

Diseño y Aplicaciones de un Vehículo Instrumentalizado: Observación de Maniobras de Adelantamiento

Design and Applications of a New Instrumented Vehicle: Observing Passing Maneuvers



Alfredo García
Catedrático
Carlos Llorca
Personal Investigador

Ana Tsui Moreno
Personal Investigador
Ana María Pérez-Zuriaga
Profesor Ayudante

Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC)
Universitat Politècnica de València

Resumen

La obtención de datos de tráfico en carreteras o vías urbanas en servicio es una herramienta fundamental en la ingeniería de carreteras. En este sentido, los vehículos instrumentados constituyen una de las técnicas más útiles para la observación del comportamiento de los conductores ante el resto del tráfico, o ante la infraestructura y su entorno. El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras de la *Universitat Politècnica de València* ha desarrollado un nuevo vehículo instrumentado, compuesto por un conjunto de equipos modular y versátil, cuya principal ventaja es que puede instalarse en cualquier vehículo en muy poco tiempo, sin necesidad o depender de un vehículo dedicado.

Este nuevo vehículo instrumentado se ha empleado para estudiar la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales, permitiendo observar maniobras reales desde un vehículo adelantado. De esta forma, se ha caracterizado con gran detalle el comportamiento de los conductores que se disponen a adelantar. En el futuro, están previstas numerosas y muy variadas aplicaciones, dada la versatilidad que el equipamiento portátil del vehículo instrumentado proporciona.

PALABRAS CLAVE: Vehículo instrumentado, Seguridad Vial, Adelantamiento.

Abstract

Traffic data collection on rural highways or urban areas is a key tool of highway engineering. Data collected by instrumented vehicles allow researchers to observe driver's behavior. This technique is useful to study the influence of other vehicles, road geometry or its surroundings. A new instrumented vehicle has been developed by the Highway Engineering Research Group of the *Universitat Politècnica de València*. Versatile and modular equipment can be installed on different vehicles in a few minutes. This is an important advantage in comparison with previous instrumented vehicles, which were based on fixed systems. In consequence, this system does not need a specific vehicle.

This new instrumented vehicle has been already used to observe passing maneuvers on two-lane rural roads. The instrumented vehicle was an impeding vehicle, as it traveled along the road at reduced speed. Therefore, passing driver's behavior and pass decisions were analyzed in detail. Further research has been proposed to extend uses of the developed vehicle.

KEY WORDS: Instrumented vehicle, Road Safety, Passing Maneuver.

Introducción

En la ingeniería de carreteras se estudia el fenómeno del tráfico y su influencia en distintos aspectos, como la seguridad vial o la funcionalidad de la vía, en función de parámetros geométricos, meteorológicos o del propio tráfico. Además, el comportamiento del conductor es una variable muy importante que considerar que habitualmente se obtiene de forma indirecta o se obvia. En este sentido, la falta de conocimiento del factor humano y su interacción con la infraestructura, el entorno, el vehículo y las condiciones del tráfico es uno de las principales limitaciones de muchos estudios e investigaciones de ingeniería de carreteras.

En los últimos años, se han generado modelos teóricos sobre el comportamiento de los conductores con el fin de no únicamente comprender mejor por qué se comportan así en la vía sino también para predecir las reacciones de los conductores a medidas o condiciones determinadas de la infraestructura [1]. Sin embargo, no existen bases de datos lo suficientemente amplias para abordar su estudio detallado. Con el fin de caracterizar el comportamiento humano, últimamente se están empleando grabaciones de vídeo desde proximidades de la vía o simuladores de conducción equipados con sistemas de grabación. Estas metodologías de toma de datos tienen el inconveniente de que, por un lado, las grabaciones desde proximidades de la vía únicamente se pueden realizar en localizaciones concretas de la vía y, en ocasiones, no graban el fenómeno completo. Por su parte, a parte de su elevado coste, los simuladores de conducción requieren de un proceso de calibración y validación de la adecuada interacción entre el conductor, el vehículo y la infraestructura, que en muchos casos no se realiza puesto que no se dispone de datos en condiciones naturalísticas con los que comparar los resultados [2].

Una metodología alternativa de toma de datos es el uso de vehículos instrumentados. Estos vehículos se equipan con diferentes sensores y cámaras que permiten recoger el comportamiento de los conductores en condiciones naturalísticas, es decir, bajo condiciones de tráfico real. Con esta metodología, el vehículo real circula en

el flujo normal del tráfico almacenando no sólo el comportamiento humano sino también las condiciones de la infraestructura, el tráfico y el entorno, así como la interacción entre el vehículo y la infraestructura.

El uso de vehículos instrumentados se ha ido extendiendo poco a poco en los últimos años para realizar investigaciones en ingeniería de carreteras. Entre los vehículos existentes se encuentra el AR-GOS, de la Dirección General de Tráfico, o los desarrollados por la *Delft University of Technology* [3], el *Texas Transportation Institute* [4], la Universidad de Michigan, el *Virginia Tech*, el *Trinity College*, la Universidad de Southampton o el *U.S. Corps of Engineers*.

No obstante, en todos los casos, el equipamiento se ha instalado en un único vehículo con el que se realiza la toma de datos. Este hecho puede afectar a la representatividad de los datos puesto que los conductores deben habituarse a un vehículo ajeno que puede no pertenecer al segmento más representativo del parque automotor. Por ello, se ha decidido diseñar un equipamiento modular, versátil e independiente que puede ser fácilmente instalado en diferentes vehículos, con el fin de poder equipar cualquier vehículo en función de los requisitos de la investigación.

Objetivos

El objetivo del presente artículo es el diseño y desarrollo de un vehículo instrumentado versátil y modular para poder aplicarlo a la investigación en ingeniería de carreteras. Además, se detallarán las principales aplicaciones actuales y futuras del mismo.

