

Validación de un simulador de conducción para el diseño de carriles de deceleración



Alfredo García, Catedrático del Departamento de Transportes, Universidad Politécnica de Valencia;

Francesco Bella, Profesor Asociado del Departamento de Ciencias de la Ingeniería Civil, Universidad "Roma Tre"; **Francisco Solves**, Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos; y **Mario A. Romero**, Doctorando, Departamento de Transportes, Universidad Politécnica de Valencia.

Resumen

La investigación tenía como propósito la validación del simulador interactivo estático de conducción del Centro de Investigación Interuniversitario para la Seguridad Vial (CRISS) para permitir su uso en el diseño de los carriles de de-

celeración, en función de la longitud del carril. La investigación se desarrolló en dos fases. En la primera se llevó a cabo un estudio de campo en Valencia sobre un tramo de una autovía, para estudiar el comportamiento de los conductores en los carriles de deceleración con tres longitudes diferentes. La segunda se llevó a cabo en Roma y consistió en un estudio experimental utilizando el simulador de conducción del CRISS. Cuarenta y dos conductores condujeron el simulador en tres configuraciones diferentes del carril de deceleración, que se correspondían con las estudiadas en el estudio de campo. Se analizaron las trayectorias y las velocidades, tanto en campo como en el simulador. También se analizó el comportamiento de los conductores en términos de gra-

do de deceleración. El análisis reveló que la trayectoria media se desarrolló con las mismas fases, tanto en campo como en simulación. Se encontró que la cuña de transición es utilizada correctamente en ambas situaciones. Antes de llegar al carril de deceleración, las velocidades en la realidad virtual son mayores que las medidas en campo. Esto se justifica probablemente por el hecho de que en el simulador de conducción no se transmite ninguna fuerza inercial al conductor. También puede haber contribuido el que el conductor sea incapaz de percibir largas distancias en el escenario virtual. Una vez en el carril de deceleración, la percepción del escenario es mejor y, consecuentemente las velocidades se asemejan más a las medidas en campo. No se en-

contró ninguna relación entre el grado de deceleración y la longitud del carril de deceleración, ni en la realidad ni en el simulador de conducción.

Palabras clave: Simulador de tráfico, diseño geométrico, carril de deceleración, seguridad vial.

Introducción

Una investigación experimental anterior evaluó la evolución de los vehículos en el carril de deceleración para diferentes longitudes, con la intención de relacionar la seguridad

de validación del simulador de conducción del CRISS para determinar si las velocidades adoptadas por los conductores en el simulador en las proximidades de una zona de obra en autopista eran diferentes a las observadas en la realidad (3) y para valorar la fiabilidad de las velocidades medidas durante la conducción virtual, comparadas con aquellas recogidas en la realidad (4). Dichos estudios destacaron la buena fiabilidad de la medición de las velocidades recogidas durante la conducción de la simulación del CRISS, aunque sus resulta-

CRISS. Se realizó una reconstrucción en realidad virtual de los tres escenarios estudiados durante la primera fase; y, a continuación, se desarrollaron una serie de pruebas de conducción y un análisis estadístico para comparar con los datos de campo, y así proceder a la validación del simulador de conducción.

Estudio en Campo

Los experimentos se llevaron a cabo en el mismo tramo, lo que nos permitió estudiar el comportamiento de los vehículos en función de la lon-

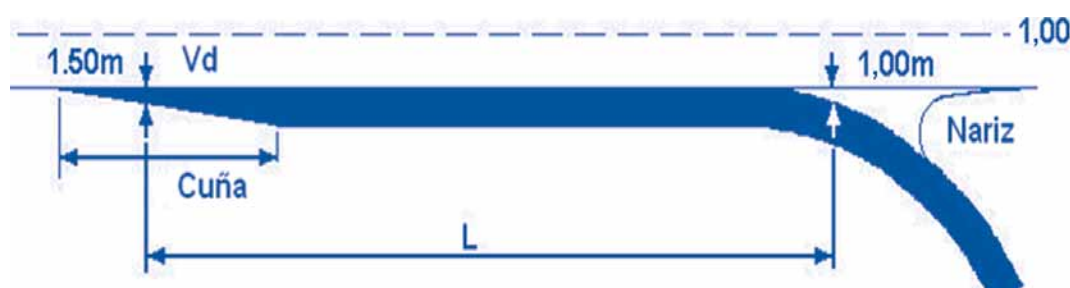


Figura 1. Carril de deceleración paralelo.

con el diseño geométrico de los carriles de deceleración. García y Romero (1) concluyeron que los carriles de deceleración con longitudes muy cortas o muy largas son los menos seguros. Por tanto, lo óptimo es una longitud intermedia. El objetivo de esta investigación es la validación del simulador interactivo estático de conducción del Centro de Investigación Interuniversitario para la Seguridad Vial (CRISS) de la Universidad Roma Tre, de modo que pueda ser utilizado para el diseño de carriles de deceleración.

La utilización de un simulador de conducción tiene varias ventajas: se puede controlar el experimento con eficiencia y seguridad, y el simulador recoge automáticamente y con detalle los datos de la conducción. Pero, para que el uso del simulador de conducción sea el apropiado, este debe ser validado. Esto se puede llevar a cabo ya sea con "validación absoluta", la cual establece una correspondencia numérica entre la realidad y la simulación, o con "validación relativa", que relaciona la variación que se produce al cambiar diferentes factores de la conducción (2). Anteriormente se han llevado a cabo distintos estudios

dos no se pueden generalizar para validar el simulador en experimentos diferentes. Dado que se recogieron los datos de campo en el mismo lugar, variando la longitud del carril de deceleración, pero sin variar el resto de características de la autovía, en esta investigación se realizó una reconstrucción en realidad virtual para tres escenarios diferentes y, de esta forma, comparar cada configuración estudiada en campo con su equivalente en realidad virtual.

