



ROMÂNIA  
MINISTERUL EDUCAȚIEI NAȚIONALE  
UNIVERSITATEA „VASILE ALECSANDRI”  
DIN BACĂU



# **MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO COMO HERRAMIENTA PARA EL DESARROLLO SOSTENIBLE DE PLANES DE ACCIÓN CONTRA EL RUIDO EN ÁREAS URBANAS**

Título en rumano: MICROSIMULAREA TRAFICULUI RUTIER CA INSTRUMENT ÎN DEZVOLTAREA DE PLANURI DE ACȚIUNE DURABILE ÎMPOTRIVA ZGOMOTULUI, ÎN ZONELE URBANE.

Título en inglés: TRAFFIC MICROSIMULATION AS A TOOL IN THE DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE NOISE ACTION PLANS IN URBAN AREAS

## **TESIS DOCTORAL EN COTUTELA (RESUMEN)**

**Autora: Alina Mihaela Petrovici**

*Director de Tesis en la Universidad “Vasile Alecsandri” de Bacău, Rumania: Dr. Valentin Nedeff*

*Director de Tesis en la Universidad de Cádiz: Dr. Jose Luis Cueto Ancela*

**BACĂU 2018**

## Agradecimientos

Esta tesis doctoral, ha requerido esfuerzo y mucha dedicación por parte de la autora y sus directores de tesis, y no hubiese sido posible su finalización sin la cooperación de todas las personas que a continuación citaré y muchas de las cuales han sido un soporte muy fuerte en los momentos más difíciles.

Me gustaría dar las gracias al director, Prof. Univ. Dr. Valentin Nedeff, por el apoyo incondicional que ha brindado durante mi formación, por la forma en que me guio en la realización de este trabajo y por su confianza.

De la misma manera quiero agradecer al director de parte de la Universidad de Cádiz, el Prof. Dr. José Luis Cueto Ancela, por aceptarme para realizar esta tesis doctoral bajo su dirección, en cotutela, por su compromiso en el desarrollo de este trabajo, su confianza, y por el aporte en mi formación como investigadora.

También agradezco a la Escuela de Doctorado de la Universidad "Vasile Alecsandri" de Bacau, a los profesores del departamento del Medio Ambiente, Claudia Tomozei, Mirela Panainte-Lehadus y Emilian Mosnegutu, que me han servido como ejemplos durante el periodo de la facultad, y a mis compañeros y amigos de la misma Universidad, por el ánimo ofrecido, y especialmente a Florin Nedeff por el apoyo ofrecido durante los experimentos.

Profundo agradecimiento al personal docente del Laboratorio de Ingeniería Acústica y del Departamento Tecnologías del Medio Ambiente de la Universidad de Cádiz, al Prof. Ricardo Hernández Molina, a Prof. Juan Antonio López Ramírez, a Prof. Diego Sales y a Prof. Enrique Chover que siempre tuvieron un buen consejo para mí. A mis compañeros del laboratorio, Diego Sales Lérida, Javier Priego Ramírez por animarme siempre y especialmente a Ricardo Gey Flores por toda su ayuda tanto a mi formación en la aplicación de mapas de ruido pero también por la ayuda en el aprendizaje del español.

También tengo profundos agradecimientos para la señora Victoria Lérida García, y señora María del Mar Fernández Fernández por toda su atención, ayuda y el apoyo incondicional ofrecido a lo largo de la estancia realizada en la Universidad de Cádiz, España.

Quiero dedicar esta tesis, junto con agradecimientos profundos, a mis padres, Vasile y Adriana Petrovici y a mi hermana, Madalina Petrovici, por su cariño, comprensión y por el apoyo continuo proporcionado a lo largo de los estudios de doctorado.

Finalmente quisiera agradecer a todas y cada una de las personas que han vivido conmigo la realización de esta tesis doctoral, con sus altos y bajos y que no necesito nombrar porque tanto ellas como yo sabemos que desde lo más profundo de mi corazón les agradezco el haberme ofrecido todo el apoyo, colaboración, ánimo y sobre todo cariño y amistad.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

Capítulo	Pag.
<b>PREAMBULO</b>	4
<b>1. PROPÓSITO Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN</b>	6
1.1. Identificación del problema que suscita la investigación y sus ramificaciones metodológicas	6
1.2. Objetivos e hipótesis de trabajo	7
1.3. Objetivos secundarios	8
1.4. Temas clave	9
1.5. Referencias del capítulo 1	9
<b>2. MATERIAL UTILIZADO EN LA TESIS Y PROCEDIMIENTOS</b>	11
2.1. VISSIM y VIS-VAP. Micro-simulación de tráfico y predicción de las “MoE”	11
2.2. MATLAB como sistema de tratamiento de datos procedentes de VISSIM, cálculo de CNOSSOS e interpretación	13
2.3. Equipos de medidas ambientales de ruido y equipos complementarios	13
2.4. Procedimiento de estimación de las velocidades con la GO-PRO HERO 2	14
2.5. Procedimiento de estimación de las velocidades con Radar Stalker ATS II	16
2.6. Procedimiento para la clasificación de los autobuses urbanos de Bacau	16
2.7. Referencias del capítulo 2	17
<b>3. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS</b>	18
3.1. “Smart Mobility”	18
3.2. Algunos aspectos novedosos desarrollados durante la investigación	19
3.3. Producción científica generada por la autora y relacionada con la tesis	19
3.4. Referencias del capítulo 3	20
<b>4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	21
4.1. Planes de acción contra el ruido basados en medidas de gestión del tráfico urbano	21
4.2. Priorización del tráfico de autobuses (BSP)	22
4.3. Referencias del capítulo 4	23
<b>5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EMPLEADA</b>	26
5.1. Método de simulación dinámica de ruido de tráfico	26
5.2. Generación de escenarios en VISSIM	28
5.3. Modelo 1. Intersección aislada	30
5.4. Modelo 2. Avenida con 5 intersecciones	32
5.5. Requisitos de diseño del BSP-GPS	35
5.6. Validación del método de la simulación dinámica de ruido de tráfico en la ciudad	36

---

de Bacau	
5.7. Definición de la zona para el estudio de caso	37
5.8. Referencias del capítulo 5	38
<b>6. REFERENCIA A LOS RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	<b>39</b>
6.1. Sistema de priorización de autobuses en una intersección regulada por semáforos. Resultados	39
6.2. Sistema de priorización de autobuses en una avenida regulada por semáforos. Resultados	45
6.3. Resultados de la campaña de medidas. Ruido	61
6.4. Resultados de la campaña de medidas. Variables del tráfico	63
6.5. Resultados del método de simulación dinámica del ruido de tráfico	63
6.6. Tratamiento y análisis del ruido de Tráfico total	63
6.7. Análisis del ruido emitido por el tráfico de autobuses	67
<b>7. CONCLUSIONES MÁS SIGNIFICATIVAS</b>	<b>69</b>
7.1. Conclusiones sobre la verificación experimental de la teoría abordada	69
7.2. Conclusiones sobre la validación de la metodología empleada en la tesis	70
<b>ANEXO</b>	<b>72</b>

---

## PREAMBULO

Este resumen se ha redactado siguiendo las especificaciones del *Procedimiento para el desarrollo de las tesis doctorales en régimen de cotutela en la Universidad de Cádiz del 25 mayo de 2018 (BOUCA254)*, en su apartado undécimo, donde especifica que el resumen debe ser redactado en español y deberá contener al menos los apartados:

- Propósito y delimitación de la Investigación.
- Procedimientos.
- Criterios que justifican el estudio y fundamentación teórica.
- Metodología de investigación empleada.
- Referencia a los resultados.
- Conclusiones más significativas.

[http://escueladoctoral.uca.es/wp-content/uploads/2018/06/Instrucci%C3%B3n\\_UCA-I01VP-2018\\_25-mayo-2018\\_BOUCA254.pdf](http://escueladoctoral.uca.es/wp-content/uploads/2018/06/Instrucci%C3%B3n_UCA-I01VP-2018_25-mayo-2018_BOUCA254.pdf)

Siendo la estructura de la tesis:

1. INTRODUCCIÓN
2. EL ESTADO DE LA INVESTIGACIÓN EN EL ÁMBITO DE REDUCIR EL NIVEL DE RUIDO GENERADO POR EL TRÁFICO RODADO
3. DIRECTRICES GENERALES SOBRE INGENIERÍA DE TRÁFICO
4. MICROSIMULACIÓN DE TRÁFICO
5. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN
6. METODOLOGÍA DE TRABAJO Y EQUIPO NECESARIO
7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN
8. VALIDACIÓN DEL MODELO DE TRÁFICO DE VISSIM Y DEL MODELO DE CÁLCULO DE RUIDO DE CNOSSOS EN BACĂU
- CONCLUSIONES GENERALES

Se aprecia que no coinciden las numeraciones de los capítulos de la tesis y del resumen. Al mismo tiempo se sigue *la norma de la Universidad "Vasile Alecsandri" de Bacău* de conservar la numeración original de la tesis relativa a:

- tablas
- figuras
- ecuaciones
- imágenes
- referencias bibliográficas

Por lo que en aras de la claridad de exposición se ha estimado conveniente actuar en 2 direcciones:

1. Las tablas, figuras, ecuaciones, imágenes, etc., se nombrarán en el resumen utilizando las expresiones:
  - a. “Tabla Tesis”, “Figura Tesis”, “Ecuación Tesis”, cuando se extraigan de la Tesis sin modificaciones y usando su numeración original referida al ejemplar de Tesis Doctoral, y esto, aunque no coincida el numeral con el capítulo del resumen.
  - b. “Extracto Tabla Tesis”, “Extracto Figura Tesis”, en caso de extraer y utilizar solo una parte de una tabla o de una figura contenida en el original de la Tesis Doctoral y usando su numeración original referida al ejemplar de Tesis Doctoral.
  - c. “Tabla”, “Figura”, “Ecuación”, con una numeración ordinal simple, cuando se introduzca material nuevo.
2. En cuanto a las citas bibliográficas, y para facilitar el seguimiento del texto, se ha incluido un resumen de las referencias bibliográficas más relevantes a continuación de cada capítulo, dentro del texto del resumen traducido al español, y con numeración independiente.

## 1. PROPÓSITO Y DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Identificación del problema que suscita la investigación y sus ramificaciones metodológicas

En general, la incorporación a la legislación europea de la Directiva 2002/49/EC [1] traslada a los gobiernos europeos la responsabilidad de actuar contra el ruido ambiental. Esto significa el desarrollo, a grandes rasgos, de dos tareas complementarias: la de diagnóstico del ruido ambiental en las ciudades, generalmente, a través de los llamados Mapas Estratégicos de Ruido, y la de gestión, a través de los planes de acción contra el ruido. Los planes de acción generalmente están basados en la adopción de una serie de medidas diseñadas para la mitigación del ruido ambiental. Sabemos que la fuente principal de ruido en las ciudades, por extensión y por número de personas afectadas, es el ruido provocado por el tráfico [2]. Si nos centramos en los países de la UE (EU-28), se puede afirmar que con datos actualizados a 2018, más de 71 millones de personas están sometidas a unos niveles del indicador de ruido  $L_{den}$  superiores a 55dB (indicador de ruido a largo plazo “dia-tarde-noche” diseñado para evaluar la molestia sonora en la población, tal y como se define en la Directiva de Ruido [1]) dentro de las áreas urbanas.

Pero todo el andamiaje metodológico que se ha adoptado para solucionar el problema del ruido se ha desarrollado bajo la influencia del concepto: “estratégico”, lo que implica evaluaciones de dosis de ruido a largo plazo y ciertas carencias y simplificaciones a nivel espacial [3]. Pero no todos los problemas acústicos se generan, se detectan y se deben solucionar a nivel “macro”. Por todo ello, la investigación llevada a cabo comienza con la adopción de una serie de requisitos metodológicos.

El diseño metodológico debería permitir:

1. Mejorar la detección de los puntos calientes de ruido a nivel micro. La noción de “Micro” lleva aparejada la incorporación o creación de herramientas que garanticen la suficiente resolución, tanto temporal como espacial. Temporalmente, porque es bien sabido que el impacto sobre la calidad de vida y sobre la salud ambiental del ruido ambiental en las ciudades se puede medir [4] y evaluar con criterios de dosis, pero también con indicadores que reflejan el impacto sobre la salud humana y la molestia de eventos sonoros. Dicho con otras palabras, mucha energía concentrada en periodos de corta duración y que deben ser medidos usando indicadores “ad-hoc” como “LAFmax”, o en series temporales de “LAeq” de corta duración (por ejemplo muestreados por segundo o cada decima de segundo). Asimismo la exigencia de una resolución espacial, es necesaria ante la evidencia de variaciones en los niveles y características del ruido emitido en distintos puntos de la red de urbana de avenidas y calles [5].
2. Ser capaces de testear cualquier propuesta de medida de mitigación del ruido urbano basada en la gestión del tráfico. Esta capacidad de análisis de las propuestas de planes de acción se resume en la posibilidad de realizar una evaluación multicriterio.
  - Criterio 1 “movilidad”. Evaluación de efectos secundarios negativos (o positivos) sobre la movilidad en la ciudad.

- Criterio 2 “eficacia acústica”. Evaluación de la eficacia acústica de las medidas propuestas contra el ruido. Esta herramienta de evaluación de criterio, debe ser suficientemente flexible para incluir la evaluación individualizada por tipos de vehículos y precisa espacial y temporalmente.
- Criterio 3 “emisiones a la atmósfera”. La posibilidad de analizar otros factores de sostenibilidad urbana. Por ejemplo la eficiencia energética contabilizada en relación al consumo de carburante y emisiones a la atmósfera.
- Criterio 4 “sinergias”. Capacidad de analizar las sinergias con otras medidas de tráfico.

Ni que decir tiene que estos criterios pueden formar parte de la entrada de un sistema de toma de decisiones, para el diseño, o en su caso selección, del mejor plan de acción. Esta tesis no va a profundizar en los temas relacionados con la toma de decisiones. También se va a dejar al margen los criterios 3 y 4; dando prioridad a los otros dos.

## **1.2. Objetivos e hipótesis de trabajo**

El objetivo general que motiva esta investigación podría plantearse en los siguientes términos:

**Desarrollar y elaborar estrategias ambientalmente sostenibles para el diseño de sistemas inteligentes de control de la señalización semafórica en las intersecciones en las que el transporte público interacciona con el resto de modos de transporte.**

En la práctica operativa se delimita el alcance dirigiendo el foco de atención hacia dos objetivos que son específicos, mensurables y alcanzables, anuncian la posibilidad de obtener resultados concretos.

1. Describir y analizar el impacto que sobre el ruido urbano tiene la priorización del tráfico de autobuses. Diseñar y testear una solución, que basada en la gestión inteligente del tráfico, consiga gestionar los semáforos de una avenida primando una circulación fluida de los autobuses urbanos y al mismo tiempo logrando rebajar el ruido generado.



*Imagen 1.1. Vehículo de alta capacidad en España. (Fuente: <https://ecomovilidad.net>)*



2. El segundo objetivo principal es analizar la validez y la aplicabilidad del método de trabajo propuesto a la ciudad de Bacau (Rumanía) con vista a la examinar la viabilidad de implantación de algunos de los resultados en dicha ciudad. El análisis de la validez del método es oportuno cuando se sospecha que la edad promedio de los autobuses de esta ciudad puede influir en la bondad del método de simulación dinámica del ruido propuesto.



*Imagen 1.2. Autobuses con más de 15 años esperando en los semáforos de la avenida Mărășești en la Ciudad rumana de Bacau.*

Este segundo objetivo se sustenta en una serie de hipótesis:

- Hipótesis 1. Una vez calibrado el modelo de tráfico en la ciudad de Bacau, las medidas de ruido ambiental (LAeq) del tráfico total que pasa por la avenida de prueba en la ciudad y los datos de ruido (LAeq) generados con el método de simulación dinámica de ruido de tráfico desarrollado en el apartado metodológico de esta tesis para esa misma avenida, son estadísticamente iguales.
- Hipótesis 2. Una vez calibrado el modelo de tráfico para la circulación de autobuses que pasan por la avenida de prueba en la ciudad; las medidas de ruido ambiental (LAm<sub>ax</sub>) de cada paso de autobuses y los datos de ruido (LAm<sub>ax</sub>) generados con el método de simulación dinámica de ruido de tráfico desarrollado en el apartado metodológico de esta tesis de las pasadas de los autobuses, son estadísticamente diferentes.

### **1.3. Objetivos secundarios**

Con objeto de delimitar el estudio, los objetivos principales se dividen en una serie de objetivos secundarios.

- Estudiar la promoción del uso del transporte público de autobuses, desde la perspectiva de los planes de acción contra el ruido ambiental en las ciudades.
- Analizar las posibilidades de uso de los modelos de simulación de tráfico para el análisis del ruido urbano siguiendo los requisitos metodológicos propuestos en el apartado anterior.
- Estudiar y diseñar un sistema de control de tráfico que pueda gestionar la priorización del transporte público:
  - En un cruce controlado por semáforos.
  - En una avenida o corredor de la ciudad coordinada por un sistema de control semafórico.
- Analizar los efectos del uso de soluciones “Smart” para la promoción del uso del servicio de autobuses públicos.

- Analizar las causas del ruido ambiental generado a nivel “micro” (espacial y temporalmente).
- Analizar la emisión de los autobuses y de los vehículos ligeros por separado.
- Analizar la emisión sonora del ruido de rodadura y de motor por separado.
- Analizar los efectos sobre el tráfico y la movilidad de vehículos y pasajeros.
- Estudiar si hay alternativas al uso del carril bus segregado.
- Garantizar la viabilidad tecnológica de las propuestas.

#### **1.4. Temas clave**

El acercamiento holístico necesario para abordar el objeto de investigación implica manejar un número considerable de conceptos, que resumidos en las siguientes palabras clave:

##### **TRÁFICO, MOVILIDAD Y SOSTENIBILIDAD URBANA**

- Modelos de micro simulación de tráfico [5]. Trabajar a un nivel de resolución espacial y temporal micro implica una descripción precisa de la emisión de ruido, comenzando por la caracterización del comportamiento dinámico de cada “clase” de vehículo, es decir al ralentí, en aceleración, en desaceleración, y en régimen de velocidad constante de cruce.
- BSP [6] o Priorización del paso de autobuses a través de avenidas controladas por sistemas de semáforos. Aquí se circunscriben los algoritmos en los que se va a basar el control y que pueden ser programados en los modelos de simulación de tráfico.
- ITS [7] o Sistemas de Transporte Inteligente. El sustrato de hardware que permite establecer la viabilidad de llevar a cabo las medidas propuestas en la ciudad.
- Promoción del transporte público. Dificultades, posibilidades de mejoras, sinergias. Consecuencias sobre la movilidad y el medio ambiente y sobre el ruido ambiental.

##### **TRÁFICO y RUIDO URBANO**

- CNOSSOS [8] [9] [10], Todos los modelos de predicción del ruido ambiental provocado por el tráfico están divididos en 2 modelos bien diferenciados: Un modelo de emisión y un modelo de propagación. Nuestra preocupación está en los límites en los que el ruido emitido por ciertos vehículos no puede ser calculados con fiabilidad.
- Acústica ambiental y planes de acción contra el ruido basados en la gestión del tráfico urbano. Promoción del transporte público

#### **1.5. Referencias del capítulo 1**

- [1] Directiva 2002/49/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 25 de junio de 2002, sobre evaluación y gestión del ruido ambiental.
- [2] European Environment Agency. Population exposure to environmental noise. Indicator Assessment. Prod-ID: IND-233-en. Also known as TERM 005, CSI 051. 19 Jul 2018
- [3]. 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).
- [4] WHO. World Health Organization Europe. Night noise guidelines for Europe; 2009

- [5] De Coensel B., Can A., Degraeuwe B., De Vlieger I., Botteldooren D., Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions, *Environmental Modelling & Software*, 1-10, 2012;
- [6]. 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>
- [7] I. Wilmink: The role of ITS in noise mapping and noise action plans. Fifth European Congress and Exhibition on ITS, Hanover. 2005.
- [8]. HARMONOISE (2004), HAR11TR-020614-SP09v4, Source modelling of road vehicles, 04-03-2004.
- [9]. IMAGINE. The Noise Emission Model For European Road Traffic IMA55TR-060821-MP10 P10 (2007). <http://www.imagine-project.org/>
- [10]. 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>

## 2. MATERIAL UTILIZADO EN LA TESIS Y PROCEDIMIENTOS

### 2.1. VISSIM y VIS-VAP. Micro-simulación de tráfico y predicción de las “MoE”

VISSIM es un modelo de micro simulación de tráfico que permite la simulación, análisis y evaluación del rendimiento de las redes de tráfico y también la prueba de los sistemas de control de la priorización (condicional e incondicional) del transporte público. VISSIM es multimodal, así que se pueden añadir tranvías, hacer diferenciaciones entre autobuses urbanos e interurbanos, se pueden incluir peatones, bicicletas, taxis, etc. Obviamente, existe una gran ventaja en la confirmación de las consecuencias de distintos cambios en el flujo de tráfico y los sistemas de control semafórico por simulaciones en vez de ensayos de campo reales.

Se usa VISSIM, no sólo porque es una herramienta de valor comprobado para crear y analizar cualquier tipo de control de señal de tráfico, sino porque incluye un módulo de lenguaje de programación llamado VAP (“Vehicle Actuated Program”) [1] [2]. VAP abre la posibilidad de construir desde el principio diferentes tipos de estrategias de control adaptadas y accionadas por cualquier tipo o tipos de vehículos. Finalmente, VISSIM ejecuta la lógica de control de tráfico personalizado que opera en la red durante simulaciones y pruebas.

VAP guarda ciertos parecidos con FORTRAN y su núcleo de la programación se basa principalmente en tres comandos: los bucles condicionales “If-then-else-end”, el comando de salto “goto” y la asignación de valores a las variables “:=”. Las respuestas BSP dependen de la lógica programada y de la información provista por los detectores. Los detectores de VISSIM pueden suministrar información directa sobre una variedad de parámetros como la presencia del vehículo, la velocidad del vehículo, el tipo de vehículo, la ocupación, etc. y servir como datos proxy para estimar otra información. El tipo de detección incluido en el modelo VISSIM se establece en la metodología. La priorización del tráfico de autobuses debe ser diseñada en VAP para proporcionar señales “GO” para que los tranvías y autobuses funcionen.

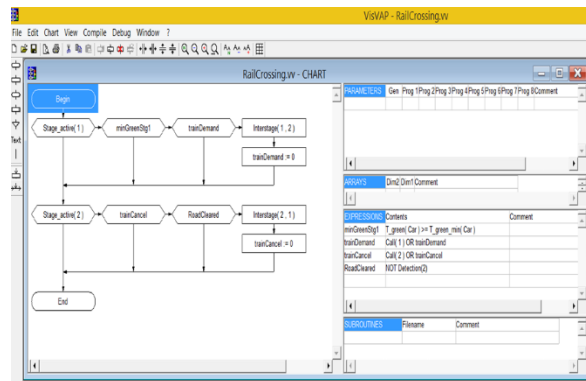


Figura tesis 6.2. Imagen de ejemplo de priorización de tranvías en intersecciones mostrado en una ventana de programación en VIS-VAP. Este es el interface que permite programar en VAP mediante estructuras lógicas más sencillas de entender.

VISSIM. Ofrece, entre otras, informaciones de salida una matriz de datos relativa a: Tipo de vehículo, posición del vehículo en red, velocidad, aceleración y tiempo de simulación. Así que segundo a segundo y metro a metro podemos extraer donde están los autobuses, motocicletas y los coches y que velocidad y aceleración tienen.