En primer lugar, se describirán los distintos elementos que conforman el equi-

pamiento del vehículo instrumentado, así como sus principales características y funciones. Posteriormente, se desarrollará una de las principales investigaciones en las que se ha empleado el vehículo: el estudio de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales. Por último, se comentarán distintos estudios en los que se ha empleado o se ha previsto emplear en el futuro el vehículo instrumentado.

Descripción del vehículo instrumentado

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras (GIIC) del Instituto de Transportes y Territorio de la Universitat Politècnica de València ha desarrollado un equipo de sensorización de carácter modular que permite su adaptación a cualquier tipo de vehículo, convirtiéndolo en un vehículo instrumentado.

El equipo se compone del sistema Video VBOX Pro (figura 1), formado por cuatro cámaras resistentes al agua, dos micrófonos, un GPS de 10 Hz y un sistema de almacenamiento de datos que permite sincronizar los datos procedentes de las cámaras, del micrófono y del GPS. A este sistema se ha añadido una unidad inercial adicional que mide la velocidad, aceleración y giros en los tres ejes y cuyos datos son almacenados de forma sincronizada junto con los anteriores.

Con los dispositivos anteriores, el vehículo instrumentado es capaz de tomar datos sobre su propio comportamiento. Sin embargo, para estudiar el flujo de tráfico en el que se encuentra el vehículo, así como su entorno, ha sido necesario incorporar también cuatro distanciómetros láser que, estratégicamente colocados en el vehículo, permiten medir no sólo la distancia a otros



Figura 1. Sistema Video VBOX Pro



Figura 2. Ubicación de las cámaras en el interior del vehículo instrumentado

vehículos sino también la velocidad relativa de éstos.

Todos estos dispositivos son de tamaño reducido y pueden utilizarse de forma independiente. Su reducido tamaño permite minimizar la influencia sobre el comportamiento del resto de los conductores, al pasar totalmente desapercibido el vehículo dotado del equipamiento. Por otra parte, el poder utilizar cada dispositivo de forma independiente permite emplearlos aislados o combinados, dependiendo del objetivo de la investigación. Además, la combinación de estas dos características hace que sea perfectamente adaptable no sólo a cualquier tipo de vehículo ligero sino también a vehículos pesados y motocicletas.

Unidad de almacenamiento de datos

La unidad de almacenamiento de datos, alimentada por la toma de corriente continua de 12 V del vehículo, es la base del sistema de sensorización del vehículo instrumentado. La unidad dispone, además de una entrada especial para la conexión de la antena del GPS, diferentes entradas CAN que permiten registrar los datos proce-



Figura 3. Antena del receptor GPS ubicada en la parte superior del vehículo

denes de las cámaras y de los micrófonos, así como también de otros dispositivos adicionales como la unidad inercial.

Gracias a este sistema todos los datos almacenados por los diferentes dispositivos periféricos en la tarjeta de memoria extraíble están sincronizados, facilitando de esta forma el análisis conjunto de los mismos.

Cámaras y micrófonos

El sistema está equipado con cuatro cámaras digitales de forma cilíndrica con una longitud inferior a 10 cm y un diámetro de 2 cm. Las cámaras disponen de un soporte articulado con una base formada por tres ventosas que, junto con su pequeño tamaño, permiten una fácil colocación y orientación de las mismas, tanto en la parte interior como en la exterior del vehículo (figura 2).

La máxima resolución con la que es posible grabar utilizando estas cámaras es 576 x 720 píxeles, en función del número de cámaras conectadas simultáneamente. La resolución disminuye a la mitad cuando las cuatro cámaras se encuentran operativas.

La grabación puede completarse mediante dos micrófonos que permiten registrar las observaciones o comentarios del conductor o del investigador embarcado en el vehículo. Estos registros de audio quedan sincronizados con las imágenes captadas con las cámaras descritas.

GPS

El equipo cuenta con un receptor GPS de 10 Hz, es decir, registra datos con una cadencia de 10 por segundo. El receptor, que se encuentra integrado en la unidad de

almacenamiento de datos, se complementa con una antena externa que, gracias al potente imán del que dispone, puede fijarse en la parte superior del vehículo, para una mejor recepción (figura 3).

El GPS proporciona datos de longitud, latitud y altitud. En cuanto a la posición horizontal, según el fabricante, las lecturas obtenidas el 95% del tiempo se encuentran dentro de un círculo de radio 5 m con centro en las coordenadas exactas, mientras que en el caso de la altitud el radio aumenta a 10 m, siendo constante para todos los puntos tomados en el mismo periodo temporal. Sin embargo, la precisión en la distancia es $\pm 0.05\%$, con lo que, a pesar del error en cuanto a posicionamiento global, el error en posicionamiento relativo es mucho menor.

Unidad inercial

Uno de los dispositivos adicionales que se han incorporado al sistema mediante su conexión a la unidad de almacenamiento de datos por entrada CAN es una unidad inercial.

La unidad inercial permite registrar las aceleraciones y giros en los tres ejes de coordenadas espaciales (figura 4). Además,

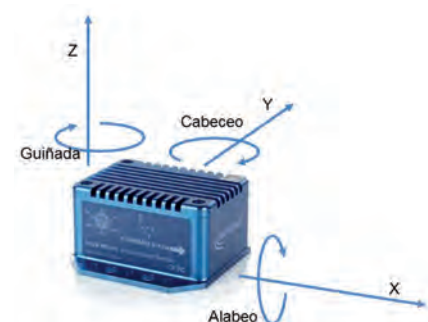


Figura 4. Unidad inercial



Figura 5. Distanciómetro láser

a partir de los datos registrados es posible obtener la posición del vehículo incluso cuando la señal GPS se vea interrumpida. De esta forma, se pueden llevar a cabo estudios en túneles donde la señal GPS es muy débil.

