

Testbed for Industrial Advanced Driver Assistance Systems

Xabiel G. Pañeda, Roberto Garcia, David Melendi, Dan García, David Martínez, Victor Corcoba

Abstract— Factories and industrial warehouses are environments in which accidents can be easily produced. People on foot work in the same place where heavy machinery is operating. Therefore, when accidents occur, they frequently have severe consequences. To reduce the number of accidents and their effects, there are strict regulations on the workplace and workers participate in regular training activities. In recent years, there has been a great evolution in Advanced Driver Assistance Systems (ADAS) specially in public road vehicles. With the proper design, these systems may also help to improve safety in industrial environments. For example, an ADAS may warn industrial drivers about nearby pedestrians. Nevertheless, the development of ADAS in this context is complex because industrial environments and their machines are very heterogeneous. Hence, this paper describes a testbed developed to assess the design of ADAS for industrial vehicles. The testbed includes all the elements needed to evaluate an industrial ADAS: hardware, an event management system, a simulator of a warehouse and, an evaluation methodology. To determine the effectiveness of the testbed, the assessment of an ADAS designed to warn industrial drivers about nearby obstacles has also been performed. The assessment includes a subjective evaluation of the testbed and of the cognitive load generated during the evaluation. The results of this assessment are very promising. They show that the testbed is realistic and that it is effective for ADAS designers to analyse the reactions of drivers to the signals produced by the assistance systems under evaluation.

Index Terms— ADAS evaluation, driving assistance, industrial vehicles, intelligent transportation systems, testbed

I. INTRODUCCIÓN

Uno de los escenarios más característicos de una fábrica es el de un conjunto de personas y vehículos trabajando juntos en una misma zona. Algunos ejemplos podrían ser el transporte de materiales, la realización de trabajos de mantenimiento o el almacenamiento de mercancías. Estos entornos se caracterizan por ser propensos a producir accidentes y, comúnmente, con consecuencias muy graves. Los vehículos industriales son pesados y cuentan con palas, horquillas y otros elementos que pueden golpear o cortar. Además, estos vehículos circulan habitualmente hacia atrás y giran con zonas ciegas donde no es posible detectar obstáculos o personas. Para evitar accidentes, se han utilizado acciones formativas.

X.G. Pañeda (xabiel@uniovi.es), R. Garcia (garciaroberto@uniovi.es), D. Melendi (melendi@uniovi.es), D. Garcia (garciaadan@uniovi.es) y V. Corcoba (corcobavictor@uniovi.es) pertenecen al área de Ingeniería Telemática del Departamento de Informática de la Universidad de Oviedo. D. Martínez (david.martinez@adnmobilesolutions.com) es director técnico de la empresa ADN Mobile Solutions.

Se definen zonas específicas para peatones y máquinas, o se instalan señales de advertencia en puntos peligrosos [1]. Sin embargo, todos estos elementos no solucionan totalmente los problemas y siguen produciéndose con cierta frecuencia incidentes con consecuencias fatales. Por ejemplo, solo durante el año 2022 la Administración de Seguridad y Salud Ocupacional de los Estados Unidos de Norteamérica u OSHA (Occupational Safety and Health Administration) registró 108 accidentes en los que había implicada una carretilla elevadora [2]. Adicionalmente, existen estudios que indican que en uno de cada seis accidentes laborales graves en los Estados Unidos de Norteamérica hay implicada una carretilla elevadora y que en el 80% de los accidentes hay también peatones implicados [3].

En los últimos años han aparecido sistemas avanzados de asistencia a la conducción o ADAS (Advanced Driver Assistance System) que han sido diseñados precisamente para evitar accidentes. Estos sistemas combinan elementos físicos y lógicos para, por ejemplo, alertar a un conductor de la presencia de un peatón u otro vehículo en el perímetro de acción. Sin embargo, el desarrollo de estos sistemas se ha centrado prácticamente en la asistencia a conductores de vehículos que circulan por la vía pública y no en factorías o explotaciones industriales. Y es que la diversidad de entornos industriales dificulta el diseño de un ADAS universal adaptado a cualquier tipo de trabajo y fábrica. Es por ello que cada ADAS debe adaptarse o configurarse para un escenario concreto. Por ejemplo, un vibrador instalado en el cinturón de seguridad podría ser muy efectivo para advertir de la presencia de un peatón en una zona de muerte. Sin embargo, si el tipo concreto de actividad requiere de peatones en esa zona de forma continuada, un sistema de este tipo puede resultar muy molesto para los conductores.

En este artículo se presenta un entorno de pruebas desarrollado para evaluar el diseño y la configuración de ADAS para vehículos industriales, de manera que se posibilita la monitorización de tiempos de respuesta y la estimación de la carga de trabajo que genera el sistema de asistencia. El banco de pruebas incluye hardware específico, un simulador adaptado al contexto industrial, un sistema de registro de eventos preparado para detectar tiempos de respuesta, un sistema de comunicación para interactuar con el ADAS a evaluar y un sistema de evaluación.