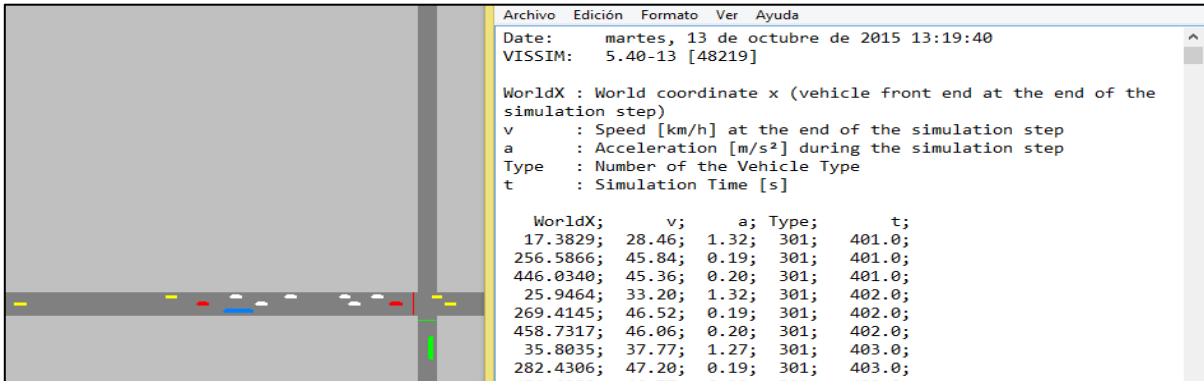


Figura tesis 6.8. Captura VISSIM con datos de salida procedentes de simulaciones. Se puede apreciar que el primer vehículo de la lista es un autobús “type”=301; está en la posición “WordX”=17.3829 m, en el tiempo de simulación “t”=401 s., circula con una velocidad “v”=28.46 Km/h mientras acelera “a”=1.32 m/s<sup>2</sup>

También como salida del modelo VISSIM ofrece las llamadas Medidas de Efectividad en tráfico (cuyo acrónimo inglés es MoE), referidas a variables de movilidad y otros parámetros medioambientales, que VISSIM calcula directamente.

Sintetizando, la mejor o peor aproximación de las simulaciones de tráfico a la realidad va a depender en gran medida de algunas cuestiones clave [3]:

- Una descripción técnica de cada clase de vehículo que participe en el flujo de tráfico (modos contemplados: coche, autobús, tranvía, motocicletas y peatones).
- Un modelo creíble de acciones e interacciones entre los vehículos que incluyan el estado de reposo (ralentí), aceleraciones, desaceleraciones y la velocidad de crucero. Para llevar a cabo esta simulación, cada vehículo se modela de forma individual y su posición, la aceleración y la velocidad se actualiza utilizando modelos de comportamiento que definen los tiempos de reacción, la distancia mínima para el vehículo de delante y los cambios de carril de cada conductor. VISSIM puede ofrecer incluso una simulación realista del comportamiento de las motocicletas que avanzan zigzagueando entre los vehículos detenidos en los semáforos en rojo, hasta alcanzar la posición de cabeza. Aun así, la simulación de este tipo de tráfico es muy difícil de lograr debido a la consideración de movimientos laterales del vehículo en el mismo carril
- Una descripción detallada de la red en cuanto a la posición de las señales de tráfico y reglas establecidas. Por ejemplo, mediante un establecimiento de zonas de conflicto entre vehículos y de las normas de prioridad en los cruces sin señalización.

- Un diseño correcto desde el punto de vista geográfico (UTMx y UTM<sub>y</sub>) para la construcción de la red en la que se necesita geometría precisa de la vía que describa su dimensión, número de carriles, y la curvatura de calles y rotondas.
- Volumen del tráfico y la composición de la flota en cada enlace y nodo de la red. La disponibilidad de información de tráfico como planes de movilidad, encuestas, etc. Por ejemplo las matrices Origen-Destino se pueden utilizar para caracterizar las decisiones sobre la ruta.
- Los datos de calibración (conteos de tráfico distinguiendo cada modo, la velocidad, la longitud de las colas en semáforos, etc.)

**2.2. MATLAB como sistema de tratamiento de datos procedentes de VISSIM, cálculo de CNOSSOS e interpretación**


Se ha creado en MATLAB todo un abanico de scripts, que aseguran la funcionalidad, la flexibilidad y la interpretabilidad del método dinámico de simulación de ruido de tráfico que se presenta en el capítulo 5.1., de este resumen. Estas herramientas calculan la potencia de ruido emitido por la avenida por unidad de espacio y por unidad de tiempo. Desde un solo automóvil a una flota.”. También, y dependiendo de las necesidades, se han escrito variaciones sobre el programa principal para describir el ruido total a largo plazo (dosis) y otras que detectan y describen eventos de ruido mediante (L<sub>Amax</sub>). Así mismo la potencia de emisión se puede descomponer según la naturaleza de la fuente: interacción neumático/superficie de rodadura (ruido de rodadura) o el ruido procedente del sistema de motor y exhaustación de gases (ruido motor). Finalmente se ha creado un pequeño script con el que se puede aplicar el modelo de propagación ISO-9613-2 para así calcular los niveles de ruido en algunos receptores que llamamos “sonómetros virtuales”.

**2.3. Equipos de medidas ambientales de ruido y equipos complementarios**

Se entiende por equipo de medida complementario aquel que tiene por objeto garantizar la repetitividad y reproducibilidad de los ensayos de ruido ambiental procedente del tráfico.




Descripción del sonómetro:

*Tabla 2.1. Instrumentos utilizados para la realización de los ensayos de ruido.*

Función	Marca y modelo	Imagen
Medida y registro del ruido ambiental	Brüel and Kjaer 2270 con trípode y protector anti viento. Calibrador de la misma marca.	

Los equipos complementarios empleados son:

*Tabla 2.2. Instrumentos utilizados para la recopilación de la información del tráfico en tiempo real y otras variables*

Función	Marca y modelo	Imagen
Medida de la velocidad y aceleración mediante el uso de radar	Radar Stalker ATS II	
Trazabilidad del ensayo de ruido ambiental mediante Audio y video sincronizado con las medidas acústicas. Número de vehículos. Categoría de vehículos. Comportamiento de los conductores. Velocidad y aceleración mediante el uso de imágenes.	GoPro HERO 2. Con trípode.	
Medida de condiciones ambientales relativas a la velocidad del viento que influye en el micrófono y la temperatura. La dirección del viento se obtiene por registros obtenidos de las estaciones meteorológicas más cercanas	Testo 425	

#### **2.4. Procedimiento de estimación de las velocidades con la GO-PRO HERO 2**

Se han puesto una serie de marcas en la vía separadas 1 m entre ellas. Estas marcas se cuentan desde la línea del semáforo que coincide con la marcas de detención en la vía. Se ha notado que los conductores realizan el “stop” unos metros aguas arriba, seguramente para tener una visión mejor de las luces del semáforo. Estas marcas las tenemos 15 m aguas arriba y otros 15 metros aguas abajo. Suficientes para el propósito del ensayo. Estas se pueden apreciar en la imagen tesis 8.22.



*Imagen tesis 8.22. Circulación por el carril 1 de un vehículo.*

Siendo una cámara con lente de gran angular (170 grados) la imagen esta distorsionada y el número de pixeles no representa, ni mucho menos el número de metros de una manera constante

a lo largo del eje de la calle (que aparece curvado). Las marcas están separadas 1 metro, pero el número de píxeles varía según la distancia al eje de visión de la cámara. También existe una distorsión en la profundidad que hace que los 30 metros de visión sobre la acera con las marcas proyectadas sobre la otra acera sean mucho más grande. Estas marcas las estamos usando de referencia para estimar la velocidad instantánea de los vehículos que circulan por el carril más próximo (carril 1).

Afortunadamente la medida de velocidad promedio se realiza con la imagen de video de una manera mucho más simple, marcando la imagen con dos líneas transversales en la vía, fáciles de identificar. La primera marca (Imagen tesis 8.23) es una línea imaginaria perpendicular al eje de la vía, que cruza la carretera de lado a lado. Cuando las ruedas delanteras del coche azul “pisan” la línea, el vehículo comienza a recorrer un trazado del que conocemos su distancia (Imágenes tesis 8.23 y 8.24).



*Imagen tesis 8.23. Vehículo en el momento de atravesar la línea de referencia 1 (izquierda) en su circulación por el carril 2.*

Al cabo de un tiempo, el mismo vehículo pisa la segunda marca, que es el comienzo del paso de peatones (Imagen tesis 8.24). Ambas marcas están separadas 12,5 metros (medido con distanciómetro laser en ambas aceras)



*Imagen tesis 8.24. Vehículo en el momento de atravesar la línea de referencia 2 (el paso de peatones) en su circulación por el carril 2.*

Sabiendo que la distancia es de 12,5 metros y que la cámara graba a 30pfs, averiguar la velocidad de paso es obvio. Contando el número de “frames” que hay entre la imagen tesis 8.23 y la imagen tesis 8.24, se tendrá una estimación razonablemente buena del tiempo que ha pasado entre ambas situaciones y por tanto será buen estimador de la velocidad promedio de cada vehículo. Es



un trabajo tedioso al no contar con un software de análisis de imagen, pero es muy sencillo de llevar a cabo.

### **2.5. Procedimiento de estimación de las velocidades con Radar Stalker ATS II**

Además se realizan ensayos con pistola radar simultáneamente sobre la velocidad de los autobuses. Esto permite la autovalidación y el contraste de resultados por dos métodos alternativos. Para medir la velocidad de los autobuses que pasan durante la medida de ruido, se ha instalado una cámara Canon al lado de la pistola radar, por varias razones. Para relacionar el tiempo del paso del autobús, conociendo la hora del sonómetro, la hora de la cámara GoPro y la hora de la cámara Canon, ya que el RADAR no tiene identificación del tiempo. En segundo lugar para identificar unívocamente el autobús. Y en último lugar, pero no menos importante, para identificar las interferencias que pueden crear otros vehículos sobre la medida y eliminarlas.

### **2.6. Procedimiento para la clasificación de los autobuses urbanos de Bacau**

Se introduce un ejemplo de clasificación para uno de los autobuses Mercedes Conecto, con los que cuenta la flota municipal de autobuses públicos de la ciudad de Bacau. La información recopilada se incluye en una ficha. Cada ficha incluye:

- Datos de velocidades promedio e instantánea, estimadas a partir de los dos métodos usados, como los mostrados en la figura 2.1.

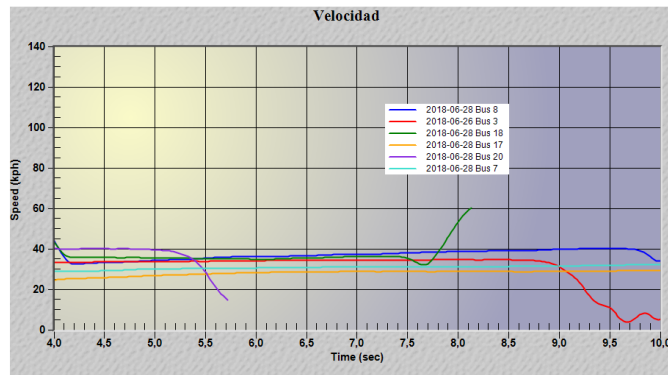


Figura 2.1. Representación gráfica de las velocidades de los autobuses Mercedes Conecto identificados durante la medida de ruido y cuyo velocidad se ha medido con la pistola RADAR.

- Datos de ruido medido con el sonómetro (tabla tesis 8.25). Únicamente se adjuntan los datos donde se garantiza que el ruido medido por el sonómetro es el ruido procedente directamente del paso ante el micrófono del autobús, sin interferencias.

Tabla tesis 8.25. Datos de la estimación de velocidad de los autobuses (método medida de cámara) y de ruido máximo emitido durante el passing-by

I.D. Autobús	Estimación Velocidad con GOPRO Hero 2	Hora sonómetro		L <sub>Aeq</sub> dB	L <sub>Ceq</sub> dB	LAF <sub>max</sub> dB
BUS 3	29 km/h	12:13:01	12:13:02	68,5	87,8	69,8
		12:13:02	12:13:03	72,6	92,8	73,8
		12:13:03	12:13:04	73,7	90,5	74,3
		12:13:04	12:13:05	70,3	88,7	72,9

Espectro de frecuencias	<p>Estimado con los 4 s de paso del autobús. Se advierte que en 50 Hz hay un tono que alcanza los 90,4 dB</p>	

## 2.7. Referencias del capítulo 2

- [1] PTV AG. VAP 2.16 Interface. User Manual, 2007.
- [2] H. Zhang, X. Liang, K. Xu, VISSIM Network Simulation under Actuated Signal Control. Journal of Computational Information Systems 10: 4 (2014) 1573–1580.
- [3] 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

### 3. JUSTIFICACIÓN DE LA TESIS

#### 3.1. “Smart Mobility”

De acuerdo con el pronóstico demográfico en el horizonte de 2030, la población urbana superará la cifra de 5 mil millones de personas, que es el 60% de la población mundial. Los múltiples desafíos que las ciudades deberán afrontar durante los próximos años, se tiene la esperanza de ser afrontados mediante soluciones basadas en el uso de las TIC (tecnología de la información y la comunicación). Sin embargo, las TIC no son la inteligencia de la ciudad, son solo la capa física donde diseñar e implementar las aplicaciones inteligentes.

Uno de estos desafíos es el transporte, ya que el desarrollo económico sostenible de las nuevas ciudades depende en gran medida de cuanto de eficiente pueda ser el transporte de personas y bienes. El crecimiento de las ciudades y el subsiguiente incremento de la demanda de transporte amenazan la movilidad de las ciudades en su concepción actual causando impactos negativos [1] tales como: congestión, dificultades de estacionamiento, dificultades para la movilidad del transporte no motorizado (peatones y bicicletas), aumento de los accidentes, aumento del consumo de energía y también impactos ambientales, incluido el aumento de los niveles de ruido urbano. Desde el punto de vista de los planes de acción contra el ruido, cuando se actúa directamente sobre la fuente se considera que la solución adoptada es óptima, ya que la reducción sonora está enfocada sobre la emisión y no sobre la propagación, por tanto los beneficios se extienden sobre todo el territorio.

Algunas cifras económicas pueden guiarnos en la estimación de la magnitud actual del problema y su evolución. Por ejemplo, el costo de la congestión del tráfico por año es enorme. En la UE se ha estimado que para 2050, el costo será cercano a € 200 mil millones [2]. Sin embargo, este enfoque no estaría completo sin incluir los costos de los posibles impactos sobre la salud pública ambiental debido al crecimiento del tráfico. Los costes anuales del ruido del tráfico en la UE 22 se han estimado en 36 000 millones de euros [3], mientras que los costes externos debidos al ruido aumentan año tras año, y solo los contaminantes atmosféricos disminuirían en un 60% para 2050 [2].

La Agencia Medioambiental Europea (EEA) pone de manifiesto de manera reiterada en sus informes anuales que la relación de las ciudades con los vehículos privados debe cambiar [3] [4]. Los nuevos paradigmas de ciudad incluyen que los vecinos, los peatones y las bicicletas deben ganar espacio público y que la movilidad debe estar sustentada en una serie de alternativas al coche. No se trata de prohibir el uso del coche, sino de explorar nuevos caminos en una movilidad diferente, dejando el uso del vehículo privado para aquellos casos en que su uso es razonable. La alternativa al vehículo privado como primera opción de transporte es un conglomerado de alternativas y políticas, que podíamos calificarlas como “the carrot and the stick”. Por ejemplo: promocionar el uso de la bicicleta, alentar la compra de vehículos eléctricos, promocionar el uso

de plataformas de movilidad (“mobility as a service”) que promueven la posibilidad de que usemos en cada momento los medios más acordes a la naturaleza de nuestro desplazamiento.

Algunas de estas medidas son extraordinariamente nuevas, pero si hay una que siempre está ahí sin importar el paso del tiempo es “la promoción del transporte público”. Es por ello que esta Tesis Doctoral gira en torno a la exploración de ideas y posibilidades ofrecidas dentro de un marco de movilidad inteligente para impulsar el transporte público y mejorar con ello el ruido ambiental. La promoción del transporte público se repite como un mantra en los informes y guías de mejores prácticas para los tomadores de decisiones como fórmula maestra que resuelve o mejora muchos problemas relacionados con el tráfico en la ciudad (por ejemplo, ruido [4] [5] y congestión del tráfico [6] [7]). Sin embargo, el crecimiento en la demanda de cualquier servicio de autobús tiene un techo que aparece cuando es difícil conciliar el servicio de autobús con las necesidades y expectativas de los usuarios potenciales. En esta tesis aborda el reto de la reducción del ruido de tráfico bajo el paradigma de Movilidad Inteligente, entendiendo como tal, el conjunto de respuestas basadas en la tecnología que intentan resolver estos problemas de manera holística y eficiente.

### **3.2. Algunos aspectos novedosos desarrollados durante la investigación**

- No se había estudiado anteriormente el control de la prioridad del transporte público (autobuses) en intersecciones que regula las dos direcciones a lo largo de una avenida desde un punto de vista de emisiones en acústica ambiental.
- No se había estudiado anteriormente la capacidad de CNOSSOS para predecir las emisiones de ruido de autobuses de muy diversa edad en condiciones de tráfico real en Rumanía.
- No se había estudiado anteriormente la influencia del comportamiento dinámico de cada “clase” de vehículo en VISSIM, sobre la capacidad de predicción del método dinámico de predicción sonora VISSIM-CNOSSOS.

### **3.3. Producción científica generada por la autora y relacionada con la tesis**

#### Artículos JCR

- Cueto J.L., **Petrovici A.M.**, Hernández R., Fernández F., Analysis of the Impact of Bus Signal Priority on Urban Noise, Acta Acustica United With Acustica, Vol. 103 (2017) 561 – 573
- **Petrovici A.M.**, Cueto J.L., Gey R., Nedeff F., Hernandez R., Tomozei C., Mosnegutu E., Optimization Of Some Alternatives To Noise Barriers As Noise Mitigation Measures on Major Roads in Europe. Case Study of a Highway in Spain, Environmental Engineering and Management Journal, 15, Nr.7 pp.1617-1628. 2016

#### Artículos BDI

- **Alina Petrovici**, Claudia Tomozei, Ricardo Gey Flores, Florin Nedeff, Oana Irimia, „Noise prediction, calculation and mapping using specialized software”, Journal of Engineering Studies and Research, 2015, V 21, No 3, pages: 59-64, ISSN 2068-7559;

- **Alina Petrovici**, Claudia Tomozei, Florin Nedeff, Oana Irimia, Mirela Panainte Lehadus, „Review On The Road Traffic Noise Assessment”, Revista: Journal of Engineering Studies and Research, Number 1, Volume XXII, 2016, ISSN 2068-7559;

Trabajos presentados en congresos:

- **Alina Mihaela Petrovici**, Valentin Nedeff, José Luis Cueto Ancela, Enrique Nava Baro, “Contributions To Noise Prediction Methods Of Bus Fleet In Urban Areas”, OPROTEH 2018, 27-28 Iunie, Bacău, România (book of abstracts);

- **Alina Petrovici**, Jose Luis Cueto, Valentin Nedeff, Claudia Tomozei, „The impact of the BSP strategies on air and noise emissions in urban areas”, OPROTEH - 2-4 Junio 2016, Universitatea “Vasile Alecsandri” din Bacău, România – poster presentation;

- **Petrovici A.M.**, Cueto J.L., Hernandez R., Nedeff V., Smart mobility strategies based on bus signal priority for noise reduction, Congress publication, EUROREGIO/TECNIACUSTICA'16, Oporto, Portugal. Junio, 2016.

- **Petrovici A.M.**, Cueto Ancela J.L., Hernandez Molina R., Sales Marquez D., Sales Lerida D., Effects upon urban noise of the prioritization of buses at intersections, Congreso TECNIACUSTICA 2015 Valencia;

- Gey Flores Ricardo, Cueto Ancela José Luis, Hernández Molina Ricardo, **Alina Petrovici**, “Presentación de resultados de la 2ª fase de los mapas estratégicos de ruido de la red de carreteras de Andalucía”, TECNIACUSTICA 2015, Valencia, Spania, 21-23 Octombrie 2015;

- **Alina Mihaela Petrovici**, Jose Luis Cueto, Ricardo Gey, Florin Nedeff, Ricardo Hernandez, Claudia Tomozei, Emilian Mosnegutu, „Optimization of some alternatives to noise barriers as noise mitigation measures on major Roads In Europe. Case Study Of A Highway In Spain”, OPROTEH - 4-6 Iunie 2015, Universitatea “Vasile Alecsandri” din Bacău, România;

- Tomozei Claudia, **Petrovici Alina**, Nedeff Florin, Irimia Oana, Panainte Mirela, „Evaluation of noise level generated by the road traffic on bridges in urban areas”, OPROTEH - 4-6 Iunie 2015, Universitatea “Vasile Alecsandri” din Bacău, România - poster;

- **Alina Petrovici** (Conțu), Claudia Tomozei, Florin Nedeff, Mirela Panainte, „General aspects concerning the assessment of the urban road traffic noise”, ICNAR - 4-7 Iunie 2014, Universitatea “Vasile Alecsandri” din Bacău, România.

### **3.4. Referencias del capítulo 3**

- [1] J. P. Rodriguez: The Geography of Transport Systems. Routledge. Taylor & Francis Third Edition. New York, 2013.
- [2] European Commission: WHITE PAPER - Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. <http://ec.europa.eu/transport/themes/strategies/>, Brussels, 2011.
- [3] European Environment Agency: Noise in Europe EEA Report No 10/2014. Denmark <http://www.eea.europa.eu/>, 2014.
- [4] European Environment Agency: A closer look at urban transport. TERM 2013: transport indicators tracking progress towards environmental targets in Europe). Report 11/2013 Denmark. <http://www.eea.europa.eu/>, 2013.
- [5] QCITY. Quiet City. Deliverable 6.2 – part 1: Consolidation - Action Plans – Dissemination. Part 1 - General measures for noise mitigation Transport. <http://www.qcity.org/>, 2007.
- [6] Transportation for America. Smart Mobility for a 21st Century America: Strategies for Maximizing Technology to Minimize Congestion, Reduce Emissions, and Increase Efficiency A White Paper by Transportation for America, ITS America, the Association for Commuter Transportation and the University of Michigan’s SMART Initiative, 2010.
- [7] International Transport Forum. Funding Urban Public Transport: Case Study Compendium. <http://www.internationaltransportforum.org/>, 2013/.

