

# SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADO A LA MOVILIDAD URBANA

Miguel Martín-Guzmán, Juan Martín-Ávila, J.J. Fernández-Lozano, A. García-Cerezo

*Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática  
University of Málaga, 29071 Málaga, Spain. Email: jfl[at]uma.es*

**Abstract** - La movilidad en las ciudades se ve comprometida por un tráfico cada vez más elevado y unas infraestructuras que no pueden ampliarse. Por tanto, la mejora de la movilidad y su sostenibilidad deben venir de la mano de una mejor gestión de los recursos, con la incorporación de estrategias de control del tráfico que se adapten en cada momento a sus condiciones. El principal obstáculo está en la obtención de esa información. Una posibilidad son las redes de sensores inalámbricos, que pueden aportar información sobre las condiciones en una zona de interés, con vistas a una planificación más eficiente y al despliegue de algoritmos de control más elaborados.

**Keywords:** redes de sensores, movilidad, control inteligente, ITS.

---

This document is a self-archiving copy of the preprint version of a copyrighted publication.

## Citation Information

Martín-Guzmán, M.; Martín-Ávila, J.; Fernández-Lozano, J.J.; García-Cerezo, A.,  
"Sistema móvil de información basado en una red de sensores inalámbricos aplicado a la movilidad urbana",  
XXXV Jornadas de Automática, Valencia, España, pp. 1-6. Septiembre, 2014.  
ISBN-13: 978-84-697-0589-6

```
@INPROCEEDINGS{Martín-Guzmán:2014,  
author={M. Mart\{i}n-Guzm\{a}n and J. Mart\{i}n-\{A}vila and J.J. Fern\{a}ndez-Lozano and A. Garc\{i}a-Cerezo},  
title={Sistema m\{o}vil de informaci\{o}n basado en una red de sensores inal\{a}mbricos aplicado a la movilidad  
urbana},  
booktitle={ XXXIV Jornadas de Automática },  
year={2014},  
pages={258 - 264},  
address={Valencia, España},  
}
```

# SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN BASADO EN UNA RED DE SENSORES INALÁMBRICOS APLICADO A LA MOVILIDAD URBANA

Miguel Martín-Guzmán, Juan Martín-Ávila, J.J. Fernández-Lozano, A. García-Cerezo  
Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática. Universidad de Málaga  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial.  
Calle Dr. Ortiz Ramos, s/n, Campus de Teatinos, 29071 Málaga, jfl@uma.es

## Resumen

*La movilidad en las ciudades se ve comprometida por un tráfico cada vez más elevado y unas infraestructuras que no pueden ampliarse. Por tanto, la mejora de la movilidad y su sostenibilidad deben venir de la mano de una mejor gestión de los recursos, con la incorporación de estrategias de control del tráfico que se adapten en cada momento a sus condiciones. El principal obstáculo está en la obtención de esa información. Una posibilidad son las redes de sensores inalámbricos, que pueden aportar información sobre las condiciones en una zona de interés, con vistas a una planificación más eficiente y al despliegue de algoritmos de control más elaborados.*

**Palabras Clave:** redes de sensores, movilidad, control inteligente, ITS.

## 1 INTRODUCCIÓN

El tráfico urbano es uno de los problemas que más influyen en la calidad de vida de los residentes en las ciudades y áreas metropolitanas de los países desarrollados, debido al modelo de ciudad, muy distribuido, y al incremento de población urbana. Ambos factores se realimentan, contribuyendo al aumento de los desplazamientos y su longitud, en un proceso expansivo descrito que ha colocado al medio urbano en una situación difícil en términos de sostenibilidad, en donde la polución, la congestión del tráfico y los accidentes constituyen externalidades negativas de fuerte impacto en la salud y la economía de los ciudadanos. Todos estos problemas aconsejan el desarrollo de nuevas estrategias globales para un transporte urbano sostenible. Estrategias que contemplen no sólo una amplia gama de medidas paliativas, sino, también, *el uso de tecnologías e infraestructuras innovadoras*. El concepto de un transporte eficiente, eficaz y seguro se impone hoy en las nuevas políticas de transporte.