La precisión de la unidad inercial, según el fabricante, es 0,01 grados por segundo para los giros y 0,002 g para las aceleraciones. Para garantizar estas precisiones la unidad inercial debe estar montada tan cerca como sea posible del centro de masas del vehículo y sobre un soporte que la mantenga horizontal e inmóvil.

Distanciómetros láser

A partir de los datos obtenidos anteriormente es posible caracterizar la dinámica del vehículo instrumentalizado e incluso el comportamiento y las reacciones del conductor; sin embargo, para la caracterización del flujo del tráfico y la interacción de este vehículo con el resto en su entorno, es necesario complementar el sistema con varios distanciómetros.

En este sentido, se han incorporado cuatro distanciómetros láser: uno en la parte frontal del vehículo, uno en la parte posterior y dos en el lateral, aunque la disposición puede variarse en función de los objetivos de las distintas investigaciones.

Los distanciómetros utilizados pertenecen al modelo TruSense S200 de *Laser Technology* (figura 5) que permiten registrar datos de distancia con una frecuencia de salida de datos de 20 Hz, independientemente de la integridad del objetivo.

El distanciómetro puede configurarse para que funcione de tres modos distintos:

1. Rango de mediciones bajo. La máxima distancia registrada es 750 m, independientemente de si el objetivo es

reflectante o no. Su precisión es de 4 cm. Puede utilizarse para la medición de distancias laterales entre vehículos.

2. Rango de mediciones medio. La máxima distancia registrada es 1500 m, cuando el objetivo es reflectante y 900 m cuando no lo es. Su precisión es de 8 cm.
3. Rango de mediciones alto. La máxima distancia registrada es 2900 m, cuando el objetivo es reflectante y 1600 m cuando no lo es. Su precisión es de 15 cm.

En cuanto a sus características ópticas, cabe destacar que su longitud de onda es 905 nm, su divergencia 3 mrad (30 cm a 100 m) y la frecuencia de repetición de pulso es de 1000 Hz, llegando a 2800 Hz o 4000 Hz dependiendo de la configuración.

Aplicación: estudio del adelantamiento en carreteras convencionales

Una de las principales aplicaciones del vehículo instrumentalizado es el análisis de la maniobra de adelantamiento en carreteras convencionales. Esta metodología se basa en hacer circular al vehículo instrumentalizado por tramos de carretera convencional en los que existen posibilidades de adelantamiento en una o varias zonas de adelantamiento permitido. El vehículo

instrumentalizado circula a una velocidad ligeramente inferior a la de operación del tramo, reproduciendo el comportamiento de los vehículos que son adelantados en las condiciones normales del tráfico.

De esta forma, los conductores de otros vehículos cuya velocidad deseada es superior a la del vehículo instrumentalizado sufren la demora causada por tener que circular a una velocidad inferior detrás de él. Esto provoca que se produzcan maniobras de adelantamiento, pudiendo observar y caracterizar a las propias maniobras y al proceso de seguimiento que tiene lugar antes de ellas empleando los distintos equipos instalados a bordo.

La investigación del fenómeno del adelantamiento se basa en los datos grabados en video por las cámaras digitales instaladas a bordo, que proporcionan una visión completa del vehículo o vehículos que se disponen a adelantar, desde el momento en el que llegan a la cola formada detrás del vehículo instrumentalizado. Para lograr esta visión completa, se coloca una cámara en la parte trasera, dos en el lateral izquierdo, y una en la parte delantera, tal como se muestra en la figura 6.

La observación en video de la maniobra de seguimiento y del adelantamiento se complementa con la medición de las distancias entre el vehículo instrumentalizado y los que le adelantan proporcionadas por

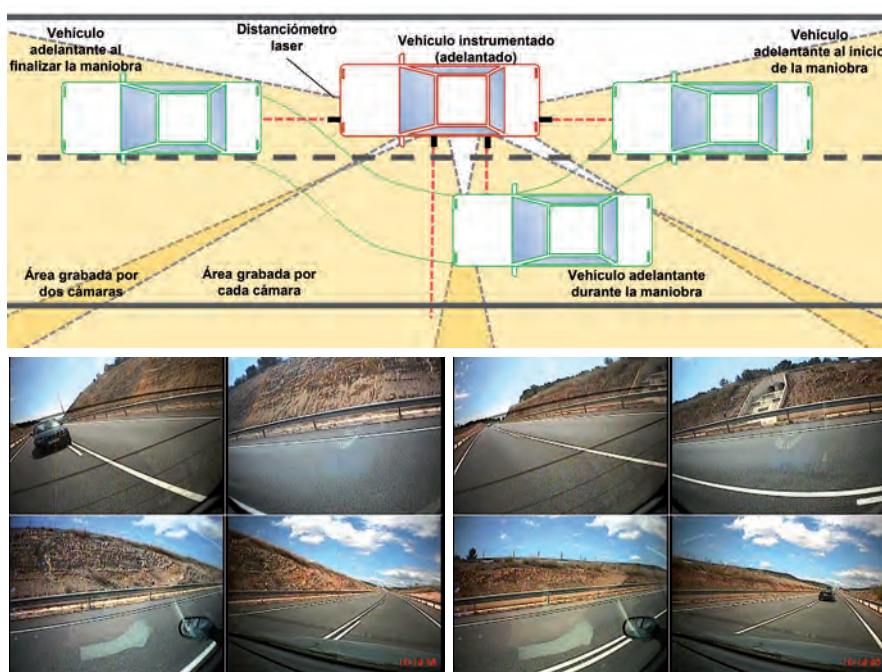


Figura 6. Esquema del vehículo instrumentalizado empleado para el estudio de la maniobra de adelantamiento. Imágenes tomadas por las cámaras de video del vehículo instrumentalizado en el instante inicial y final de una maniobra de adelantamiento

