

# Diseño y simulación de un sistema de frenado y evasión autónomo (OPREVU-AES) para la evitación del atropello de peatones en diferentes condiciones de tráfico

Ángel Losada<sup>1</sup>, Francisco Javier Páez<sup>2</sup>, Luca Piovano<sup>3</sup>, Francisco P. Luque Oostrom<sup>4</sup>, Juan José Herrero Villamor<sup>5</sup>, María Asunción Santamaría Galdón<sup>6</sup>

<sup>1</sup> INSIA-UPM, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: [angel.losada.arias@upm.es](mailto:angel.losada.arias@upm.es)

<sup>2</sup> INSIA-UPM, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: [franciscojavier.paez@upm.es](mailto:franciscojavier.paez@upm.es)

<sup>3</sup> CEDINT-UPM, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: [lpiovano@cedint.upm.es](mailto:lpiovano@cedint.upm.es)

<sup>4</sup> CEDINT-UPM, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: [franluque@cedint.upm.es](mailto:franluque@cedint.upm.es)

<sup>5</sup> INSIA-UPM, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: [juanjose.herrero@upm.es](mailto:juanjose.herrero@upm.es)

<sup>6</sup> CEDINT-UPM, Universidad Politécnica de Madrid, España. Email: [asun@cedint.upm.es](mailto:asun@cedint.upm.es)

## Resumen

Entre las posibles mejoras de los sistemas de frenado autónomo de emergencia (AEB), reducir la intensidad del proceso de frenado automático a través del estudio de la cinemática y el comportamiento general del peatón mientras cruza resulta clave para poder determinar la progresividad de la frenada, o sustituir parte del proceso de frenado por una maniobra evasiva cuando la colisión es inminente. Este artículo propone la integración de un sistema de evitación autónomo (*Automatic Emergency Steering*, AES) que actúa directamente sobre el sistema de dirección para generar una maniobra de evasión y evitar un posible atropello al peatón, completando su operación con el detector de ángulo muerto para tráfico posterior-lateral y el reconocimiento de vehículo de frente con el sensor de fusión. La simulación del vehículo con el sistema OPREVU-AES embarcado se realiza a través del software CarSim®, analizando así la respuesta cinemática y dinámica bajo diferentes condiciones de contorno.

**Palabras clave:** usuarios vulnerables, peatón, sistema de frenado autónomo, sistema AES, respuesta cinemática y dinámica.

## Abstract

Among the possible improvements in Autonomous Emergency Braking (AEB) systems, reducing the intensity of the automatic braking process by assessing the kinematics and general behavior of the pedestrian while crossing is crucial to determine the progressiveness of the braking, or replacing part of the braking process by an evasive maneuver when a collision is imminent. This paper proposes the integration of an Autonomous Avoidance system (*Automatic Emergency Steering*, AES) that acts directly on the steering system to generate an evasive maneuver and avoid a possible pedestrian collision, completing its operation with the blind spot detector for rear-side traffic and the recognition of the vehicle in front with the fusion sensor. The simulation of the vehicle with the on-board OPREVU-AES system is performed through the CarSim® software, analyzing the kinematic and dynamic response under different boundary conditions.

**Keywords:** vulnerable users, pedestrian, autonomous braking system, AES system, kinematic and dynamic response.

## 1. Introducción

En la década 2010-2020, los peatones representaron el 21% del total de fallecidos en accidentes de tráfico en España, y un 50% de los decesos acaecidos en ciudad, lo que indica la importancia de la siniestralidad de este grupo de usuarios vulnerables (*Vulnerable Road Users*, VRU) en zona urbana [1].

Actualmente, con el objetivo de aumentar la seguridad al volante y garantizar una respuesta efectiva por parte del vehículo cuando tiene lugar una situación de riesgo en la calzada, los sistemas de frenado autónomo de emergencia (*Autonomous Emergency Braking*, AEB) se anticipan a la respuesta del conductor en caso de posible colisión con vehículos y peatones o, de producirse esta, reducir la severidad de los daños en la

medida de los posible. Estos sistemas constan de un sensor de fusión, que combina la actuación de una cámara y un dispositivo LIDAR.

Algunos autores [2] señalan las posibles áreas de optimización de los sistemas AEB. Entre las posibles soluciones, se plantea regular la respuesta de frenada autónoma actuando sobre la curva de desaceleración y sobre el valor de presión máxima en régimen continuo, modificando su valor en función de la velocidad transversal del peatón.