Uno de los principales obstáculos a la implementación de nuevas estrategias de gestión del transporte, y en concreto del control del tráfico urbano, es la información limitada de la que se dispone. Los sensores que se emplean en la monitorización del tráfico pueden encuadrarse en dos grupos (Tubaihat et al., 2009):

- Sensores intrusivos, como espiras soterradas en la calzada, magnetómetros, o tubos neumáticos. Se instalan directamente en el pavimento, bien enterrándolos bajo la superficie o anclándolos al asfalto. Su precisión es buena, pero tienen un coste elevado al requerir instalación.
- Sensores no intrusivos, como video-cámaras, radar de microondas, láser, o ultrasonidos. Pueden ofrecer un conjunto de información más amplio, implicando el procesamiento de la información, pero habitualmente son complejos y con elevadas necesidades de potencia, y sus prestaciones se degradan en condiciones climáticas adversas.

Sobre la base de esta información sensorial se construyen los esquemas de gestión del tráfico que se emplean actualmente en las ciudades. Estos esquemas definen los ciclos y los tiempos en los cruces semafóricos, que actúan como elementos de control. Existen varias formas de fijar los parámetros de un ciclo semafórico:

- Planificación fija. Se definen el ciclo y los repartos una sola vez, que se mantiene en el tiempo.
- Planificación dinámica. Se definen diversos conjuntos de ciclo y repartos, que se cambian a lo largo del tiempo. Habitualmente se diseña un número limitado de ellos (dado que el proceso de diseño tiene un elevado componente heurístico, aunque se parte de los datos recabados por los sensores que pueda haber instalados, que suelen ser intrusivos), y se conmutan de acuerdo con la experiencia de los centros de control. Como máximo, se hacen cambios horarios.

- Planificación adaptativa. Los ciclos y repartos se definen en tiempo real de acuerdo con las condiciones del tráfico reinantes, de acuerdo con algoritmos de control. Es la estrategia más prometedora en cuanto a la optimización de la infraestructura, pero choca con la necesidad de disponer de gran cantidad de información en tiempo real, y que esta información sea fiable.

El principal obstáculo para hacer que las planificaciones cambien adaptándose a las condiciones del tráfico está precisamente en conocer cuantitativamente cuáles son esas condiciones. Si bien los núcleos de cierto tamaño suelen contar con sensores intrusivos instalados (habitualmente en la forma de espiras soterradas), la información recabada es muy limitada:

- No se obtiene información de todas las vías: en caso de existir sensores instalados, éstos se limitan a las vías principales.
- Los sensores con los que se cuenta (habitualmente espiras soterradas) son razonablemente precisos en la estimación del número de vehículos, pero tienen un rango de observación limitado: solamente cuentan los vehículos que pasan por el carril en el que están instalados. No se dispone de información acerca de tamaños de colas, o incluso velocidades de tránsito.
- No se dispone de información procedente de los vehículos, que pueden enriquecer la imagen de conjunto del problema, al tiempo que ofrecer una realimentación decisiva para una gestión del transporte en los núcleos urbanos.

Avanzar en los accesos y en las interconexiones de algunos núcleos), exige conseguir más y mejor información, y a un coste que pueda afrontarse desde las administraciones implicadas.

En los últimos años se han venido proponiendo diversas aplicaciones de las redes de sensores inalámbricos (WSN, *Wireless Sensor Networks*) a los problemas de transporte (Arief et al., 2007). Pero habitualmente se centran en el estudio de la red en sí, planteándola como una alternativa para sustituir completamente los sistemas de gestión actuales (ver, por ejemplo, Joseph, 2006; Bera 2009; Chandrasekaran, 2010; Tacconi, 2010; o Dimitrakopoulos, 2010). Además, suelen exigir la incorporación de elementos a bordo de los vehículos. En cambio, la madurez de la tecnología de redes de sensores (ver por ejemplo Akyildiz, 2002 o Xu, 2002) permite plantear el desarrollo de aplicaciones eficientes y que puedan plantearse resolver problemas concretos, más allá del ámbito de la investigación básica, y que no exijan modificaciones sustanciales

tanto de la infraestructura como de los vehículos actuales.

El presente trabajo está estructurado como sigue. Tras esta introducción, se describe la arquitectura del sistema móvil de información propuesto. A continuación se trata la implementación de dicho sistema. La siguiente sección presenta un apartado de validación y pruebas reales completadas hasta el momento. Por último, se cierra el documento con las conclusiones.