Método

La investigación ha sido desarrollada en dos fases. La primera consistió en una fase experimental aprovechando las obras para mejorar un tramo de la autovía CV-35, próxima a la ciudad de Valencia. Fue posible estudiar el comportamiento de los conductores en un carril de deceleración variando su longitud, adoptando longitudes larga, media y corta. Para ello se empleó cinta adhesiva blanca como señalización.

La segunda ha consistido en una experimentación en realidad virtual con el simulador de conducción del

gitud del carril sin modificar el resto de las características de la vía, y manteniéndose las características del tráfico. La longitud del carril de deceleración y las características utilizadas en esta investigación (figura 1) corresponden a la Instrucción de Tráfico de Carreteras (5).

La longitud del carril de deceleración (L) se define como la distancia entre la sección característica donde la cuna de transición mide 1,5 m de ancho y la sección donde la anchura de la nariz es de 1 m, en función de la pendiente de la calzada (i), la velocidad de diseño del carril principal (V_{do}) y la velocidad límite establecida para el ramal de salida (V_{dl}) y se calcula utilizando la ecuación 1.

$$L = \frac{V_{do}^2 - V_{dl}^2}{254 \cdot i + 50} \geq 100 \text{ m} \quad (1)$$

El tramo de autovía estudiado tiene una pendiente longitudinal de -2% (-0,02), la velocidad límite establecida para la salida es de 40 km/h y no hay velocidad límite en la zona de la cuna de transición.

Se establecieron tres configuraciones diferentes de carril según los con-

dicionantes anteriores. La configuración 1 pretende estudiar el comportamiento de los conductores con carriles de deceleración más largos que los establecidos en la norma, por lo que se eligió la longitud máxima disponible (395 m) que equivale a la que se obtendría utilizando $V_{do}=127$ km/h y una cuña de 100 m de longitud. Para las configuraciones 2 y 3, se utilizaron diferentes velocidades de diseño para determinar tanto la longitud de la cuña como la del carril de deceleración. La *tabla 1* muestra las características del carril de deceleración en las diferentes configuraciones.

Se utilizó una cinta de señalización autoadhesiva para construir cada configuración; y, antes de tomar la información, se dejó transcurrir, por lo me-



Carril de deceleración experimental en la CV-35.

Configuración	V_{do} (km/h)	Longitud del carril de deceleración (m)	Longitud de la cuña (m)
1	127	395	100
2	120	285	100
3	100	187	83

Tabla 1. Características de cada configuración

nos, una semana, para permitir que los conductores se acostumbraran a la nueva longitud del carril, dado que la mayoría de los conductores eran habituales. Para recoger la información, se posicionaron cuatro videocámaras que grababan simultáneamente cuatro subtramos del carril de deceleración, y de esta forma lograr establecer la trayectoria de cada vehículo.

Estudio en el Simulador de Conducción

Para validar el simulador de conducción para el proyecto y para verificar la influencia de la longitud del carril de deceleración en el comportamiento de los conductores, se llevó a cabo un experimento con el simulador de conducción del CRISS siguiendo tres etapas:

- Reconstrucción en realidad virtual del escenario real observado en la autovía CV-35, en cada una de las tres configuraciones.
- Elección de una muestra representativa de conductores.
- Conducción en realidad virtual

en las tres configuraciones.

El simulador del CRISS es un simulador interactivo estático de conducción que incluye un modelo vehicular dinámico completo basado en la simulación por ordenador, adaptado para trabajar en tiempo real. El modelo completo ha sido extensamente validado (6). El *hardware* se compone de cuatro ordenadores interconectados y tres interfaces. Un ordenador procesa las ecuaciones de movimiento, y los demás se encargan de generar las imágenes. Las interfaces son el sistema directriz, los pedales y la palanca de embrague, que, con la intención de crear un entorno similar al de la conducción, están instalados en un vehículo real. El escenario de la carretera se proyecta sobre tres grandes pantallas: una en el centro, justo en frente del vehículo, y las otras dos una a cada lado. Habitualmente el campo de visión es de 135°. Este montaje proporciona una vista realista de la carretera y su entorno. El escenario cambia dinámicamente de acuerdo a las condiciones de evolu-

ción del vehículo, el cual depende de las acciones del conductor sobre los pedales y el volante. La resolución visual es de 1024 x 768 píxeles y la frecuencia gráfica va de 30 a 60 Hz en función de la complejidad de la escena. El sistema también está equipado con un equipo de sonido que reproduce los sonidos del motor. Ello ofrece una simulación muy realista, recogiendo todas las acciones que el conductor realiza sobre el freno, el acelerador y el volante, y proporcionando muchos otros parámetros que describen las condiciones de viaje (baricentro del vehículo, posición relativa con respecto al eje de la vía, velocidad local y aceleración, ángulo de giro del volante, ángulo de inclinación, ángulo de rotación, etc.) con intervalos de tiempo o de espacio de fracciones de segundo o de metro, respectivamente.

