

OPTIMIZACIÓN DE UNA MANIOBRA DE ADELANTAMIENTO APLICADA A VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

Marta Alonso Villarmarzo

Área de Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes de la Universidad de Oviedo

Carlos Martínez García

Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA) – Universidad Politécnica
de Madrid

Felipe Jiménez Alonso

Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA) – Universidad Politécnica
de Madrid

Daniel Álvarez Mántaras

Área de Ingeniería e Infraestructuras de los Transportes de la Universidad de Oviedo

RESUMEN

El grado de autonomía en los vehículos ha crecido significativamente en la última década debido a la aparición de nuevas tecnologías, que permiten conocer en cada instante de tiempo, tanto las condiciones del entorno, como las del vehículo, dejando en un segundo plano el factor humano.

Ya son una realidad en los vehículos que circulan por nuestras carreteras, el sistema de mantenimiento de carril (LKAS – Lane Keeping Assistance System), el sistema de ayuda de permanencia en la carretera (RDM – Road Departure Mitigation) o el control de crucero adaptativo inteligente (ACC – Adaptive Cruise Control), aunque la idea, es ir más allá, a vehículos totalmente autónomos capaces de transportar con seguridad a personas entre dos localizaciones sin la implicación de éstas.

En el presente artículo, se desarrolla la optimización del tiempo de ejecución de una maniobra de adelantamiento, utilizando campos potenciales para el cálculo de la trayectoria y las regiones de estabilidad (velocidad de guiñada – ángulo de deriva) para determinar el nivel de seguridad.

Los campos potenciales, son una herramienta utilizada en la generación de trayectorias, permiten conocer en cada instante de tiempo, el entorno y las situaciones que rodean al vehículo, adaptando así sus movimientos. Por otro lado, con las regiones ($\dot{r} - \beta$) es posible conocer los límites de estabilidad de los vehículos, además de detectar situaciones comprometidas durante la conducción.

La combinación de ambas herramientas permite realizar maniobras de adelantamiento, no solo rápidas, sino seguras. Para el desarrollo, se realizan simulaciones con un modelo 3D complejo en el software de simulación dinámica multicuerpo MSC Adams® y se implementa el control en Matlab Simulink®.

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, los vehículos autónomos y sus tecnologías han sufrido un gran desarrollo (Kuramoto, 2018; Somogyi, 2018; Park, 2016). La utilización de este tipo de vehículos supone muchos beneficios para la circulación vial (European Commission, 2016), desde la reducción del número de accidentes/incidentes en la carretera (de factor humano) (National Highway Traffic Safety Administration, 2015; Rowley, 2018), pasando por la reducción de los atascos o la aparición de nuevos servicios de transporte.

A la hora de hablar de conducción autónoma, es necesario distinguir entre 6 niveles de autonomía (SAE International, 2018), según el grado de intervención del ser humano (Figura 1).

Nivel de Automatización	Denominación	Control de los actuadores	Monitorización del entorno	Capacidad del sistema
0	Sin automatización	Conductor humano	Humano	n/a
1	Asistencia del conductor	Sistema + Humano	Humano	Algún modo
2	Automatización parcial	Sistema	Humano	Algún modo
3	Automatización condicionada	Sistema	Sistema	Algún modo
4	Automatización alta	Sistema	Sistema	Algún modo
5	Automatización total	Sistema	Sistema	Todos modos

Figura 1: Niveles de automatización para vehículos (SAE)

A pesar de los claros beneficios que tienen hoy en día los vehículos autónomos, su uso en la actualidad, está reducido a entornos controlados, aunque cada día incrementan sus posibilidades (Jiménez, 2018). Un ejemplo de esto, de aplicación en el transporte de mercancías, es la agrupación de vehículos en un pelotón, siendo el primero del grupo el que controla a los demás (Jia, 2017; Santini, 2017). Además, surgen nuevas opciones de negocio, car-sharing o taxis autónomos (Bischoff, 2016), vehículos militares (Naranjo, 2019) y nuevas posibilidades para gente de avanzada edad o con discapacidades (Harper, 2016).

En un vehículo autónomo, se distinguen tres etapas durante la conducción, que se desarrollarán cíclicamente, percepción (del entorno), toma de decisión y acción (Figura 2).