## 4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 4.1. Planes de acción contra el ruido basados en medidas de gestión del tráfico urbano

Es bien sabido que las emisiones totales de ruido del tráfico en las infraestructuras viales de las ciudades están relacionados con ciertas variables del tráfico. Así los planes de acción basados en gestión del tráfico urbano (tabla. 4.1):

*Tabla 4.1. Resumen de medidas de mitigación del ruido basadas en gestión de tráfico, con algunos ejemplos.*

Impacto sobre el ruido	Medidas de gestión del tráfico. Ejemplos de aplicación
Reducir el volumen de vehículos por hora (demanda).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Construcción de nuevas carreteras para redistribuir y canalizar el tráfico en la ciudad.</li> <li>- Medidas de enrutamiento de tráfico inteligente basadas en paneles de señalización e información del tráfico</li> <li>- Restringir la entrada de vehículos privados en el centro de las ciudades (peatonalización del centro) y a la vez complementar dicha medida con la creación de aparcamientos disuasorios en las afueras, con un buen servicio de autobuses.</li> <li>- Promoción del uso del transporte público y no motorizado, dedicando parte de la vía al servicio público de transporte (Carril-Bus) y bicicletas (carril-bici).</li> </ul>
Cambiar la composición de la flota, disminuyendo el porcentaje de vehículos ruidosos (por ejemplo actuando sobre la circulación de camiones pesados, motocicletas de gran cilindrada, etc.) y aumentando el porcentaje de los silenciosos (tranvías, vehículos eléctricos, híbridos, con pila de gas, etc.).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Medidas de enrutamiento de tráfico inteligente basadas en paneles de señalización e información del tráfico</li> <li>- Q-zonas. Zonas habilitadas en el centro de la ciudad para que puedan circular vehículos silenciosos.</li> <li>- Renovación de la flota de autobuses.</li> </ul>
Calmar el tráfico, incidiendo sobre los patrones de conducción en dos vertientes: - Velocidad de los vehículos - Los niveles de aceleración / deceleración).	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ondas verdes</li> <li>- Áreas con velocidad límite de 30 Km/h</li> <li>- Controles de velocidad con radar.</li> <li>- Badenes, resaltos en la calzada y bandas sonoras de alerta.</li> </ul>
Introducir cualquiera de las medidas anteriores de gestión del tráfico en momentos puntuales. Un ejemplo claro es introducirlas durante el periodo de descanso nocturno.	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Restricciones nocturnas para la circulación de vehículos pesados en ciertas áreas residenciales de la ciudad.</li> <li>- Medidas de enrutamiento de tráfico inteligente basadas en paneles de señalización e información del tráfico</li> </ul>

Existe una amplia colección de proyectos, estudios y referencias científicas europeas sobre resultados y experiencias en cómo se reduce el ruido del tráfico mediante la gestión del tráfico (por ejemplo, [1] [2] [3] [4] [5]). Usar métricas de evaluación de la molestia del ruido que tienen en cuenta los eventos ruidosos también tiene sus consecuencias en el diseño y orientación de los planes de acción. Referidos al tráfico urbano se han publicado numerosos trabajos [6] [7] [8] [9] [10] que vinculan el número e intensidad de estos eventos ruidosos con las zonas en las infraestructuras donde se detectan gran número de aceleraciones y deceleraciones

#### **4.2. Priorización del tráfico de autobuses (BSP)**

Volviendo sobre las medidas para promocionar el uso del servicio público de autobuses, lo cierto es que no todas tienen un impacto directo en el ruido urbano. Como se aprecia en la tabla, la mayoría de ellas apuesta por una combinación de medidas de promoción del uso del autobús y de coerción del uso del coche. Como resultado directo se busca la reducción del volumen de tráfico. Buscando la reducción de las emisiones se han considerado la instalación de sistemas de ayuda a la conducción ecológica para autobuses [10]. Esto afecta a la velocidad, pero sobre todo, a una progresión más suave en las aceleraciones y deceleraciones. Hay más ejemplos, ya que las alternativas para la mejora del ruido actuando sobre el transporte público son variadas, pero la línea de trabajo que aparece como una de las más prometedoras es la que explora lo que se ha dado en llamar “movilidad inteligente”. Más concretamente el interés de este trabajo se centra en la gestión y priorización del tráfico de autobuses (BSP). La pregunta que inicia la investigación es la siguiente:

¿Es posible que ciertos sistemas de priorización del flujo de autobuses aplicables a las avenidas de nuestras ciudades reúna un conjunto de ventajas que lo hagan atractivo desde los puntos de vista ambientales, de movilidad urbana y de gestión del espacio público?

No en vano, varias de las Medidas de Efectividad en tráfico (cuyo acrónimo inglés es MOE), están por lo general relacionados con ciertos requisitos ambientales, riesgo de accidente y movilidad urbana, entre otras. Así pues, un punto de vista integral que tiene en cuenta la interacción entre el control semafórico y las emisiones de contaminantes a la atmósfera, es imprescindible, y se ha recogido en obras anteriores, por ejemplo [12] [13] [14] [15] [16]. También se han abordado trabajos de optimización de la sincronización de los semáforos en avenidas buscando la fluidez del movimiento de vehículos en pelotones conocida como ondas verdes [17] [18] [19]. Se cree que la creación de ondas verdes asegura que el flujo de vehículos circule en un flujo tranquilo y fluido sin cambios repentinos en el comportamiento y con una velocidad lo más constante posible. Algunos estudios han avanzado en la línea antes reseñada del análisis de las emisiones gases, partículas, y de ruido provocadas por el tráfico en las proximidades de las intersecciones. Por lo tanto, se han ensayado y analizado cruces con distintos diseños, con distintas normas de prioridad, con o sin semáforos [20] [21] [22] [23] [24]. Y finalmente, y para completar la visión del tema, también existen una serie de estudios muy enfocados al ruido ambiental, que analizan el compromiso entre ruido y movilidad [13] [25] [26] [27] [28] [29] [30].

En todos estos trabajos donde los semáforos controlan el tráfico en la intersección, el corazón del sistema es precisamente la lógica que regula ese tráfico [28]. En los semáforos de regulación fija, la respuesta del sistema depende del tiempo. En los sistemas actuados, como BSP, la respuesta de los semáforos depende del tráfico en tiempo real y es un algoritmo el que establece la relación entre entrada (variables de tráfico y otras) y salida regulación semafórica. BSP modifica el plan semafórico existente para priorizar el tráfico en las intersecciones aisladas [29] [31] y también en las grandes vías y arterias urbanas [30] [31] en respuesta a las variaciones del tráfico en tiempo real. Hay que distinguir entre BSP y “pre-emption”, ya que el último consiste en un verde incondicional para los vehículos de emergencia y el verde que asigna BSP a los autobuses está condicionado por la lógica del sistema de priorización, que puede tener a su vez en cuenta factores intrínsecos y extrínsecos al tráfico. Por ejemplo estos factores pueden incluir la gestión eficaz de la demanda de cada vía, en relación a la capacidad; pero también los cruces peatonales, cuidar la seguridad de ciclistas seguridad, evitar congestiones y demoras; y por otro lado tener en cuenta los niveles de CO<sub>2</sub> y niveles de ruido L<sub>Amax</sub>; o el número de personas que van dentro del autobús. Esto es lo que llamaremos un plan multicriterio del que se nutre un sistema de toma de decisiones (la lógica de actuación), que además deberá resolver situaciones conflictivas y contradictorias.

Los modelos de microsimulación del tráfico puede recrear todas estas situaciones de tráfico con un grado de detalle tan preciso que permiten ser usado como base para evaluar el ruido generado con igual grado de detalle y de una manera dinámica [13] [18] [33] [34] [35] [36] [37] [38].

Naturalmente el grado de implantación de las medidas de mitigación propuestas debe ser analizado, antes de seguir adelante con el trabajo. En relación a ello se ha de decir que los requisitos de partida de la investigación se basan en tecnologías que afortunadamente podemos calificar de muy maduras. Principalmente:

- Tecnologías de detección de tráfico. Con respecto a la detección y adquisición de datos de autobuses, ya se han llevado a cabo suficientes investigaciones, por ejemplo resaltamos [39] [40]; para estudiar la adquisición de datos de los mismos, como: posición, retraso; la cantidad de pasajeros a bordo; detección de cuando se cierran las puertas en la parada de autobús; consumo de combustible, etc. La detección de posición se puede realizar utilizando bucles inductivos fijos/transpondedores y balizas y últimamente utilizando tecnologías instaladas a bordo de vehículos como GPS (Sistema de posicionamiento global).
- Sensores para adquirir otros tipos de datos relacionados con la investigación (incluido ruido) para crear una gama de soluciones inteligentes relacionadas con la movilidad, por ejemplo [41].

### **4.3. Referencias del capítulo 4**

- [1] V. Desarnaulds, G. Monay, A. Carvalho, Noise reduction by urban traffic management. Proc. ICA, Kyoto, Japan, 2004.  
[2] H. Bendtsen, L. Ellebjerg: Traffic Management and Noise. Danish Road Institute. Report 147. Road Dictatorate. Danish Ministry of Transport and Energy, 2006.  
[3] L. Ellebjerg, H. Bendtsen, Traffic Management and Noise. Internoise. Istanbul, 2007.  
[4] L. Ellebjerg: Effectiveness and Benefits of Traffic Flow Measures on Noise. SILENCE\_H.D1\_20070105\_DRI.



- <http://www.silence-ip.org/>
- [5] S. Curcuruto, R. Silvaggio, M. Stortini: Correlation between traffic flows and noise reduction in HUSH project strategic actions. Forum Acusticum. Aalborg. Denmark, <http://www.hush-project.eu>, 2011.
- [6] B. De Coensel, A.L. Brown, D. Tomerini: A road traffic noise pattern simulation model that includes distributions of vehicle sound power levels Applied Acoustics Volume **111**, (2016), Pages 170–178.
- [7] B. De Coensel, D. Botteldooren, T. De Muer, B. Berglund, M. E. Nilsson, P. Lercher: A model for the perception of environmental sound based on notice-events. JAcoust Soc Am; **126**(2): (2009) 656–65.
- [8] M. Björkman: Community noise annoyance: importance of noise levels and the number of noise events. J Sound Vib **151**(3): (1991) 497–503.
- [9] T. Sato, T. Yano, M. Björkman, R. Rylander: Road traffic noise annoyance in relation to average noise level, number of events and maximum noise level. J Sound Vib, **223**(5): (1999) 775–84.
- [10] A. L. Brown: An overview of concepts and past findings on noise events and human response to surface transport noise. In: Proceedings of the 43rd international congress and exposition on noise control engineering (Internoise), Melbourne, Australia, 2014.
- [11] M. Rannala, T. Metsvahi, and A.M. Orntlich Measure Evaluation Results TAL 6.1 Eco Driving. Measure Evaluation Results. CIVITAS-MIMOSA. 2013
- [12] J.L. Cueto et al. Intersecciones semaforizadas en la ciudad y ruido ambiental. 44º Congreso Español de Acústica. EAA European Symposium on Environmental Acoustics and Noise Mapping. Valladolid (2013)
- [13] M. Madireddy, B De Coensel, A. Can, B. Beusen, I. de Vlieger, D. 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.
- [14] V. Desarnaulds et al., Noise reduction by urban traffic management. Proc. ICA, Kyoto, Japan. (2004)
- [15] B. De Coensel et al.. Effects of traffic signal coordination on noise and air pollutant emissions. Environmental Modelling & Software. doi:10.1016/j.envsoft.2012.02.009 (2012)
- [16] P.G. Boulter and I.S. McGrae. The links between micro-scale traffic, emission and air pollution models. Project PPR 269 Transport Research Laboratory. (2007)
- [17] B. De Coensel, and D. Botteldooren. Traffic signal coordination: a measure to reduce the environmental impact of urban road traffic? INTERNOISE. Osaka (2011)
- [18] M. Berengier, and J. 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).
- [19] L. Ellebjerg and H. Bendtsen. Traffic Management and Noise. Danish Road Institute. Report 155. Road Directorate. Danish Ministry of Transport and Energy. (2007)
- [20] 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/>
- [21] B. De Coensel et al. Noise emission corrections at intersections based on microscopic traffic simulation. EURONOISE. Tampere. (2006).
- [22] E. Chevallier, et al. Dynamic noise modeling at roundabouts. Applied Acoustics. 70. (2009)
- [23] B. De Coensel et al.. Microsimulation based corrections on the road traffic noise emission near intersections. Acta Acustica united with Acustica. Volumen 93. (2007)
- [24] A. Can, et al. Accounting for traffic dynamics improves noise assessment: Experimental evidences. Applied Acoustics. 70. (2009)
- [25] I. Wilmlink, T. Vonk: Applying Intelligent Transport Systems to manage noise impacts. Euronoise. Manstrich, 2015.
- [26] I. Wilmlink: The role of ITS in noise mapping and noise action plans.. 5th European Congress and Exhibition on ITS, Hanover. 2005.
- [27] J. L. Cueto, R. Hernandez, F. Fernandez, D. Sales, J. C. Priego: Effects upon the urban noise of prioritizing bicycle traffic at intersections. Internoise, Melbourne, 2014.
- [28] J. L. Cueto, F. Fernandez, R. Hernandez, F. Lopez, L. Lorente, D. Carretero: Traffic management strategy to reduce environmental noise in cities based on the application of ITS. Internoise. New York, 2012.
- [29] A. M. Petrovici; J. L. Cueto; R. Hernández, D. Sales, D. Sales-Lerida, J. Priego: Effects upon urban noise of the prioritization of buses at intersections, Tecnicacustica Valencia, 207-213, 2015.
- [30] A. M. Petrovici, J. L. Cueto; R. Hernández, V. Nedeff, Smart mobility strategies based on bus signal priority for noise reduction, Euroregion, Porto, 2016.
- [31] K. Gardner, C. D’Souza, N. Hounsell, B. Shrestha, D. Bretherton: Interaction of buses and signals at road crossings Deliverable 1 Review of Bus Priority at Traffic Signals around the World. N.B Technical Cluster “Extra-vehicular technology” UITP WORKING GROUP: 2009
- [32] S. Araghi, A. Khosravi, D. Creighton: A review on computational intelligence methods for controlling traffic signal timing. Expert Systems with Applications **42**, Issue 3, (2015) Pages 1538–1550

- [33] E. Chevallier, L. Leclercq, J. Lelong, R Chatagnon: Dynamic noise modeling at roundabouts. *Applied Acoustics*. **70**, (2009) 761-770.
- [34] B. De Coensel, T. De Muer, I. Yperman, D. Botteldooren: The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes. *Applied Acoustics* **66**, (2005) 175–194.
- [35] Y. Namikawa, H. Yoshinaga, T. Tajika, Y. Oshino, K. Yoshihisa, K. Yamamoto: Methods of predicting noise in the vicinity of signalized intersections. *Acoust. Sci. & Tech.* **31**, (2010) 87-94.
- [36] K. Yoshihisa, Y. Oshino, K. Yamamoto, H. Tachibana: Road traffic noise prediction in the vicinity of signalized intersections in urban areas. *Proc. ICA, IV-(2004)* 3019-3022.
- [37] P. Sundbergh: Small prototypes for Driver behaviour measures for vehicles. Deliverable D2.13 QCity, 2006.
- [38] L. Estévez-Mauriz <sup>†</sup>, J. Forssén. Dynamic traffic noise assessment tool: A comparative study between a roundabout and a signalised intersection. *Applied Acoustics* **130** (2018) 71–86
- [39] N. B. Hounsell, F. N. McLeod, B.P. Shrestha: Bus priority at traffic signals: investigating the options, Proceedings of 12th International Conference on Road Traffic Information and Control, London, IEE, London, 2004.
- [40] Hounsell, N. B., Shrestha, B. P., McLeod, F. N., Palmer, S., Bowen, T. and Head, J. R.: Using global positioning system for bus priority in London: traffic signals close to bus stops. *IET Intelligent Transport Systems*, **1**, (2007), 131-137
- [41] IMAGINE: Collection Methods for Additional Data. WP2: Demand and traffic flow management. IMAGINE REPORT IMA02TR-060525-UL10, 2006.

## 5. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EMPLEADA.

### 5.1. Método de simulación dinámica de ruido de tráfico

El método de trabajo se recoge en el esquema representado en la figura tesis 6.7; cuyo corazón es el método CNOSSOS-EU [1], para el cálculo de la potencia de ruido emitida, conducido por los datos de salida del modelo de microsimulación del tráfico.

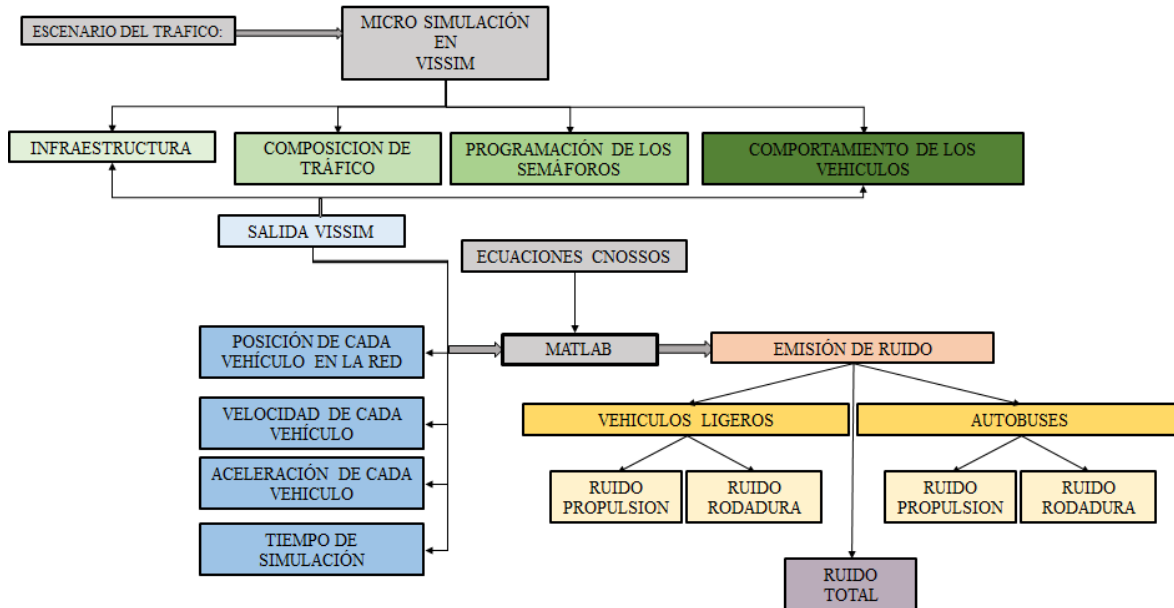


Figura tesis 6.7. Esquema desarrollo del trabajo.

En Europa se ha recorrido un largo camino en el diseño de modelos de emisión de ruido para el tráfico rodado, comenzando con los estudios previos de la Directiva, pasando por los proyectos desarrollados en el marco de la financiación de la UE, Harmonoise / IMAGINE [2], [3], hasta el actual CNOSSOS-EU [4] [5]. En este trabajo siempre que se aluda a CNOSSOS se referirá al modelo de emisión y nunca la modelo de propagación. Para verificar su aplicabilidad se hicieron numerosas campañas de medición de ruido (de paso) incluyendo diferentes tipos de vehículos y en diferentes países europeos. De esta forma, se obtuvieron datos sobre los efectos de la velocidad y de aceleración (que deben ser aplicados con ciertos márgenes para conservar la fiabilidad del método) y de otros tantos factores (neumáticos, superficies de calzada, pendientes, etc.). Incluso para garantizar su adaptabilidad es posible introducir correcciones regionales.

Las ecuaciones básicas de CNOSSOS-EU para el cálculo de la potencia emitida por el tráfico de una avenida son:

Ruido rodadura (ecuación tesis 4)

$$L_{WR}(f) = A_R(f) + B_R(f) \cdot \log_{10} \left( \frac{v}{v_{ref}} \right) \quad (4)$$

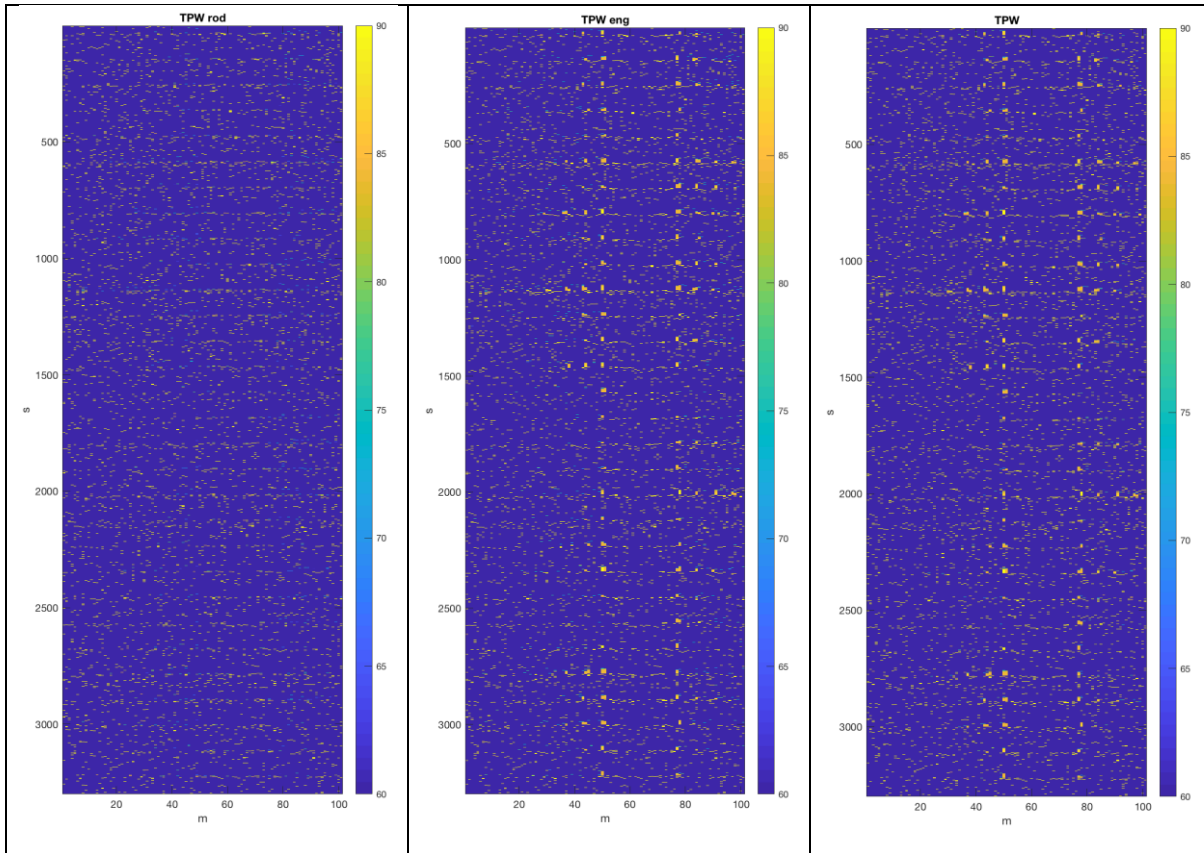
$L_{WR}$  es la potencia de ruido de rodadura;  $A_R$ ,  $B_R$ : coeficientes que cambiarán para cada banda de frecuencia en octavas para cada categoría de vehículo;  $v$ : velocidad del vehículo; y  $v_{ref}$ : velocidad de referencia que es 70 Km/h.

Ruido motor (ecuación tesis 5)

$$L_{WP}(f) = A_P(f) + B_P(f) \cdot \left( \frac{v - v_{ref}}{v_{ref}} \right) + C_P(f) \cdot a \quad (5)$$

$L_{WP}$  es la potencia de ruido de propulsión,  $A_P$ ,  $B_P$ ,  $C_P$ : coeficientes que cambiarán para cada banda de frecuencia en octavas para cada categoría de vehículo;  $v$ : velocidad de los vehículos;  $v_{ref}$ : velocidad de referencia;  $a$ : aceleración del vehículo. El término de la ecuación que se refiere al cálculo de la influencia de la aceleración en el ruido ha ido cambiando considerablemente a lo largo del tiempo.

A través de este método de simulación dinámica de ruido de tráfico, se han obtenido una serie de resultados sobre la potencia sonora en una avenida analizada. La idea y el método, como ya se ha puesto de manifiesto, no es nuevo (por ejemplo, [6] [7] [8]), pero las diferentes implementaciones del mismo conducen a herramientas más o menos potentes. La herramienta que se ha programado en esta tesis es capaz de funcionar como un escalpelo que decide como analizar espacio-temporalmente los datos. Y todo ello es posible gracias a las matrices de datos que se usan y están representadas en las gráficas siguientes usando un ejemplo.



*Figura tesis 8.72. Conjunto de Graficas que representan la evolución temporal y espacial de la potencia de emisión sonora de la calle simulada. De izquierda a derecha, ruido de rodadura, motor y ruido total. Los colores representan el nivel de potencia sonora de mayor (tendiendo hacia el amarillo) a menor (tendiendo hacia el azul oscuro).*

Las gráficas recogidas en la figura tesis 8.72, representan la potencia radiada por metro y por segundo LAw', en los 100 metros de una calle (eje de abscisas). Esta potencia es la composición de vehículos ligeros y los autobuses, ya que no se tiene en cuenta el paso de motocicletas y otros vehículos especiales. Como vemos en el eje "x" se representa el espacio que coincide de izquierda a derecha con moverse 100 metros en la sección de carretera. El eje "y" representa la progresión en el tiempo de arriba abajo.