El resto del artículo se ha organizado de la siguiente forma. En la sección 2 se analizan los trabajos relacionados. La sección 3 presenta las características del sistema de pruebas comenzando por el entorno físico y continuando con el software

y el sistema de comunicación con el ADAS. En la sección 4 se describen las pruebas realizadas para determinar la validez del sistema de pruebas construido. Y finalmente, en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Existen numerosos trabajos publicados en el contexto de los simuladores de conducción [4] - [7]. Este tipo de entornos de pruebas se han venido utilizando con éxito para actividades de formación, evaluaciones de componentes, o incluso, análisis forenses, etc. En lo que se refiere a maquinaria y vehículos industriales, su uso se limita casi exclusivamente a procesos de entrenamiento de conductores y maquinistas [8] [9]. Por ejemplo, en [10] se presenta el diseño de un entorno de realidad virtual para mejorar la seguridad de manejo en los conductores de carretillas elevadoras. Para ello, definieron un área en la que había trabajadores a pie donde la carretilla debía realizar diversas tareas.

Sin embargo, no se ha encontrado referencia alguna sobre entornos de simulación para la evaluación de sistemas de apoyo a la conducción en un contexto industrial. Quizás sea por su especificidad, porque estos dispositivos son todavía escasos [11] [12] o porque los fabricantes prefieren mantener sus evaluaciones confidenciales. En todo caso, es probable que en los próximos años se produzca una mayor demanda de sistemas de asistencia, ya que el problema de los accidentes es una realidad y contar con este tipo de entornos de prueba permitirá hacer ensayos más extensos en contextos diferentes. Por ejemplo, para determinar el mejor diseño para los avisos visuales, en [13] los autores utilizaron una sala en la que el conductor maneja una máquina real con la que recorre un circuito de 10 metros en el que existe una puerta de salida simulada. Mediante un sistema de aviso activado de forma aleatoria al cruzar la puerta, se analizaba el tiempo de respuesta del conductor. Este entorno permite realizar experimentos útiles, pero sólo de forma limitada. Adicionalmente, su coste es alto debido a que se necesita una máquina real. Más tarde, en [14] los autores realizaron las pruebas en una factoría. En este caso se evaluó un sistema de aviso con luces que permite a los peatones observar un área de peligro en el entorno a la máquina. Este tipo de evaluación puede ser admisible, dado que el sistema no puede llegar a inducir a error y provocar un accidente. No obstante, no es generalizable. Lo recomendable es hacer pruebas en entornos controlados antes de realizar experimentos con usuarios reales.

En este artículo, se presenta un entorno capaz de evaluar sistemas de apoyo a la conducción mediante una sencilla integración a través de servicios HTTP REST. El sistema es capaz de plantear escenarios de conducción y monitorizar las acciones del conductor al encontrarse con obstáculos ocultos (no detectables).

III. ENTORNO DE PRUEBAS

El objetivo del entorno de pruebas es el de crear un entorno de pruebas lo más realista posible que permita llevar a cabo la evaluación de sistemas de asistencia a la conducción para

vehículos industriales. Sobre el mismo se pueden desplegar prototipos ADAS con la finalidad de evaluar su funcionamiento mientras un conductor maneja un vehículo industrial en el interior de una factoría. A lo largo de evaluación, el conductor encuentra diferentes obstáculos no visibles de cuya presencia es informado por el ADAS. Estudiando las reacciones del conductor puede determinarse la utilidad de los diferentes tipos de avisos.

Para conectar el entorno de pruebas con el ADAS, éste tiene que contar únicamente con un servidor HTTP REST en el que pueda recibir eventos generados por los obstáculos ocultos.

El entorno de pruebas está compuesto por una estructura física y un simulador. La estructura física cumple un doble propósito. Por un lado, permitir que los conductores puedan realizar la actividad simulada, y por otro, permitir la instalación realista del ADAS. En la Fig. 1 pueden verse las partes principales del entorno de pruebas con un ADAS instalado. Estas partes se detallan en el diagrama de bloques que se muestra en la Fig. 2.

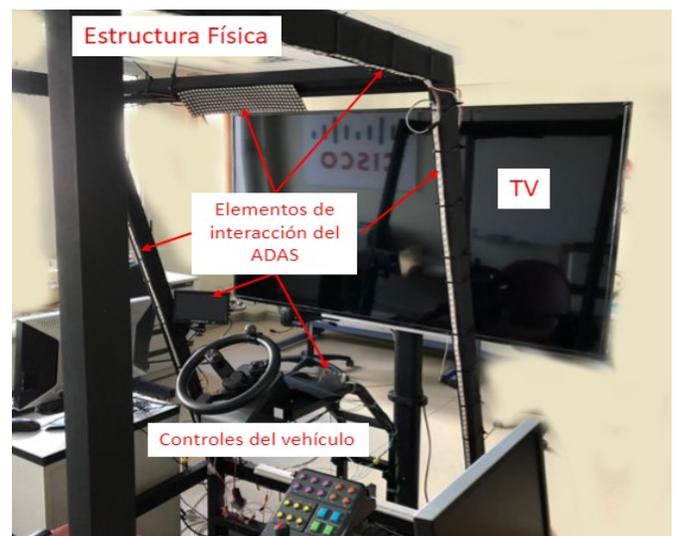


Fig. 1. Partes principales del entorno de pruebas, incluyendo su estructura física, los controles del vehículo, la pantalla y un ADAS en evaluación.