La caracterización del comportamiento del peatón ha sido estudiada desde el punto de vista de la predicción de la trayectoria y del tipo de reacción de este [3], utilizando filtros de tipo Kalman para el análisis de imagen, mientras que otros autores [4] se centran en el desarrollo de modelos de decisión de tipo Markov (*Markov decision process*, MDP) para el desarrollo y mejora de los sistemas de frenado de emergencia y vehículos autónomos. Otros estudios [5], centran su investigación en la comprensión y el análisis del movimiento de las extremidades del peatón en función de la decisión de cruzar.

En aquellos casos donde las velocidades de circulación son altas (próximas a la máxima velocidad permitida en zona urbana, 50 km/h), la distancia para frenar puede no ser suficiente, por lo que nuevas maniobras de evitación de atropellos son contempladas para el desarrollo de los sistemas avanzados de ayuda a la conducción (*Advanced Driver Assistance Systems*, ADAS) embarcados en los vehículos de nueva generación. En particular, el sistema de emergencia con control automático de la dirección (AES) se sitúa dentro de la hoja de ruta de la Euro NCAP para 2025 en el marco de la seguridad primaria [6], y espera una mayor implementación en la flota a partir de 2022.

En [7], el diseño del sistema de evasión se centra en el mapeo de una trayectoria con un control tipo *fuzzy* sobre el volante. Asimismo, la combinación del sistema AEB con el sistema de evitación ha sido objeto de estudio en [8], donde se ha ensayado la toma de decisión de qué sistema es más apropiado a velocidades inferiores a 50 km/h, en diferentes escenarios con situaciones potenciales de atropello.

Este artículo propone la formulación de un sistema combinado de frenado y evitación autónomo OPREVU-AES (dicha designación toma el nombre del proyecto en el que se ha desarrollado el diseño y análisis), cuya operativa tiene en cuenta la información de distancia y velocidad relativas obtenidas por el sensor de fusión, así como la probabilidad de atropello en función de parámetros que definen el comportamiento del peatón, el nivel de atención de este y las condiciones de visibilidad de la vía. Las trayectorias de evitación han sido predefinidas para velocidades mayores de 40 km/h, controlando por

puntos el proceso completo de adelantamiento y reentrada en el carril, garantizando así la estabilidad lateral del vehículo a través de la acción del control de estabilidad (ESP). Asimismo, el algoritmo de decisión de este sistema conjunto completa su operación teniendo en cuenta la información obtenida del detector de líneas de carril (tanto para calcular la zona de reacción del peatón como para definir los márgenes de actuación del sistema de dirección autónomo), el detector de ángulo muerto (para vehículos que se aproximan por los flancos del automóvil), y por el propio sensor de fusión, para vehículos que vienen de frente en carriles colindantes y para el resto de usuarios que cruzan la calzada.

## 2. Metodología

El esquema metodológico (Figura 1) que se presenta en este apartado ha sido desarrollado dentro del proyecto OPREVU (RTI2018-096617-B-100), y puede desglosarse en las siguientes etapas: caracterización del comportamiento de peatones mediante ensayos de Realidad Virtual y generación de un modelo predictivo de colisión; realización de ensayos en pista para la validación del sistema AEB en un vehículo comercial, con el objetivo de analizar su respuesta cinemática y dinámica, así como la lógica de actuación del sistema; la configuración del sistema conjunto de AEB y AES mediante la adaptación del modelo vehicular integrado en el software de simulación dinámica CarSim©, y el análisis de los límites de actuación del sistema global OPREVU-AES junto con el resto de sistemas ADAS.

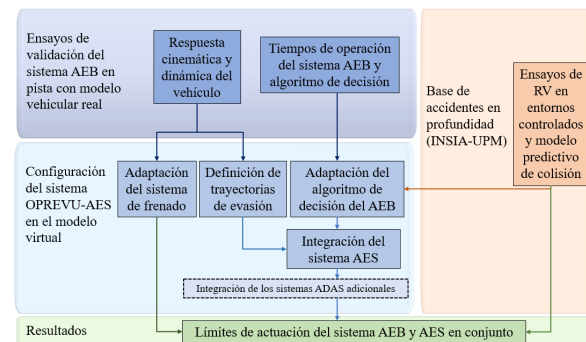


Figura 1. Metodología del diseño y análisis del sistema OPREVU-AES

### 2.1. Modelo de comportamiento para peatones

Para la caracterización del comportamiento de los peatones y la generación de un modelo adaptable al algoritmo de decisión del sistema AEB, se llevó a cabo el estudio de una base de datos de 100 accidentes sobre usuarios vulnerables en la ciudad de Madrid (España). Aspectos tales como la información relativa a las víctimas, al vehículo, tipo de impacto y gravedad de las lesiones, las características de la vía y del entorno urbano, la luminosidad ambiental, las condiciones

climáticas y la densidad de tráfico, han sido considerados para el diseño de los escenarios de test. Considerando el tipo de colisión más significativa en la base de datos (colisión en paso de cebra regulado por semáforo, con impacto a más de 40 km/h en la mayoría de los casos), los escenarios urbanos que se identifican con estas características de atropello y que son diseñados para la sesión experimental son: Avenida de los Toreros, Avenida de Machupichu y Calle Hermanos García Noblejas.