Figura 2: Etapas vehículo autónomo

De las tres etapas que se distinguen, la que más desarrollo está sufriendo en la actualidad es la percepción. Son múltiples las tecnologías utilizadas para el reconocimiento del entorno o del tráfico, visión artificial (Bertozzi, 2000), ultrasonidos (Alonso, 2011), radar (Eltrass, 2018) o/y LiDar (Kidono, 2019; Baras, 2019).

Como se ha visto, el vehículo autónomo, lleva asociado, una red de telefonía (redes 4G-5G, WiFi) (Wang, 2019) y periféricos (sensores, microcontroladores) (Faouzi, 2016; Khaleghi, 2013) e infraestructura (posicionamiento por satélite) (Milanés, 2008), que hacen posible su funcionamiento (Brown, 2014).

A la hora de abordar la toma de decisiones, intervienen varios factores, planificación de trayectorias, tipo de carretera y geometría, obstáculos en la vía, peatones, entre otros, por lo que se trata también de una etapa de gran complejidad. (Jiménez, 2018; Rasekhipour, 2017; Aldibaja, 2018).

Lo que se pretende en este trabajo, es combinar los campos potenciales (técnica para la toma de decisiones) con las regiones de estabilidad del vehículo ($\dot{r} - \beta$) (definidas por la velocidad de guiñada y el ángulo de deriva) de forma que se consigan maniobras, en este caso de adelantamiento, más rápidas y seguras. Por un lado, los campos potenciales posicionan el vehículo en la vía e inducen cambios en el movimiento de este, mientras que las regiones de estabilidad condicionan la velocidad con la que se realiza la maniobra, de forma que nunca se superen los límites asociados a cada vehículo y condición operativa.

2. METODOLOGÍA

El uso de modelos tridimensionales y simulaciones virtuales son ampliamente utilizados tanto para la comprobación de las capacidades técnicas de los vehículos, como para la modelización de escenarios de tráfico.

2.1 Modelo virtual de vehículo

En la Figura 3 se muestra el modelo 3D complejo, definido en el programa de simulación dinámica multicuerpo MSC Adams View® y utilizado para la modelización del vehículo.

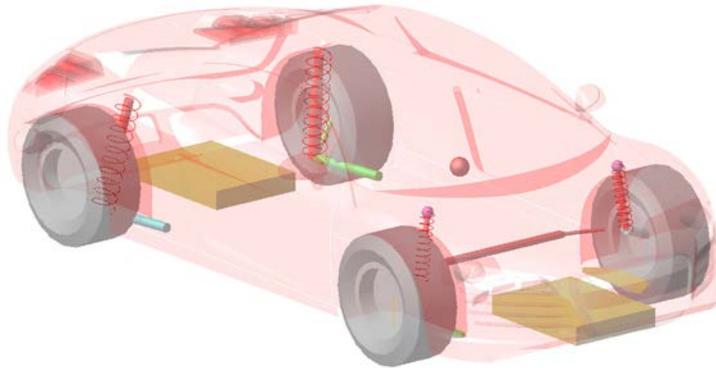


Figura 3: Modelo virtual utilizado para los ensayos

Se trata de un modelo con 16 grados de libertad y 21 partes móviles, capaz de reproducir fidedignamente el comportamiento dinámico del vehículo real. El vehículo tiene una suspensión delantera de tipo McPherson y trasera de brazos arrastrados. En este caso, el modelo de neumático utilizado es un Pacejka 2002 (Pacejka, 2002).

El modelo virtual utilizado para las simulaciones se exporta desde el software de simulación hacia el software en el que se realiza el control Simulink®. El bloque generado en la exportación (planta), es el que se muestra en la Figura 4.