A. Entorno Físico

El entorno de pruebas cuenta con una estructura física en forma de cabina, con unas dimensiones similares a las de la de una carretilla elevadora. Para simular el manejo, se dispone de unos controles de vehículo industrial compuestos por un volante con pomo giratorio y dos pedales para realizar movimientos hacia delante y hacia atrás. En la parte delantera de la estructura física se dispone de un televisor de 65 pulgadas para la proyección del simulador. La estructura física también permite la colocación de los diferentes elementos de interacción

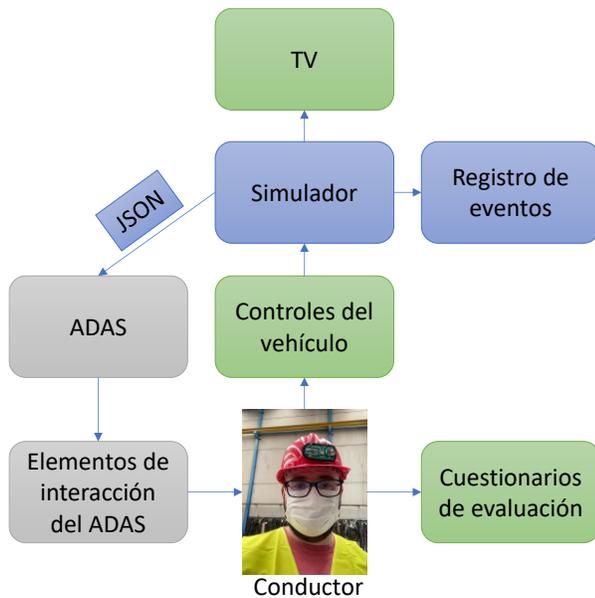


Fig. 2. Diagrama de bloques con los elementos principales del entorno de pruebas.

con el conductor que utilizarán los ADAS a evaluar, como pantallas, tiras led, matrices led, altavoces, cinturón con vibrador, etc. Finalmente, el sistema cuenta con sistemas de alimentación para proporcionar la energía necesaria a todos los elementos.

B. Simulador

Para simular la conducción en una factoría se ha desarrollado un juego basado en el motor Unity. El juego consiste en manejar un vehículo industrial, en este caso una carretilla elevadora, por una factoría. La dinámica es sencilla, ya que no se trata de evaluar las capacidades de manejo del conductor, sino de determinar si el ADAS a evaluar es efectivo o no. Por ello, su principal objetivo es el de centrar la atención del usuario durante la conducción sin que el ADAS le suponga un esfuerzo cognitivo superior al de la realización de una actividad simple como puede ser el manejo de una carretilla para una persona que lo hace rutinariamente.

La factoría virtual se ha diseñado con una planta rectangular en la que se han situado diferentes módulos constructivos que dan lugar a una estructura compleja de pasillos. Los módulos son opacos, con lo que el conductor no puede ver lo que hay detrás de una esquina al girar. En la Fig. 3 se observa una vista superior de la factoría con los módulos constructivos. Adicionalmente, en los pasillos de la factoría se ha distribuido un gran número de obstáculos (cajas, barriles, etc.). El objetivo es el de evitar que el conductor avance sin prestar atención. Los módulos constructivos y los obstáculos obligan al conductor a realizar pequeños cambios de dirección.

Uno de los elementos importantes del simulador son los obstáculos ocultos. Estos no son visibles en forma alguna y su función es la de desencadenar avisos al ADAS que se evalúa. Los obstáculos no tienen ninguna representación física ya que si fueran visibles no sería posible discernir si el conductor los ha detectado porque los ha visto o gracias a la intervención del



Fig. 3. Estructura de la factoría y disposición de los obstáculos ocultos.

ADAS. En la Fig. 3 se pueden ver los obstáculos ocultos desplegados en la factoría. Cuando el vehículo se adentra en la zona de aviso configurable de un obstáculo, el simulador envía un mensaje HTTP al ADAS proporcionando un conjunto de datos extensible en formato JSON. Esta información puede ser personalizada para proporcionar los datos que necesita cada ADAS, para actuar según su propio diseño. Puede incluir detalles generados por el simulador como la velocidad o la ubicación relativa de un obstáculo respecto del vehículo (delante, detrás, izquierda, derecha) La comunicación se realiza mediante servicios HTTP REST. Este tipo de integración extensible permite independizar el entorno de simulación del ADAS que se pretende evaluar, al poder funcionar en equipos diferentes comunicándose mediante protocolos estándar. Para recibir los eventos, el ADAS debe disponer de un servidor HTTP REST habilitado, que sea capaz de procesar los mensajes generados por el simulador.

La carretilla elevadora se maneja utilizando los controles de vehículo que ya se han descrito. El vehículo simulado se ha diseñado para desplazarse como una carretilla elevadora real. Por ello, gracias al giro sobre si mismo del vehículo, no es necesario prácticamente utilizar la marcha atrás. En el diseño se ha buscado un manejo sencillo y que no requiera habilidades especiales. Esto permite realizar evaluaciones con conductores no especializados. En la Fig. 4 se muestra una escena de simulación de manejo. El simulador cuenta con un ruido de fondo configurable, lo que permite crear una experiencia inmersiva. Para aumentar el realismo, este ruido varía en las diferentes zonas de la factoría. Además, el ruido del motor del vehículo cambia según su velocidad.



Fig. 4. Escena de la simulación con obstáculos y la indicación de salida.

C. Registro de Eventos

El simulador del entorno de pruebas genera una línea de log en un registro cada vez que se produce un evento de obstáculo oculto. Estas líneas log permiten estudiar los tiempos de respuesta del conductor y el desplazamiento del vehículo. Además, permiten analizar la respuesta en función del tipo de señal emitida y de los obstáculos, situados en diferentes posiciones de la factoría y con una posible influencia en los tiempos de respuesta. Las líneas del registro de eventos incluyen los siguientes campos:

- Posición del vehículo dentro de la factoría en el instante de envío del aviso.
- Marca de tiempo en el instante de envío del aviso.
- Posición del vehículo en el instante en el que el conductor deja de acelerar (frena el vehículo).
- Marca de tiempo en el instante en el que el conductor deja de acelerar (frena el vehículo).
- Indicador de que el conductor no ha frenado antes de 5 segundos.
- Obstáculo oculto que activó el aviso del ADAS.
- Tipo de aviso generado por el simulador: zona del obstáculo (delante, detrás, izquierda, derecha) y perímetro (naranja, rojo).