Los ensayos se realizan utilizando un ordenador de mochila HP GZ V2 *Backpack*, unas gafas de realidad virtual HTC Vive Pro con tecnología de seguimiento ocular, y cuatro estaciones base que permiten dotar al espacio de ensayo de unas dimensiones de 10x3.6 m. Las pruebas han sido realizadas con una muestra de sujetos con condiciones sociodemográficas similares (edad: 20-30 años; sexo: 21% mujeres, 79% hombres).

Del análisis de los datos registrados durante las pruebas de realidad virtual, se ha obtenido que: un 25.6% de los usuarios aceleraron para cruzar completamente el paso de cebra hasta la mediana; un 32.6% se detuvieron y retornaron hasta la acera, y un 41.8% no reaccionaron.

Para definir el porcentaje de tiempo que el peatón permanece mirando a la zona de aproximación del vehículo, se define un mínimo ángulo por debajo del cual se considera que el usuario está mirando a la zona donde el vehículo podría aparecer y adentrarse en el paso de peatones.

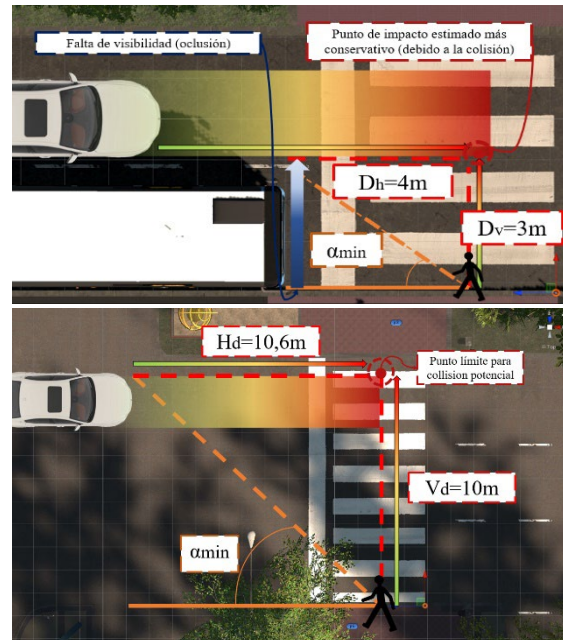
Este ángulo se define como “Mínimo ángulo de atención, MAA”, y tiene en cuenta la distancia máxima que el peatón debe recorrer hasta un punto del cruce donde la colisión es plausible (considerando la cara más externa del chasis) y la distancia mínima que el vehículo pilotado necesitaría para frenar completamente desde la velocidad de cruce. Dado que la máxima deceleración del automóvil es 7.7 m/s<sup>2</sup> (fijado en la simulación) y que la máxima velocidad de circulación del automóvil es 47 km/h, el tiempo para frenar es 1.69 s. Aproximando el proceso de frenado a un movimiento rectilíneo uniformemente acelerado, la distancia mínima para detenerse es 10.6 m.

Téngase en cuenta que esta distancia es válida para el escenario de la calle Hermanos García Noblejas, pero no para Av. de Machupichu, ya que, en este último entorno hay un autobús estacionado en la marquesina, dificultando la visibilidad lateral al vehículo pilotado. Por tanto, para tener en cuenta la falta de visibilidad, la distancia medida en la horizontal se reduce a 4 m, distancia entre el frontal del autobús y el punto teórico de atropello, en esa dirección.

Consecuentemente, se tiene que  $\alpha_{\min} = \arctan(D_v/D_h)$ , donde  $D_v$  es la distancia vertical y  $D_h$  es la distancia

horizontal. Para Machupichu, el MAA es  $\alpha_{\min} = 36.9^\circ$  y para Hermanos García Noblejas,  $\alpha_{\min} = 43.3^\circ$ .

En la Figura 2 se aprecia la definición geométrica de ambos ángulos, considerando las diferentes características de dichos entornos urbanos:



**Figura 2.** Definición geométrica del Mínimo ángulo de atención (MAA) para Avenida de Machupichu (arriba) y la calle Hermanos García Noblejas (debajo)

Tras la fase de preprocesamiento de datos, se identificaron cuatro variables relevantes en el comportamiento de los peatones: tipo de reacción (acelerar, frenar, no reaccionar), zona de reacción (antes del carril de atropello, dentro del carril de atropello, sin cambio de velocidad), obstaculización lateral (sí, no) y el porcentaje de tiempo de atención (PTA). Esta última variable se computa calculando el porcentaje de tiempo de simulación (entendido este como el tiempo desde que el vehículo se lanza en la simulación) en el que el peatón está mirando con un ángulo de rotación de cabeza inferior al MAA.