### **5.2. Generación de escenarios en VISSIM**

Para estudiar los sistemas de priorización y su influencia sobre el ruido se ha optado por comenzar por modelos VISSIM simples para ir escalando en complejidad. Para ello se ha comenzado con los casos que representan intersecciones aisladas (Modelo 1) y con distintas configuraciones de control semafórico. Más adelante se configuran las avenidas (Modelo 2), ya que éstas no se pueden estudiar como la mera suma de sus cruces controlados por semáforo y analizados por separado. Las avenidas tienen su propia dinámica y los ingenieros de tráfico buscan su coordinación para ganar en fluidez del tráfico.

En todos los casos, para cada configuración diferenciada de control semafórico, se ha planteado el análisis sistemático que las variaciones y combinaciones de ciertas variables (variables

independientes) tienen sobre el ruido emitido por la infraestructura (variable dependiente). Las variables independientes son:

- Demanda (o densidad de vehículos por hora). Se han probado distintas demandas para cada dirección.
- Frecuencia del servicio de autobuses. El número de autobuses en cada dirección por hora.
- Relación entre el verde efectivo y el tiempo total del ciclo. En general se tiene en cuenta la duración del ciclo semafórico, ya que la relación de tiempo dedicado al verde respecto al ciclo total de los semáforos se mantendrá en 0,5.
- Tipo de control semafórico o diseño del programa de regulación de los semáforos.
- Carril bus. La incorporación (o no) al modelo de un carril bus segregado.
- Bus stop. La incorporación (o no) al modelo, de paradas de autobús entre las intersecciones.

Una de las cuestiones que debe considerarse es que no se han programado tiempos de amarillo, ya que no es necesario para los fines de la investigación. Otra cuestión que se ha tenido en cuenta en este análisis se relaciona con el comportamiento de los conductores. Este comportamiento ha sido dividido en tres categorías de la siguiente manera (tabla tesis 6.3):

*Tabla tesis 6.3 Composición de los conductores en relación a su comportamiento al volante.*

<b>Composición trafico</b>	<b>Calmado</b>	<b>Normal</b>	<b>Agresivo</b>
	15%	70%	15%

Las variables dependientes son:

- La potencia de emisión de ruido total generado por la avenida o intersección. En concreto se analiza en esta parte de la tesis la evolución espacial de la potencia de ruido por metro, promediada para un período de tiempo predefinido. Aunque la evolución temporal de la potencia de ruido para un intervalo de espacio predefinido también se utilizará más adelante. El cálculo de potencia se realiza mediante un script Matlab que incorpora las dos ecuaciones de CNOSSOS (ecuación tesis 4 y 5). Dependiendo de los casos puede ser de interés el manejo de datos más detallados, por ejemplo:
  - La potencia de emisión de ruido total generado diferenciando las distintas direcciones de una avenida y las distintas ramas de un cruce.
  - La potencia de emisión de ruido distinguiendo entre el generado por el motor de los vehículos que pasan y el ruido generado por la rodadura (interacción neumático-carretera)
  - La potencia de emisión de ruido distinguiendo entre el generado por los autobuses y los automóviles.

- La movilidad de los autobuses y del resto de vehículos. Movilidad que se tienen en cuenta solo en la avenida y se evalúa en función de los tiempos de viaje. El tiempo de viaje se define en VISSIM como el tiempo requerido por cualquier vehículo para conducir entre 2 secciones, el tiempo que pasa desde el inicio a destino. El tiempo de viaje ideal es el tiempo que se alcanzaría si no hubiera otros vehículos y semáforos y otras paradas en la red, o sea, 144 s, considerando una velocidad constante de 50 km/h.

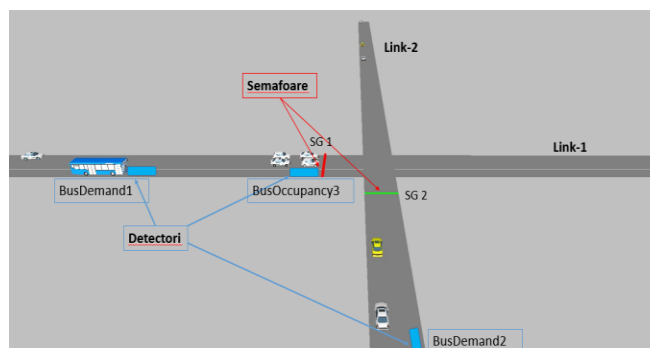
Una de las cuestiones que debe considerarse antes de seguir adelante, es que se ha hecho la evaluación del ruido incluyendo todo el periodo de simulación sin separar los periodos de rojo y verde de los semáforos.

Todas las variables dependientes se calculan en relación a los datos de salida de VISSIM. Estos consisten en ofrecer cada 0,1 s los siguientes datos de todos y cada uno de los vehículos que están en la red simulada en ese momento. Que son:

- El tipo de vehículo.
- La aceleración en  $m/s^2$ .
- La velocidad de cada vehículo en la flota en km/h.
- La posición de cada vehículo durante el tiempo de la simulación.
- El tiempo de la simulación.

### **5.3. Modelo 1. Intersección aislada**

Se describen las decisiones metodológicas que se han tomado en relación a los diseños de los modelos de micro simulación de tráfico para la intersección aislada.



*Figura Tesis 6.11. Representación gráfica de la intersección analizada.*

#### Descripción general del modelo. Geometría

El diseño realizado para este trabajo consiste en una intersección de tipo cruce (figura tesis 6.11) controlado por semáforos, compuesta de dos brazos con la misma longitud (1000 m), con los vehículos circulando en dirección Oeste a Este (Link 1), y del Sur al Norte (Link 2). Tanto el Link 1 que Link 2 tienen tres carriles, de las cuales el primero por la derecha es exclusivo para autobuses.

En otra serie de casos probados, los dos brazos de la intersección tienen solo dos carriles que comparten autobuses y vehículos ligeros. El ancho de cada carril es de 3,5 m. En este modelo el análisis se ha llevado a cabo simultáneamente en las dos vías del cruce.

#### Control del semáforo. Sin priorización de los autobuses

La atención se centra en la relación entre el programa de control semafórico y la estimación del nivel de ruido generado por los vehículos.

- La relación de tiempo dedicado al verde respecto al ciclo total de los semáforos es de 0,5 (50% rojo y 50% verde – el color amarillo no se considera en este estudio).
- Se estudiaron dos ciclos de semáforos: 60 s y 120 s.

#### Volumen y composición del tráfico

**Demanda.** Se ensayaron dos volúmenes de tráfico para Link 1 (950 veh/h y 1900 veh/h) y un solo volumen para Link 2 (950 veh/h).

**Densidad de autobuses.** En cuanto los autobuses, en Link 1 se han probado dos volúmenes distintos (60 y 12 autobuses/h). En Link 2, hay siempre 12 autobuses/h.

#### Velocidad y comportamiento de los conductores

La velocidad deseada para los automóviles es de 50 km/h, y 45-50 km/h para los autobuses

Se ha tenido en cuenta el comportamiento de los conductores, la distribución de vehículos calmados, normales y agresivos siendo como en la Tabla Tesis 6.3.



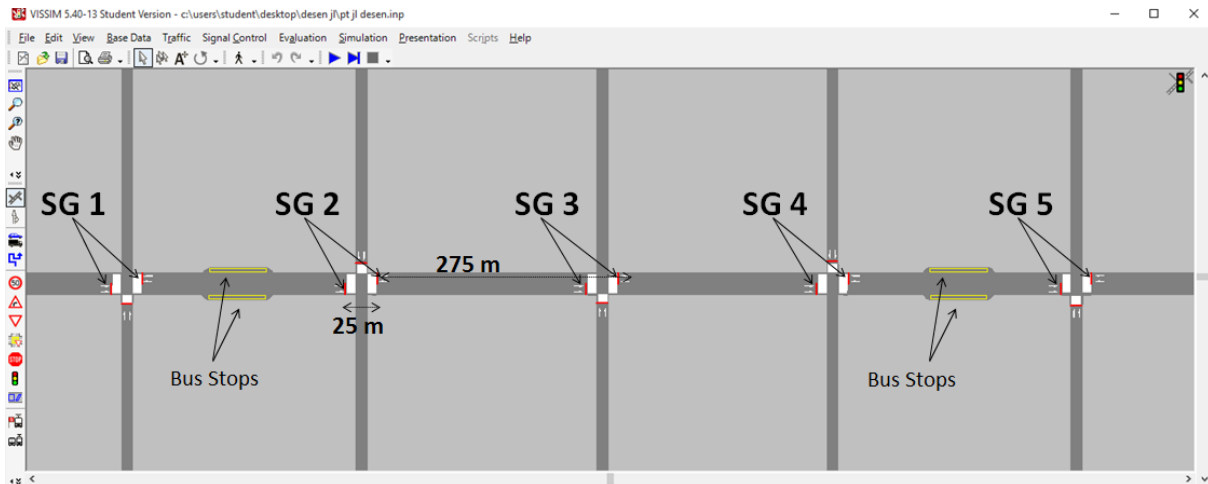
Detectores
<p>En este caso el número de detectores ha variado dependiendo del escenario probado. Los detectores se han instalado en los dos brazos del cruce, y son de dos tipos: “Bus-Demand” (indica la presencia de un autobús cerca del cruce) y “Bus-Occupancy” (indica el hecho de que un autobús tuvo que detenerse delante del semáforo). El tamaño de los detectores varía en función del caso probado. Dependiendo del ciclo los detectores fueron instalados a distintas distancias antes del semáforo: 42 metros, para el ciclo de 60 s, y 84 m, para el ciclo de 120 s.</p>
<p>Control del semáforo- Con priorización programado en VAP (“Vehicle Actuated Program”) que es la plataforma utilizada en el estudio para la programación de las soluciones de tráfico inteligentes (“Smart mobility”)</p>
<p>Solución programada de priorización: <i>“Early Green”</i></p> <p>En ausencia de un autobús, los semáforos funcionan en un programa fijo (50% verde - 50% de rojo).</p> <p>La detección del autobús cuando el semáforo está en rojo implica el cambio automático de la lógica de control. Esta programación acorta el tiempo de rojo cuando un autobús se acerca al semáforo, ya que introduce el verde justo para permitir el paso del autobús. Esto sucede cumpliendo el requisito de duración mínimo de verde para la otra vía (15 s para un ciclo de 60 s y 30 s para el ciclo de 120 s).</p>

Los escenarios propuestos y estudiados son los siguientes:

- escenario I - Regulación fija
- escenario II - Priorización de autobuses en Link 1
- escenario III - Priorización en el Link 1 y Link 2

#### **5.4. Modelo 2. Avenida con 5 intersecciones**

Se describen las decisiones metodológicas que se han tomado en relación a los diseños de los modelos de micro simulación de tráfico para la avenida con 5 cruces.



*Figura Tesis 6.18. Descripción del modelo VISSIM para la avenida simulada.*

### Descripción general del modelo. Geometría

El diseño realizado consiste en una avenida de 2125 m longitud, controlada por 5 semáforos en cada dirección, con los vehículos circulando en dirección Oeste a Este, y del Este a Oeste. Cada dirección tiene dos o tres carriles de 3,5 m (dependiendo del escenario probado) de las cuales el primero (situado a la derecha) es exclusivo para autobuses. El modelo tiene dos paradas de autobús (dos para cada dirección), situadas como se aprecia en la Figura Tesis 6.18.

Las 5 avenidas secundarias que cruzan las intersecciones están representadas por calles de sentido único (con tránsito de N a S y S a N) cada una de ellas con dos carriles. La intensidad del tráfico en las carreteras secundarias es la misma durante toda la simulación, (475 coches / h y 12 autobuses / h).

En cuanto a las rutas que siguen los vehículos, siguiendo la configuración presentada en la Figura Tesis 6.18, todos los giros a la izquierda de la avenida principal están prohibidos. El modelo se simplifica para maximizar la capacidad del corredor, excluyendo los movimientos de giro (salida / entrada).

#### Control del semáforo, Semáforos con programación fija y sin sincronizar Requisitos generales

Las intersecciones están reguladas por un sistema de control de semáforos (SC), que incluye diez grupos de semáforos (SG), dos para cada intersección.

La atención se centró en la relación entre el control de semáforos y la estimación del nivel de ruido generado por los vehículos.

- Se debe recordar que la relación de tiempo dedicado al verde respecto al ciclo total de los semáforos es de 0,5 (50% rojo y 50% verde, ya que el color amarillo no se considera en este estudio).
- Se estudiaron dos ciclos de semáforos: 60 s y 120 s.

#### Detectores

La detección se realiza en tiempo real. La detección tipo GPS proporciona datos de posición y velocidad cada décima de segundo cuando los autobuses urbanos se acercan al área de influencia del cruce. La detección se extiende hasta que los autobuses dejan atrás la intersección. En las paradas de autobús, la detección del autobús finaliza hasta que el vehículo vuelve a entrar en tráfico general de la avenida.

#### Volumen y composición del tráfico

Se ensayaron dos volúmenes de tráfico para la avenida 1 (950 veh/h y 1900 veh/h) y dos composiciones de frecuencia de autobuses (12 autobuses/h y 60 autobuses/h). Para las vías secundarias estos datos son fijos.

#### Velocidad y comportamiento de los conductores

La velocidad deseada para los automóviles es de 50 km/h, y 45-50 km/h para los autobuses

Se ha tenido en cuenta el comportamiento de los conductores, la distribución de vehículos calmados, normales y agresivos siendo la misma como en el Modelo 1 (Tabla Tesis 6.3).

En este modelo se analiza de manera conjunta el nivel de ruido emitido por los vehículos que usan la red, y al mismo tiempo se han analizado la movilidad del tráfico en términos de tiempo de viaje. Se han definido tres escenarios propuestos y para ser estudiados:

- Semáforos con programación fija y sin sincronizar.

- Onda Verde. En este escenario el control de tráfico está diseñado para permitir la libre circulación de vehículos en pelotones. Debido a que la instalación de la onda verde en una dirección genera automáticamente una onda roja en la dirección opuesta, la luz verde debe colocarse en la dirección de circulación más intensa.
- Priorización para autobuses (BSP-GPS).

Para cada uno de los escenarios probados en el Modelo 2, se definieron cuatro configuraciones de tráfico diferentes. Para cada configuración de tráfico, se propusieron 16 casos. Las configuraciones de tráfico se describen de la siguiente manera:

- Configuración no. 1: en este modelo de infraestructura de tráfico no hay un carril bus dedicado y tampoco hay paradas de autobús.
- Configuración no. 2: en este modelo de infraestructura de tráfico hay un carril bus dedicado, pero no hay paradas de autobús.
- Configuración no. 3: en este modelo de infraestructura de tráfico no hay un carril bus pero hay paradas de autobús.
- Configuración no. 4: en este modelo de infraestructura de tráfico hay carril bus y paradas de autobús.

### **5.5. Requisitos de diseño del BSP-GPS**

Todos los grupos de señales actúan bajo la información transmitida por el detector de bus siguiendo las reglas lógicas BSP programadas en VAP. Se asigna el nombre de BSP-GPS a la secuencia de comandos desarrollada en el lenguaje de programación VAP. BSP-GPS fueron diseñados bajo los siguientes requisitos [9] contenidos en los pasos que se han mencionado. Las Respuestas de Priorización de Bus dependen de la lógica programada y la información provista por los detectores. La detección de un bus introduce cambios en las fases fijas existentes (preprogramadas) de tal forma que el control de la señal del vehículo accionado (VA) se realiza de forma independiente en cada grupo de señales (SG). Esta arquitectura se conoce como un sistema BSP distribuido, donde todas las decisiones prioritarias se toman en el nivel de intersección.

BSP-GPS fueron diseñados bajo los siguientes requisitos Las estrategias BSP utilizadas en este trabajo están diseñadas con una combinación de verde extendido (“Extended-Green”) y acortar el rojo (“Early-Green”).

El tratamiento inicial de priorización consiste en una extensión de la etapa verde actual si se detecta un autobús que se aproxima a la intersección.

- Máxima extensión del verde = 10 s. Cuando un autobús se acerca a la intersección, el algoritmo calcula si la extensión verde será necesaria, teniendo en cuenta la predicción de la trayectoria del autobús (que es una función de su posición y velocidad actualizadas).
- Una vez que la extensión verde está habilitada, SG puede volver a rojo antes de alcanzar los 10 segundos, a menos que haya otros buses pidiendo prioridad (cuando el autobús

cruza la intersección (“check-out”), o si algo hace que el bus se detiene tanto que su trayectoria prevista no será compatible con el intervalo de tiempo habilitado por la extensión verde).

Esto último (también llamado “red truncation”) consiste en reducir la situación de rojo para volver al verde lo más pronto posible cuando llegue el autobús. El truncamiento máximo en rojo es de 10 segundos. Se obtienen dos situaciones:

- Cuando un autobús se acerca a la intersección, el algoritmo calcula si será necesario truncar el rojo, y si es así, cuándo hacerlo.
- Si hay un autobús atrapado en una cola delante de un semáforo, el truncamiento rojo se ejecuta lo antes posible, precisamente en 10 segundos para dejar circular lo antes posible al autobús.

En el caso de múltiples solicitudes de prioridad, prevalecen las reglas inviolables que rigen el tiempo máximo de verde y el tiempo mínimo de rojo. El sistema debe devolver el tiempo a las fases complementarias cuando sea posible y necesario.

#### **5.6. Validación del método de la simulación dinámica de ruido de tráfico en la ciudad de Bacau**

Cualquier metodología empleada para el análisis de medidas de mitigación del ruido ambiental debe adecuarse para su uso real. Más aún cuando se trabaja en tráfico urbano, ya que no se puede despreciar el factor local. Esta adecuación se demuestra mediante la validación, para lo cual es necesario llevar a cabo estudios de campo de los parámetros de desempeño del método, tales como definición del tráfico y niveles de emisión de los vehículos. Teniendo en cuenta que el segundo depende del primero se definieron una serie de ensayos que se van a describir más adelante para validar las metodologías analíticas utilizadas. Las variables de estudio son las necesarias para analizarlos y si se adecuan convenientemente al caso de Bacau.

Al mismo tiempo se debe analizar esta capacidad predictiva del método usando magnitudes que examinen tanto la dosis como la molestia causada por eventos a corto plazo. Por esa razón se han seleccionado tanto el LAFmax (analizado con un muestreo de 0,1 s), como la distribución de LAeq (analizado cada 1 s.) en el intervalo de tiempo de análisis que fue de una hora.

Por tanto, este apartado de la tesis tiene por objeto analizar la capacidad predictiva del método de simulación dinámica de ruido de tráfico en una avenida de Bacau. Es por ello que en la tesis este tema se ha tratado como un capítulo independiente que comprende sus propias hipótesis, metodologías e instrumentos de análisis.

Los pasos serán como sigue:

1. Campaña de mediciones de ruido ambiental en una avenida cuyas características se ponen de manifiesto a continuación.
2. Simultáneamente a la campaña de medidas de ruido se graba en video la escena del tráfico. Esto nos permitirá entre otras cosas:

- 2.1. Definir la densidad de tráfico y también los porcentajes de coches, motocicletas, autobuses y vehículos pesados.
3. Simultáneamente a las dos anteriores se realizan medidas de velocidad y aceleración sobre los autobuses.
  - 3.1. Esto nos ayudará también a definir el comportamiento de la unidad vehículo-conductor en distintas situaciones de tráfico
4. Aplicar la metodología de predicción dinámica del ruido (VISSIM-CNOSSOS) según se ha establecido en el capítulo 6 con las siguientes particularidades.
  - 4.1. Generación de un modelo VISSIM realizado para la avenida y el momento en el que se tomaron las medidas. Esto es muy importante, porque pretendemos es corregir el modelo VISSIM hasta llegar a un grado de realismo en Bacau, no lo que ocurre en esa calle de manera habitual:
    - La densidad de tráfico y el tipo de vehículos en la flota, en el momento del test
    - El control semafórico durante el momento del test.
    - Incorporación de datos que reproduzcan un modelo de comportamiento de la unidad vehículo-conductor más realista para el periodo de tiempo donde se llevó a cabo el test de ruido ambiental
5. Los resultados procedentes de CNOSSOS (potencia de ruido), servirán de entrada a un modelo simplificado de propagación que nos sirve para determinar los niveles de presión sonora en un punto receptor que mimetiza la posición exacta del sonómetro respecto a la vía. Así se estimaran los niveles medidos por el sonómetro virtual para los casos recreados en la fase de simulación 4.
6. Análisis estadístico que nos permita corroborar o refutar las hipótesis planteadas.

### **5.7. Definición de la zona para el estudio de caso**

Características de la vía y de la zona de ensayo:

- Superficie. Una de esas características más importantes de la avenida Marasesti de Bacau escogida para el estudio es que el asfalto está en buenas condiciones y es un asfalto neutro para la generación de ruido.
- Circulación fluida. Desde la posición del punto de medida y al menos 100 metros aguas abajo / aguas arriba no hay coches aparcados en los márgenes, no hay cruces, rotondas, pasos de peatones, no hay obstáculos o cualquier otro aspecto que hagan necesario que los vehículos se paren o reduzcan su velocidad.
- Tráfico de autobuses. La avenida debe estar cruzada por un número suficiente de autobuses urbanos, al menos a la hora del ensayo. Por ejemplo, 30 autobuses por hora, o 3 % del flujo de tráfico.
- Fluidez del tráfico de autobuses. Por otro lado y desde la posición del punto de medida y al menos 100 metros aguas abajo no debe haber paradas de autobuses
- Visibilidad del tramo de la carretera. La avenida debe ser recta o al menos con visibilidad total para los conductores sobre el tramo.
- Pendientes. Sin pendientes significativas
- Uso del área. Residencial

- Ubicación en la ciudad. Ubicación central
- Ancho mínimo del carril de 3 a 3.5 m
- Límite de velocidad. 50 Km/h
- Ciclo semafórico. El que permita un nivel de servicio, determinado por la relación demanda / capacidad de la vía  $< 0,5$ . En otras palabras, lejos de la ocurrencia de congestiones de tráfico
- Neumáticos. No se permite realizar el ensayo cuando se usa neumáticos de invierno
- Ausencia de edificios y superficies reflectantes verticales en las proximidades del sonómetro.

### **5.8. Referencias del capítulo 5**

- [1] CNOSSOS, Draft JRC Reference Report, Version 2d, pg. 37-45/57-58, 2010;
- [2]. HARMONOISE (2004), HAR11TR-020614-SP09v4, Source modelling of road vehicles, 04-03-2004.
- [3]. IMAGINE. The Noise Emission Model for European Road Traffic IMA55TR-060821-MP10 P10 (2007). <http://www.imagine-project.org/>
- [4] 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>
- [5] Kephelopoulos Stylianos, Paviotti Marco, Anfosso-Lédée Fabienne, Van Maercke Dirk, Shilton Simon, Jones Nigel, 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;
- [6] E. Chevallier, L. Leclercq, J. Lelong, R Chatagnon: Dynamic noise modeling at roundabouts. Applied Acoustics. **70**, (2009) 761-770.
- [7] B. De Coensel, T. De Muer, I. Yperman, D. Botteldooren: The influence of traffic flow dynamics on urban soundscapes. Applied Acoustics **66**, (2005) 175–194.
- [8] L. Estévez-Mauriz, J. Forssén. Dynamic traffic noise assessment tool: A comparative study between a roundabout and a signalised intersection. Applied Acoustics 130 (2018) 71–86
- [9] Petrovici A.M., Cueto J.L., Hernandez R., Nedeff V., Smart mobility strategies based on bus signal priority for noise reduction, Congress publication, EUROREGIO/TECNIACUSTICA'16, Oporto, Portugal. Junio, 2016.