D. Evaluación Subjetiva

Para la evaluación de los ADAS en el entorno de pruebas, se contempla una valoración subjetiva del entorno, del propio ADAS y de la carga de trabajo requerida. Para ello, los conductores participantes deben rellenar un cuestionario que consta de cuatro partes. En la primera parte se obtiene información sobre el conductor (edad, posesión de licencia de conducir, experiencia en el manejo de vehículos industriales y frecuencia de uso de un vehículo a motor). La segunda parte se basa en la escala Simulator Sickness Questionnaire (SSQ) propuesta por [15] donde los participantes valoran cada elemento entre cero (ausente) y tres (grave). Sus preguntas tienen el propósito de detectar síntomas similares al mareo que podrían impactar en la usabilidad y en el comportamiento del participante [16] [17]. La tercera parte se basa en el Igroup Presence Questionnaire (IPQ) [18] y emplea una escala de tipo Likert entre 1 (muy desacuerdo) y 7 (muy de acuerdo). Permite medir la sensación subjetiva de cada persona de estar en el entorno virtual y depende de la tecnología empleada y del contenido de la simulación. Existe una relación positiva entre la usabilidad y una puntuación alta en el IPQ [19] [20]. Finalmente, la última parte se centra en analizar la carga de trabajo de la tarea. Para ello, se emplea el método Nasa-TLX [21] sin ponderar y empleando una escala comprendida entre 1 (muy bajo) y 7 (muy alto). Este cuestionario ha sido validado en multitud de trabajos previos y evalúa la carga de trabajo en base a seis dimensiones: la demanda mental, la demanda física, la demanda temporal, el rendimiento, el esfuerzo y el nivel de frustración.

El análisis estadístico previsto, una vez realizados los experimentos, consiste en estudiar los resultados proporcionados por el ADAS y el entorno de pruebas con el objetivo de determinar si hay diferencias significativas entre las

medias de dos o más grupos de variables. Se han utilizado las pruebas más comunes para este tipo de análisis [22]. Así, la elección de la prueba depende de la asunción de las condiciones de normalidad y homocedasticidad de los datos. En primer lugar, se chequea la normalidad con la prueba de Shapiro-Wilk y la homocedasticidad con de Bartlett. Si los datos cumplen ambas condiciones, se utiliza la prueba de ANOVA de una vía para comparar los datos. Si falla la homocedasticidad, se utiliza la prueba de Kruskal-Wallis. La prueba de Kruskal-Wallis también se usa en situaciones con un fallo considerable de normalidad, con un p-valor $> 0,05$. Si estas pruebas arrojan diferencias significativas entre los grupos de variables bajo estudio, las comparaciones por pares se realizan con las pruebas de Tukey o pruebas "t" de Student con un coeficiente de confianza del 95%.

IV. PRUEBAS DEL ENTORNO DE EXPERIMENTACIÓN

Para determinar la efectividad del entorno de pruebas se ha realizado la evaluación de un prototipo de ADAS compuesto por unas tiras led, un vibrador para el cinturón y una matriz led. El sistema es capaz de avisar al conductor cuando se detecta un obstáculo en el perímetro del vehículo, con dos subperímetros: rojo y naranja. En el caso de la zona naranja, el vehículo avisa al conductor a través de unas tiras led laterales iluminadas en color naranja y unas flechas indicadoras en la parte delantera superior que indican la posición relativa del obstáculo. En el caso de la zona roja, se cambia el color de las tiras led (en rojo) y se activa un vibrador situado en el cinturón de seguridad. En la Fig. 5 puede verse el prototipo de ADAS instalado en un vehículo real. Para realizar la evaluación del ADAS en el entorno de pruebas, se ha sustituido el sistema de detección de operarios por un servidor HTTP REST que es capaz de procesar los eventos del sistema y activar las señales correspondientes.

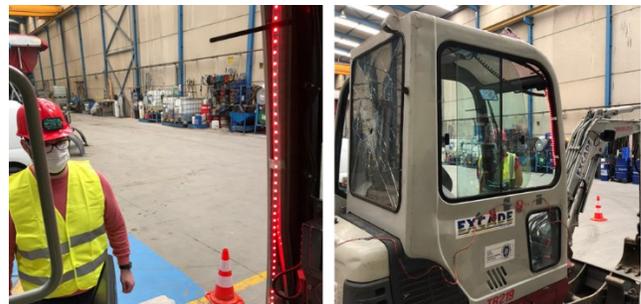


Fig. 5. Utilización del prototipo de ADAS en un contexto real. Detalle de tiras led en rojo por la proximidad de un operario (a) y vista general del vehículo durante las pruebas (b).