Dichas variables permiten predecir la ocurrencia del atropello, definida esta como una variable dicotómica con valor “0” para la ausencia de atropello y “1” para la colisión. Por tanto, se plantea la formulación de un método de clasificación de tipo “White box” (más cercanos al razonamiento lógico humano, sin la complejidad matemática y de representación espacial de los llamados modelos “Black box”). Asimismo, dado que se buscan modelos cuyo gasto computacional sea el menor posible para acelerar el tiempo de procesamiento en el sistema AEB optimizado, se opta por un modelo de árbol de decisión individual, cuya precisión final es igual (81%) a la de un modelo *Random Forest* (la precisión ha sido calculada a través de una validación cruzada con 10 iteraciones, y

distribución 80/20 en la muestra de entrenamiento/test), con la diferencia de que este último exigiría un número de árboles mayor (64 para estabilizar la tasa de error *Out-of-the bag*, *OOB*) y mayores tiempos de ejecución.

## 2.2. Análisis del sistema AEB comercial

Se han realizado pruebas en pista para validar el sistema AEB en un vehículo comercial (Hyundai Ioniq 1.6 GDI HEV Style DCT), tomando como referencia los ensayos de validación CPNA-50 y CPNA-25 (Car-to-Pedestrian Nearside Adult) de la Euro NCAP [9].

El objetivo de estos ensayos es analizar la respuesta cinemática y dinámica del automóvil durante el proceso de frenado autónomo, así como los tiempos de respuesta para el aviso de colisión (*Forward Collision Warning*, FCW) y para la activación de la frenada automática (*Time to Collision-TTC-threshold*).

Para ambas configuraciones, las velocidades de test cubrieron un rango entre 20 km/h y 60 km/h, con intervalos de 5km/h entre pruebas. Adicionalmente, se utilizó un *dummy* estático con las proporciones y requerimientos biométricos que especifica el protocolo de la Euro NCAP.

El posicionamiento del vehículo en coordenadas cartográficas UTM, velocidades, aceleraciones y momentos en las tres direcciones son obtenidas a través de un sistema de registro de doble antena incorporado en el vehículo. La adquisición de datos del sistema GNSS se realiza a una frecuencia de 100 Hz.

## 2.3. Definición de las trayectorias de evitación del sistema OPREU-AES

Con el objetivo de generar maniobras de evitación que garanticen la estabilidad del vehículo durante el proceso completo de rebasamiento, se definen trayectorias por puntos en el *dataset* de doble cambio de carril de CarSim© (*Double Lane Change, Tight w/o ESC*), para cada una de las velocidades comprendidas entre 40 y 70 km/h. Se ha escogido dicho rango de velocidades ya que por debajo de 40 km/h las distancias de frenado de emergencia del AEB original nunca excedían los 12 m, por lo que no es necesario establecer maniobras evasivas por debajo de esta velocidad. Asimismo, los atropellos analizados en la base de datos revelan que la velocidad máxima alcanzada por los turistas implicados es inferior a 70 km/h, por lo que se establece este como límite superior de actuación.

El ancho del paso de peatones genérico que se utiliza como referencia para definir las trayectorias de adelantamiento es de 7 m, correspondiente al caso más

conservativo de ancho de cebreado en los escenarios de accidentes de la base de datos.

El control por volante se hace en bucle cerrado (*Steering by the Closed-Loop Driver Model*), y la GUI del *dataset* permite establecer los puntos de la trayectoria que el vehículo debe recorrer, a través de una tabla que relaciona la coordenada de avance (S) con el *offset* lateral (LTARG). A partir de dicha tabla, se genera una curva por interpolación con *spline*, mientras que el *offset* lateral para valores de coordenada S fuera del rango de la tabla se calculan con extrapolación de tipo *flat-line* para generar los puntos correspondientes al tramo recto (antes y después del rebasamiento).

## 2.4. Ajuste del modelo vehicular en CarSim©

El sistema vehicular integrado en CarSim© se adapta a las dimensiones del vehículo Hyundai Ioniq probado en pista. Se modifican también las masas (suspendida y no suspendida), neumáticos, *powertrain* y sistema dirección (se sustituye el original por uno comandado electrónicamente, para la posterior adaptación del sistema AES).

El algoritmo lógico del sistema AEB del modelo virtual se incluye dentro de un sistema de bloques en Simulink, cuyas señales de entrada son exportadas desde el modelo VSMath de CarSim©. Originalmente, en el modelo virtual los valores límites de activación de la señal de aviso FCW y del TTC para la frenada automática son constantes. Adicionalmente, existe un valor prefijado de presión máxima, que es constante en todos los supuestos.