Tabla 1. Resumen de los tramos estudiados. Características geométricas y del tráfico

Carretera	CV-35	CV-35 (i)	CV-35 (ii)
PK	40+000 a 50+000	83+500 a 85+000	34+000 a 40+000
Longitud del tramo estudiado (km)	10	1,5	6
Velocidad de diseño en el tramo (km/h)	120	80	90
Velocidad máxima permitida (km/h)	100	100	100
Intensidad horaria (veh/h)	250 - 350		
Longitud de las zonas de adelantamiento (m)	450 - 1800	600 - 800	250 - 1100
Velocidades del vehículo adelantado (km/h)	80 - 90	50 - 60	60 - 70
Número de maniobras observadas	42	51	54
Distancia recorrida por el vehículo instrumentalizado (km)	160	85	155
Duración de la toma de datos (h)	4	4	4

los distanciómetros láser, así como de la información de posicionamiento y velocidad registrada por el receptor GPS. A ello se le añaden otras variables observadas y registradas por el copiloto del vehículo durante la realización de la toma de datos.

Metodología

Hasta el momento, existen muy pocas investigaciones basadas en observaciones de adelantamiento, y son principalmente desde puntos de vista exteriores y estáticos [5, 6], y en ningún caso en España, a excepción del presentado por Llorca y García [7]. En cuanto a la observación de esta maniobra desde la propia carretera, mediante vehículos instrumentalizados, el número de estudios es todavía más reducido [3, 4].

Mediante la metodología que se presenta, además de permitir la observación del adelantamiento en carreteras españolas, se introduce el análisis de algunas variables que hasta el momento sólo se habían considerado al emplear otras metodologías, como los simuladores de conducción. Es el caso de los parámetros sociológicos (sexo y edad) del conductor del vehículo adelantante, o el estudio del proceso de seguimiento antes de adelantar, compuesto por distintas decisiones de rechazo o aceptación de huecos generados por el tráfico en sentido opuesto.

Con esta metodología experimental, el GIIC comenzó, en abril de 2011, una inves-

tigación sobre el adelantamiento en tramos de carretera de la provincia de Valencia. Esta investigación forma parte del proyecto "Desarrollo de modelos de distancias de visibilidad de adelantamiento", subvencionado por el Ministerio de Ciencia e Innovación, con referencia TRA2010-21736.

La aplicación de la metodología, tal como se ha comentado, consistió en hacer circular al vehículo instrumentalizado a lo largo de un tramo de carretera convencional a una velocidad constante y previamente fijada en ciertos valores, con el objetivo de que actuara como vehículo adelantado en las distintas maniobras que tuvieran lugar durante la toma de datos.

Dos de los principales parámetros a determinar fueron, por lo tanto, los tramos de carretera en los que se realizó este estudio y las velocidades de circulación del vehículo durante el mismo. La selección obedeció a la influencia que determinadas variables tienen en la maniobra de adelantamiento, entre las que se encuentran las características geométricas de la vía (velocidad de diseño, sección transversal, visibilidad disponible, etc.) o las condiciones del tráfico (volumen, composición y velocidades de operación), tal como demuestran anteriores estudios [6, 4].

En el caso de la investigación comentada por el GIIC, se escogieron tres tramos de carreteras en la provincia de Valencia, cuyos volúmenes de tráfico son similares entre sí y se encuentran entre los 250 y

los 350 vehículos/hora. Esta intensidad de tráfico, de acuerdo a un estudio previo [7] demostró que provocaba una frecuencia elevada de maniobras. La ejecución de aquel estudio se llevó a cabo en los mismos tramos pero empleando grabaciones desde puntos de vista estáticos con ayuda del laboratorio móvil de tráfico del GIIC [8], y permitió caracterizar, entre otros muchos parámetros, las velocidades de los vehículos adelantados. A partir de dichas velocidades, se definieron las velocidades a las que posteriormente se hizo circular el vehículo instrumentalizado.

Una vez planteado el diseño experimental mediante el que se abarcan los distintos tramos y las distintas velocidades de circulación, se procedió a la realización de la toma de datos. Para ello, el vehículo instrumentalizado realizó recorridos de ida y vuelta por el tramo a velocidad constante, hasta alcanzar una muestra de maniobras significativa.

En total, se observaron más de 150 maniobras de adelantamiento, durante más de 15 horas de grabaciones a lo largo de los 3 tramos de carretera considerados. En la *tabla 1* se resumen las características de los tramos y los resultados previos de la toma de datos.

Durante el desarrollo de la toma de datos, el copiloto del vehículo instrumentalizado registraba la hora exacta en la que se producían las distintas maniobras a analizar. Además, la observación de los adelantamientos por parte de los ocupantes del vehículo adelantado instrumentalizado permitió anotar otras variables que no es posible observar posteriormente en los archivos de video. Es el caso de las características del conductor y del vehículo adelantante, como su edad aproximada, su sexo, el número de ocupantes, el modelo de vehículo, etc.

Una vez concluida la toma de datos, se procedió a su tratamiento con el objeto de llevar a cabo un proceso de reducción, tras el que se obtuvieron una serie de variables que caracterizan de forma objetiva y simple a cada una de las maniobras de adelantamiento observadas.

La definición de las variables de caracterización del adelantamiento se realizó a partir de las investigaciones desarrolladas con anterioridad y por otros autores, pero

ampliando el nivel de detalle alcanzado y extendiendo la observación no solo a la propia maniobra, sino a todo el tiempo durante el que el vehículo que adelanta circula en cola, detrás del instrumentalizado. Esta profundización en el estudio del adelantamiento es la principal y más novedosa aportación de la metodología.