## 2 SISTEMA MÓVIL DE INFORMACIÓN URBANA

El objetivo del sistema se enuncia como caracterizar el flujo de vehículos, y su reparto por las diferentes vías, en una zona de interés, mediante el cálculo de la matriz de origen-destino (en adelante matriz O-D). Para ello se plantea el diseño de un sistema basado en una red de sensores inalámbricos que pueda desplegarse fácilmente en el entorno del que se desea obtener información. Estos sensores deberán ser no intrusivos, y permitir obtener una información tan fiel como sea posible bajo la premisa de la flexibilidad del sistema en su conjunto.

### 2.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA

Para alcanzar el objetivo, se ha concebido un sistema modular, de manera que pueda reconfigurarse la topología de la red de sensores según las necesidades del viario bajo estudio. La modularidad comprende tanto el número de nodos de la red como el número y tipo de sensores en que se basa. La red cuenta con un nodo receptor encargado de configurar la red, y un conjunto de nodos transmisores, que serán los que se unan a la red creada por el nodo receptor (ver Figura 1). Una vez que se ha establecido la red, cada nodo transmisor realizará la adquisición y procesamiento de los datos según su programación. Por último, enviará una trama al nodo receptor la cual contendrá la información necesaria ya procesada.

Los nodos transmisores incorporan los sensores del sistema, y cuentan con un microprocesador con capacidad suficiente para obtener, guardar, analizar y enviar los datos ya procesados en forma de tramas. A la hora de definir el conjunto de sensores empleados, se ha buscado obtener una información tan exacta como sea posible del flujo de vehículos. Actualmente solamente los escáneres láser o los radares ofrecen una información exacta del flujo, y aun así solamente en determinadas circunstancias. Son además sensores caros que no casan bien con el objetivo de sencillez y facilidad de despliegue del sistema que se ha mencionado antes. Por tanto, se ha elegido una estrategia distinta en la configuración de la batería sensorial. Se ha elegido como sensor primario la

detección de dispositivos Bluetooth. Estos dispositivos son cada vez más frecuentes, y permiten al mismo tiempo una identificación exacta del usuario de la vía, a través de la dirección de acceso al medio (MAC), lo que posibilita aplicaciones del tipo de la identificación de matrices O-D, o estimación del número de ocupantes de un vehículo. Sin embargo, no todos los vehículos tienen montado uno de estos dispositivos, ni todos son visibles. Por ello se completa el sistema con otros sensores, como ultrasonidos, o gases. Los sensores de ultrasonidos permiten detectar el número de vehículos que atraviesan su haz de detección. Los sensores de gases detectan la presencia de NOx, CO, CO2, VOC, O3 u O2. También se usan sensores de ruido, luz y polvo. Con todo ello se genera una imagen sensorial del entorno que permite caracterizar el flujo de vehículos, y elaborar una estimación del mismo en base a las lecturas de los diversos sensores y su fusión. Para poder caracterizar esta estimación se incorpora también un nodo con un láser, que en la fase de desarrollo permite contrastar las medidas de los demás sensores, si bien el objetivo es conseguir estimaciones fiables prescindiendo de él.

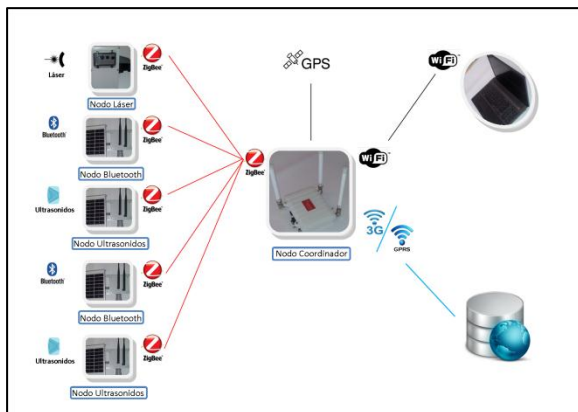


Figura 1: Topología del sistema.