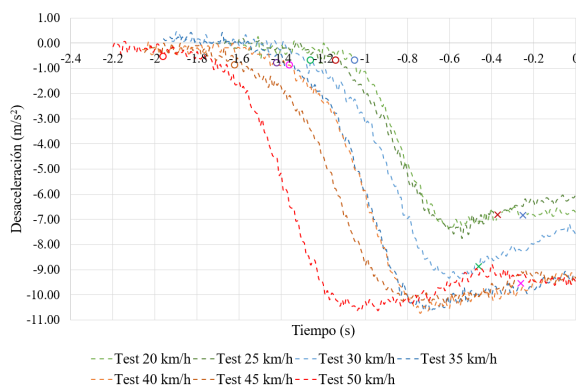
No obstante, se comprobará en los resultados que el valor del TTC límite depende de un conjunto de parámetros que definen el comportamiento cinemático del vehículo ensayado, y posteriormente la presión máxima de frenado incluirá un factor de corrección una vez integrado el sistema AES y la optimización del propio AEB.

El sensor de fusión genera una variable binaria, que toma el valor de “1” en caso de detección del peatón, y “0” si no existe reconocimiento. En caso de identificar la presencia de un peatón, el sensor capta la distancia y velocidad relativas entre peatón y vehículo, ángulo de posición del peatón respecto al eje longitudinal (*bearing angle*), y distancia vertical relativa entre sensor y peatón.

La configuración del sistema de frenado en CarSim© se basa en la modificación de la función de transferencia de primer orden que conecta la presión en el cilindro maestro con la presión aplicada directamente en rueda.

Consecuentemente, la presión máxima se adapta teniendo en cuenta la desaceleración alcanzada en el sistema vehicular de CarSim© para diferentes valores de presión durante la frenada autónoma. Teniendo en cuenta que el valor más conservativo de desaceleraciones en las pruebas con el vehículo real fue de 0.83g, y que las curvas de desaceleración analizadas en el sistema virtual tienden a estabilizarse en torno a un valor de 0.8g a partir de 70-80 bares, la máxima presión definida para el bloque de activación del sistema AEB es 80 bares.

El valor de la constante de tiempo ( $T_d$ ) de la función de transferencia es responsable de la variación de los tiempos de presión constante durante el régimen permanente de presión (un mayor valor de  $T_d$  genera un menor número de escalones previos al régimen de presión continua), así como de las oscilaciones previas al régimen de máxima desaceleración (son menores cuanto mayor es el valor de  $T_d$ ). Un mayor valor de esta constante tiende a retrasar en el tiempo el punto de máxima desaceleración, dando lugar a una respuesta más progresiva y una menor desaceleración máxima. Comparando las curvas de desaceleración del modelo real (Figura 3) con las obtenidas en el modelo virtual, y teniendo en cuenta que la región recta de la curva, previa al régimen permanente, es aproximadamente paralela en todos los casos con un valor medio de  $20 \text{ m/s}^3$ , se concluye que el valor de la constante  $T_d$  es de 0.18.



**Figura 3.** Gráficas de desaceleración del Hyundai Ioniq en las pruebas de validación de su sistema AEB en pista

Una vez adaptado el modelo virtual primitivo de CarSim©, la optimización del sistema AEB pasa por la introducción del modelo predictivo de colisión analizado en el apartado 2.1. Posteriormente, se definen dentro de Simulink el conjunto de bloques para el cálculo de las siguientes variables: tipo de reacción, cuyo input es la velocidad del usuario vulnerable; el lugar de reacción, que precisa de la posición relativa del peatón respecto al vehículo y posición relativa de los carriles por los que circula; el PTA, obtenido a través de la medición de la rotación de la cabeza del peatón; y la detección de obstáculos laterales en la

calzada (vehículos aparcados o estacionados), a través del propio sensor de fusión. Asimismo, se definen los márgenes de actuación del sistema AES y AEB, teniendo en cuenta para este último la salida del modelo predictivo. Para el caso particular del sistema AES, se considera adicionalmente la información obtenida del resto de sistemas ADAS embarcados en el modelo final.