De esta forma, se definieron distintas etapas o fases en la maniobra de adelantamiento y en el tiempo en cola, a partir de determinados sucesos observables en las imágenes de video, tal como se aprecia en la figura 7.

El tiempo en cola comenzaba cuando un vehículo circulando a mayor velocidad se aproxima por la parte posterior y comienza a seguir al instrumentalizado a su misma velocidad o a otros vehículos que ya formaban pelotón. A partir del momento en el que el vehículo se encontraba tras el vehículo adelantado, y dentro de aquellas zonas de adelantamiento permitido señalizadas por línea discontinua, se definieron dos posibles situaciones: huecos aceptados y huecos rechazados. Los huecos corresponden a intervalos de tiempo (medidos también en distancia) entre dos vehículos consecutivos en el flujo en sentido opuesto. A lo largo del proceso de seguimiento al vehículo adelantado instrumentalizado, se identificaron y midieron los huecos rechazados, si es el caso, y un hueco aceptado, dentro del que se lleva a cabo la maniobra.

En el interior del hueco aceptado se lleva a cabo el adelantamiento. La fase fundamental es el tiempo durante el que se invade el carril izquierdo, que se designó por t_1 . Además, se llamó t_2 al tiempo existente entre el regreso al carril derecho y el cruce con el próximo vehículo opuesto, que permite medir el riesgo asumido para completar la maniobra.

La medición de tiempos se basó directamente en la observación de las imágenes de video en un programa de visualización adecuado. Paralelamente, el registro de datos GPS proporcionó la posición del vehículo instrumentalizado en cada instante, así como su velocidad.

Por último, conociendo las distancias relativas entre el vehículo instrumentalizado y el vehículo adelantante, fue posible calcular también su posición y su velocidad. Para obtener dichas distancias se aplicó, en

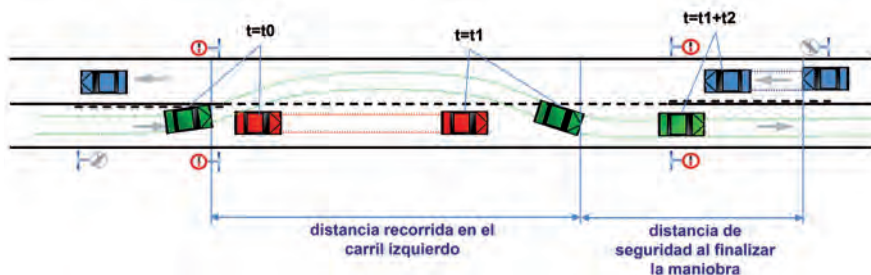


Figura 7. Esquema de la maniobra e identificación de las principales variables

un principio, la restitución de perspectivas a partir de las imágenes de video registradas por las cámaras. Este proceso se basa en la relación geométrica existente entre la realidad y su representación en perspectiva sobre un fotograma [8]. La realización de la restitución requirió la medición de una serie de referencias o puntos de posiciones conocidas previamente a la realización de la toma de datos. Para medir estas referencias, se estacionaba el vehículo con las cámaras en funcionamiento en una explanada amplia, y se colocaban una serie de conos de tráfico en posiciones conocidas, dibujando unas líneas ficticias de referencia que, trasladadas al resto de la grabación, permiten conocer la trayectoria de los vehículos que rodean al instrumentalizado. Este proceso requiere una gran cantidad de tiempo.

Por este motivo, se decidió dotar al vehículo instrumentalizado de medidores de distancia láser para poder calcular estas distancias relativas de forma automática. Se han dispuesto dos sensores, uno en la parte trasera y otro en la delantera, para poder calcular la distancia entre ambos vehículos mientras circulan ambos por el carril izquierdo. Además, dos sensores adicionales colocados en posición transversal permiten calcular la velocidad relativa del vehículo adelantante respecto del adelantado cuando ambos circulan en paralelo, así como las velocidades de circulación de los vehículos en el sentido opuesto.

Análisis de resultados

Como ya se ha comentado, entre abril y mayo de 2011, el GIIC realizó tres sesiones de toma de datos aplicando la metodología explicada. Este estudio experimental constituye una primera fase de la campaña de toma de datos incluida en el proyecto de investigación "Desarrollo de modelos de distancia de visibilidad de adelantamiento". Aunque en el conjunto del proyecto

está previsto analizar hasta 20 tramos de carretera convencional, bajo condiciones muy diversas, los resultados del análisis de la primera fase, ya completada, han proporcionado algunas conclusiones significativas.

La metodología ha permitido caracterizar la maniobra de forma más detallada que en anteriores investigaciones, permitiendo conocer y analizar el efecto de nuevas variables relativas al conductor del vehículo adelantante y a su comportamiento. El análisis se ha planteado para una muestra de más de 150 maniobras, que ya es comparable en magnitud, en esta primera fase, a la de otros autores que realizaron estudios del adelantamiento mediante vehículos instrumentalizados. En todas las maniobras observadas el vehículo adelantado es, dado el diseño de la metodología planteado, el mismo vehículo ligero.