## 6. REFERENCIA A LOS RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 6.1. Sistema de priorización de autobuses en una intersección regulada por semáforos.

#### Resultados

*Extracto de las Tablas de Tesis 7.1 y 7.2. Datos de entrada y extracto de resultados de emisión de ruido en los casos del escenario I*

Escenario I - Regulación fija							Fluctuación de los niveles LAw' promediados durante el tiempo de simulación. Valores mínimos y máximos detectados 50 m. aguas arriba del semáforo. (dB)	LAw' promediada durante el tiempo de simulación. Niveles máximos detectados en el semáforo (dB)
Caso	Efecto sobre	Escenario	Vehículos ligeros/h	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus		
1	Link 1	Fijo	1900	60	60	SI	77-81	89
9	Link 1	Fijo	1900	60	60	NO	79-85	87
17	Link 2	Fijo	950	12	60	SI	73-74	84
18	Link 2	Fijo	950	12	120	SI	73-76	85

*Extracto de la Tabla de Tesis 7.3. Datos de entrada y extracto de resultados de emisión de ruido en los casos del escenario II*

Escenario II - Priorización de autobuses en Link 11 (avenida principal del cruce).				Ciclo (s)		Carril bus	Fluctuación de los niveles LAw' promediados durante el tiempo de simulación. Valores mínimos y máximos detectados 50 m. aguas arriba del semáforo. (dB)	LAw' promediada durante el tiempo de simulación. Niveles máximos detectados en el semáforo (dB)
Caso	Efecto sobre	Vehículos ligeros/h	Autobuses/h	Total	Mínimo verde			
21	Link 1	1900	60	60	15	SI	77-80	86
21	Link 2	-	-	-	-	-	73-74	85
23	Link 1	1900	60	120	30	SI	78-80	87
23	Link 2	-	-	-	-	-	73-76	87

*Extracto de la Tabla de Tesis 7.4. Datos de entrada y extracto de resultados de emisión de ruido en los casos del escenario III.*

Escenario III - Priorización de autobuses en el Link 1 (avenida principal del cruce) y Link 2 (Avenida secundaria del cruce)				Ciclo (s)		Carril bus	Fluctuación de los niveles LAw' promediados durante el tiempo de simulación. Valores mínimos y máximos detectados 50 m. aguas arriba del semáforo. (dB)	LAw' promediada durante el tiempo de simulación. Niveles máximos detectados en el semáforo (dB)
Caso	Efecto sobre	Vehículos ligeros/h	Autobuses/h	Total	Mínimo verde			
41	1 y 2	1900	60	60	15	SI	77-80	87
43	1 y 2	1900	60	120	30	SI	78-80	87
49	1 y 2	1900	60	60	15	NO	77-85	86



Tras analizar los casos empleados en el Modelo 1 se ha observado que no hay cambios significativos en el ramal secundario de la intersección (link 2), independientemente de las combinaciones de variables de tráfico adoptadas para el ramal principal del cruce (link 1): Caso 17 (Figura tesis 7.13) en comparación con la situación en el caso de 21 Link 2 (Figura tesis 7.14), Caso 18 (Figura tesis 7.15) en comparación con la situación en el caso de 23 Link 2 (Figura tesis 7.16), sin importar lo que ocurre en el brazo principal de la intersección (link 1).

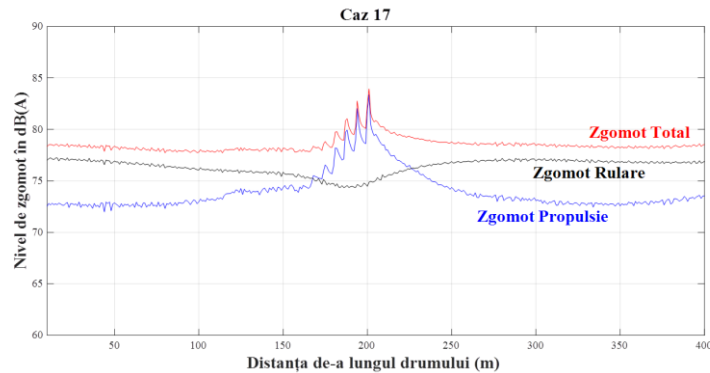


Figura Tesis 7.13. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 17;  $x$ =distancia a lo largo de la carretera,  $y$ = nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

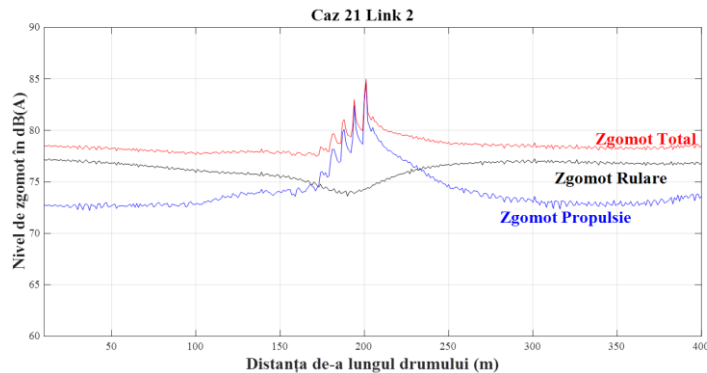


Figura Tesis 7.14. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 21 Link 2;  $x$ =distancia a lo largo de la carretera,  $y$ = nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

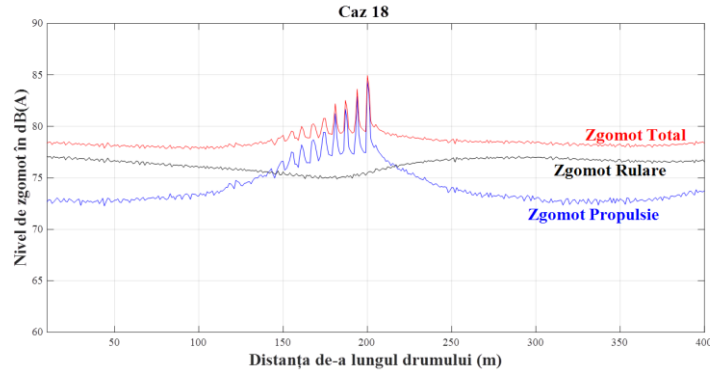


Figura Tesis 7.15. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 18; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

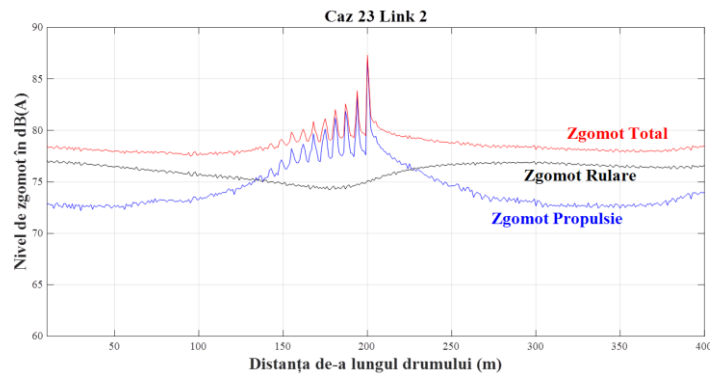


Figura Tesis 7.16. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 23 Link 2; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

También se ha observado que los Escenarios 2 y 3 tienen resultados similares. No hay gran variación en el nivel de ruido entre ellos como se aprecia en la tabla 6.1

Tabla 6.1. Comparativa del rendimiento acústico de los casos analizados.

Caso	Examen del ruido en la zona de espera del semáforo (desde 150 a 200 m., en las figuras)	Examen del ruido a la altura del semáforo (200 m., en las figuras)
21	77-80 dBA	86 dBA
41	77-80 dBA	87 dBA
23	78-80 dBA	87 dBA
43	78-80 dBA	87 dBA

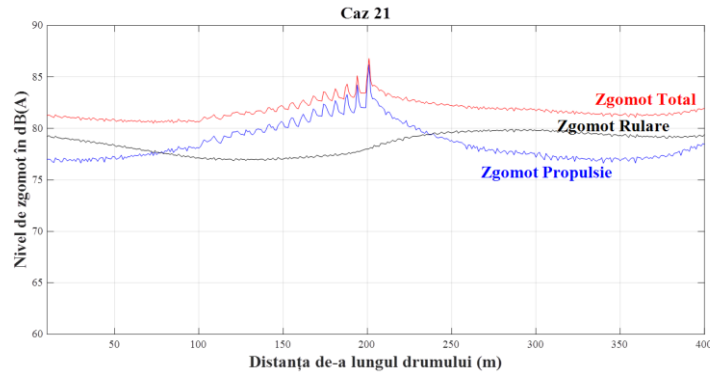


Figura Tesis 7.2. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 21; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

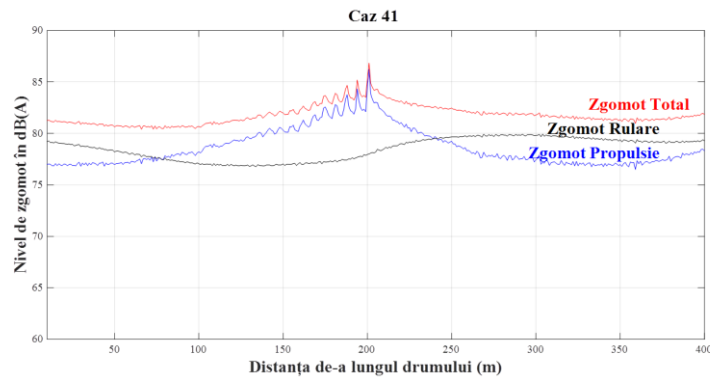


Figura Tesis 7.3. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 41; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

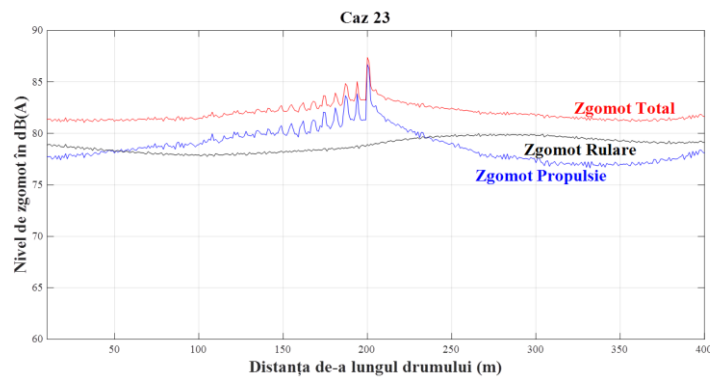


Figura Tesis 7.5. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 23; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

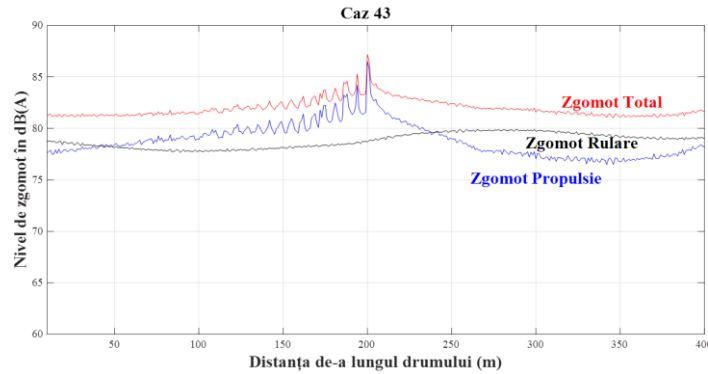


Figura Tesis 7.6. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 43; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

Con una demanda alta de tráfico (1.900 vehículos/h), se observaron niveles de ruido hasta 3 dBA más bajos en el semáforo en los Escenarios 2 y 3 (escenarios con priorización) frente a las mismas condiciones, pero en el Escenario 1 (sin priorización). Esto se aprecia al comparar las situaciones que se listan en la tabla 6.2

Tabla 6.2. Comparativa del rendimiento acústico de los casos analizados.

Caso	Figura Tesis	Examen del ruido en la zona de espera del semáforo (desde 150 a 200 m., en las figuras)	Examen del ruido a la altura del semáforo (200 m., en las figuras)
1	7.1	77-81 dBA	89 dBA
21	7.2	77-80 dBA	86 dBA
41	7.3	77-80 dBA	87 dBA

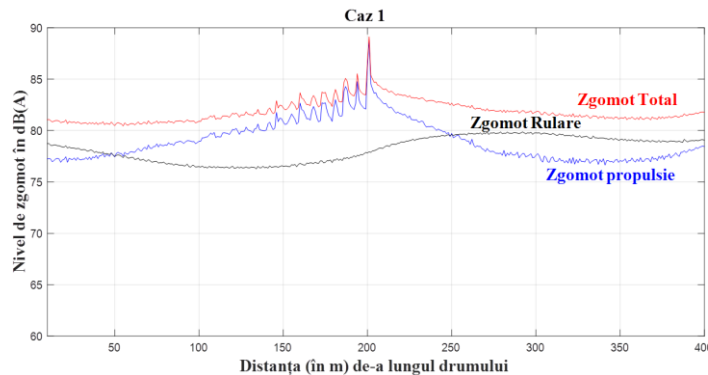


Figura Tesis. 7.1. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 1; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.

Al eliminar el carril bus (los dos carriles que quedan tienen tráfico mixto - automóviles y autobuses), se observó que el nivel de ruido aumenta antes del semáforo con aproximadamente 3 dBA en comparación con la situación donde hay carril bus. Esto se observa al comparar los casos que aparece en la tabla 6.3.

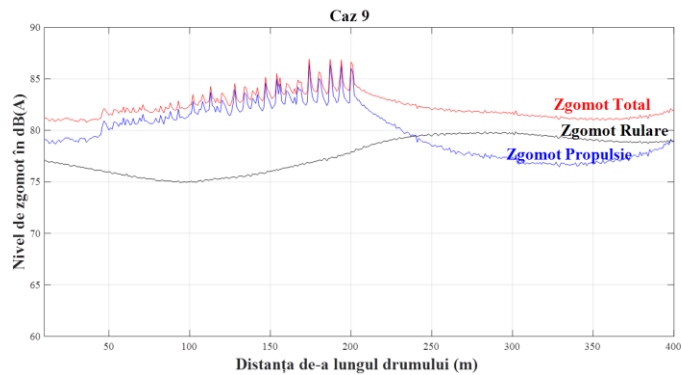
*Tabla 6.3. Comparativa del rendimiento acústico de los casos analizados.*

Caso	Figura Tesis	Examen del ruido en la zona de espera del semáforo (desde 150 a 200 m., en las figuras)	Examen del ruido a la altura del semáforo (200 m., en las figuras)
1	7.1	77-81 dBA	89 dBA
9	7.7	79-85 dBA	87 dBA

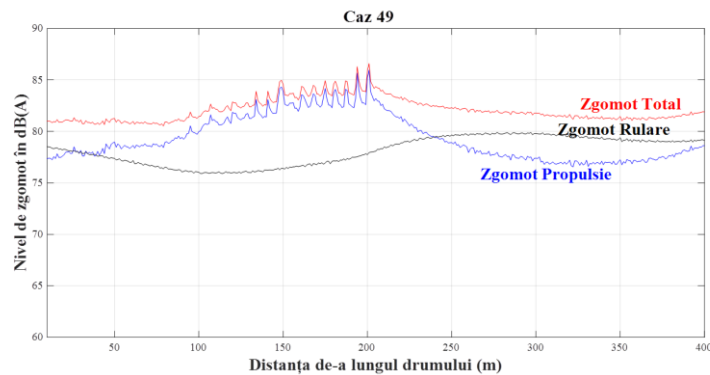
Y también se observa mediante la comparación expuesta en la tabla 6.4.

*Tabla 6.4. Comparativa del rendimiento acústico de los casos analizados.*

Caso	Examen del ruido en la zona de espera del semáforo (desde 150 a 200 m., en las figuras)	Examen del ruido a la altura del semáforo (200 m., en las figuras)
41	77-80 dBA	87 dBA
49	77-85 dBA	86 dBA



*Figura Tesis 7.7. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 1; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.*



*Figura Tesis 7.9. La representación gráfica del nivel de ruido generado por todos los vehículos ingresados al tráfico en las condiciones presentadas para el Caso no. 49; x=distancia a lo largo de la carretera, y= nivel de ruido en dB(A); con azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura, rojo=ruido total.*

## 6.2. Sistema de priorización de autobuses en una avenida regulada por semáforos. Resultados

Para este análisis se han presentado dos graficas distintas para cada caso. La primera grafica tiene representado el nivel de ruido generado en la avenida por cada dirección (E-W y E-O), y la segunda grafica tiene representado el nivel de ruido total generado tras sumar energéticamente ambas direcciones. Los picos de ruido a lo largo de la avenida delatan la presencia de los semáforos debido a que son áreas que soportan intensas aceleraciones y deceleraciones. Las discusiones se han dividido por cada una de la configuración probada (presentadas dentro de la metodología) de la siguiente manera:

### CONFIGURACION 1 - Cuando no hay un carril bus y tampoco paradas de autobús

Cuando hay una demanda alta de tráfico (tab. 7.8) se observa que el nivel de ruido incrementa en toda la avenida.

Tabla Tesis 7.8. Datos de entrada, caso 17

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
17	1.900	1.900	60	60	NO

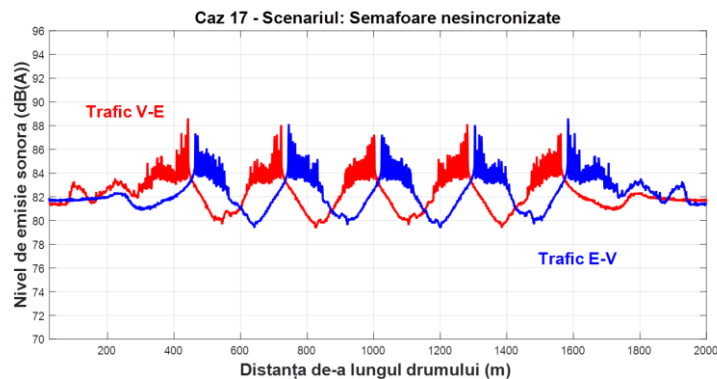


Figura Tesis 7.19-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 17, en cada dirección en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

Una característica visible en todas las gráficas presentadas para el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR" es la simetría de la representación del ruido para las dos direcciones, casi en espejo. Esto se debe al hecho de que en este escenario, los semáforos mantienen la misma programación durante la simulación, y no hay diferencias de ciclos. Además, el tráfico ingresado en las simulaciones se ejecuta de la misma manera aleatoria en ambas direcciones en todos los escenarios. El efecto acumulado al cabo del suficiente tiempo de simulación es la simetría.

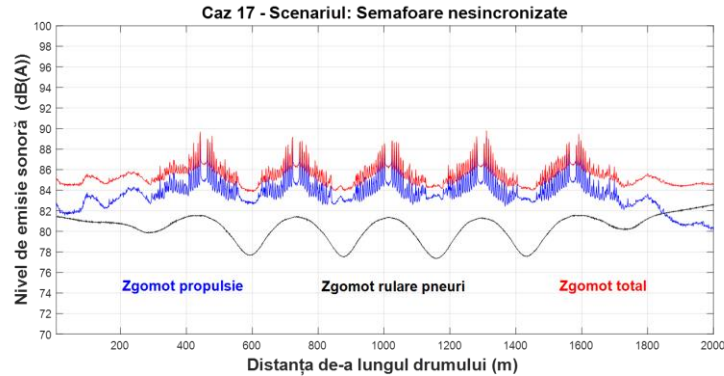


Figura Tesis 7.19-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 17, en toda la avenida en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR":  $x$ =distancia al largo de la avenida (m),  $y$ =potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura

En la Figura 7.19-b se puede ver que en este escenario el ruido total es alto en las intersecciones pero también en las secciones entre semáforos, debido a la congestión del tráfico que se crea, como se ha observado también durante la simulación del caso 17. En este escenario el ruido total llega a 90 dB(A). Además del alto número de automóviles, la introducción de un mayor número de autobuses también influye en el incremento del ruido.

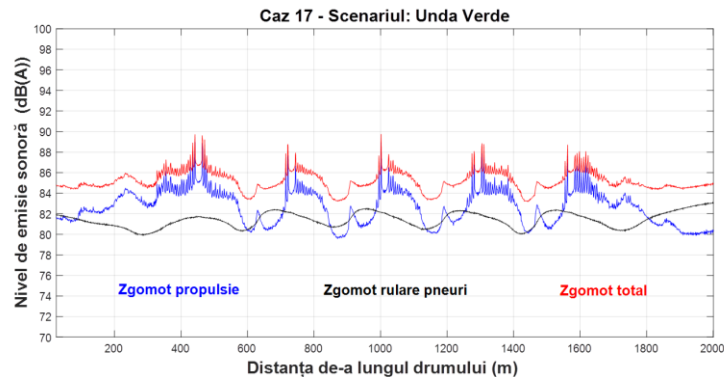


Figura Tesis 7.20-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 17, en toda la avenida en el escenario "ONDA VERDE":  $x$ =distancia al largo de la avenida (m),  $y$ =potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura

En la onda verde el ruido causado por las congestiones de tráfico también está presente, llegando a un nivel de 90 dBA en algunos semáforos (Figura Tesis 7.20-b). En cuanto en el escenario con prioridad para autobuses se nota una disminución del ruido porque el tráfico se hace fluido. Este aspecto se nota más en las secciones que están entre los semáforos (Figura Tesis 7.21-b).

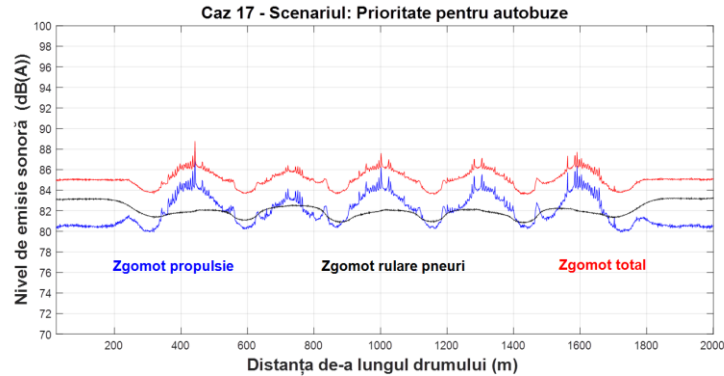


Figura Tesis 7.21-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 17, en toda la avenida en el escenario "PRIORIZACION PARA AUTOBUSES":  $x$ =distancia al largo de la avenida (m),  $y$ =potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

Tabla Tesis 7.11. Datos de entrada, caso 26.

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
26	950	950	60	60	NO

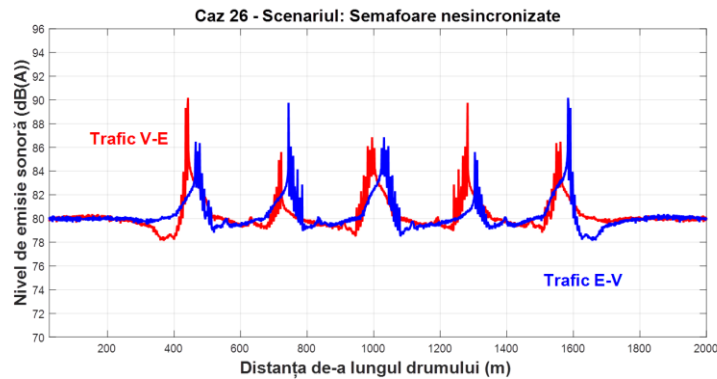


Figura Tesis 7.28-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 26, en cada dirección en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR":  $x$ =distancia al largo de la avenida (m),  $y$ =potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

En situación de tráfico bajo (950 veh/h, tabla tesis 7.11) se puede observar que en el escenario semáforos sin sincronizar, el ruido alcanza niveles hasta 90 dBA, en las dos direcciones (Figura Tesis 7.28-a), en comparación con 85 dB que consigue la onda verde (excepto el primer semáforo en la dirección O-E) (Figura Tesis 7.29-a).