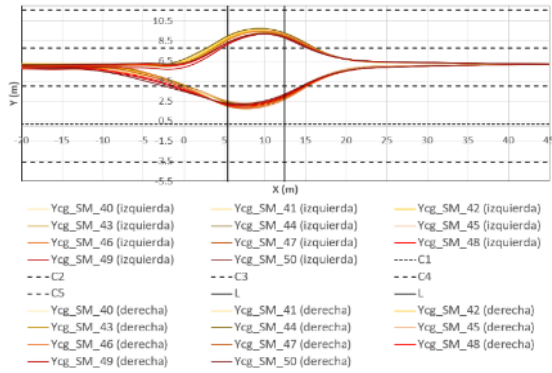
### 3. Resultados

Los datos obtenidos a través de un sistema de registro de doble antena incorporado al vehículo son exportados y analizados, arrojando los siguientes datos relevantes:

- La cámara cubre un rango de  $\pm 26^\circ$  (amplitud de  $52^\circ$ )
- La identificación del peatón se realiza a una distancia máxima de 30 m
- La distancia lateral entre el peatón y el vehículo (respecto al eje longitudinal de este último), debe ser inferior a 1 m.
- La señal de aviso FCW se activa cuando el TTC desciende a 1.8 s
- El valor instantáneo del TTC debe ser inferior a un cierto valor umbral para el inicio de la frenada autónoma, el cual es variable con la cinemática de automóvil. Este valor límite para el inicio de la desaceleración automática es modelado a través de una ecuación de regresión lineal:  $TTC_{limite} = 1.094 + 0.017 \cdot V_{t=T(D)} - 1.225 \cdot D_{media}$ , donde V y D son respectivamente la velocidad y desaceleración y cuya bondad de ajuste es  $R^2 = 0.75$
- La distancia a la cual se inicia la frenada es inferior a 12 m para velocidades de ensayo inferiores a 40 km/h.

En las pruebas de doble cambio de carril en CarSim©, se obtienen trayectorias estables entre 40 km/h y 55 km/h, a 12 m del peatón/objetivo, mientras que entre 56 km/h y 65 km/h, la trayectoria es estable iniciándose a 18 m del usuario. Para velocidades entre 66 km/h y 70 m/h, la distancia entre el peatón y el vehículo en el momento de inicio de la trayectoria debe ser de al menos 24 m.

En la Figura 4 se representan las trayectorias correspondientes al rango de velocidades entre 40 km/h (mínima velocidad para la actuación del sistema AES) y 50 km/h (máxima velocidad permitida en zona urbana), tomando como punto de referencia el centro de masas del vehículo. Las líneas L representan el ancho del paso de cebra, y C las líneas de carril.



**Figura 4.** Trayectorias de evasión a derecha e izquierda para velocidades entre 40 y 50 km/h

La actuación del sistema ESP permite controlar la aceleración lateral por debajo de 0.8 g, y en todos los casos, el perfil de giro de volante y la velocidad de guiñada permiten concluir que los ensayos de rebasamiento (a ambos lados) cumplen con la norma ECE R13H para el control de desplazamiento transversal.

Asimismo, el ángulo de volante ha sido corregido para asegurar que la entrada en el carril de adelantamiento sea en el centro de dicho carril, con un margen de 0.5 m a cada lado de este, lo que garantiza mayor seguridad en la maniobra. De igual manera, el rango de detección (en distancia y amplitud), se adaptan a los valores obtenidos en los ensayos de validación en pista.

El valor del TTC se calcula como el cociente entre distancia y velocidad relativas, y es continuamente evaluado para compararlo tanto con el valor para la aparición de la señal FCW en el *cockpit* digital (fijada en 1.8 s), como con el valor límite de activación de la desaceleración autónoma, expresado mediante la ecuación de regresión lineal introducida anteriormente. Asimismo, se calcula la distancia lateral respecto del plano medio del automóvil y se compara con el correspondiente valor límite. Si estas dos últimas condiciones se satisfacen, el sistema inicia la frenada de emergencia.

Las limitaciones de actuación del sistema AEB analizado en el modelo original de Hyundai consisten fundamentalmente en un rango lateral de activación de 1 m (cubre hasta la parte más externa del chasis, 2 m en total), y la no inclusión del comportamiento y cinemática del peatón en el algoritmo de decisión para regular la respuesta de frenado, a través del modelo predictivo de colisión.

El tipo de reacción se obtiene a través del perfil de velocidad generado por el sensor, y el análisis de la aceleración instantánea de este. Considerando los resultados de los ensayos de realidad virtual, los casos cuya reacción ha sido acelerar corresponden a aceleraciones mayores de 1.05 m/s<sup>2</sup>, mientras que los

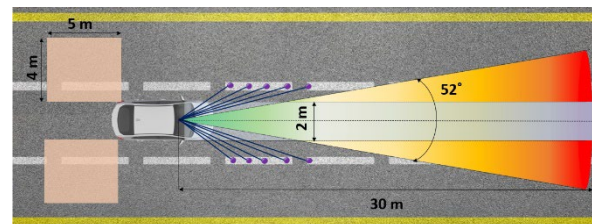
casos en los que el peatón frena y retrocede, la desaceleración ha sido mayor que 1.05 m/s<sup>2</sup>. Para el cálculo del lugar de reacción, se toma el punto en el que se superó la aceleración (o desaceleración) de referencia y se compara con la posición lateral de las líneas de carril, cuya información es obtenida a través de un sistema de detección de carriles de 5 puntos.