Las principales variables que caracterizan la maniobra, y que han sido analizadas en profundidad, son las siguientes:

- El tiempo t_1 , de invasión del carril izquierdo, representa la principal variable geométrica del adelantamiento, ya que en este periodo se produce el potencial conflicto con el tráfico en sentido opuesto. Su valor medio, en el caso de las maniobras observadas, fue de 7,5 s, no estando afectado de forma significativa por la velocidad de circulación del propio vehículo, aunque tiende a ser más elevado conforme aumenta la velocidad de operación de la vía.
- La diferencia de velocidades medias entre el vehículo adelantante y el adelantado (dV) a lo largo del tiempo t_1 , es la variable que explica directamente la duración de la maniobra. Su valor medio se situó en los 19,9 km/h, y tampoco se ve afectado por las velocidades de circulación de ambos vehículos, aunque presenta una gran dispersión.
- El tiempo t_2 desde el final de la ma-

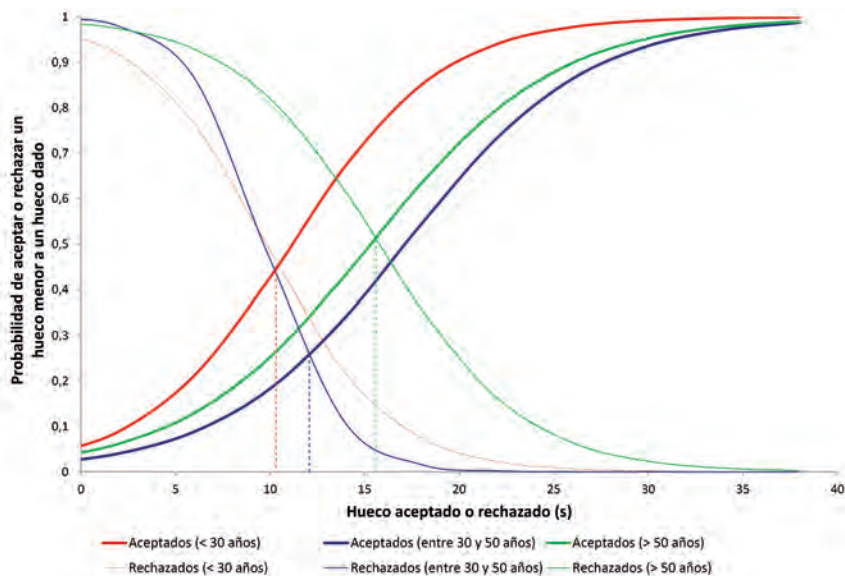


Figura 8. Distribuciones de probabilidad acumulada de aceptación y de rechazo de huecos en función de la edad estimada del conductor del vehículo adelantante

niobra hasta el cruce con el próximo vehículo opuesto representa el riesgo potencial ante el conflicto provocado por la aproximación del vehículo adelantante y el opuesto. El tiempo t_2 estuvo acotado inferiormente por valores de 1 s, aunque se observa que, a partir de tiempos inferiores a 4 s, las maniobras se llevan a cabo con mayor rapidez, encontrándose valores de t_1 significativamente inferiores. En estos casos, además, se han identificado maniobras evasivas del vehículo opuesto, que tiende de manera frecuente, aunque no generalizada, a desplazarse hacia la parte exterior de su carril, para reducir

un posible conflicto con el vehículo adelantante que se le aproxima.

- El valor del hueco aceptado se ha medido desde el punto de vista del conductor del vehículo adelantante, es decir, desde el momento en el que comienza para él la posibilidad de adelantar hasta que se cruza con el vehículo opuesto. Su valor medio se situó en 16 s, correspondientes a la suma de los tiempos t_1 y t_2 , y una fase inicial desde que es posible adelantar hasta que se decide hacerlo, componente principal del llamado tiempo de percepción y decisión. En este estudio de huecos, sólo se han tenido en cuenta aquellos casos en los

que el adelantamiento se realiza frente a un vehículo opuesto visible.

- La edad estimada del conductor del vehículo adelantante tiene un efecto apreciable en las anteriores variables, de modo que los grupos más jóvenes de conductores realizaban adelantamientos en un tiempo t_1 menor, con un mayor nivel de riesgo (menor tiempo t_2), aceptando por tanto huecos más pequeños en el sentido opuesto.
- El sexo del conductor del vehículo adelantante, y el tiempo en cola detrás del vehículo instrumentalizado, no tuvieron, en términos estadísticos, una influencia tan significativa en la maniobra.

Al ajustar las distribuciones de huecos aceptados y rechazados a una función exponencial, tal como han realizado otros autores [9], se puede observar la influencia de la edad, tal como se muestra en la figura 8. La intersección de la curva de aceptación con la curva de rechazo proporciona el valor del hueco crítico, entendido como aquél que tiene la misma probabilidad de ser aceptado que de ser rechazado. La figura muestra, igualmente, cómo el hueco crítico medio aumenta conforme aumenta la edad del conductor del vehículo adelantante.

De forma análoga, la figura 9 muestra la tendencia de los conductores más jóvenes a completar la maniobra con mayor rapidez, si bien no existen diferencias estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%.

Hasta el momento, una de las principales limitaciones de la metodología es que en todas las maniobras el vehículo adelantado era el mismo. No obstante, dado que el equipamiento del vehículo instrumentalizado es portátil, está previsto instalarlo a bordo de distintos tipos de vehículos, tal como se comentará más adelante.

Teniendo en cuenta esta limitación, se compararon los resultados de este estudio con otras observaciones realizadas anteriormente, observando, en general, tiempos de recorrido en el carril izquierdo inferiores, acotados por los valores de normativas [10] o inferiores a los valores medios observados [5]. En cuanto a la comparación con otras investigaciones realizadas mediante vehículos instrumentalizados, los valores propuestos por Carlson et al. [4], representan de forma adecuada a los valores