## 2.2 IMPLEMENTACIÓN

Para el desarrollo de la red de sensores inteligentes inalámbricos se ha partido de una solución hardware desarrollada por la compañía *Libelium*. El *nodo receptor* está basado en el router multiprotocolo *Meshlium* y configurado para que pueda trabajar con los protocolos *ZigBee*, *WiFi*, *Bluetooth* y *3G/GPRS*, funcionando todo a la vez sin que haya interferencias entre los protocolos. Este router tiene una capacidad interna de almacenamiento de 32GB y la posibilidad de sincronizar las tablas de sus bases de datos con bases de datos externas en un servidor externo que se ha configurado para la aplicación. Además, el router *Meshlium* hace la función de coordinador, configurando la red de sensores inteligentes inalámbricos y permitiendo o no, que se unan a la red los nodos transmisores. Cuenta además con la

posibilidad de funcionar autónomamente en cuanto a la energía, gracias a una batería de 12V y un kit solar.

Para los nodos transmisores se ha seleccionado como base el modelo de placa *Waspote V1.2*. A esta placa se le acopla un módulo de comunicaciones inalámbricas XBee Pro S2 desarrollado por la compañía Digi. Entre los protocolos inalámbricos que se pueden configurar se encuentra el protocolo ZigBee a 2.4 GHz el cual permite transmitir pequeños paquetes de información con un gasto mínimo de energía y con un alcance de más de 700 metros según condiciones de visibilidad.

Sobre esta base se incorporan diversos sensores, que dan lugar a variantes de los nodos transmisores. Así por ejemplo, para dar lugar a un *nodo de Bluetooth* se añade al Waspote V1.2, junto con el módulo de comunicaciones XBee Pro S2, un módulo de Bluetooth BlueGiga WT12. Con una configuración apropiada es posible trabajar con protocolos inalámbricos ZigBee y Bluetooth 2.1 +EDR a la vez y sin interferencia entre ellos. Para obtener un *nodo de ultrasonidos* se añade a la configuración inicial un sensor de ultrasonidos Maxbotix modelo XL-MaxSonar-WR1. Este opera con una frecuencia de 42KHz, y logra un alcance máximo de 600 cm con una sensibilidad de 3.2mV/cm a 3.3 V, o 700 cm y una sensibilidad de 4.9 mV/cm a 5.5 V.

El *nodo láser*, en cambio, se basa en una placa pico ITX con un nano procesador a 1.2 GHz, una memoria RAM DDR3 de 4 GB y un disco duro de estado sólido de 60 GB. El láser seleccionado es el modelo UTM-30LX-EW de la marca Hokuyo por tener características tipo IP67. La alimentación del láser se realiza mediante una batería de 12 Voltios cargada a través de un panel solar de 20 W.

Para la programación de los nodos transmisores (salvo en el caso del láser) se ha empleado la API desarrollada por Libelium. Dentro del conjunto de librerías suministradas por Libelium se han modificado las correspondientes al módulo de Bluetooth, añadiendo métodos nuevos para poder detectar y enviar por tramas todos los Bluetooth detectados en un periodo de cinco segundos. Para llevar a cabo la implementación del código se ha empleado la IDE desarrollada por Libelium. En el caso del nodo láser se ha tenido que desarrollar una solución independiente basada en Linux.

Todos los nodos transmisores se han encapsulado en cajas de protección de categoría IP 67, de manera que se pueda desplegar la red de sensores en el exterior y en cualquier tipo de condición atmosférica. Se han diseñado soportes acordes a las necesidades de espacio para fijar los componentes de los distintos nodos dentro de las cajas de protección IP 67.

Como se ha adelantado más arriba, se ha elegido el protocolo ZigBee para comunicar los nodos. La elección ha estado basada en varias razones. Por una parte, es un protocolo robusto y seguro, y el desarrollo es fácil. Por otra parte, tiene un bajo gasto energético. Esto implica una transferencia de datos baja, pero resulta suficiente para las necesidades de la red de sensores inalámbricos. Otra ventaja radica en la creación de la red por el nodo receptor y la unión a dicha red de los otros nodos transmisores o nuevos nodos que es muy sencilla e inmediata. Por último, es un protocolo muy extendido en diversos ámbitos, gracias a la ZigBee Alliance.