El escenario real se reprodujo en realidad virtual recreando exactamente el trazado en planta, así como el perfil longitudinal, la sección transversal y los elementos laterales propios de la carretera. Los elementos laterales de la carretera (talud, barreras, señales, árboles, etc.) fueron colocados como los reales, tomados a partir de un vídeo que muestra el entorno real de la carretera. Estos objetos fueron reconstruidos utilizando un *software*



Figura 2. Ejemplo de reproducción del escenario real en realidad virtual.

tridimensional e introducidos en el escenario del simulador. Por último, se reconstruyó el escenario de la manera más real posible. El fondo se obtuvo ensamblando distintas imágenes del entorno real. La figura 2 muestra algunos ejemplos de lo que el conductor percibía durante la simulación.

Se seleccionaron cuarenta y dos conductores para efectuar la conducción en el simulador, que cumplieran las siguientes características: ninguna experiencia con el simulador de conducción; al menos 4 años de antigüedad del carné de conducir; y una distancia media recorrida en carretera interurbana de al menos 2500 km/año. El procedimiento desarrollado con cada voluntario fue el siguiente:

1. Explicación al conductor de las características generales de la prueba (duración de la misma, uso del volante y los pedales, cambio automático, etc.).

2. Relleno de un formulario con los datos personales: edad, sexo, antigüedad del carné de conducir, media anual de distancia recorrida en carretera interurbana. La edad varía entre los 22 y los 45 años; el 31% de los conductores fueron mujeres. La antigüedad del carné fue superior a los 4 años; la media anual de conducción

en carretera interurbana se situó entre 2500 y 40 000 km.

3. Posicionamiento del conductor dentro del coche y ajuste del asiento.

4. Prueba en el simulador de conducción en un tramo de autopista de duración aproximada 10 minutos.

5. Conducción en autovía en una de las configuraciones establecidas previamente.

6. El conductor abandona el vehículo durante unos 5 minutos para reestablecer las condiciones psicofísicas similares a aquellas con las que inició la prueba.

7. Conducción en la autovía para las otras dos configuraciones del estudio.

8. Relleno de otro cuestionario sobre las molestias percibidas durante la conducción en el simulador de modo que se puedan eliminar aquellas pruebas llevadas a cabo en condiciones anómalas.

El cuestionario descrito en el paso 8 consta de cuatro preguntas, cuya respuesta puede ser cualquiera de las siguientes molestias: náuseas, mareo, fatiga u otro. Cada pregunta podía ser respondida de acuerdo al nivel de molestia sentido: nulo, leve, medio y alto. El nivel nulo en los cuatro tipos de molestia es considerado el óptimo pa-

ra la conducción. No se observó ningún caso en el que la conducción fuera inaceptable. Por tanto, los 42 conductores pudieron ser utilizados para el propósito del estudio.

Resultados

Resultados de campo

Se consideraron únicamente vehículos ligeros y, en particular, vehículos en los cuales el comportamiento del conductor no estaba condicionado por los vehículos que le precedían. Se consideró solo automóviles con un intervalo mínimo de 5 segundos y que se incorporaran cuando el carril de deceleración estuviera libre. Utilizando un software específico, es posible transformar las imágenes recogidas en distintos datos como velocidades, aceleraciones y trayectorias, las cuales son necesarias para explicar el comportamiento del conductor.

Trayectoria

Gracias a la restitución de las trayectorias de los vehículos seleccionados, es posible concluir que en carriles de deceleración paralelos, los conductores (85%) prefieren una maniobra de curva y contracurva en lugar de una directa.

De un primer análisis, se evidencia que la trayectoria media en las tres configuraciones es similar. En todas ellas, se desarrollan las mismas fases:

- El vehículo circulando por el carril derecho de la vía principal, en las proximidades a la cuña, realiza una primera maniobra para entrar en el carril de deceleración.

- A continuación, el conductor corrige su trayectoria para situarse paralelo al carril de deceleración.

- Próximo a la nariz, el conductor realiza una nueva maniobra para inscribir el vehículo en la salida.

La velocidad

En cada configuración, se seleccionaron cinco secciones para estudiar la velocidad: la primera se encuentra a 125 m del inicio de la cuña

de transición; de esa manera es posible analizar como el conductor se acerca al carril de deceleración. La segunda (al inicio de la cuña) y la quinta (sobre la nariz) son las que determinan la longitud del carril de deceleración L (figura 1), y por ultimo las secciones 3 y 4 se encuentran a $1/3 L$ y $2/3 L$ de la sección 2, dentro del carril de deceleración.

Se obtuvieron las siguientes conclusiones para la velocidad:

- Para cada sección de cada configuración los datos se ajustaban a una distribución normal lo que se verificó en primera instancia con la χ^2 , para un nivel de significancia del 5%. Los resultados del test revelaron que los datos cuya distribución se suponía gaussiana funcionaban con resultados positivos.

- Aumentando la longitud disponible hasta la salida, es decir, aumentando la longitud del carril de deceleración, el valor de percentil 85 de la distribución de velocidades (V_{85}) recogida para las configuraciones 1, 2 y 3 es mayor. En la sección 1, la velocidad es de 127 km/h para la configuración 1, 122 km/h para la configuración 2, y 119 km/h para la configuración 3. Lo mismo ocurre para el resto de configuraciones.