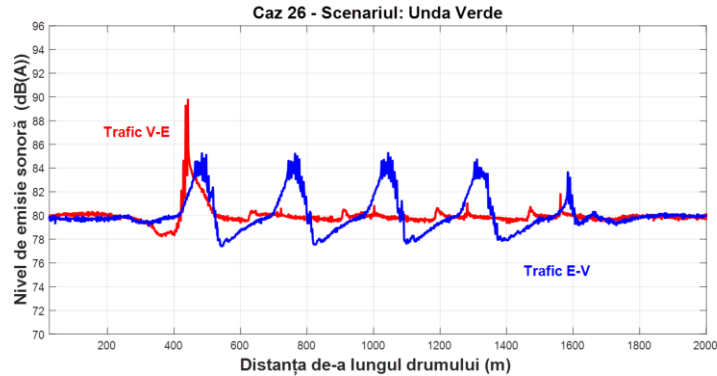


Figura Tesis 7.29-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 26, en cada dirección en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

Hay que remarcar el hecho de que la onda verde obtiene resultados muy buenos en términos de ruido en la dirección en el que esta implementada, 80 dBA en figura tesis 7.29-a (excepto el primer semáforo donde muchos coches tienen que parar), pero en la otra dirección la situación mucho más contaminante (84-85 dBA), por la onda roja que se genera.

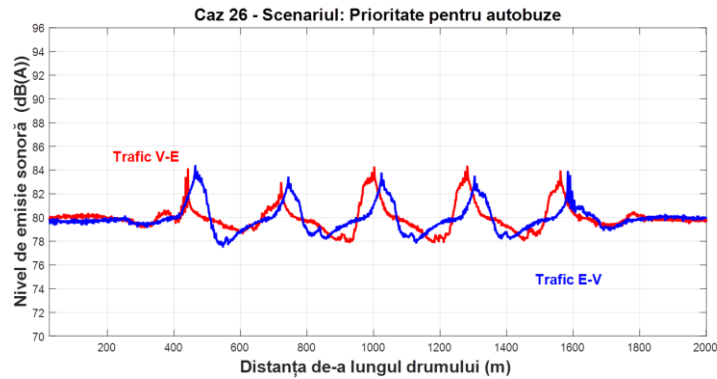


Figura Tesis 7.30-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 26, en cada dirección en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

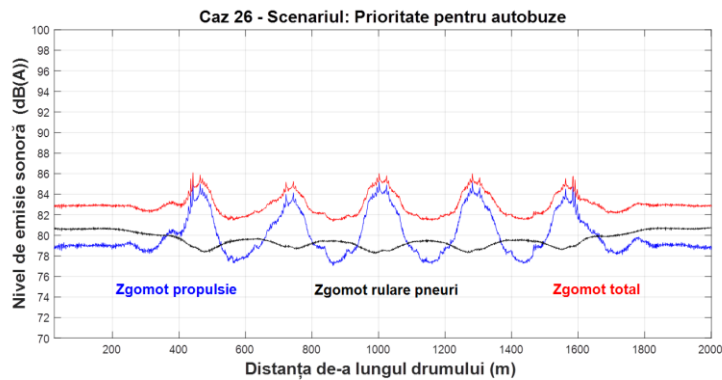


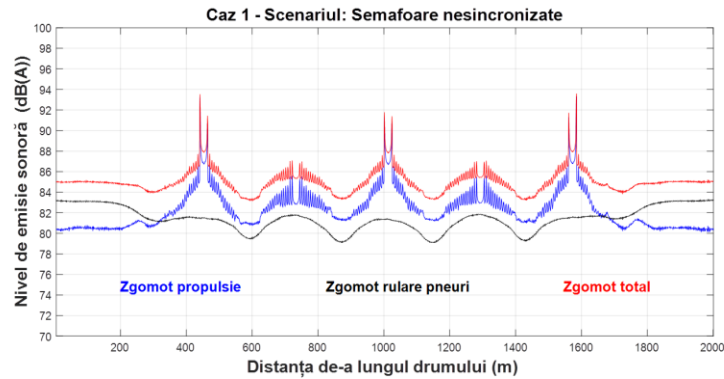
Figura Tesis 7.30-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 26, en toda la avenida en el escenario "PRIORIZACION PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

Analizando el resultado del escenario con priorización para autobuses, se observa que existe una situación de ruido muy equilibrado en este caso, entre las dos direcciones del tránsito, los niveles no son altos (como mucho 84 dB) (fig. Tesis 7.30-a). Esto es porque se consigue que el tráfico sea más fluido, independientemente de la dirección, cosa que se nota viendo la representación del ruido motor en la figura tesis 7.30-b.

**CONFIGURACION 2 - Cuando hay un carril bus pero no hay paradas de autobús**

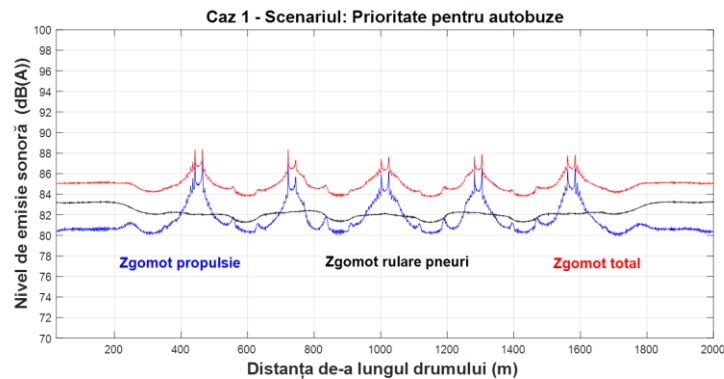
*Tabla Tesis 7.12. Datos de entrada, caso 1*

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
1	1.900	1.900	60	60	SI



*Figura Tesis 7.31-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 1, en toda la avenida en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.*

Analizando el escenario semáforos sin sincronizar, manteniendo los mismos parámetros de tráfico para cada una de las direcciones (tab. tesis 7.12), se observa que hay grandes variaciones comparando el ruido en cada semáforo (Figura Tesis 7.31-b), y que los niveles de ruido llegan hasta 93 dBA en algunas de ellas, comparando con 88 dBA registrados en el escenario con prioridad para los autobuses.



*Figura Tesis 7.33-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 1, en toda la avenida en el escenario "PRIORIZACION PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.*

Unos niveles de ruido más altos se observan también en el escenario onda verde, con un nivel máximo alcanzado en ciertos semáforos de 93 dB (al nivel del primer semáforo en la dirección O-E) (Figura tesis 7.32-a). Esto se debe al hecho de que la mayoría de los vehículos se detienen en este semáforo, mientras que los siguientes no tienen por qué hacerlo, ya que hay una sincronización de los semáforos en verde, lo que les permite circular casi sin interrupciones por toda la avenida.

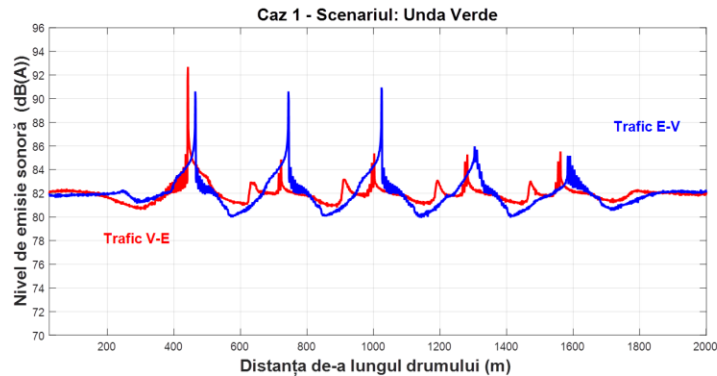


Figura Tesis 7.32-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 1, en cada dirección en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

Tabla Tesis 7.14. Datos de entrada, caso 5

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
5	1.900	1.900	60	120	SI

En este caso (Tabla Tesis 7.14), el nivel de ruido no tiende favorablemente de manera significativa en ningún escenario, debido a la congestión del tráfico que se forma en la avenida.

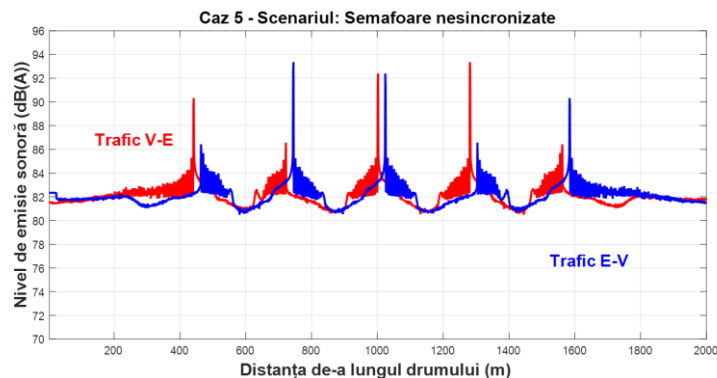


Figura Tesis 7.37-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 5, en cada dirección en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

Se puede ver que la peor situación en este caso es el escenario con semáforos sin sincronizar donde el nivel de ruido se eleva en ambas direcciones (hasta 93 dB(A)), mientras que en el escenario con onda verde, hay un nivel bajo de ruido en el sentido en el cual se introdujo, pero el nivel de ruido varía mucho en la dirección opuesta (92 dB(A), Figura Tesis 7.38-a).

En cuanto al escenario con prioridad para autobuses se observa que al crearse menos atasco, el ruido es más bajo que en los otros dos escenarios (Figura Tesis 7.39-a).

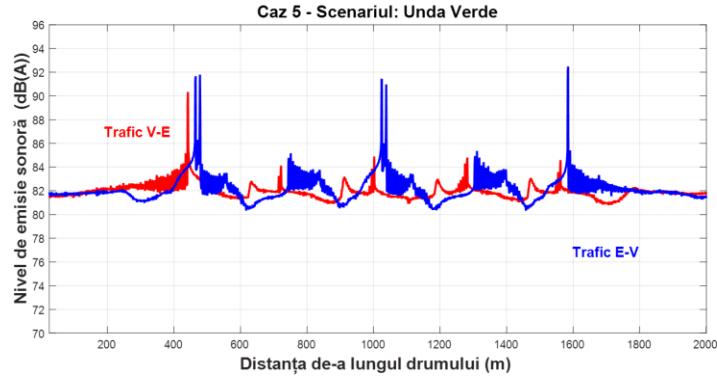


Figura Tesis 7.38-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 5, en cada dirección en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

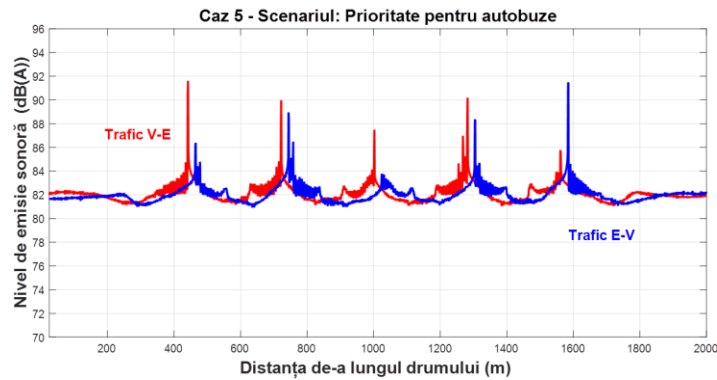


Figura Tesis 7.39-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 5, en cada dirección en el escenario "PRIORIDAD PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

### CONFIGURACION 3 - Cuando hay un carril bus pero no hay paradas de autobús

Cuando hay una demanda alta de tráfico (tabla tesis. 7.16) se observa que el nivel de ruido incrementa en toda la avenida.

Tabla Tesis 7.16. Datos de entrada, caso 49

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
49	1.900	1.900	60	60	NO

Con la eliminación del carril dedicado al tráfico de buses exclusivo (Tabla Tesis 7.16), el nivel de ruido aumenta en todos los escenarios (Figuras tesis 7.43- b, 7.44-b, 7.45-b) pero el incremento es menor en el escenario prioridad para autobuses.

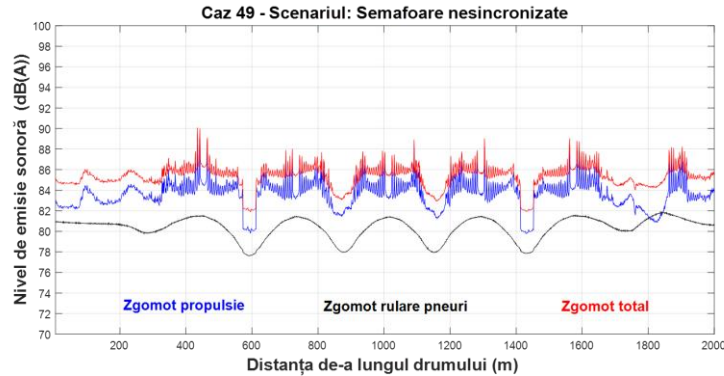


Figura Tesis 7.43-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 49, en toda la avenida en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR":  $x$ =distancia al largo de la avenida (m),  $y$ =potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

En estos gráficos, se observa la presencia de estaciones de autobuses (p. Ej., punto de 600 m en el gráfico de las Figuras tesis 7.43-a. 7.44-a, 7.45-a). También se observa que el nivel de ruido después de la estación de autobuses es alto, causado por la aceleración de los buses al salir de la parada.

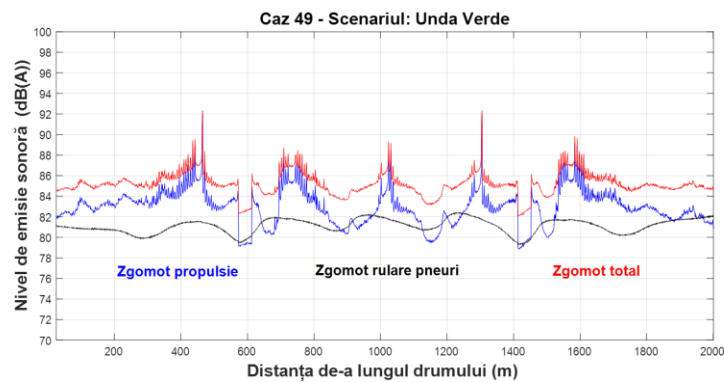


Figura Tesis 7.44-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 49, en toda la avenida en el escenario "ONDA VERDE":  $x$ =distancia al largo de la avenida (m),  $y$ =potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

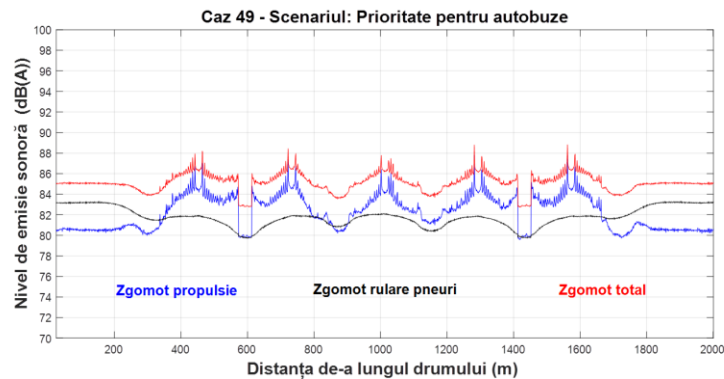


Figura Tesis 7.45-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 49, en toda la avenida en el escenario "PRIORIDAD PARA AUTOBUSES":  $x$ =distancia al largo de la avenida (m),  $y$ =potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

Una cosa digna de mención y positiva desde el punto de vista del ruido es que las diferencias entre los casos de prioridad para los autobuses que tienen un carril bus y aquellos sin carril bus (Figura Tesis 7.57-a) no son considerables, casi insignificantes para los niveles de ruido generados, estando comprendidos todos ellos entre 87-89 dBA.

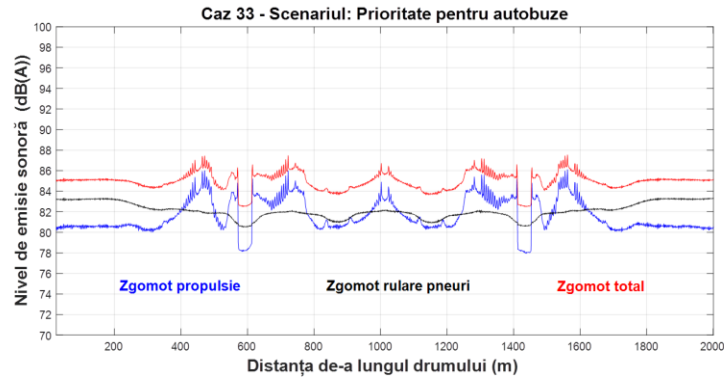


Figura Tesis 7.57-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 33, en toda la avenida en el escenario "PRIORIDAD PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

Tabla Tesis 7.17. Datos de entrada, caso 53.

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
53	1.900	1.900	60	120	NO

Se puede observar de nuevo que, en un ciclo prolongado de 120 segundos (tabla Tesis 7.17), se crea una gran congestión de tráfico, independientemente del escenario probado (7.46-b, 7.47-b, 7.48-b).

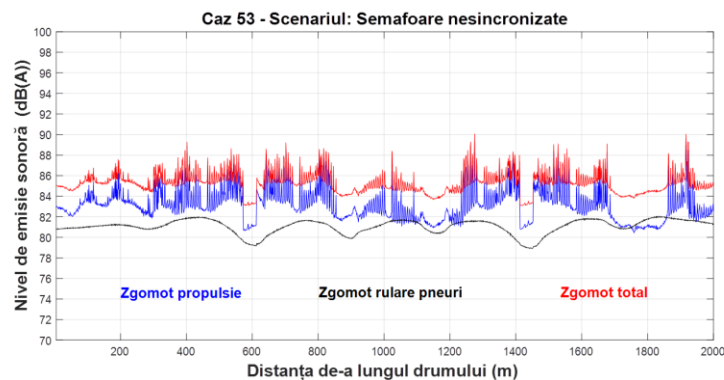


Figura Tesis 7.46-a. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 53, en toda la avenida en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

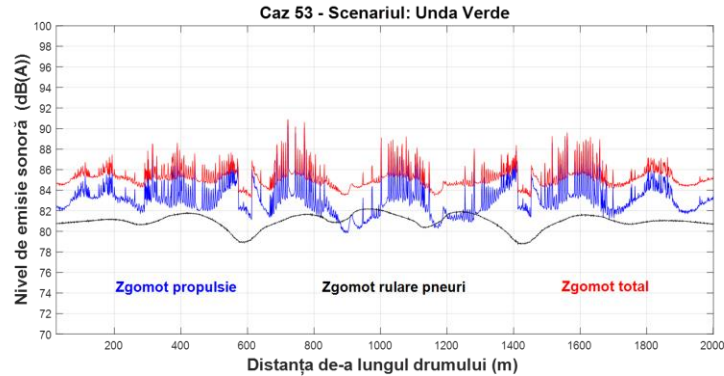


Figura Tesis 7.47-a. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 53, en toda la avenida en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

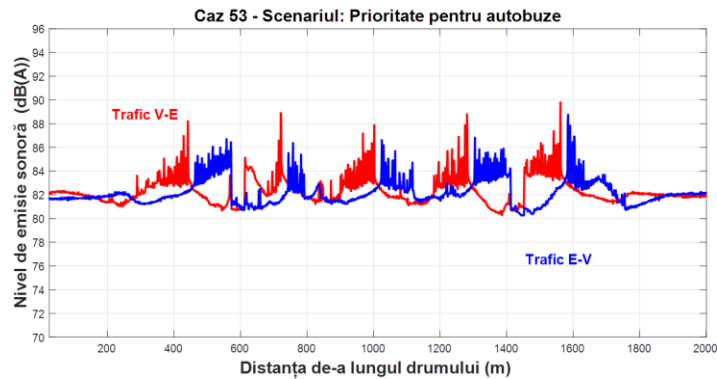


Figura Tesis 7.48-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 53, en toda la avenida en el escenario "PRIORIDAD PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura

La congestión del tráfico también se crea en el escenario prioridad para autobuses, como se ve en la Figura tesis 7.48-b, pero en él se observan mejoras (el ruido no está tan extendido, ni es tan intenso) en comparación con los otros dos escenarios.

Tabla Tesis 7.19. Datos de entrada, caso 62.

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
62	950	950	60	120	NO

Un ciclo de 120 segundos influye el nivel de ruido aunque el tráfico disminuya a la mitad, en todos los escenarios. Sigue formándose congestiones de tráfico, cuya influencia es mayor en la generación de ruido (Figura Tesis 7.52-b, 7.53-b, 7.54-b).

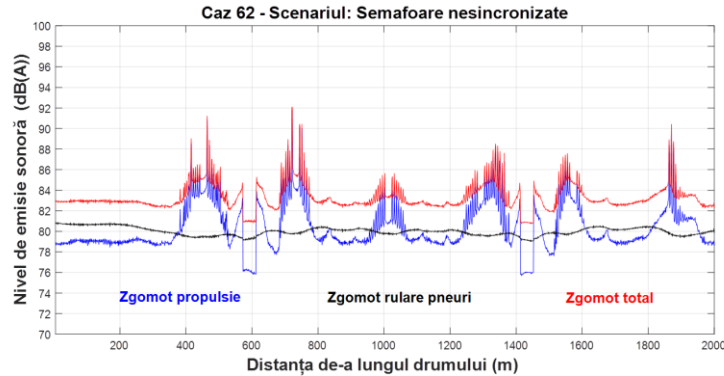


Figura Tesis 7.52-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 62, en toda la avenida en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

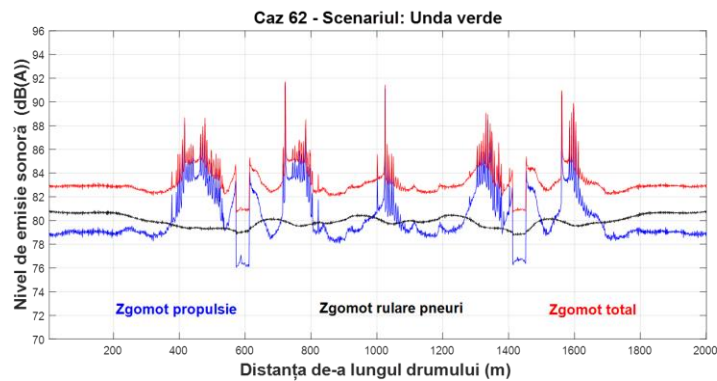


Figura Tesis 7.53-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 62, en toda la avenida en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

Se observa que en el escenario prioridad para autobuses el ruido no supera los 87 dB(A) y no hay una gran variación de una dirección a otra. Los autobuses, que tienen prioridad no tienen que detenerse en los semáforos (Figura Tesis 7.54-b), por lo que el ruido del tráfico no es tan alto como los otros dos escenarios.

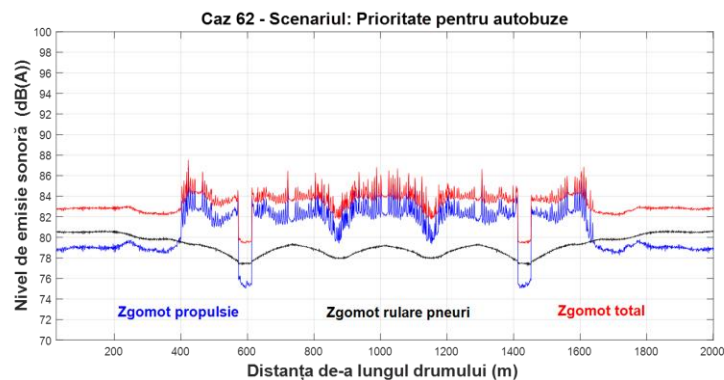


Figura Tesis 7.54-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 53, en toda la avenida en el escenario "PRIORIDAD PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.