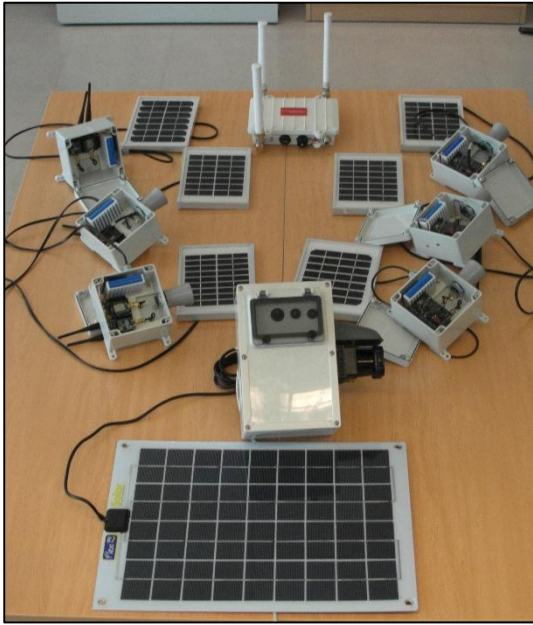


Figura 2: Conjunto de sensores y nodo coordinador.

En cuanto al despliegue de los nodos, las diversas elecciones de diseño permiten una gran flexibilidad. Los nodos transmisores de tipo Bluetooth se pueden posicionar en cualquier lugar siempre que estén dispuestos dentro del rango del nodo Receptor. Los nodos transmisores de tipo ultrasonidos deben colocarse con acceso libre al vial que vayan a controlar teniendo en cuenta que su alcance máximo de longitud es de 7 metros. Debe posicionarse a una altura de 50 centímetros con respecto al suelo. La campana del sensor debe estar en posición perpendicular al vial y sin obstáculos en su haz. El nodo transmisor de tipo láser debe ser montado a una altura que depende de la anchura de la calzada bajo estudio, pero que puede alcanzarse fácilmente con montajes sobre el mobiliario urbano (por ejemplo, sobre una farola). En cuanto al nodo receptor, al ser autónomo y no intrusivo se puede posicionar en cualquier localización, siempre que aporte la cobertura suficiente a todos los nodos dentro de su red.

### 3 CARACTERIZACIÓN DEL TRÁFICO URBANO: MATRIZ DE ORIGEN-DESTINO

Una de las aplicaciones de este sistema es el cálculo de la matriz O-D en un ámbito concreto mediante la red de sensores inteligentes inalámbricos.

La matriz O-D es una expresión matemática que indica el número de vehículos que se desplazan entre un punto origen y otro punto destino. También puede ser expresada en número de personas equivalentes, según el estudio que quiera realizarse.

Tradicionalmente, han existido dos formas de obtener la matriz O-D: encuestas a conductores y monitorización del tráfico mediante sensores. En este trabajo, se desarrolla un método matemático para la obtención de la matriz O-D a partir de los datos recopilados por la red de sensores inteligentes inalámbricos.

Para la obtención de la matriz O-D se necesita información precisa acerca del número de vehículos que pasan por una determinada vía y del destino de los mismos. En términos matemáticos se puede expresar de la siguiente forma:

$$M_{OD} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & \dots & m_{1n} \\ m_{21} & m_{22} & \dots & m_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{n1} & m_{n2} & \dots & m_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Donde  $m_{ij}$  representa el número de vehículos que pasando por el vial  $i$  (sección  $i$ ) han tenido como destino el vial  $j$  (sección  $j$ ) y  $n$  es el número total de secciones en estudio.

Siendo  $U_i$  la suma de vehículos que entran y salen por una sección  $i$ , se puede expresar como:

$$U_i = \sum_{j=1}^n m_{ij} + \sum_{j=1}^n m_{ji} = E_i + S_i \quad (2)$$

Siendo  $E_i$  y  $S_i$  el número total de vehículos que entran y salen, respectivamente de la sección  $i$ . Si llamamos  $\beta_{ij}$  a la proporción en tantos por uno de vehículos que teniendo como origen la sección  $i$  tiene como destino la sección  $j$ , cumpliéndose que:

$$\sum_{j=1}^n \beta_{ij} = 1 \quad (3)$$

Se puede definir la matriz  $B$  como:

$$B = \begin{bmatrix} \beta_{11} & \beta_{12} & \dots & \beta_{1n} \\ \beta_{21} & \beta_{22} & \dots & \beta_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{n1} & \beta_{n2} & \dots & \beta_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