- La velocidad en la sección 5, que tiene la misma geometría local en las tres configuraciones, confirma lo que se afirmaba en el primer punto. Las velocidades son mayores conforme la longitud del carril de deceleración es mayor; V_{85} es: 59,6 km/h en la configuración 1; 51,5 km/h en la configuración 2; y 46,0 km/h en la configuración 3.

- El comportamiento de los conductores cerca de la salida se aproxima a la velocidad específica del ramal de salida en la configuración 3 (46,0 km/h). En las otras configuraciones los conductores adoptaron velocidades mayores.

- En todas las configuraciones la velocidad al inicio de la cuña (sección 2) es menor a la velocidad de diseño de la calzada principal. La cuña en las configuraciones 1 y 2 está diseñada para una velocidad de 120 km/h,

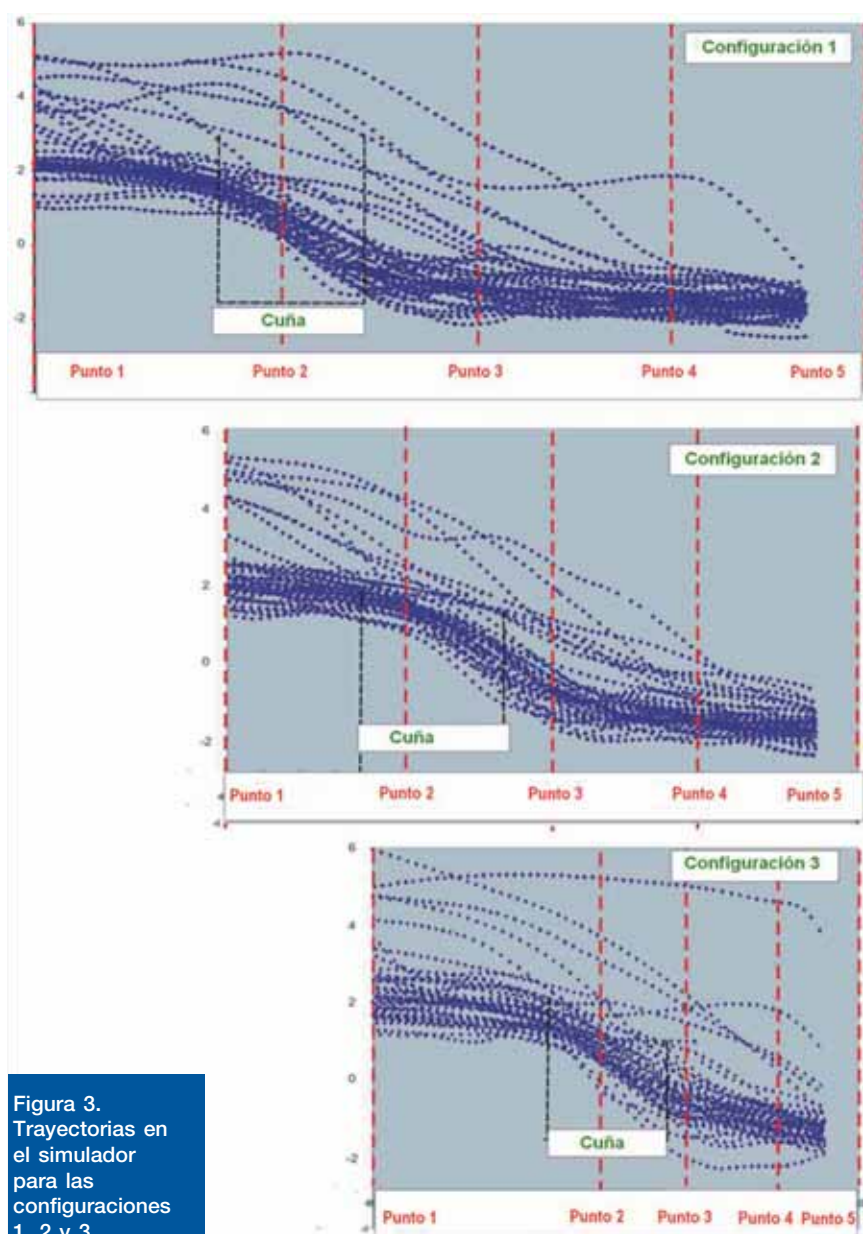


Figura 3. Trayectorias en el simulador para las configuraciones 1, 2 y 3.

mientras que en la configuración 3 la cuna está diseñada para una velocidad de 100 km/h.; sin embargo la V_{85} es 112,2 km/h para la configuración 1, 108,8 km/h para la configuración 2, y 99,0 km/h para la configuración 3.

- El estudio de la desviación estándar muestra comportamientos del conductor más heterogéneos para mayores longitudes del carril de deceleración (valores de 19 km/h en la sección 1 de las configuraciones 1 y 2). Los comportamientos más homogéneos se dan para la configuración 3, que es la más corta.

Cuando el carril es demasiado largo, se da la posibilidad al conductor de acelerar, para decelerar posteriormente junto a la salida. Se calculó el

porcentaje de vehículos que aceleran sobre el carril de deceleración para determinar la funcionalidad del carril. Para las configuraciones 1 y 2, aproximadamente un tercio de los vehículos aceleraron sobre el carril de deceleración, mientras que en la configuración 3 ninguno lo hizo.

No se encontró ninguna relación entre los valores de la tasa de deceleración y la longitud del carril.

Además, el punto donde se produce la frenada es independiente de la longitud del carril.