El ADAS se ha probado en el entorno de pruebas en dos contextos. Uno con buena iluminación ambiente y el otro con escasa iluminación. La evaluación se ha realizado con 5 conductores voluntarios cuyas características se muestran en la tabla 1. Cada conductor ha llevado a cabo dos pruebas de conducción, con y sin iluminación. Cada una de las pruebas ha consistido en el manejo de una carretilla durante 5 minutos, en trayectos desde diferentes puntos de la factoría hasta su puerta de salida. En diferentes localizaciones desconocidas, el vehículo pasa cerca de obstáculos ocultos que provocan la

activación del ADAS, avisando al conductor de que debe detener el vehículo.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS CONDUCTORES

ID del conductor	Edad	Años de experiencia conduciendo
1	33	17
2	48	30
3	41	8
4	55	31
5	36	0

Cada prueba consta de una serie de fases que el conductor debe ir superando. Cada una de las fases consiste en un trayecto que parte desde un punto diferente de la factoría. Se ha monitorizado cada una de estas fases, siendo posible analizar el tiempo individual para cada una de ellas, como muestra la Fig. 6. El conductor #2 es un usuario con experiencia en la conducción y manejo de este tipo de maquinaria, por lo que el tiempo que emplea en superar cada fase es significativamente menor que el del conductor #5, que no tiene experiencia en el manejo de estas máquinas.

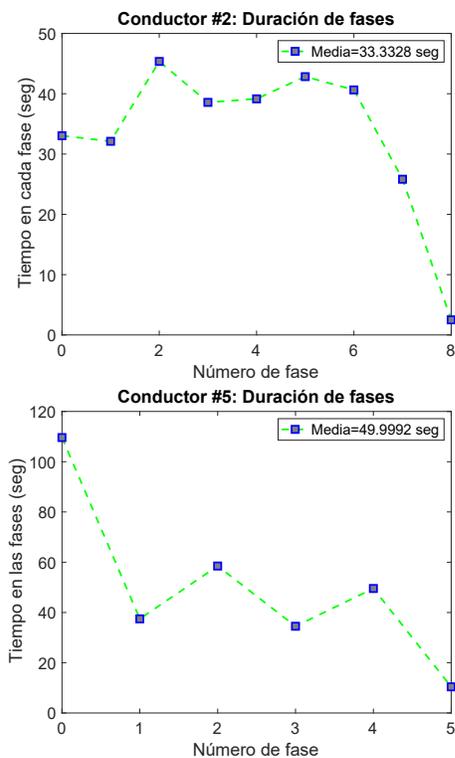


Fig. 6. Duración de las fases de prueba para el conductor #2 (a) y para el conductor #5 (b).

Asimismo, el simulador permite monitorizar la respuesta del conductor ante los diferentes tipos de obstáculos, lo que permite predecir el tiempo de reacción del conductor desde que recibe el aviso del ADAS sobre la presencia de un obstáculo oculto. En la Fig. 7 se muestran los resultados de la monitorización del tiempo de respuesta del conductor #2. En la Fig. 7.a se muestra el tiempo de reacción para cada uno de los obstáculos encontrados en cada una de las fases de la prueba. Por otro lado,

en la Fig. 7.b se observa un boxplot en el que se muestran la mediana y los percentiles de los tiempos de reacción registrados para cada uno de los obstáculos encontrados en cada una de las fases de las pruebas realizadas por el conductor #2.

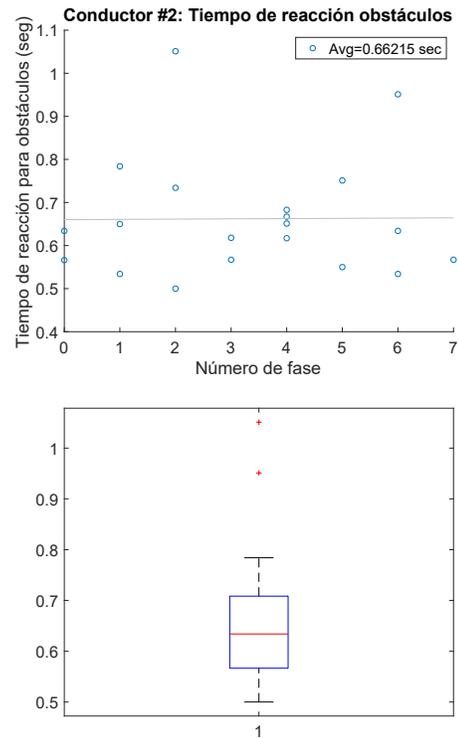


Fig. 7. Tiempo de reacción ante obstáculos para el conductor #2. Mediciones por fase (a) y boxplot con la mediana y los percentiles de los tiempos de reacción (b).

Por otro lado, se midió la distancia recorrida hasta la parada del vehículo, para comprobar la capacidad de reacción del conductor, como un criterio de validez para el entorno de experimentación, tal y como se muestra en la Fig. 8. La Fig. 8.a muestra los resultados para el conductor #2, pudiendo apreciarse cómo, evidentemente, la distancia recorrida hasta que el conductor frena es proporcional al tiempo de reacción. También influye en esta distancia la velocidad del vehículo, obtenida a partir de los registros de actividad del simulador. En la Fig. 8.b se muestra la velocidad del vehículo en el momento de la colisión. De estas pruebas preliminares no puede concluirse que la velocidad influya decisivamente en el tiempo de reacción de los conductores. Pero la influencia de la velocidad en la distancia recorrida antes de actuar es evidente, por lo que el conductor debe ser plenamente consciente de que un exceso de velocidad, aunque no aumente el tiempo de reacción, provoca que la distancia recorrida hasta la detención del vehículo sea mayor, aumentando el riesgo de accidente.

Además, se analizaron los tiempos de reacción de los conductores en dos contextos diferentes. Se hizo un análisis de conducción con una buena iluminación ambiente y otro en condiciones de luminosidad escasa, tal y como se observa en la Fig. 9. Sin embargo, los resultados preliminares no permiten concluir que una buena iluminación ambiente disminuya el tiempo de reacción de los conductores.