La ecuación (2) puede escribirse como:

$$U_i = E_i + \sum_{j=1}^n \beta_{ji} \cdot E_j \quad (5)$$

Que también puede expresarse en forma matricial:

$$\vec{U}_i = \vec{E}_i + \vec{S}_i = I \cdot \vec{E}_i + B^T \cdot \vec{E}_i \quad (6)$$

Resultando un sistema de ecuaciones que, conocido el vector  $U_i$  y la matriz  $B$ , tiene como incógnita el vector  $E_i$ . Despejando en (6), resulta que:

$$\begin{aligned} \vec{U}_i &= I \cdot \vec{E}_i + B^T \cdot \vec{E}_i = (I + B^T) \cdot \vec{E}_i \\ \vec{E}_i &= (I + B^T)^{-1} \cdot \vec{U}_i \end{aligned} \quad (7)$$

Ecuación que permite calcular  $E_i$ , siempre y cuando la matriz  $(I+B^T)$  sea invertible.

Conocido  $E_i$ , la matriz O-D se obtiene como sigue:

$$M_{OD} = \begin{bmatrix} \beta_{11} \cdot E_1 & \beta_{12} \cdot E_2 & \dots & \beta_{1n} \cdot E_n \\ \beta_{21} \cdot E_1 & \beta_{22} \cdot E_2 & \dots & \beta_{2n} \cdot E_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_{n1} \cdot E_1 & \beta_{n2} \cdot E_2 & \dots & \beta_{nn} \cdot E_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

Para llegar a esta expresión se necesita conocer por un lado  $U_i$  y, por otro, la matriz  $B$ . Ambas se obtienen a partir de la información recopilada por el conjunto de sensores. Los sensores de tipo ultrasonido y láser contabilizan el total de vehículos que pasan por una sección de la vía, sin tener en cuenta si están entrando o saliendo de la misma. Por otro lado, la información recopilada por los sensores de Bluetooth, se analiza para obtener tendencias de origen-destino en los vehículos.

Cuando un nodo de Bluetooth localiza una MAC, éste envía una trama al nodo receptor, indicando la numeración del nodo, la MAC hallada y el tiempo, entre otros parámetros. La numeración del nodo está asociada a una sección de una vía en concreto. Con esta información se obtiene la sección de la vía por la que ha entrado el vehículo y la sección de la vía por la que ha salido, dando lugar a una aproximación de la matriz  $B$ . Hay que mencionar que la dirección MAC es única para cada dispositivo Bluetooth fabricado en el mundo.

Esta aproximación de la matriz  $B$  es similar a la realizada en los métodos tradicionales de cálculo de la matriz O-D mediante encuestas a los conductores. La confianza en los resultados depende de la muestra analizada con respecto al total de los vehículos que han circulado por las diferentes vías en estudio.

Las pruebas realizadas hasta el momento han tenido como objeto la calibración del sistema. Se han llevado a cabo pruebas en interior y pruebas en exterior. En los

siguientes apartados se comentan los diferentes experimentos realizados.

## 4 APLICACIONES

En primer lugar, se realizaron pruebas en interior, en la biblioteca de la Escuela de Ingenierías de Málaga y los pasillos anexos. Consistió en el seguimiento de una dirección MAC durante su desplazamiento por una trayectoria dada y la contabilización de personas mediante ultrasonidos, identificándose correctamente la trayectoria realizada por el dispositivo con MAC conocida y detentándose el paso de personas por el sensor de ultrasonidos.

En segundo lugar, se han realizado pruebas en exterior.

Para poder obtener la matriz O-D según la expresión (8) se necesita conocer con buena aproximación la matriz  $B$  (4). Por tanto, es necesario conocer qué tanto por ciento de los vehículos que actualmente circulan por las carreteras españolas tienen dispositivos Bluetooth identificables por los sensores de nuestra red.