Resultados del Simulador de Conducción Trayectoria

Así como ocurría para las trayectorias en campo, en el carril de dece-

lación paralelo la mayoría de los conductores (cerca de 85%) prefieren una trayectoria de curva-contracurva en lugar de una directa, pero la trayectoria directa se da más cuanto menor es la longitud del carril (figura 3). En todas ellas se desarrollan según las fases que ya se describieron para los resultados de campo. La cuña cumple con la función para la cual fue diseñada.

La velocidad

En primer lugar, se realizó un análisis para determinar cómo influía el orden de las configuraciones al realizar las pruebas sobre las velocidades medidas. Se evidenció que los resultados eran los mismos, tanto si el conductor comenzaba con la configuración más larga, con la media o con la más corta. Se demostró que el procedimiento no influía en los resultados y también fue posible hacer el análisis sin tener en cuenta el orden en que se habían probado las configuraciones.

Del mismo modo que ocurrió para las velocidades de campo, los resultados del test revelaron que la velocidad en realidad virtual se comportaba según la distribución gaussiana. La figura 4 muestra los valores de velocidad (V_{85}) obtenidas para las configuraciones 1, 2 y 3.

Se extrajeron los siguientes resultados para las velocidades:

- El percentil 85 de la velocidad en la sección 1 es mayor que el límite de velocidad de 120 km/h para las tres configuraciones (configuración 1: 144,16 km/h; configuración 2: 141,53 km/h; configuración 3: 137,34 km/h).

- La pendiente del perfil de velocidades es mayor entre las secciones 2-3 que entre las secciones 1-2, lo que confirma que la cuña de transición cumple con la función para la cual fue diseñada.

- En las secciones 3 y 4, la velocidad disminuye cuando la longitud del carril de deceleración es menor. Ello confirma una adecuada restitución visual del escenario, que es bien percibida por los conductores. En la sección 3 las velocidades son:

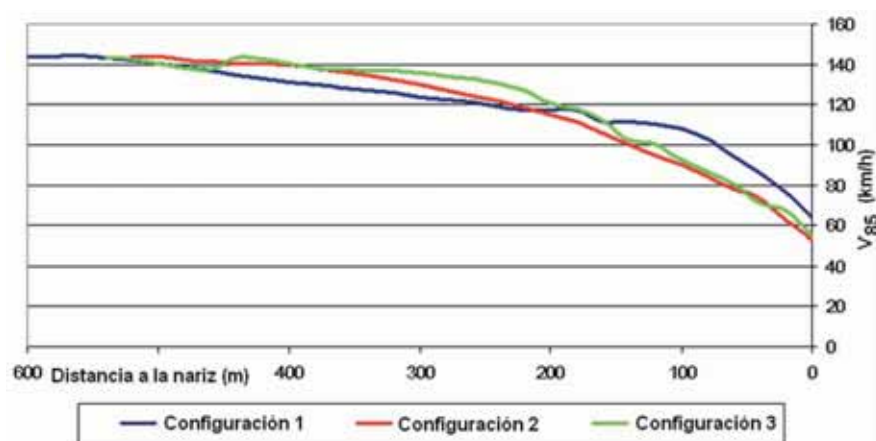


Figura 4. Perfil del percentil 85 de la velocidad en cada configuración

121,60 km/h en la configuración 1;
112,52 km/h en la configuración 2;
y 102,58 km/h en la configuración

3.

- Las velocidades en las secciones situadas a la misma distancia de la nariz son sustancialmente similares para las configuraciones 2 y 3. Ello concuerda con el hecho de que el conductor decelera en función de la distancia disponible para realizar la salida. Ello no ocurre en la configuración 1, donde el percentil 85 de la velocidad es menor que en el resto de configuraciones hasta encontrarnos a 180 m de la nariz; pasado este punto, las velocidades en la configuración 1 son mayores. Esto parece revelar un comportamiento anómalo inducido por una excesiva longitud del carril de deceleración en la configuración 1.

- Junto a la nariz (sección 5), la velocidad para las configuraciones 2 y 3 es similar (en la configuración 2, 53,26 km/h, y en la configuración 3, 54,55 km/h), mientras que en la configuración 1 la velocidad es 62,54 km/h.

- La desviación estándar es alta en todas las secciones (en un intervalo entre 21,53 km/h y 11,05 km/h), lo que se explica por el comportamiento heterogéneo de los conductores en el simulador. Las desviaciones en el simulador son menores cerca de la salida, donde la geometría local (que es similar para las tres configuraciones) hace que el comportamiento de los conductores sea más homogéneo.

Los resultados para la deceleración revelaron también algunas dife-

rencias entre el comportamiento del conductor para la configuración 1 que para las otras:

- El punto donde se realiza la frenada es básicamente el mismo, 200 m antes de la nariz. De hecho, el percentil 85 de la velocidad en esta sección era el mismo para todas las configuraciones.

- Sin embargo, a parte de eso, en la configuración 1, que es la más larga debido a que hay más distancia para realizar la frenada, el conductor se relaja pensando que tiene tiempo suficiente, lo que hace que la deceleración se dé más tarde y con valores mayores (de todos modos el conductor llega con deceleraciones mayores)

- Los valores de deceleración para la configuración 1 son diferentes que para el resto de configuraciones. En este caso los conductores deceleran a 180 m de la nariz. La deceleración no es constante y varía enormemente junto a la salida. Al inicio el valor de la deceleración se encuentra entre $-3,5$ y $-4,0$ m/s²; pero, según las velocidades son mayores, es necesario realizar una frenada extra de $-5,0$ m/s² en los últimos 50 m.