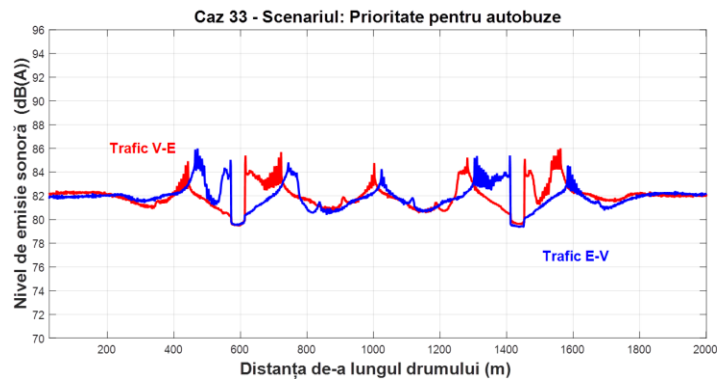
#### CONFIGURACION 4 - Cuando hay un carril bus y paradas de autobús

Cuando hay una demanda alta de tráfico (tab. Tesis 7.20) se observa que el nivel de ruido incrementa en toda la avenida.

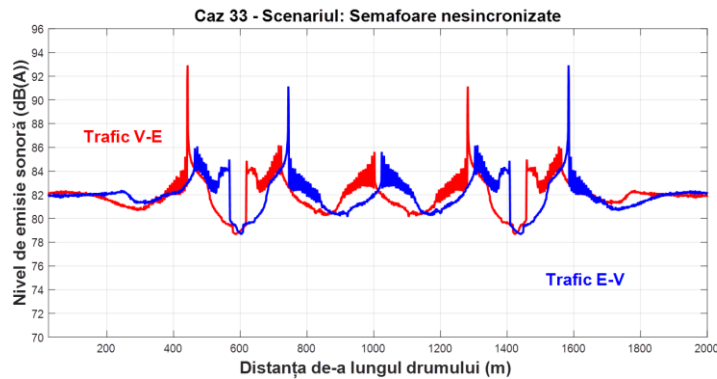
*Tabla Tesis 7.20. Datos de entrada, caso 33.*

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
33	1.900	1.900	60	60	SI

Tras introducir el carril bus (Tabla Tesis 7.20), se observa un mejor resultado en el escenario prioridad para autobuses con 86 dBA en los semáforos y 81 dBA entre ellos (Figura Tesis 7.57-a), mientras que en el caso de los escenarios con semáforos sin sincronizar (Figura Tesis 7.55-a) y onda verde (Figura Tesis 7.56-a), los niveles en los semáforos alcanzan 93 dBA.



*Figura Tesis 7.57-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 33, en cada dirección en el escenario "PRIORIDAD PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.*



*Figura Tesis 7.55-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 33, en cada dirección en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.*

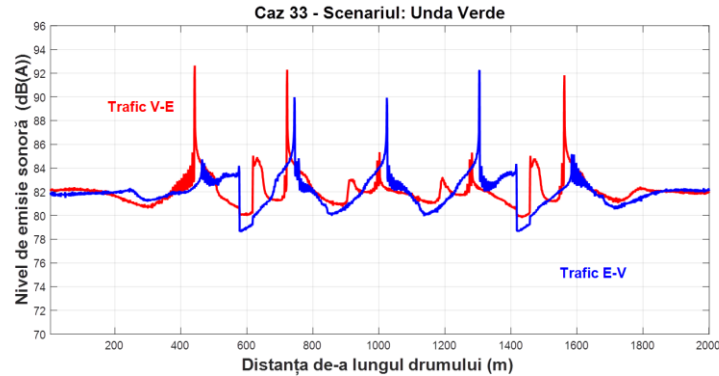


Figura Tesis 7.56.-a. La representación gráfica del nivel de ruido que resulta en el caso 33, en cada dirección en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido generado por el tráfico de O-E, azul=ruido generado por el tráfico de E-O.

Causado por las paradas de autobús se observa en este caso que hay autobuses que se ven obligados a detenerse en el primer semáforo que hay después de las paradas. De esa manera, el ruido se incrementa en esta sección de la avenida.

Tabla Tesis 7.21. Datos de entrada, caso 37

Datos de entrada					
Caso	Numero coches/h Dirección O-E	Numero coches/h Dirección E-O	Autobuses/h	Ciclo (s)	Carril bus
37	1.900	1.900	60	120	SI

La extensión del ciclo semafórico a 120 s, (tab. 7.21) lleva a la congestión del tráfico, pero comparando todos los escenarios, el que tiene prioridad para autobuses presenta mejores resultados en términos de ruido (Figura Tesis 7.60-b).

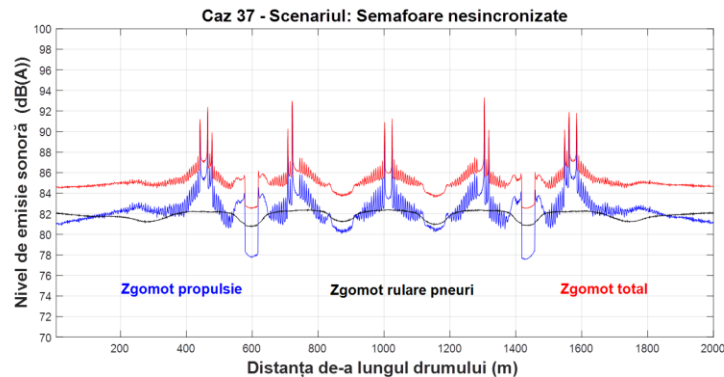


Figura Tesis 7.58-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 37, en toda la avenida en el escenario "SEMAFOROS SIN SINCRONIZAR": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

La congestión del tráfico causada por el ciclo largo (120 s) está presente en todas las configuraciones de tráfico y en todos los escenarios. Se nota la influencia de la congestión del tráfico en el ruido, especialmente en los escenarios con semáforos sin sincronizar y onda verde (el ruido llega a 93 dB(A)).

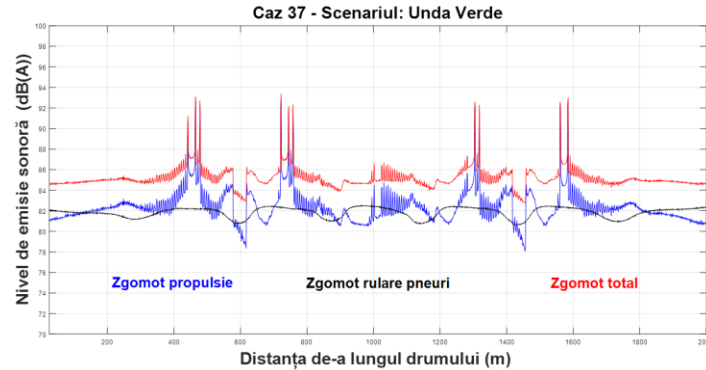


Figura Tesis 7.59-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 37, en toda la avenida en el escenario "ONDA VERDE": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

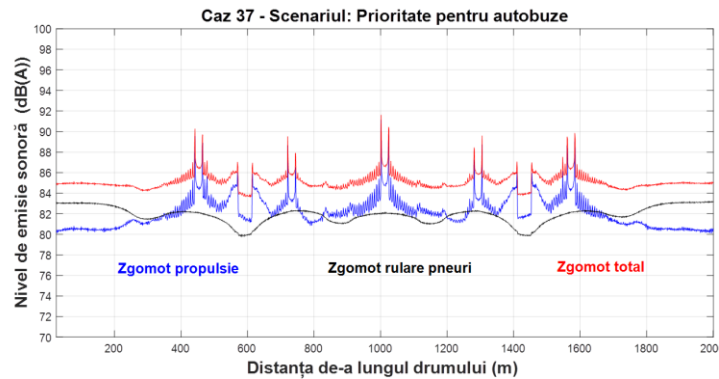


Figura Tesis 7.60-b. La representación gráfica del nivel de ruido total que resulta en el caso 37, en toda la avenida en el escenario "PRIORIDAD PARA AUTOBUSES": x=distancia al largo de la avenida (m), y=potencia sonora (dB(A)), en rojo= ruido total, azul=ruido propulsión, negro=ruido rodadura.

Resultados en sobre la movilidad del tráfico en los escenarios y configuraciones presentados para la avenida del Modelo 2.

**CONFIGURACION 1**

Para la dirección O-E (Figura tesis 7.67), en el caso de los coches, el mejor resultado se obtiene en el escenario onda verde, con un promedio de 215 s, para el viaje de 2 km, seguido por el escenario de prioridad para los autobuses, con 229 s las cosas son diferentes en la dirección E-O, donde el escenario de prioridad para los autobuses ha conseguido mejores resultados para coches y autobuses, seguido por el escenario de semáforo no sincronizado.

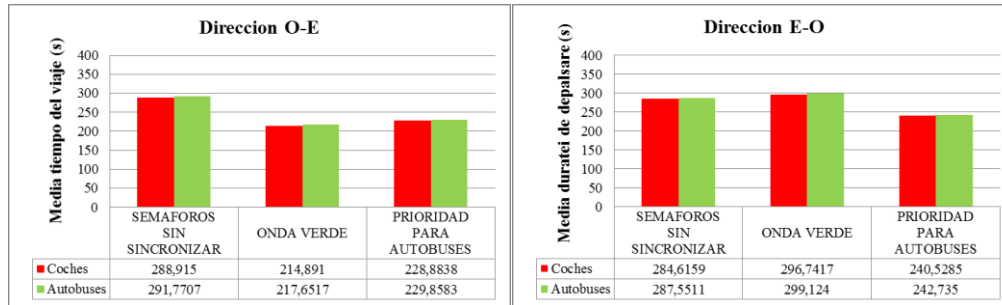


Figura Tesis 7.67. El tiempo de viaje de los vehículos resultado en la Configuración 1 (para cada dirección).

### CONFIGURACION 2

En la Configuración 2 se introduce un carril bus exclusivo. Esto se refleja claramente en los resultados de la movilidad del tráfico, lo que lleva a una disminución en el tiempo de viaje tanto para los autobuses como para los automóviles en todos los escenarios (Figura tesis 7.68).

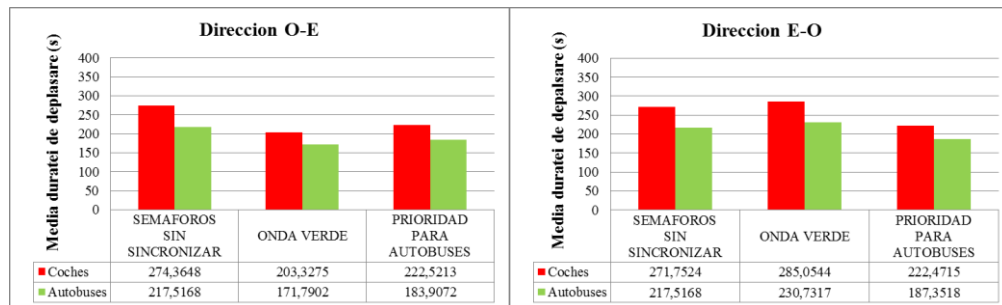


Figura Tesis 7.68. El tiempo de viaje de los vehículos resultado en la Configuración 2 (para cada dirección).

En la dirección O-E, el escenario onda verde logra los mejores resultados, con un promedio de 203 s para los coches y 172 s para los autobuses, seguido por el escenario con priorización con un promedio de 223 s para los coches y 184 segundos para los autobuses. Se observa que hay diferencias significantes entre los resultados de la dirección O-E y E-O en el escenario onda verde: los coches en la dirección E-O tienen un promedio de 285 s y para los autobuses 231 s.

Para el tráfico E-O, los mejores resultados se registran en el escenario con prioridad con un promedio de 222 segundos para coches y 187 segundos para autobuses, seguidos por el escenario con semáforos sin sincronizar con un promedio de 272 segundos para coches y 218 segundos para autobuses. Los resultados en el escenario con prioridad son bastante equilibrados mirando los dos sentidos de circulación.

### CONFIGURACION 3

La eliminación del carril bus y la introducción de las paradas de autobuses conducen a un aumento significativo en el tiempo de viaje de los vehículos, especialmente para autobuses, con valores promedio superiores a 320 segundos en todos los escenarios, en ambos sentidos (Figura Tesis 7.69).

Los valores negativos para ambos sentidos y categorías de vehículos se pueden ver en el escenario con semáforos sin sincronizar con un promedio de 294 s para los coches en dirección O-E y 295 s en E-O, y para auto-buses 377 s para O-E y 379 s para E-O. Los mejores resultados para los automóviles son el escenario onda verde en dirección O-E con un promedio de 225 segundos, pero para los autobuses las cosas son diferentes. En la dirección E-O, onda verde registra los resultados más débiles, con un promedio de 303 segundos, para los coches y 386. El escenario con priorización para autobuses sigue siendo el más equilibrado del punto de vista del tiempo de viaje.

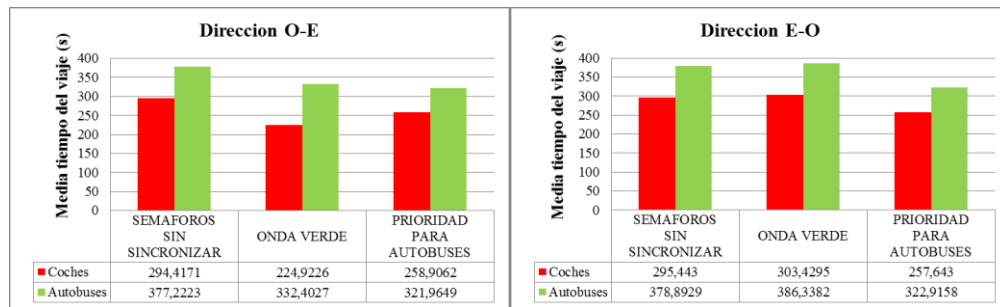


Figura Tesis 7.69. El tiempo de viaje de los vehículos resultado en la Configuración 3 (para cada dirección).

#### CONFIGURACION 4

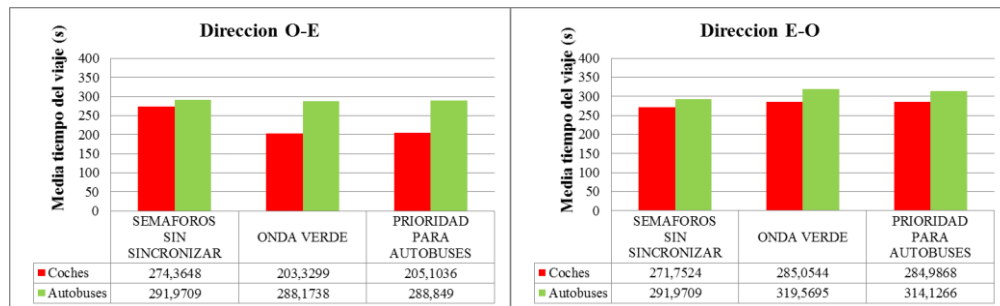


Figura Tesis 7.70. El tiempo de viaje de los vehículos resultado en la Configuración 4 (para cada dirección).

En la dirección de circulación O-E, los peores resultados se obtuvieron en el escenario con semáforos sin sincronizar con un promedio de 274 s para los coches y 292 s para los autobuses. En el E-O se observa que el escenario onda verde obtiene los peores resultados, con un promedio de 285 s para los coches y 320 s para los autobuses. Se observa que los resultados obtenidos en el escenario onda verde son muy similares a los obtenidos en el escenario con priorización en ambas direcciones de circulación (Figura Tesis 7.70).

### 6.3. Resultados de la campaña de medidas. Ruido

Del trabajo efectuado en el campo se ha generado un registro de 1 hora de duración con valores de ruido medidos de 1 segundo en 1 segundo. Este registro de datos LAeq es el que aparece a continuación en la figura tesis 8.20.

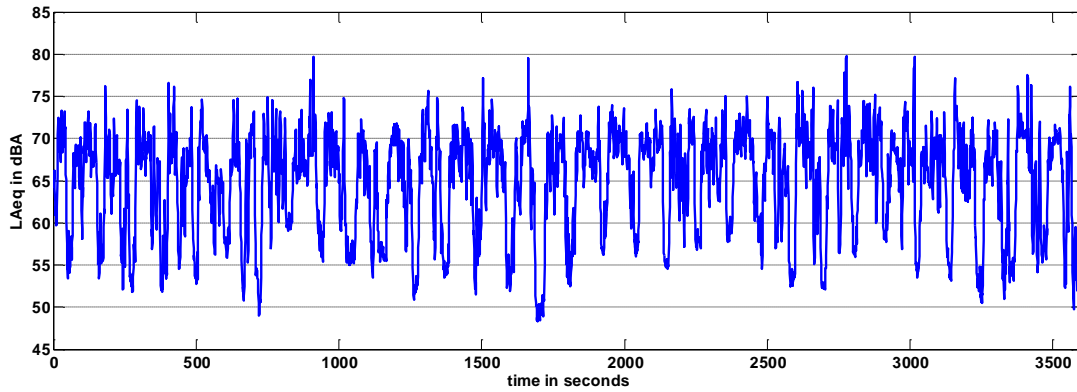


Figura tesis 8.20. Medidas de ruido en el exterior una vez corregido las anomalías producidas por ambulancias, sirenas, motocicletas y otros eventos que no se pueden simular en VISSIM:

Finalmente las medidas tienen una distribución que se puede observar en la figura tesis 8.21.

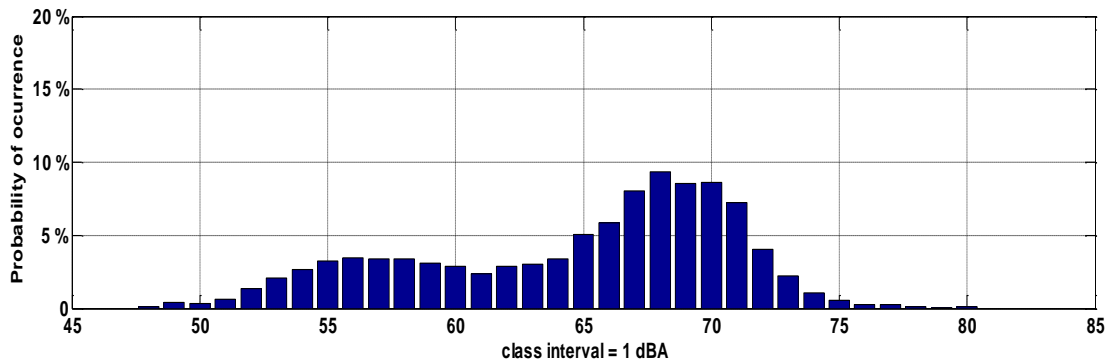


Figura tesis 8.21. Distribución de las medidas LAeq realizadas en la calle una vez corregidas por anomalías.

Se puede concluir que el LAeq total representado tanto en la figura tesis 8.20 como en la figura tesis 8.21 es de 67,9 dBA, media aritmética 64,76, dBA desviación estándar = 6,12 dBA. Esta información se puede completar con los valores estadísticos acumulados registrados para el tiempo total de medida: LAFmax=85,6 dB y LAF min=47,6 dB. L1=74,6 dB, L5=72,4 dB, L10 = 71,3 dB, L50 = 66,4 dB, L90 = 55,2 dB, L95 = 53,5 dB y L99 = 50,6 dB.

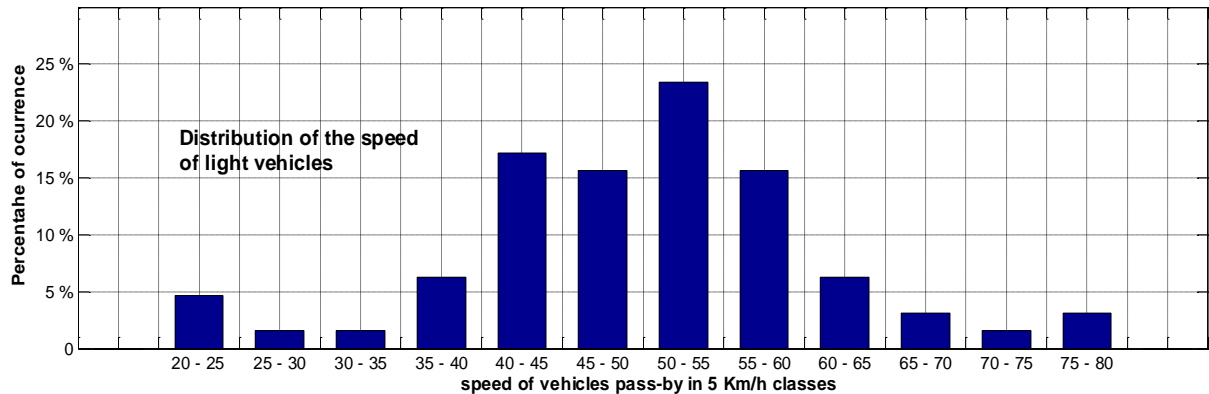
### 6.4. Resultados de la campaña de medidas. Variables del tráfico

Junto con este registro y de manera sincronizada se han recogido datos del número de vehículos, su posición en la vía y su velocidad. A lo largo de la hora tenemos la densidad de tráfico recogida en la tabla tesis 8.22:

*Tabla Tesis 8.22. Datos de tráfico considerados en las medidas y en las simulaciones. En ellos se ha eliminado: motos, camiones y vehículos especiales. También se ha eliminado una ambulancia con su sirena (14 segundos) y otros eventos que no interesan para el análisis.*

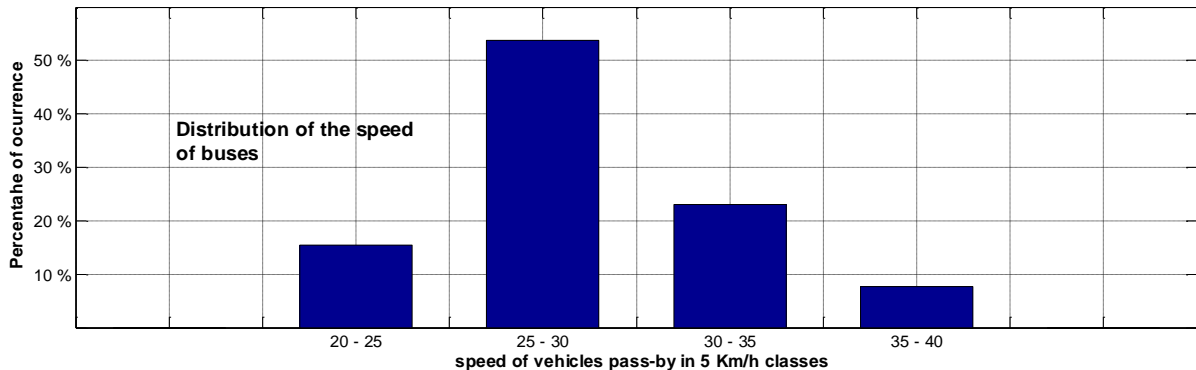
	coches	autobuses
Dirección N-S (más alejada de cámara y sonómetros)	814	20
Dirección S-N (más cercana a la cámara y sonómetros)	770	20

La distribución de la velocidad de los vehículos ligeros se puede apreciar en la figura tesis 8.25



*Figura Tesis 8.25. Distribución de velocidades deseadas durante el tiempo de ensayo (velocidad de crucero) de los coches (vehículos ligeros) durante el tiempo de ensayo*

La distribución de la velocidad de los autobuses se puede apreciar en la figura tesis 8.26.