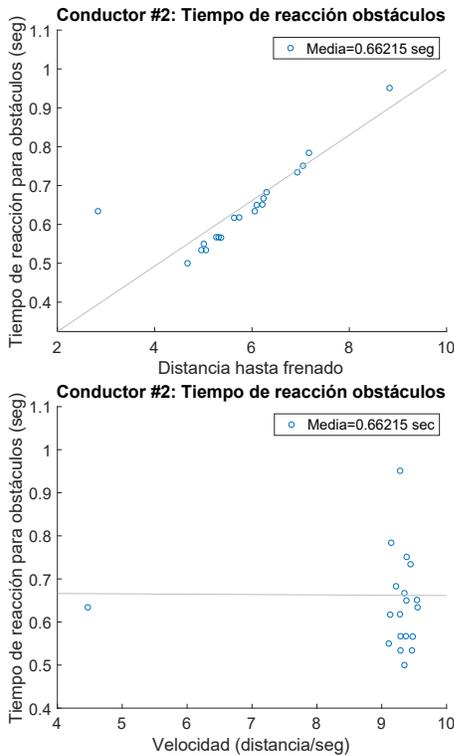


Fig. 8. Tiempo de reacción ante obstáculos del conductor #2 comparado con la distancia recorrida (a) y con la velocidad (b).

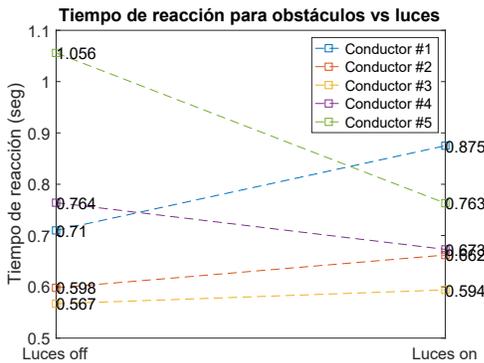


Fig. 9. Estudio comparativo del tiempo de reacción de todos los conductores según la iluminación

Respecto a la evaluación subjetiva, la Fig. 10 muestra los resultados sobre la posibilidad de que el simulador cause malestar. El 100% de los usuarios indicaron una total ausencia de los efectos valorados, salvo en las dimensiones de mareo y dificultad de concentración. Para estas dos dimensiones, solo el 20% de los usuarios indicó que el simulador le provocaba síntomas leves de mareo y dificultades para concentrarse. Por otro lado, la Fig. 11 muestra los resultados sobre presencia espacial del simulador. Para evaluar cada uno de los elementos se empleó una escala de tipo Likert entre 1 (Muy en desacuerdo) y 7 (Muy de acuerdo). Los participantes en la prueba destacaron el realismo del simulador, con una valoración de este ítem de 4 puntos o más en el 80% de los participantes. El manejo del vehículo con los controles también pareció estar bien implementado ya que el 100% de los usuarios calificó esta cuestión con 4 puntos o más. Por lo tanto, aunque el número de

conductores que han participado en los experimentos es bajo, los resultados son positivos. Finalmente, la Fig. 12 muestra los resultados de la encuesta en la que se aborda la carga de trabajo. La figura muestra la mediana y los percentiles las respuestas para cada una de las dimensiones de la escala Nasa-TLX, valoradas entre 1 (Muy bajo) y 7 (Muy alto). Aunque el número de participantes fue reducido, se puede observar que en todos los conductores el simulador causó demanda de trabajo; especialmente en las dimensiones de demanda mental, demanda física, frustración y esfuerzo, alcanzando una mediana de cuatro.

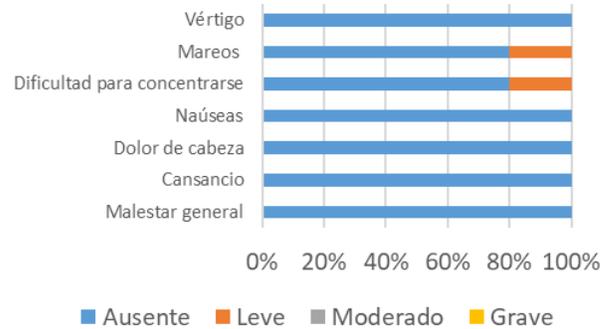


Fig. 10. Resultados sobre el malestar provocado por el simulador, basados en la escala SSQ.

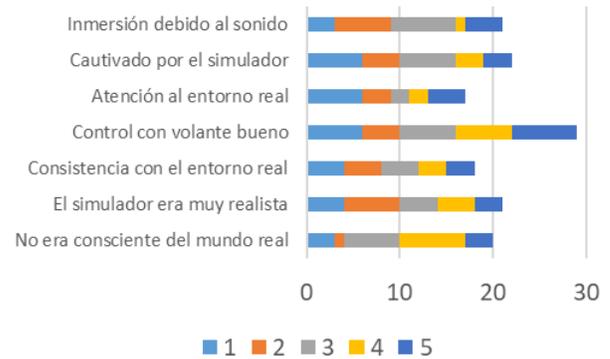


Fig. 11. Resultados sobre la presencia espacial del simulador para los conductores 1 a 5, basada en la escala IPQ.