- En la configuración 2, la deceleración es constante y varía entre $-3,5$ y $-4,0$ m/s². En este caso el conductor empieza a decelerar cuando se encuentra a 210 m de la nariz. En la configuración 3 la deceleración es constante con un valor de $-4,0$ m/s². El conductor empieza a decelerar a 200 m de la nariz. Por tanto, el valor de la deceleración es similar en estas configuraciones; aunque en la

configuración 2, dado que hay disponible una mayor distancia, el conductor decelera más suavemente.

- Por tanto, el comportamiento más homogéneo se da en la configuración 3 (la más corta), donde, además, la deceleración se produce sobre la cuña.

Análisis de validación

Trayectoria

El análisis de campo y el de realidad virtual revelan que la mayoría de los conductores (cerca del 85%) realizan una maniobra paralela con curva y contracurva, es decir, el comportamiento del conductor concuerda con el diseño del carril de deceleración. Hay un pequeño número de conductores que realizan una maniobra directa y, por tanto, no coherente con el diseño del carril. En el simulador de conducción es donde las maniobras de tipo directo aparecen de manera clara y, en particular, para la configuración 3. La cuña es utilizada de forma correcta, ya que los conductores cambian de carril en este punto. El comportamiento del conductor muestra las mismas fases, ya sea en la realidad o en simulación (figura 5).

Finalmente, en las proximidades de la salida la trayectoria es más homogénea, debido a la geometría local, que es la misma sea cual sea la configuración.

Velocidad

En las secciones 1 y 2 y, por tanto, antes del carril de deceleración, las velocidades en realidad virtual son mayores a las medidas en campo (tabla 2 de la página siguiente). La explicación puede residir en el hecho de que en el simulador de conducción (estático) no hay percepción del riesgo, lo que hace que los conductores circulen más rápido. Una vez el conductor se encuentra en el carril de deceleración (secciones 3 y 4), la percepción del escenario es mejor y el conductor se da cuenta que debe reducir su velocidad, lo que hace que en estas secciones las velocidades sean similares a las medidas en cam-

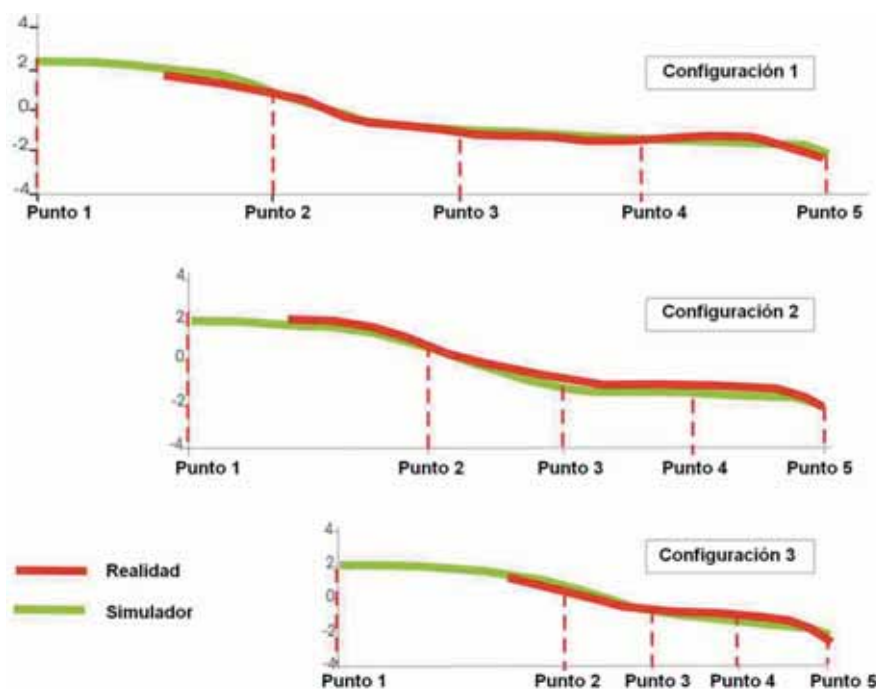


Figura 5. Trayectoria media en el simulador y en la realidad.

po. En la sección 5, junto a la salida, para las configuraciones 1 y 2 las velocidades en el simulador son iguales a las reales. En la configuración 3 la velocidad en la sección 5 en el simulador es unos 8 km/h mayor que la registrada en campo. Finalmente, en simulación, la desviación estándar es mayor que en la realidad.

Se llevó a cabo para el análisis un test Z bilateral, para determinar si las diferencias entre las velocidades de dos poblaciones (velocidades en la realidad y en el simulador) eran estadísticamente significantes.

Del análisis estadístico utilizando el test Z con un 5% de nivel de significancia, es posible decir que el simulador de conducción da como resultado las mismas velocidades que las recogidas en el carril de deceleración real (secciones 3, 4 y 5). Esta conclusión confirma que las diferencias en términos de velocidad medidas en campo y en simulación no son estadísticamente significativas en ninguna de esas secciones para estas configuraciones. Sin embargo, esto no ocurre en las secciones 1 y 2 previas al carril de deceleración, donde el test Z no da resultados positivos. Esto se debe probablemente al hecho de que en el simulador de conducción no se transfiere al conduc-

tor ningún tipo de fuerza inercial (el simulador del CRISS es un simulador estático).