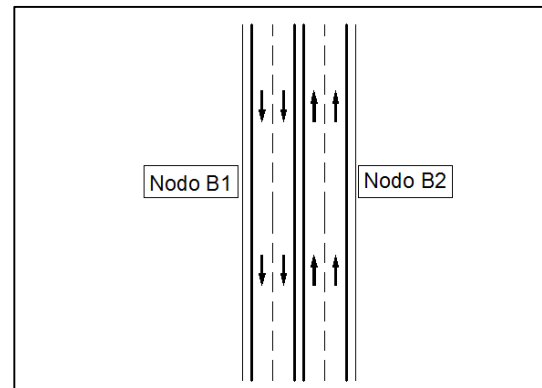


Figura 3: Esquema de instalación de sensores.

Para ello, se realizaron diferentes conteos en un tramo de la A-357, autovía de acceso a Málaga con un flujo de vehículos intenso y una velocidad máxima permitida de 100 km/h. Por un lado se contabilizaron el total de vehículos que circularon por ambos sentidos en un tiempo determinado y, por otro, se dispusieron dos nodos Bluetooth, uno en cada arcén, según se aprecia en la figura 3.

Los resultados obtenidos fueron que de 2.856 vehículos que circularon por el tramo, el sistema fue capaz de encontrar 198 MAC distintas, lo que supone un 6,9 % de dispositivos Bluetooth detectados. Resultados similares a los estudiados realizados en Indianápolis, EEUU (Brennan, 2010).

Para finalizar este apartado y cotejar los resultados obtenidos con las pruebas realizadas en la autovía, se



eligió una rotonda en un entorno urbano con tres ramales de entrada/salida de vehículos. El objetivo era probar el conjunto de sensores inalámbricos al completo.

La figura 4 muestra el esquema de la instalación realizada para la monitorización del cruce. La sección 1 se monitoriza con un nodo láser para contabilización de vehículos y un nodo Bluetooth para identificación de MAC, la sección 2 con dos nodos de ultrasonido y uno de Bluetooth y, por último, la sección 3 con un nodo de ultrasonido y otro de Bluetooth. Todos estos nodos sensoriales envían la información obtenida al nodo Coordinador en forma de tramas.

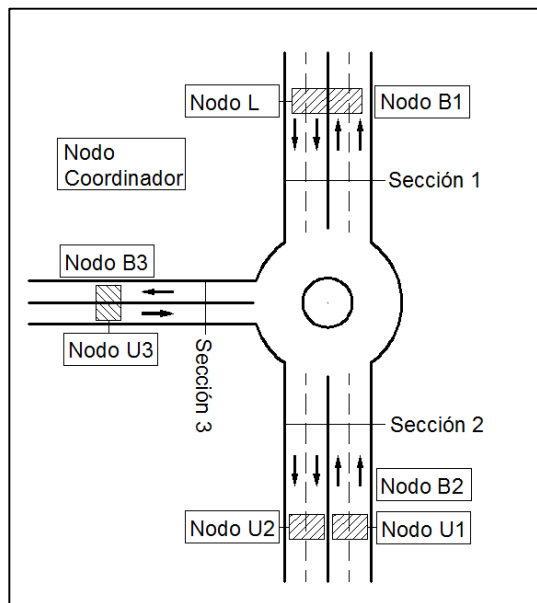


Figura 4: Esquema del cruce inteligente probado.

Durante el experimento se grabó en video el tráfico de la rotonda para el posterior análisis del número total de vehículos que han circulado por cada vial.

En las pruebas se comprobaron diferentes aspectos, tales como:

- La separación idónea entre los nodos Bluetooth para poder identificar por cual nodo ha entrado el vehículo y por cual ha salido.
- El funcionamiento del nodo láser como elemento totalizador del tráfico.
- El funcionamiento de los nodos de ultrasonido para el conteo del tráfico.
- Comprobar que el nodo coordinador recibe todas las tramas enviadas por los nodos sensoriales así como la cobertura con los mismos en diferentes situaciones.

Una vez terminadas las pruebas de campo, se procesó la información obtenida para cotejarla con el tráfico real medido. Se obtuvo la siguiente matriz  $B$  para un tiempo de 60 minutos y un total de 759 vehículos.

$$B = \begin{bmatrix} 0,03 & 0,60 & 0,37 \\ 0,95 & 0 & 0,05 \\ 0,71 & 0,29 & 0 \end{bmatrix}$$

Obtenida a partir de 52 direcciones MAC distintas con las que pudieron obtenerse un origen y un destino, las cuales corresponden a prácticamente el 7% del total de vehículos contabilizados en el experimento.