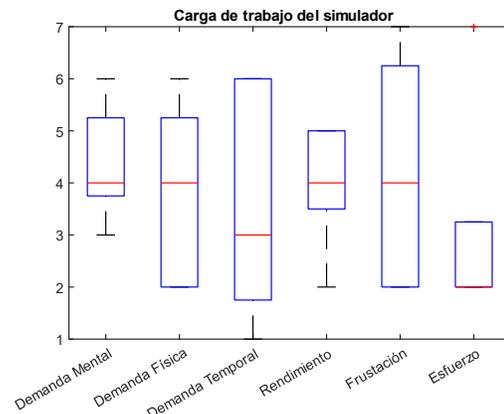


Fig. 12. Boxplot con los resultados de evaluación de la carga de trabajo en las distintas dimensiones del test Nasa-TLX.

V. CONCLUSIONES

En este artículo se ha presentado un entorno para la evaluación de sistemas ADAS para vehículos industriales. Dicho entorno se compone de dos elementos principales: una estructura física, similar a la de una carretilla elevadora; y un simulador. El simulador representa una factoría en la que un conductor de un vehículo industrial circula entre dos puntos esquivando diferentes tipos de obstáculos. Además de los obstáculos visibles, existen otros invisibles que el conductor solo percibe a través de los avisos del ADAS que se está evaluando en cada momento. Ante estas señalizaciones, el conductor debe detener el vehículo para evitar un atropello o choque. La estructura de la factoría y el manejo del vehículo son simples para evitar que el simulador requiera una excesiva concentración o una curva de aprendizaje alta. Los obstáculos que generan los avisos son invisibles para el conductor ya que, de lo contrario, no se sabría si su reacción es debida al aviso del ADAS o a la visualización de los mismos. Todas estas características minimizan el impacto del propio entorno de evaluación sobre los resultados de las pruebas. Además, facilitan la realización de pruebas con conductores no expertos. El entorno utiliza el motor de videojuegos Unity que es gratuito para aplicaciones no comerciales. Su construcción es de bajo costo y es fácilmente integrable con sistemas de apoyo a la conducción, dos importantes ventajas para su uso generalizado.

Para evaluar la utilidad práctica del entorno de pruebas, se han realizado experimentos de un prototipo de ADAS, en los que ha participado diferentes conductores. Los resultados objetivos muestran que el entorno de experimentación permite estudiar cómo los conductores reaccionan ante las señales producidas por los sistemas de asistencia que se desean evaluar. Además, es posible estudiar estas reacciones en diferentes situaciones, observar su evolución en el tiempo y analizar la curva de aprendizaje de los usuarios.

Como trabajo futuro el equipo investigador se plantea la realización de evaluaciones más amplias y complejas de ADAS con diferentes señales y métodos de interacción con el conductor. Estas evaluaciones permitirán determinar con mayor precisión cómo los diferentes avisos impactan sobre el comportamiento de los conductores. Todo ello es fundamental para determinar la efectividad del sistema de apoyo. Además de realizar evaluaciones amplias de ADAS, existen áreas de mejora en la configuración del propio entorno de pruebas que pueden ser mejoradas. La incorporación de una pantalla trasera para poder ver lo que pasa detrás del vehículo, la definición de más actividades en el simulador, como por ejemplo la circulación con carga o la incorporación de puertas o pasillos estrechos en el diseño de la factoría, pueden ser elementos interesantes para complementar el funcionamiento actual. Otra mejora interesante puede ser la monitorización de parámetros biométricos del conductor durante los ejercicios, permitiendo analizar el impacto de los avisos en, por ejemplo, la frecuencia cardíaca o el nivel de estrés.

APÉNDICE

El código fuente de la versión del simulador utilizada en este

trabajo se puede obtener de <https://github.com/SMIOT-uniovi/SimuladorFactor-aCarretilla>.

AGRADECIMIENTO

Este trabajo ha sido parcialmente financiado a través del proyecto FUIO-20-088 de la Universidad de Oviedo y la empresa ADN Mobile Solutions, el proyecto SV-22-GIJON-1-01 del Instituto Universitario de Tecnología Industrial de Asturias y el proyecto TED2021-130919B-I00, financiado por MCIN/AEI/ 10.13039/501100011033 y por la Unión Europea “NextGenerationEU”/ PRTR. (Corresponding author: D. Melendi). Todos los autores han contribuido equitativamente en la elaboración de este artículo.