Las fuerzas inerciales se presentan generalmente en condiciones reales e influyen en el comportamiento de los conductores. La incapacidad del conductor de discernir el escenario de la carretera a largas distancias (la nariz está demasiado lejos de las secciones 1 y 2) podría haber contribuido también a las altas velocidades observadas en el simulador. Conclusiones similares se obtuvieron en un estudio previo de Kaptein *et al* (7). En él llevaron a cabo una investigación para validar el simulador de conducción estático en cuanto al comportamiento del conductor y encontraron que en algunos casos las diferencias entre la conducción virtual y la conducción real eran importantes. Se propusieron dos posibles causas para estas diferencias. En primer lugar, la ausencia de sensación de movimiento podría haber llevado a resultados no realistas. En segundo lugar, aquellas tareas que requirieran de información visual a largas distancias podrían haber sido diferentes en el simulador como resultado de un bajo nivel de resolución.

Dichos resultados concuerdan también con los que previamente habían

Configuración 1		Realidad			Simulador	
Sección	V ₈₅ km/h	Nº muestras	Desviación estándar	V ₈₅ km/h	Nº muestras	Desviación estándar
1	126,96	42	18,85	144,16	42	20,02
2	112,21	42	12,15	130,82	42	21,53
3	110,37	42	11,84	121,60	42	20,91
4	97,26	42	11,52	111,00	42	21,25
5	59,62	42	8,86	62,54	42	12,87
Configuración 2		Realidad			Simulador	
Sección	V ₈₅ km/h	Nº muestras	Desviación estándar	V ₈₅ km/h	Nº muestras	Desviación estándar
1	122,04	53	16,69	141,53	42	18,79
2	108,79	53	14,95	128,47	42	19,85
3	106,09	53	11,88	112,52	42	18,55
4	86,99	53	9,02	89,49	42	12,03
5	51,50	53	5,69	53,26	42	11,70
Configuración 3		Realidad			Simulador	
Sección	V ₈₅ km/h	Nº muestras	Desviación estándar	V ₈₅ km/h	Nº muestras	Desviación estándar
1	119,03	49	12,26	137,34	42	18,28
2	99,02	49	10,89	121,75	42	20,53
3	95,91	49	9,87	102,58	42	21,40
4	84,13	49	8,35	86,55	42	17,73
5	45,99	49	4,79	54,55	42	11,05

Tabla 2. Percentil 85 de la velocidad.

alcanzado Bittner *et al* (8), Tornos (2), Boer *et al.* (9) y Bella (4) sobre el comportamiento en términos de velocidad en el simulador y en la realidad. Encontraron que en simulación las velocidades eran más altas que en las carreteras reales. Dicha diferencia en términos de velocidad era atribuible a la ausencia de los pequeños movimientos que el vehículo realiza en la carretera, pero que no ocurren en los simuladores de conducción estáticos.

En cuanto a la deceleración, es posible decir que en ambos casos se comporta de la misma manera. Esto ya se había demostrado por Hoffman *et al.* (10) quien encontró que la acción de frenado en el simulador y en campo era similar. El inicio de frenado es independiente de la longitud del carril. No se encontró, por tanto, ninguna relación entre la deceleración y la longitud del carril.

En cuanto a la correspondencia numérica entre las velocidades en el simulador de conducción y las que se producen en la realidad, los datos recogidos demuestran que las velocidades en el simulador son mayores que en las de campo en todas y ca-

da una de las secciones de cada configuración. La diferencia de velocidades podría deberse a la baja percepción de riesgo que se da en el simulador y no en la carretera real.

Es en la vía donde el conductor realiza una comparativa continua entre el riesgo percibido y el asumible en función de la información que obtiene del entorno. Si el riesgo percibido excede del aceptable, el conductor actúa sobre los parámetros que controlan su conducción reduciendo la velocidad operativa y/o modificando la posición lateral del vehículo en la carretera para así reducir el riesgo percibido hasta el rango del admisible. Si, por el contrario, el riesgo percibido es menor que el aceptable, el conductor, en aras de reducir el tiempo de su viaje, aumentará su velocidad hasta un valor en el cual el riesgo percibido sea el máximo que es capaz de aceptar. Este modelo es conocido en la literatura como la homeostasis del riesgo (11) (12).

Este modelo no funciona en realidad virtual. En el simulador de conducción, es un hecho, que el conductor no percibe ningún riesgo (o

quizá uno muy pequeño asociado a la posibilidad de tener un accidente virtual en el cual no habría daños personales ni materiales) y puede asumirse que ajusta su velocidad en función solo del entorno de la carretera. En otras palabras, se puede asumir que el trazado geométrico generoso es el que lleva a los conductores a adoptar altas velocidades, tanto en la carretera real como en la virtual. No obstante, mientras que en la carretera real esta tendencia se comprueba porque el riesgo percibido por el conductor aumenta según lo hace la velocidad, en el simulador no ocurre así. Aunque en el simulador no se perciba riesgo, el conductor mantiene la tendencia a adoptar altas velocidades en tramos geoméricamente no complicados. Estas consideraciones son coherentes con los resultados de estudios previos realizados por Bittner *et al.* (8) sobre el comportamiento en términos de velocidad en el simulador y en la realidad. Se encontró que, en las curvas más sencillas, la velocidad de entrada era mayor en el simulador que en la realidad, mientras que, en las más com-

plicadas, las velocidades de entrada en la curva eran menores en el simulador que en la carretera real.