Por otro lado, el cálculo de la variable PTA se obtiene mediante la captación del “Heading angle” del peatón de ensayo, y la comparación con el valor límite MAA. Téngase en cuenta que, para obtener este valor, se cuenta con un sistema de reconocimiento facial y ocular integrado en la propia cámara del sensor de fusión (incluye regulación electrónica del zoom óptico), que permite obtener el ángulo de rotación de la cabeza en función de la distancia interpupilar y la distancia peatón-vehículo.

Asimismo, la identificación de vehículos que dificultan la visibilidad del cruce (vehículos estacionados o momentáneamente parados), se detectan a través del sensor de cámara y LIDAR.

Para el diseño del sistema AES, se exportan los datos de giro de volante, coordenada de avance y presión de frenado para cada velocidad y lado de adelantamiento, para elaborar un *lookup table* en el sistema actualizado de bloques de decisión, con el objetivo de que, al activar la maniobra de evitación, se tome la información de estas variables. Por último, se añade un sensor de ángulo muerto, con reconocimiento de tráfico posterior hasta 5 m por detrás de la parte trasera del vehículo.

En la Figura 5 se muestra un esquema con el rango de detección y actuación del sistema OPREVU-AES, así como el de los sistemas de ayuda a la conducción complementarios:



**Figura 5.** Rango de detección y actuación de los sistemas ADAS embarcados en el vehículo. El rango de visión del sensor de fusión es de 30 m y apertura total de 52°. El rango lateral de activación del AEB (azul) es de 2 m en total. El sistema de detección de carriles de 5 puntos (morado) permite obtener la posición de los bordes de carril. El detector de ángulo muerto cubre un área de 4 m x 5 m a cada lado (naranja).

Si, antes de llegar a los 12 m de distancia relativa al peatón, existe identificación de tráfico trasero o vehículos que se aproxima de frente por alguno o

ambos costados (detectados a través del propio sensor de fusión), se anula la trayectoria; mientras que, si una vez iniciado el rebasamiento y superado el cruce, hay un vehículo en el carril original, el vehículo desactiva la operación del AES y frena al automóvil con presión máxima. Por otro lado, el algoritmo de decisión del sistema OPREVU-AES integra la información procedente del resto de sistemas de control del automóvil, por lo que si se detecta un fallo en alguno de ellos (por ejemplo, se produce el pinchazo de una rueda), automáticamente anula el proceso de evasión autónoma.

En el caso de que, en un intervalo entre 12 m (distancia mínima para iniciar la trayectoria de evasión) y 30 m (máximo alcance del sensor para la identificación de peatones), la distancia necesaria para frenar sea mayor que la distancia relativa al peatón en la dirección longitudinal, el sistema AES inicia su operación. En caso contrario, el sistema AEB actúa, regulando su actuación de frenado en función de la salida del modelo predictivo: en caso de colisión potencial, se activa la presión máxima de 80 bares; mientras que, en caso de predecir la evitación, se activa una presión de frenado igual al 75% de la máxima, con el objetivo de garantizar así una caída de desaceleración máxima inferior al 20% y asegurar de esta forma una respuesta segura.

En la Figura 6, se muestra un ejemplo de toma de decisión del sistema combinado de frenada y evasión autónoma ante un peatón acelerando en el paso de cebra tras ver al vehículo:



**Figura 6.** Simulación del sistema OPREVU-AES para peatón acelerando. En la imagen de la izquierda, el vehículo reconoce tráfico trasero por detector de ángulo muerto y de peatón y vehículo de frente por el sensor de fusión (izquierda). En ese caso, anula la esquiwa y activa el AEB. En la imagen de la derecha, no hay vehículos en el carril de esquiwa (derecha). Por tanto, inicia la maniobra de rebasamiento.

#### 4. Conclusiones

El sistema actual OPREVU-AES permite realizar maniobras de frenado y evasión con control automático del volante de manera eficiente, garantizando la estabilidad del vehículo durante la trayectoria completa de adelantamiento. Asimismo, el modelo predictivo de colisión, basado en comportamientos reales de usuarios en situaciones potenciales de atropello en entornos de realidad virtual, permite regular la respuesta de frenado

cuando se inicia la frenada autónoma, lo que hace plausible un menor desgaste en el sistema de frenos.