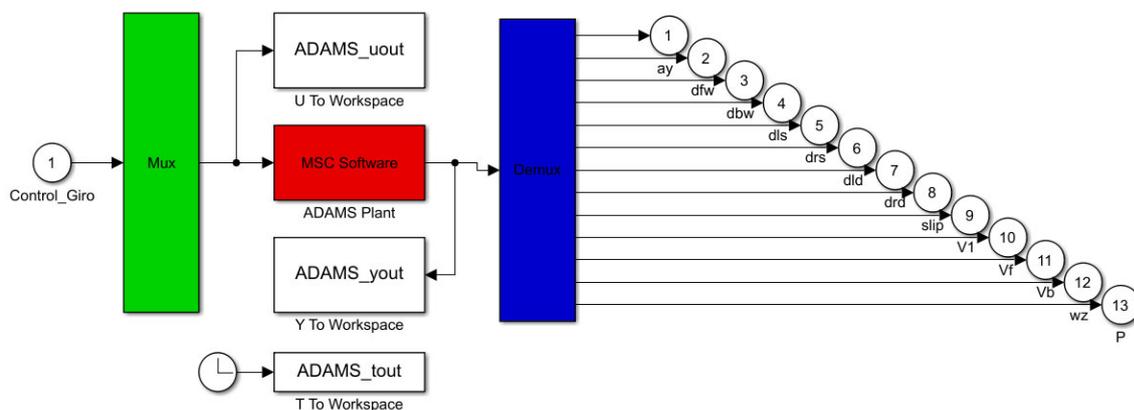


Figura 4: Planta del modelo 3D de simulación

De la simulación se obtienen datos de distancias entre vehículos, distancia a los límites de la carretera, datos sobre la dinámica vehicular, como pueden ser la velocidad de guiñada y el ángulo de deriva, datos de la geometría del vehículo como la posición del centro de gravedad (cdg) o la masa de este.

2.2 Diseño del sistema de control

Para la realización de las simulaciones se ha considerado una velocidad de circulación constante, por lo que la variable de control del modelo es el giro de volante durante la maniobra de adelantamiento. El modelo de control se divide en tres partes, Figura 5:

- Control en base a la sobreaceleración lateral
- Control aplicando campos potenciales (Martínez, 2019)
- Control aplicando regiones de estabilidad (Beal, 2013; Bobier, 2013; Bobier, 2012, Erlien, 2015)

Una vez se tiene definido un ensayo para un modelo dado, se exporta la planta desde Adams View® a Matlab Simulink® para realizar el control, Figura 5, ya que es más flexible para trabajar y da más opciones.

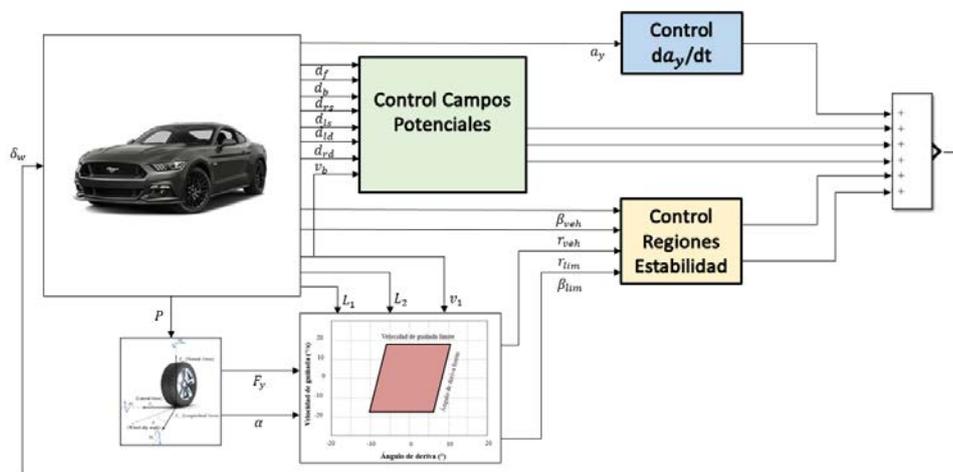


Figura 5: Control para el adelantamiento del vehículo

Mediante los campos potenciales, se define el giro de volante necesario que hace posible la maniobra de adelantamiento, mientras que el control de a_y y las regiones de estabilidad, determinan que ésta, se haga con total seguridad.

2.3 Control en base a la sobreaceleración

Para el control en base a la sobreaceleración lateral, se toman como referencia los límites que se establecen en la Norma 3.1 – IC Trazado sobre la sobreaceleración que sufren los pasajeros durante la circulación. En la Figura 6, se muestran los diagramas de bloques que llevan a cabo el control.