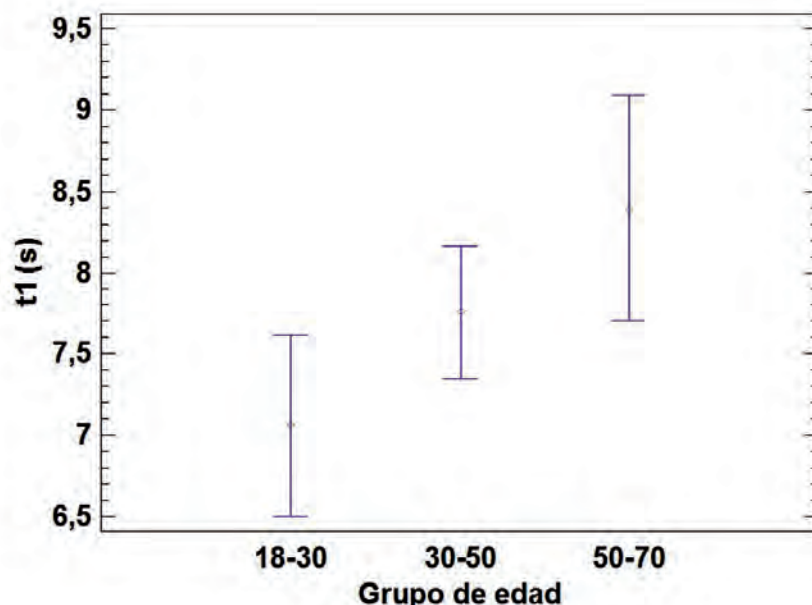


Figura 9. Variación del tiempo de recorrido en el carril contrario en función de la edad estimada del conductor del vehículo adelantante.

observados, en los rangos de velocidad comparables.

Teniendo en cuenta que el número de tramos observados, y por tanto de maniobras, se va a incrementar en los próximos meses, los objetivos principales de esta línea de investigación son la formulación o calibración de un modelo de distancia de visibilidad de adelantamiento, afectada por diversas condiciones. Entre ellas se encuentran las características de la vía (velocidad y visibilidad), del vehículo adelantado y adelantante (sexo y edad del conductor y tipo de vehículos), del tráfico (volumen, demoras acumuladas por el seguimiento y tiempo en cola) o del entorno (condiciones lumínicas). De esta forma, se pretende evaluar, gracias a la observación directa de maniobras ejecutadas por los conductores en tramos de carretera existentes, la seguridad y funcionalidad que proporcionan los actuales criterios de diseño y de señalización de prohibiciones de adelantamiento, recogidos en las Instrucciones de Carreteras 3.1 y 8.2, respectivamente.

Otras aplicaciones

Como se ha descrito en los anteriores apartados, la toma de datos mediante vehículo instrumentalizado se ha utilizado en el GIIC para el estudio de adelantamiento en carreteras convencionales.

Además, recientemente, el mismo equipamiento ha sido empleado para caracterizar la dinámica vehicular al paso por el *speed kidney*, dentro del proyecto MODETRA "Metodología para el diseño e implantación de sistemas de moderación del tráfico", subvencionado por el CEDEX del Ministerio de Fomento con referencia PT-2007-052-23/APM.

El *speed kidney* es un moderador del tráfico inventado, diseñado y desarrollado por el GIIC de la UPV [11]. El objetivo de esta aplicación concreta fue el de comprobar si las aceleraciones máximas sufridas por los conductores a su paso por el moderador de tráfico *speed kidney* con trayectoria curvada eran superiores a las permitidas por las normativas internacionales, tanto en la pista de ensayos del *speed kidney* en Puzol (Valencia), con 18 geometrías diferentes del dispositivo, como en la ronda este de Almussafes (Valencia), donde se

encuentran implementadas siete unidades de *speed kidney* en servicio.

Con ambas aplicaciones, se ha puesto de manifiesto la versatilidad del equipo y la eficacia del mismo.

Siguiendo con el desarrollo de la principal investigación descrita, acerca del adelantamiento en carreteras convencionales, el sistema de sensorización puede incorporarse también en vehículos pesados para caracterizar tanto la dinámica de estos en las maniobras de adelantamiento como el comportamiento de los vehículos que los adelantan.

Por otra parte, en relación con la segunda de las aplicaciones, la sensorización se puede utilizar para la evaluación de la dinámica vehicular en el resto de los moderadores de tráfico existentes y la caracterización de la trayectoria descrita en el caso de las actuaciones en la planta. Además, este estudio no tiene porqué centrarse únicamente en vehículos ligeros, sino que puede ampliarse a otros tipos de vehículos, como vehículos de emergencias, camiones, autobuses y motocicletas.

Pero las aplicaciones del vehículo instrumentalizado van más allá de estos ámbitos.

En investigaciones encaminadas al estudio del comportamiento de los conductores, el vehículo puede utilizarse con los siguientes objetivos:

- Estudio de la percepción de velocidad por parte de los conductores.
- Estudio de la percepción del tiempo de llegada.
- Estudio de la percepción del tiempo hasta colisión.
- Estudio de la atención de los conductores.
- Estudio de la percepción de la distancia de seguridad.
- Caracterización de los estilos de conducción.
- Comportamiento de los conductores al aproximarse a vehículos más lentos.
- Efecto de las condiciones meteorológicas en el comportamiento de los conductores.
- Márgenes de seguridad utilizados por los conductores.
- Respuesta de los conductores a la señalización horizontal o vertical.
- Aceptación de huecos en cruces e in-

corporaciones.

- Comportamiento en el cambio de carril o trenzados.
- Posicionamiento lateral del vehículo respecto a las líneas de limitación de carriles.
- Tiempos de reacción del conductor.
- Comportamiento de los conductores sobre diferentes estados del pavimento.
- Validación de simuladores de conducción para el estudio del comportamiento de los conductores.

En estudios relacionados con la infraestructura, el sistema puede utilizarse para las siguientes aplicaciones:

- Restitución de la geometría de la vía.
- Estudio de la trazada y velocidades de los vehículos en curvas.
- Estudio del diseño de las intersecciones oblicuas.
- Estudio de los desplazamientos laterales de los vehículos.
- Estudios de visibilidad.