El conjunto de bloques de decisión de los sistemas AEB y AES, en combinación con el resto de los sistemas de ayuda a la conducción, es capaz de procesar información cada 0.5 ms, por lo que se trata de un algoritmo de baja carga computacional y capaz de ejecutar acciones sobre el vehículo de manera inmediata. El sensor de fusión y el detector de ángulo muerto permiten evaluar la presencia de otros agentes en la vía, para garantizar que la maniobra ejecutada se haga en condiciones de seguridad. Por otro lado, el sistema de detección de líneas de carril permite medir el posicionamiento relativo del peatón en la calzada y a la vez controlar la posición del vehículo mientras ejecuta la maniobra de adelantamiento y retorno durante la evasión automática.

Realizar este tipo de trayectorias implica disponer de un espacio suficiente para ejecutar la maniobra (especialmente a altas velocidades de circulación), por lo que, dentro de los posibles campos de mejora para esta tecnología, sería necesario contar con una cámara de mayor rango de distancia longitudinal.

Asimismo, una de las posibles limitaciones de este sistema es la falta de integración de un sistema de *mapping* multimodal, capaz de procesar de manera conjunta la información procedente de la cámara para la detección de líneas de carril, reconocimiento de señales de tráfico y semáforos; de LIDAR para la detección de obstáculos; y GNSS, para obtener información sobre la localización, velocidad y orientación del automóvil. Asimismo, la futura tecnología V2P (*Vehicle-to-Pedestrian*) permitirá favorecer la comunicación directa o indirecta (a través de la infraestructura urbana) entre automóvil y usuario vulnerable, por lo que sería posible incorporar la predicción de trayectoria del peatón al actual modelo de probabilidad de colisión, logrando una mayor precisión en la toma de decisión.

#### 5. Agradecimientos

Este estudio forma parte de las actividades de investigación desarrolladas por los centros INSIA-UPM y CEDINT-UPM dentro del proyecto OPREVU, financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad (RTI2018-096617-B-100). Este estudio ha sido parcialmente financiado por la Comunidad de Madrid (S2018/EMT-4362) SEGVAUTO-4.0-CM.

Los autores desean agradecer a Hyundai Motor España S.L.U., así como a los expertos de la Policía de Tráfico española y a la Dirección General de Tráfico (DGT) por su contribución.

## 6. Referencias

[1] Observatorio Nacional de Seguridad Vial, Dirección General de Tráfico . Avance de las principales cifras de la Siniestralidad Vial [Online] (2020). Disponible en: <https://www.dgt.es/menusecundario/dgt-en-cifras/dgt-en-cifras-resultados/dgt-en-cifras-detalle/?id=00810>

[2] Losada Arias. A *et al.*, "Improvement of the AEB activation algorithm based on the pedestrian reaction. *FISITA World Congress*, Prague, CZ (2021)

[3] C. G. Keller, D. M. Gavrila. "Will the Pedestrian Cross? A Study on Pedestrian Path Prediction", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 15, no. 2, pp. 494-506, 2014. Disponible: <https://doi.org/10.1109/TITS.2013.2280766> .

[4] M. Schratter, M. Bouton, M. J. Kochenderfer, D. Watzenig. "Pedestrian Collision Avoidance System for Scenarios with Occlusions," *2019 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, pp. 1054-1060, 2019. Disponible: <https://doi.org/10.1109/IVS.2019.8814076>

[5] R. Sherony, R. Tian, S. Chien, L. Fu, et al., "Pedestrian/Bicyclist Limb Motion Analysis from 110-Car TASI Video Data for Autonomous Emergency Braking Testing Surrogate Development," *SAE International Journal of Transportation Safety* 4(1):113-120, 2016. Disponible: <https://doi.org/10.4271/2016-01-1456>.

[6] European New Car Assessment Programme (Euro-NCAP). Euro NCAP 2025 Roadmap, in pursuit of vision zero. *Euro NCAP technical paper*, 2017. Disponible: [euroncap-roadmap-2025-v4.pdf](https://www.euroncap.com/media/67888/euro-ncap-roadmap-2025-v4.pdf)

[7] D. Fernandez Llorca et al., "Autonomous Pedestrian Collision Avoidance Using a Fuzzy Steering Controller," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 2, pp. 390-401, 2011. Disponible: <https://doi.org/10.1109/TITS.2010.2091272>

[8] C. G. Keller et al., "Active Pedestrian Safety by Automatic Braking and Evasive Steering," *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 12, no. 4, pp. 1292-1304, 2011, Disponible: <https://doi.org/10.1109/TITS.2011.2158424>

[9] Euro NCAP. "Test protocol, AEB/LSS VRU systems (Version 4.1)". 2022. Disponible: <https://cdn.euroncap.com/media/67888/euro-ncap-aeb-lss-vru-test-protocol-v41.pdf>