REFERENCIAS

- [1] T.J. Larsson, T. Horberry, T. Brennan, J. Lambert, I. Johnston, “A Guidebook of Industrial Traffic Management and Forklift Safety”, Monash University Accident Research Centre Guidebook, Australia, 2003.
- [2] Occupational Safety and Health Administration (OSHA), “OSHA Fatality and Catastrophe Investigation Summaries”, 2023, [Online] Disponible en: <https://www.osha.gov/pls/imis/accidentssearch.html>.
- [3] R. Bostelman, “Towards improved forklift safety: white paper,” 9th Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems, 2009.
- [4] D.P. Upahita, Y.D. Wong, K.M. Lum, “Effect of driving inactivity on driver’s lateral positioning control: A driving simulator study”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 58, pp. 893-905, Oct. 2018.
- [5] M. P. Bobermin, M. M. Silva, S. Ferreira, “Driving simulators to evaluate road geometric design effects on driver behaviour: A systematic review”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 150, Feb. 2021.
- [6] L. M. Martín-delosReyes, E. Jiménez-Mejías, V. Martínez-Ruiz, E. Moreno-Roldán, D. Molina-Soberanes, P. Lardelli-Claret, “Efficacy of training with driving simulators in improving safety in young novice or learner drivers: A systematic review”, *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, vol. 62, pp. 58-65, Apr. 2019.
- [7] A. Karimi, M. Bassani, AM. Boroujerdian, L. Catani, “Investigation into passing behavior at passing zones to validate and extend the use of driving simulators in two-lane roads safety analysis”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 139, May 2020.
- [8] S. Marchesiello, Y. Noda, R. Hoshi, A. Kaneshige, “Training Simulator for Acquiring Operational Skill to Operate Overhead Traveling Crane while Suppressing Load Sway”. *Shock and vibration*, vol. 2019, May 2019.
- [9] K. Dhalmahapatra, J. Maiti, O.B. Krishna, “Assessment of virtual reality based safety training simulator for electric overhead crane operations”, *Safety Science*, vol. 139, Jul. 2021.
- [10] M. Choi, S. Ahn, J. O. Seo, “VR-Based investigation of forklift operator situation awareness for preventing collision accidents”, *Accident Analysis & Prevention*, vol. 136, Mar. 2020.
- [11] M. Ulrich, C. Marbach, C. Dolar, C. Engelha, “Collision Warning System for Forklift Trucks”. *ATZ Heavy Duty Worldwide*, vol. 13, pp. 16-21, 2020.
- [12] L. Cao, T. Depner, H. Borstell, K. Richter, “Discussions on sensor-based Assistance Systems for Forklifts,” *Smart SysTech 2019; European Conference on Smart Objects, Systems and Technologies*, pp. 1-8, 2019.
- [13] A. M. v. Stein, A. Dorofeev, J. Fottner, “Visual collision warning displays in industrial trucks”, *IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pp. 1-7, 2018.
- [14] T. G. Bobick, M. Hause, C. Socias-Morales, M. Gwilliam, D. Tashira. “Forklift Safety: A Pilot Study Evaluation of Retrofit Lights.” *Prof. Safety*, vol. 65, no. 12, pp. 41–45., Dec. 2020.
- [15] R. S. Kennedy, N. E. Lane, K. S. Berbaum, M. G. Lilienthal, “Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness”, *Int. J. Aviat. Psychol.*, vol. 3, no. 3, pp. 203-220, Jul. 1993.
- [16] R. Reinhar, H. M. Rutrecht, P. Hengstenberg, E. Tutulmaz, B. Geissler, H. Hecht, A. Muttray, “The best way to assess visually induced motion

sickness in a fixed-base driving simulator”, *Transp. Res. Part F Traffic Psychol. Behav.*, vol. 48, pp. 74-88, Jul. 2017.

- [17] A. Helland, S. Lydersen, L.-E. Lervåg, G. D. Jenssen, J. Mørland, L. Slørdal, “Driving simulator sickness: Impact on driving performance, influence of blood alcohol concentration, and effect of repeated simulator exposures”, *Accid. Anal. Prev.*, vol. 94, pp. 180-187, Sep. 2016.
- [18] T. Schubert, F. Friedmann, H. Regenbrecht, “The experience of presence: Factor analytic insights”, *Presence Teleoperators Virtual Environ.*, vol. 10, no. 3, pp. 266-281, Jun. 2001.
- [19] H. M. Sun, S. P. Li, Y. Q. Zhu, B. Hsiao, “The effect of user’s perceived presence and promotion focus on usability for interacting in virtual environments”, *Appl. Ergon.*, vol. 50, pp. 126-132, Sep. 2015.
- [20] J. Brade, M. Lorenz, M. Busch, N. Hammer, M. Tscheligi, P. Klimant, “Being there again – Presence in real and virtual environments and its relation to usability and user experience using a mobile navigation task”, *Int. J. Hum.-Comput. Stud.*, vol. 101, pp. 76-87, may 2017.
- [21] S. G. Hart, L. E. Staveland, “Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of Empirical and Theoretical Research”, *Advances in Psychology*, vol. 52, pp. 139-183, 1988.
- [22] M.J. Crawley, “The R Book”, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.



Xabiel G. Pañeda es Doctor (2004) por la Universidad de Oviedo y actualmente es Profesor Titular en la misma universidad. Sus principales áreas de investigación son el Internet de las Cosas, los sistemas multimedia y la comunicación persona computador dentro del contexto de la movilidad inteligente.



Roberto García Fernández, es Doctor (2006) por la Universidad de Oviedo y Profesor Titular en la misma Universidad. Sus principales áreas de investigación son los sistemas multimedia, el Internet de las Cosas, y la comunicación persona computador dentro del contexto de la movilidad inteligente.



David Melendi Palacio es Doctor (2007) por la Universidad de Oviedo y actualmente es Profesor Titular en la misma Universidad. Sus principales áreas de investigación son el Internet de las Cosas, los sistemas multimedia y la comunicación persona computador dentro del contexto de la movilidad y el hogar inteligentes.



Dan García Carrillo es Doctor (2018) por la Universidad de Murcia y Profesor Ayudante Doctor en la Universidad de Oviedo. Sus principales áreas de investigación son la seguridad y la privacidad para Internet de las Cosas.



David Martínez es Doctor por la Universidad de Oviedo y director técnico de la empresa ADN Mobile Context-Aware Solutions dedicada a los sistemas de apoyo a la conducción, la movilidad inteligente y la electrónica industrial.



Victor Corcoba, es doctor (2014) por la Universidad Carlos III de Madrid y actualmente es Profesor Contratado Doctor en la Universidad de Oviedo. Sus principales áreas de investigación son el Internet de las Cosas, los sistemas de transporte inteligente, la eSalud y los asistentes virtuales.