En cuanto al estudio de la dinámica del propio vehículo, se pueden llevar a cabo investigaciones relacionadas con los siguientes temas:

- Comportamiento de los vehículos sobre diferentes estados del pavimento.
- Comportamiento de los vehículos en condiciones de hidroplaneo.
- Validación de simuladores de conducción para la evaluación de vehículos.

Finalmente, uno de los aspectos más importantes que considerar en la ingeniería de carreteras es la interacción entre los distintos vehículos y el comportamiento del flujo de tráfico. Dentro de este ámbito de investigación, el vehículo instrumentado puede ser parte esencial en los siguientes estudios:

- Estudio de la relación entre la velocidad y la distancia entre vehículos.
- Estudio de huecos críticos en intersecciones.
- Comportamiento del tráfico en cola.
- Evaluación del tiempo de recorrido.
- Distribución de velocidades.
- Tasas de aceleración y deceleración.
- Toma de datos para la calibración de microsimuladores de tráfico.

Como puede verse en la relación de posibles aplicaciones, el vehículo instrumentalizado puede utilizarse no sólo para la toma de datos que sirvan de base para



Vista interior del vehículo instrumentalizado

diferentes investigaciones, sino que también para la obtención de datos que faciliten la validación de simuladores de conducción y microsimuladores. De esta forma, el vehículo instrumentalizado se convierte en la fuente de alimentación de otras metodologías de toma de datos, siempre basada en observaciones de procesos de conducción naturalística.

Conclusiones

El Grupo de Investigación en Ingeniería de Carreteras ha desarrollado un vehículo instrumentalizado, modular y versátil, que permite la observación de una gran variedad de fenómenos del tráfico.

El vehículo instrumentalizado se compone, entre otros elementos, de cuatro cámaras digitales, un receptor GPS, distanciómetros láser y una unidad inercial de 3 ejes. Mediante estos elementos es posible caracterizar con un número muy elevado de variables, minimizando o eliminando, si es necesario para la aplicación concreta, la influencia del propio vehículo en el resto de conductores. El reducido tamaño de los equipos instalados a bordo es lo que permite que pasen desapercibidos para el resto de conductores, tal como ya se ha verificado en los estudios ya completados.

El reducido tamaño y el carácter modular de los equipos de sensorización del vehículo proporcionan una gran versatilidad, siendo una de las mayores ventajas la posibilidad de ser instalados en casi cualquier tipo de vehículo, ya sea ligero, pesado o incluso en motocicletas. Esta ventaja permite emplear el vehículo en un rango muy amplio y diverso de investigaciones relacionadas con la ingeniería de carreteras.

En cuanto a las experiencias llevadas a cabo hasta el momento mediante el vehículo instrumentado, destaca la que se ha desarrollado en el artículo. La observación de adelantamientos desde un punto de

vista interno a la maniobra permite evaluar la respuesta del conductor ante las oportunidades de adelantamiento que se le presentan, para conocer la influencia en este proceso de decisión de numerosas variables de la vía o de su entorno. La misma instrumentación ha sido empleada, en otra investigación y en otros vehículos, para estudiar las aceleraciones y velocidades al circular sobre el nuevo moderador de tráfico speed kidney.

El vehículo instrumentalizado puede ser empleado, tanto por profesionales como por investigadores, para analizar trayectorias, velocidades, aceleraciones o giros del propio vehículo o de los que le rodean, así como para estudiar el comportamiento de sus conductores. La utilidad de los datos recogidos es fundamental para numerosos estudios de diseño geométrico de carreteras, de la operación del tráfico urbano e interurbano y la seguridad vial.

Agradecimientos

El desarrollo del vehículo instrumentalizado ha sido posible gracias a la subvención del CEDEX del Ministerio de Fomento, con Referencia PT-2007-052-23/APM y a la subvención del Ministerio de Ciencia e Innovación con Referencia TRA2010-21736.

Referencias

- [1] Shinar, D. (2007). *Traffic Safety and Human Behavior*, Emerald.
- [2] Fisher, D., Rizzo, M., Caird, J. y Lee, J. (2011). *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine, and Psychology*, CRC Press.
- [3] Hegeman, G., Tapani, A. y Hoogendoorn, S. (2009). *Overtaking assistant assessment using traffic simulation. Transportation Research. Part C* 17, pp. 617-630.
- [4] Carlson, P. J., Miles, J. D. y Johnson, P. K. (2006). *Daytime High Speed Passing Maneuvers observed on Rural Two-Lane, Two-Way Highway: Findings and Implications. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1961, pp. 9-15.
- [5] Polus, A., Livneh, M. y Frischer, B. (2000). *Evaluation of the passing process on two-lane rural highways. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1701, p. 53.
- [6] Harwood, D. W., Gilmore, D. y Richard, K. (2010). *Passing Sight Distance Criteria for Roadway Design and Marking. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2195, pp 36-46.
- [7] Llorca, C. y García, A. (2011). *Evaluation of Passing Process on Two-Lane Rural Highways in Spain Using New Methodology Based on Video Data. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*.
- [8] García, A. Romero, M, Moreno, A.T. y Llorca, C. (2010). Desarrollo y aplicaciones de un nuevo laboratorio móvil de tráfico. *Rutas* 139, pp. 10-18.
- [9] Cheng, J., Jang, X. y Huang, X. (2008). *Driver's Critical Gap Calibration at Urban Roundabouts: A Case Study in China. Tsinghua science and technology* 13, 2, 2008, pp. 237-242.
- [10] American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), (2004). *A policy on geometric design of highways and streets*, Washington, D.C.
- [11] García, A., Moreno, A. y Romero, M. (2011). Development and Validation of Speed Kidney, a New Traffic-Calming Device. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, vol 2223, 43-53. ♦