Investigaciones anteriores (7) y (13) encontraron que, al darle al simulador de conducción posibilidad de movimiento, aumentaba el realismo en la simulación. Es razonable, por tanto, asumir que una mejora del simulador de conducción del CRISS, implementándole dicha movilidad para reproducir los efectos de la conducción real, podría ayudar a reducir las altas velocidades consecuentes de la ausencia de percepción de riesgo. Tam-

Antes de llegar al carril de deceleración, las velocidades en el simulador son mayores a las medidas en campo. La explicación puede residir en el hecho de que en el simulador de conducción (estático), no hay percepción del riesgo, lo que hace necesario implementarle la movilidad para generar los efectos debidos al movimiento. El bajo nivel de resolución del sistema visual podría ser también una causa. Una vez en el carril de deceleración, la percepción del escenario es mejor y consecuentemente, la velocidad en esta

encontraron diferencias significativas en términos de velocidad antes de llegar a la cuña de transición. Es razonable pensar que la mejora de la fidelidad del simulador de conducción del CRISS, implementándole un sistema que le confiera movilidad y que simule adecuadamente los movimientos reales del vehículo y, también, una mejora en el sistema de representación visual podrían ayudar a obtener velocidades más parecidas a las reales en zonas que se encuentren a gran distancia de la nariz.

El simulador de conducción del CRISS es una herramienta fiable para el análisis del comportamiento de los conductores en los carriles de deceleración



En los carriles de deceleración aparecen maniobras conflictivas.

bién se obtendrían efectos positivos mejorando la representación gráfica.

Conclusiones

El análisis de campo, así como el de realidad virtual, revelan que, para carriles de deceleración paralelos, la mayoría de los conductores (cerca del 85%) prefieren la trayectoria de curva y contracurva en lugar de la maniobra directa. El comportamiento del conductor muestra que la trayectoria media se desarrolla en las mismas fases en la realidad y en la simulación. La cuña de transición se utiliza correctamente, tanto en la realidad como en simulación.

zona es similar a la de campo; pero en simulación la desviación estándar es mayor a la que se da en la realidad.

No se encontró relación entre la deceleración y la longitud del carril, ni en la realidad ni en la realidad virtual. El punto donde se produce la frenada es independiente de la longitud del carril.

La comparación entre los datos obtenidos en campo y los datos obtenidos del simulador nos permiten afirmar, del simulador de conducción del CRISS, que se trata de una herramienta fiable para el análisis del comportamiento de los conductores en los carriles de deceleración. Se

Agradecimientos

Esta investigación ha sido llevada a cabo gracias a la financiación del Gobierno italiano a través del Ministerio para la Universidad y la Investigación Científica.

Referencias bibliográficas

1. Garcia, A. and Romero, M. Tracking Vehicle Behavior in a deceleration lane with different lengths. In Proceedings 3rd International Symposium on Highway Geometric Design. TRB, Chicago, 2005.
2. Tornos, J. Driving behaviour in a real and a simulated road tunnel –

Rutas Técnica

a validation study. *Accident Analysis and Prevention*. Vol. 30, N°4, Elsevier Science, 1998, 497-503.

3. Bella, F. Validation of a driving simulator for work zone design". In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, N° 1937, TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2005, 136-144.

4. Bella, F. Reliability analysis of speed measures on a two-lane rural road using driving simulator" Paper number 06-1444. in *Proceedings of the 85th Annual Meeting Transportation Research Board*. Washington, January 2006.

5. Ministerio de Fomento "Norma 3.1-IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras". Madrid, 1999.

6. Allen, R. W. Rosenthal, T. J., Aponso, B. L., Klyde, D. H., Anderson, F. G., Hougue, J. R. Christos, J. P. A low cost PC based driving simulator for prototyping and Hardware-in-the-Loop Applications. SAE (So-

ciety of Automotive Engineers) paper 98-0222, 1998, Warrendale, PA.

7. Kaptein, N. A., Theeuwes, J. Vand Der Horst, R. Driving simulator validity: some considerations. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, No.1550 TRB, National Research Council, Washington, D.C., 1996, pp. 30-36.

8. Bittner, Alvah C, Jr., Ozgur Simsek, William H. Levison, and John L. Campbell. On-Road Versus Simulator Data in Driver Model Development : Driver Performance Model Experience. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, N° 1803 TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002, pp. 38-44.

9. Boer, E. R., A. R. Girshik, T. Yamamura, and N. Kuge. Experiencing the Same Road Twice: A Driver Centered Comparison Between Simulation and Reality. *Driving Simulation*

Conference 2000, Paris, Sept. 6-7, 2000.

10. Hoffman, J. D., Lee, J.D., Brown, T. L., McGehee, D. V. Comparison of drive braking responses in a high-fidelity simulator and on a Test Track. In *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, N° 1803 TRB, National Research Council, Washington, D.C., 2002, pp. 59-65.

11. Wilde, G. J. S. *Target Risch*. 1994 PDE Publications. Toronto.

12. Fuller, R. *Psychology and the Highway Engineer*. In *Human Factors for Highway Engineers*. 2002. Elsevier Science Ltd.

13.- Slick, R. F., Tran, T. Q, Cady, E. T. Adaptation a motion-based and non-motion-based Simulator. Proceedings of the Third International Driving Symposium on Human Factors in Driver Assessment, Training and Vehicle Design. Rockport; Main USA, June 27-30, 2005.■