El siguiente paso es la planificación de nuevos experimentos de mayor duración y en diferentes horarios en un plazo de varios días y en diferentes zonas para poder elaborar un historial estadístico fiable con un fijo de vehículos mayor y, de este modo, realizar una comparativa con viales de distinta distribución para ver el comportamiento y la eficiencia de la red de sensores inteligentes inalámbricos.

Esta caracterización se incorporará al procesamiento de los datos dentro del SCADA que se está elaborando para la monitorización y la futura actuación del sistema y, así, aumentar la tolerancia a fallos de todo el sistema y, por tanto, su robustez.

## 5 CONCLUSIONES

El presente trabajo describe un sistema de información urbana basado en redes de sensores inalámbricos. Su carácter modular, tanto en la topología como en la batería de sensores que monta, permite obtener información acerca de las condiciones reales del tráfico en una determinada zona, y mejorar los modelos del mismo con vistas a adoptar estrategias de control que permitan optimizar el uso de las infraestructuras disponibles.

Se han llevado a cabo pruebas de validación del sistema en interiores y en exteriores. En el transcurso de las mismas ha podido comprobarse el correcto funcionamiento del sistema en líneas generales, y se han avanzado algunos parámetros del comportamiento del tráfico urbano en la zona de estudio, demostrando la viabilidad del sistema. No obstante, la caracterización de dicho comportamiento, y la estimación de su grado de exactitud, exige realizar ensayos de mayor duración, ya en fase de planificación, que permitan ampliar el número de vehículos detectados.

## Agradecimientos

Los autores quieren agradecer el apoyo financiero de los fondos FEDER de la Unión Europea para el proyecto “Sistema Móvil de Información Aplicado a la Movilidad Urbana” (GI3000/IDIZ) dentro del “Programa Operativo FEDER 2007-2013”. También queremos darle las gracias a todo el personal de la Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía por su dedicación y profesionalidad.



Agencia de Obra Pública de la Junta de Andalucía  
**CONSEJERÍA DE OBRAS PÚBLICAS Y VIVIENDA**



**Unión Europea**

Fondo Europeo  
de Desarrollo Regional



## Referencias

- [1] Akyildiz I.F., W. Su, Y. Sankarasubramaniam, E. Cayrci (2002). Wireless sensor networks: a survey. *Computer Networks* 38, 393-422.
- [2] Arief B., P. Blythe, R. Fairchild, K. Selvarajah y A. Tully (2007). Integrating smartdust into intelligent transportation system. Technical report. University of Newcastle upon Tyne.
- [3] Bera R., D. Mondal, S. Sil, S. Dhar, S. Sur, D. Bhaskar, S. K. Sarkar y D. Kandar (2009). 2009 International Conference on Computers and Devices for Communication.
- [4] Brennan, T., Jr., Ernst, J. (2010). Influence of Vertical Sensor Placement on Data Collection Efficiency from Bluetooth MAC Address Collection Devices. *Journal of Transportation Engineering*, 136(12), 1104–1109.
- [5] Chandrasekaran S., R. Haritha, S. Aiswarya, D. Dipesh (2010). A Fault Tolerant Pervasive Model for Intelligent Transport System. 2010 International Conference on Computer and Communication Technologies in Agriculture Engineering.
- [6] Dimitrakopoulos G. y P. Demestichas (2010). Intelligent Transportation Systems. *IEEE Vehicular Technology Magazine*.
- [7] Joseph A. D. (2006). Intelligent Transportation Systems. *IEEE Pervasive Computing*.
- [8] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L. <http://www.libelium.com/>.
- [9] Tacconi D., D. Miorandi, I. Carreras, F. Chiti, R. Fantacci (2010). Using wireless sensor networks to support intelligent transportation systems. *Ad Hoc Networks* 8, 462-473.
- [10] Tubaishat M., P. Zhuang, Q. Qi, Y. Shang (2009). Wireless sensor networks in intelligent transportation systems. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 9, 287-302.
- [11] Xu N. (2002). A Survey of Sensor Network Applications. *IEEE Communications Magazine*.