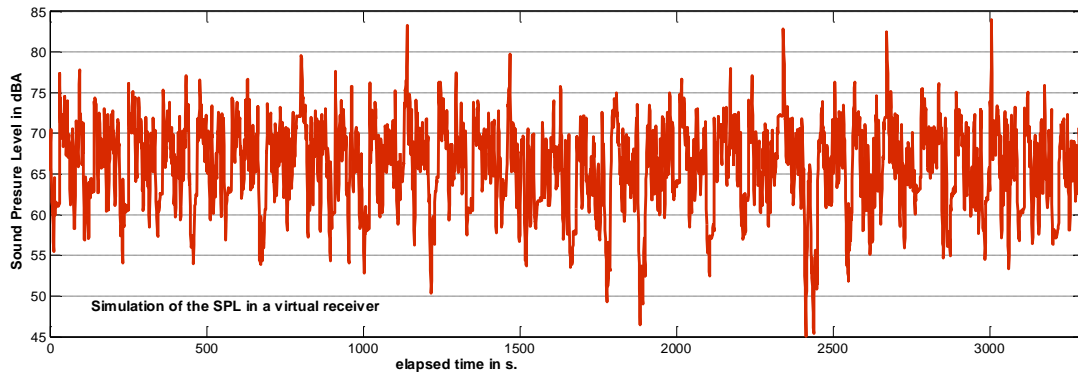


*Figura 8.26. Distribución de velocidades deseadas durante el tiempo de ensayo (velocidad de crucero) para los autobuses durante el tiempo de ensayo.*

### **6.5. Resultados del método de simulación dinámica del ruido de tráfico**

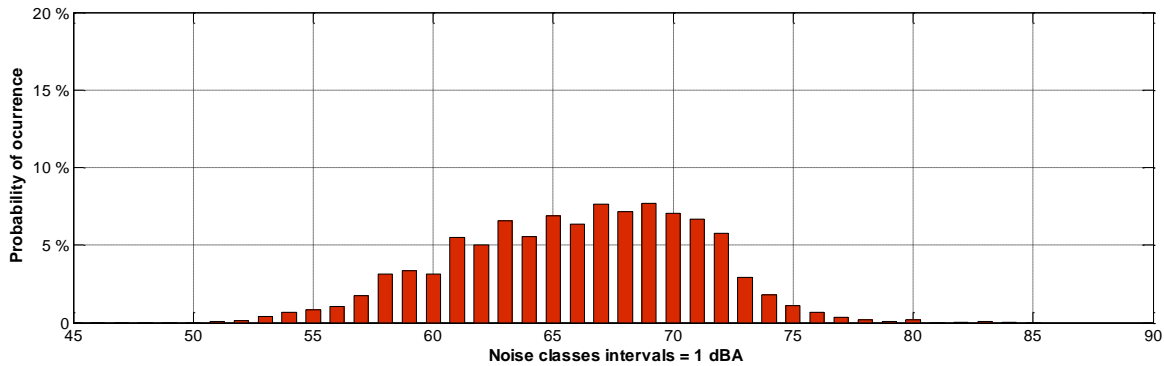
Se ha generado La serie temporal mostrada en la gráfica tesis 8.77 tras aplicar el método de simulación y finalmente usar una script en MATLAB que nos genera los datos de niveles acústicos

registrados en un sonómetro virtual que mimetiza la situación real, tal como se registraron y se recogen en los apartados 6.3 y 6.4 de este resumen de tesis.



*Gráfica tesis 8.77. 3300 valores de LAeq,T=1s registrados por el sonómetro virtual*

El valor máximo procedente de la simulación es de LAeq=84; mientras que el LAeq,T=3300 s = 68.6 dBA.



*Figura tesis 8.78. Distribución de los valores recogidos en la gráfica 8.77. LAeq=68,6 dBA, media aritmética 65,77, desviación estándar=5,32 dB*

### **6.6. Tratamiento y análisis del ruido de tráfico total**

El problema de analizar la distribución representada en la figura tesis 8.78 en contraste con la figura tesis 8.21, es debido al problema del ruido de fondo. Una vez que de la serie medida se han eliminado los eventos sonoros ruidosos (algunos de ellos alcanzan de LAeq=102,9 dBA) que son debidos a sirenas de ambulancias y motocicletas de gran cilindrada, nos queda una distribución (Figura tesis 8.21) que tiene una forma asimétrica con 2 jorobas. Esta forma nos da a entender que hay al menos dos fuentes de ruido en la zona y que en realidad tenemos dos distribuciones mezcladas. La primera fuente y más importante provocada por el tráfico de la avenida a su paso por el punto de medida, a la que visualmente podríamos asignar la moda en unos 68 dB. La segunda, el ruido de fondo, es el ruido causado en los momentos en los que por diversas causas el ruido principal se apaga y no pierde importancia. Entonces aparecen ruidos de diversas causas, ruido de la naturaleza, los peatones y el ruido causado por el tráfico lejano de otras avenidas y de la propia avenida (que hemos despreciado en la simulación), etc. Este empieza a destacar en



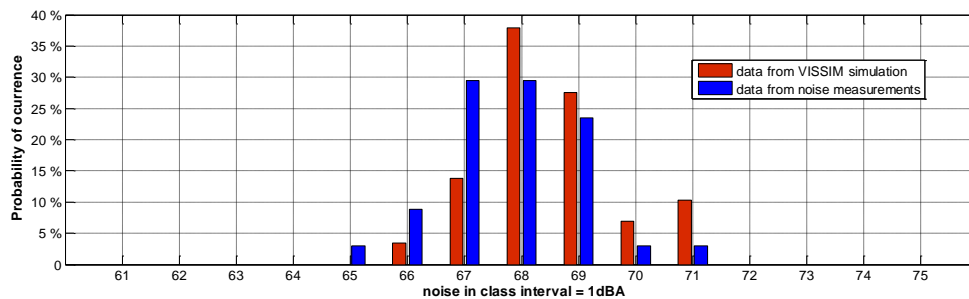
situaciones especiales cuando no hay tráfico en la zona cercana al sonómetro, o, por ejemplo, cuando el semáforo está en rojo, con los vehículos parados.

Substraer energéticamente el ruido de fondo de la serie de mediciones de ruido “total” es complicado precisamente por la dispersión del mismo. En este último caso tenemos una zona en la que la cola izquierda del ruido del tráfico se mezcla con la cola derecha del ruido de fondo, haciendo que la substracción genere incertidumbre en esta área de decisión.

Se han estimado varias alternativas, algunas de las cuales se han valorado como más correctas que otras. El proceso que hemos empleado ha pasado por los siguientes pasos

1. Se ha dividido ambas series temporales (simulada y real) en intervalos de 110 s, que coinciden con el ciclo semafórico rojo-verde-amarillo-rojo, de tal manera que podemos extraer tanto el LAeq, para cada uno de los ciclos.
2. El ciclo de paso de la ambulancia se ha eliminado de la serie real medida, no solo por la anomalía detectada, sino porque el tráfico se ve alterado y el flujo normal de vehículos alterado por la presencia de la ambulancia.
3. Se ha sumado energéticamente a la serie de datos simulados 50 dB, que se corresponde con el nivel LAeq más bajo y prolongado de ruido de fondo medido durante el periodo de medida. Así eliminamos también la presencia de ceros.
4. Se promedia energéticamente los datos de ruido dentro de cada ciclo

El procesado al que se ha sometido a los datos convierten a estos en un mejor estimador del ruido provocado por el tráfico y mucho más robusto ante la presencia de ruido de fondo. En la nueva serie de datos el ruido de fondo es despreciable energéticamente respecto al LAeq del flujo de tráfico estimado para cada uno de estos ciclos. Tras el procesamiento de los datos, en la figura tesis 8.80 se aprecia la distribución de las nuevas series.



*Figura tesis 8.80. Distribución de los LAeq, T=110 sincronizados con el semáforo tanto para la serie simulada (rojo) como para la serie medida (en azul) corregida por las anomalías.*

Se ha hecho un test de normalidad y se ha visto con una confianza del 95% que las distribuciones no son normales, por lo que se ejecutan test no-paramétricos.

Los contrastes que se presentan a continuación permiten comprobar si las 2 muestras (medida y simulación) proceden de una misma población, a través del análisis de sus distribuciones. Algunas

de las pruebas que pueden realizarse con el programa SPSS son: la prueba U de Mann-Whitney, la prueba Z de Kolmogorov-Smirnov y la prueba de rachas de Wald-Wolfowitz.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para dos muestras independientes Resultados SPSS (tabla tesis 8.46).

Variable	GRUPO	N
LAeq, T=110 s	Simulacion	29
	Medidas	34
	Total	63

El contraste de Kolmogorov-Smirnov proporciona los siguientes resultados que ponen de manifiesto que no existen diferencias significativas entre las puntuaciones asignadas, ya que el nivel de significación correspondiente al valor del estadístico de prueba es 0,163 (tabla tesis 8.47).

		Variable LAeq, T=110s
Máximas diferencias extremas	Absoluta	0,283
	Positivo	0,283
	Negativo	-0,029
Z de Kolmogorov-Smirnov		1,119
Sig. asintótica (bilateral)		0,163
a. Variable de agrupación: GRUPO		

Z se encuentra en la región de aceptación. Ubicándose dentro de la región +1,96 y -1,96 para ALPHA= 0,05. Entonces en este caso se decide no rechazar Ho. Con un p-valor > 0,1 no se puede rechazar Ho. Por tanto podemos afirmar que ambas series de datos pertenecen al mismo proceso y afirmamos con un 95 % de nivel de significación que la serie simulada predice perfectamente los resultados obtenidos directamente de las medidas de ruido ambiental.

Prueba de Mann-Whitney para dos muestras independientes Resultados SPSS (tabla tesis 8.48).

Variable	GRUPO	N	Rango promedio	Suma de rangos
LAeq, T=110 s	1 Simulacion	29	36,38	1055,00
	2 Medidas	34	28,26	961,00
	Total	63		

Como puede observarse, el rango medio correspondiente a las observaciones procedentes de la muestra "1 Simulación" es prácticamente igual al correspondiente a las observaciones de la muestra "2 Medidas", lo cual es un indicio de que ninguna de las dos muestras está sistemáticamente asociada a valores grandes (ni pequeños) de los rangos, y, en consecuencia,

parece que no hay diferencias significativas entre las puntuaciones asignadas por estos dos colectivos.

*Tabla tesis 8.49. Estadísticos de prueba<sup>a</sup>*

	Variable LAeq, T=110s
U de Mann-Whitney	366,000
W de Wilcoxon	961,000
Z	-1,752
Sig. asintótica (bilateral)	0,080
a. Variable de agrupación: GRUPO	

El valor del estadístico U es 366 (tabla tesis 8.49). Aproximando su distribución de probabilidad a la normal obtenemos un valor estandarizado igual a -1,752, concluyendo que no se puede rechazar la hipótesis nula para los niveles de significación habituales. Z se encuentra en la región de aceptación. Ubicándose dentro de la región +1,96 y -1.96 para ALPHA = 0,05; entonces en este caso se decide no rechazar Ho. Un p-valor < 0,1 pero p-valor es > 0,05 podría haber ambigüedad. Pero no se rechaza Ho. Podemos afirmar que ambas series de datos pertenecen al mismo proceso y afirmamos con un 95% de nivel de significación que la serie simulada predice perfectamente los resultados obtenidos directamente de las medidas de ruido ambiental.

Prueba de rachas de Wald-Wolfowitz para dos muestras independientes Resultados SPSS (tabla tesis 8.50).

*Tabla tesis 8.50. Frecuencias*

Variable	GRUPO	N
LAeq, T=110 s	1 - Simulación	29
	2 - Medidas	34
	Total	63

*Tabla tesis 8.51. Estadísticos de prueba<sup>a,b</sup>*

Variable	GRUPO	Número de rachas	Z	Sig asintótica unilateral 0,885
LAeq, T=110 s	Prueba de Wald-Wolfowitz	37c	1.201	0,885
	Variable de agrupación: GRUPO			
	No se han encontrado empates entre grupos.			

Aunque para realizar este contraste es suficiente que las variables se midan en una escala ordinal, la presencia de empates, que este tipo de escala favorece, afecta negativamente a la fiabilidad del contraste y en tal caso es preferible utilizar la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Afortunadamente no se han encontrado empates en el grupo. Z se encuentra en la región de aceptación (tabla tesis

8.51). Ubicándose dentro de la región 1,96 - -1.96 para  $\alpha = 0,05$ ; entonces en este caso se decide no rechazar  $H_0$ .

El p-valor es  $> 0,1$  y no se rechaza  $H_0$ . Podemos afirmar que ambas series de datos pertenecen al mismo proceso y afirmamos con un 95% de nivel de significación que la serie simulada predice perfectamente los resultados obtenidos directamente de las medidas de ruido ambiental.

### **6.7. Análisis del ruido emitido por el tráfico de autobuses**

El grupo total de 20 autobuses medidos durante su paso por el carril 1, muestra una media de  $\text{mean}=74.46$  dB y una desviación estándar de  $\text{STD}=3.26$  dB. Los resultados revelan que los autobuses más ruidosos son los Mercedes Conecto 0345 tienen una media de  $\text{mean}=76.41$  dBA de  $L_{Amax}$  y una desviación estándar de  $\text{STD}=3.14$  dBA. Los IRISBUS muestran una media  $\text{mean}=73.94$  dB y una desviación típica de  $\text{STD}=2,58$  dBA. El número de autobuses IVECO analizados es muy pequeño para llegar a afirmar que son los más silenciosos, aunque los resultados de la media  $\text{mean}=69.1$  dB proporcionados por los 3 elementos y la desviación estándar de  $\text{STD}=1,78$  dB, así parecen afirmarlo.

Planteamos un test ANOVA de una sola dirección. Se comprueba la homogeneidad de las varianzas mediante un test de Levene ( $p>0.05$ ) con el fin de saber si se presentó o no igualdad de varianzas de los grupos de comparación, mediante la formulación (tabla tesis 8.53).

*Tabla Tesis 8.53. Prueba de homogeneidad de varianzas*

L <sub>Aw</sub>			
Estadístico de Levene	gl1	gl2	Sig.
0,455	4	33	0,768

*Tabla Tesis 8.54. Test ANOVA*

L <sub>Aw</sub>					
	Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Entre grupos	132,263	4	33,066	5,325	0,002
Dentro de grupos	204,908	33	6,209		
Total	337,171	37			

Dicho test ANOVA indica como efecto principal estadísticamente significativo entre-sujetos  $F = 5,325$ ,  $p = 0.002$ . Si el valor de  $p$  es menor que 0.05, se considera significativo desde el punto de vista estadístico y como en este caso  $p=0.002 < 0.05$  (tabla tesis 8.54), se deduce que se presentaron diferencias estadísticamente significativas entre las medias de los dos grupos comparados y permite rechazar la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna, es decir: No en todos los casos el ruido emitido por los diferentes autobuses es el mismo

Una prueba post hoc de Tukey (tabla tesis 8.55) mostró que los vehículos IVECO son significativamente menos ruidosos que los vehículos Mercedes ( $p=0,001$ ), que los vehículos ISUZU ( $p=0,021$ ) y que la simulación ( $p=0,028$ ). Pero esta diferencia no es significativa para establecer tal conclusión respecto a los Irisbus ( $p=0,091$ ).

*Tabla Tesis 8.55. Pruebas Post Hoc, pruebas múltiples*

Variable dependiente: LAw						
HSD Tukey						
(I) BUS	(J) BUS	Diferencia de medias (I-J)	Error estándar	Sig.	Intervalo de confianza al 95%	
					Límite inferior	Límite superior
Mercedes	Irisbus	2,90000	1,24593	,162	-,6936	6,4936
	Iveco	7,31250*	1,68699	,001	2,4467	12,1783
	Isuzu	-,08750	1,96998	1,000	-5,7696	5,5946
	Simul-42	2,43603	1,06837	,177	-,6455	5,5176
Irisbus	Mercedes	-2,90000	1,24593	,162	-6,4936	,6936
	Iveco	4,41250	1,68699	,091	-,4533	9,2783
	Isuzu	-2,98750	1,96998	,559	-8,6696	2,6946
	Simul-42	-,46397	1,06837	,992	-3,5455	2,6176
Iveco	Mercedes	-7,31250*	1,68699	,001	-12,1783	-2,4467
	Irisbus	-4,41250	1,68699	,091	-9,2783	,4533
	Isuzu	-7,40000*	2,27474	,021	-13,9611	-,8389
	Simul-42	-4,87647*	1,56046	,028	-9,3773	-,3756
Isuzu	Mercedes	,08750	1,96998	1,000	-5,5946	5,7696
	Irisbus	2,98750	1,96998	,559	-2,6946	8,6696
	Iveco	7,40000*	2,27474	,021	,8389	13,9611
	Simul-42	2,52353	1,86277	,660	-2,8493	7,8964
Simul-42	Mercedes	-2,43603	1,06837	,177	-5,5176	,6455
	Irisbus	,46397	1,06837	,992	-2,6176	3,5455
	Iveco	4,87647*	1,56046	,028	,3756	9,3773
	Isuzu	-2,52353	1,86277	,660	-7,8964	2,8493

\*. La diferencia de medias es significativa en el nivel 0.05.

Se ha usado la herramienta MATLAB para corroborar los análisis realizados en SPSS, llegando a conclusiones idénticas.

## 7. CONCLUSIONES MÁS SIGNIFICATIVAS

### 7.1. Conclusiones sobre la verificación experimental de la teoría abordada

1. Se confirma que los modelos de micro simulación son muy útiles porque incluyen en el análisis detallado del ruido ambiental ya que permite un conocimiento profundo de las causas, y por tanto proporciona una herramienta muy potente para el análisis de las propuestas de planes de acción contra el de ruido.

Escenario **cruce aislado controlado por semáforos**. Respecto a la incorporación de un sistema de priorización de autobuses en una intersección aislada controlada por semáforos, se puede apreciar que:

2. Se obtienen buenos resultados de reducción de ruido, independientemente de las variaciones introducidas en los siguientes parámetros de tráfico:
  - Duración del ciclo semafórico.
  - volumen de tráfico.
  - número de autobuses.
3. No se aprecian variaciones significativas en el ruido emitido cuando la priorización se aplica sólo en el brazo principal del cruce (escenario 2); respecto a los casos en los que se aplica a la rama principal del cruce y a las secundarias (escenario 3).
4. Cuando la priorización del paso de autobuses se aplica solo a la vía principal, no se aprecia influencias negativas significativas sobre el ruido emitido en la vía secundaria de la intersección.

Escenario **BSP-GPS programado a lo largo de una arteria de la ciudad**. La incorporación de un sistema de priorización de autobuses en una avenida cuyas intersecciones están controlado por un sistema semafórico **BSP-GPS** es una medida positiva de mitigación del ruido, por las siguientes causas:

5. El número y la magnitud de los eventos de ruido así como su distribución a lo largo de la avenida, disminuyen;
6. Es posible alcanzar un compromiso de disminución del ruido y cumplimiento de horarios del servicio de autobuses sin la necesidad de incorporar carriles-bus exclusivo. Esto es una buena noticia para aquellas áreas urbanas que no tienen espacio suficiente en las infraestructuras para habilitar o construir un carril de autobuses.

Escenario **Onda Verde programada a lo largo de una arteria de la ciudad**. Respecto al control de dicha avenida por una onda verde se puede afirmar:

7. La onda verde muestra buenos resultados en términos de ruido en la dirección en la que se introduce, lo que no sucede en la dirección opuesta al tráfico, donde el ruido aumenta considerablemente, por la onda roja que se crea;
8. Mientras que BSP-GPS muestra buenos de emisión de ruido en ambas direcciones.

Por todo ello se puede afirmar

**La introducción de un sistema de priorización de autobuses logra resultados positivos en materia de ruido y cumplimientos de horarios del servicio de autobuses urbano y sin impacto negativo en la movilidad del conjunto del tráfico. Los beneficios se alcanzan sin la creación de carriles exclusivos para autobuses. A nivel de viabilidad técnica los requisitos son muy sencillos y pasan por saber con mucha precisión la posición de los autobuses en cada momento. Esto se puede conseguir con la incorporación de un sensor GPS en los autobuses y sistemas de detección en los semáforos.**

## **7.2. Conclusiones sobre la validación de la metodología empleada en la tesis**

Los factores locales de cada país deben ser validados antes de su introducción en el modelo de tráfico VISSIM, ya que su importancia es mucho mayor que otros factores locales de la flota de vehículos que puedan ser incluidos en el modelo CNOSSOS. Por tanto, aspectos como: el nivel de agresividad de los conductores, el tiempo de respuesta, la distancia de seguridad entre vehículos, los comportamientos para adelantar vehículos tanto por la izquierda como por la derecha y sobre todo la velocidad de cruce (la que percibe el conductor como velocidad deseada) son muy importantes para trasladar los resultados de los modelos de un país a otro.

9. Se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que una vez calibrado el modelo de tráfico en VISSIM para la ciudad de Bacau en las condiciones reales de la avenida durante el tiempo de ensayo, las medidas de ruido ambiental LAeq del tráfico total que pasa por la avenida y los datos simulados de ruido LAeq del tráfico total de la misma avenida generadas con el método de simulación dinámica de ruido de tráfico, son iguales.
10. Se puede afirmar con un nivel de confianza del 95% que una vez calibrado el modelo de tráfico de autobuses en VISSIM para la ciudad de Bacau en las condiciones de la avenida durante el tiempo de ensayo; las medidas de ruido ambiental LAm<sub>ax</sub> de cada pasada de autobuses y los datos simulados LAm<sub>ax</sub> de las mismas pasadas siguiendo método de simulación dinámica de ruido de tráfico, son iguales.
11. Sin embargo, de los test estadísticos puestos en marcha no podemos afirmar que la edad de los autobuses influye en las diferencias medidas del LAm<sub>ax</sub> durante los pasos de los autobuses delante del sonómetro. En todo caso parece apreciarse que los autobuses nuevos IVECO presentan un nivel de ruido inferior a los demás y si esto es así (ya que solo se disponía del ruido de 2 de esos autobuses, de los 8 de los que dispone ciudad), también que nuestro modelo sobrestima el ruido emitido por estos autobuses nuevos. Pero no parece que los autobuses Mercedes hagan un ruido significativamente superior al resto de la flota, ni a las predicciones del método de simulación dinámica de ruido de tráfico. De todos modos, debido a lo limitado del número de datos manejados para las predicciones de los autobuses y el tipo de variable manejada (LAm<sub>ax</sub>) sería recomendable realizar un número muy superior de mediciones.

Por todo ello se puede afirmar

La validación del método de simulación dinámica de ruido de tráfico compuesto por VISSIM + CNOSSOS propuesto en el documento ha demostrado que este método de predicción del ruido del tráfico es idóneo para la evaluación de la eficacia de planes de acción para combatir el ruido urbano. Se puede afirmar que puede aplicarse a cualquier área urbana siempre que se calibre el modelo de micro simulación de tráfico adecuándolo a cada ciudad.



## **ANEXO**

A continuación se reproducen las dos últimas publicaciones en las que participa la autora, y que son fruto de la estancia en la Universidad de Cádiz

Reproducción del artículo:

Autores: Jose Luis Cueto, Alina Mihaela Petrovici, Ricardo Hernández, Francisco Fernández

Título: Analysis of the Impact of Bus Signal Priority on Urban Noise

Revista: ACTA ACUSTICA UNITED WITH ACUSTICA Vol. 103 (2017) 561 – 573

DOI 10.3813/AAA.919085

Y de la comunicación a congreso:

Autores: Alina Mihaela Petrovici, Jose Luis Cueto, Ricardo Hernandez, Valentin Nedeff

Título: SMART MOBILITY STRATEGIES BASED ON BUS SIGNAL PRIORITY FOR NOISE REDUCTION

Congreso: EUROREGIO 2016. Oporto Portugal