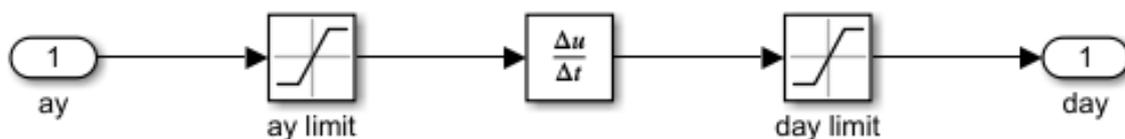


Figura 6: Diagrama de bloques para el control a partir de a_y

Al tratarse de una maniobra de adelantamiento, en la que el cambio de carril se realiza de forma brusca, se limita esta sobreaceleración a ± 2 (m/s^3). En la Figura 7 se muestran los valores de aceleración lateral y sobreaceleración para el vehículo utilizado durante una maniobra de adelantamiento.

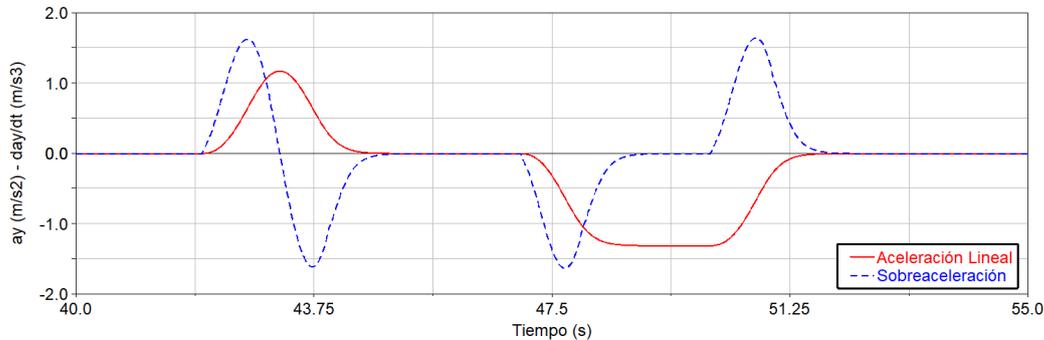


Figura 7: Aceleración y sobreaceleración para un vehículo

La aceleración lateral límite, para que sea común en todos los vehículos, se considerará un valor de ± 5 (m/s^2).

2.4 Control aplicando campos potenciales

A la hora de abordar la toma de decisiones en la conducción autónoma, se puede recurrir a varias técnicas, tele-operación, navegación por waypoints o control difuso entre otras. Para este análisis se ha optado por utilizar técnicas reactivas, campos potenciales, donde el vehículo responde en todo momento a la situación actual generando el movimiento adecuado.

Como se puede ver en la Figura 8, cada elemento del entorno (carriles, otros vehículos o los propios límites de la vía) produce un campo potencial con el vehículo. Según el tipo de potencial, el vehículo modificará su comportamiento.

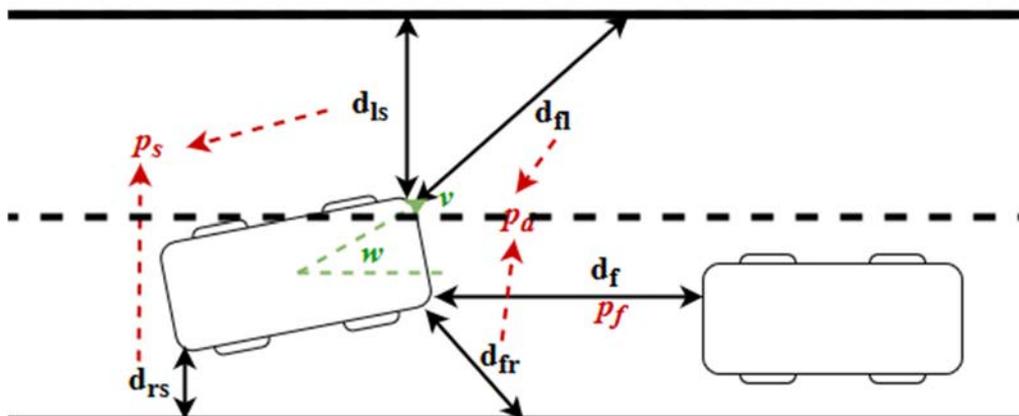


Figura 8: Distancias que definen los potenciales entre el vehículo y el entorno

En la Figura 9, se representan sobre el vehículo los potenciales frontales/traseros, laterales y diagonales, que permiten posicionar el vehículo en la vía y respecto al resto de usuarios.

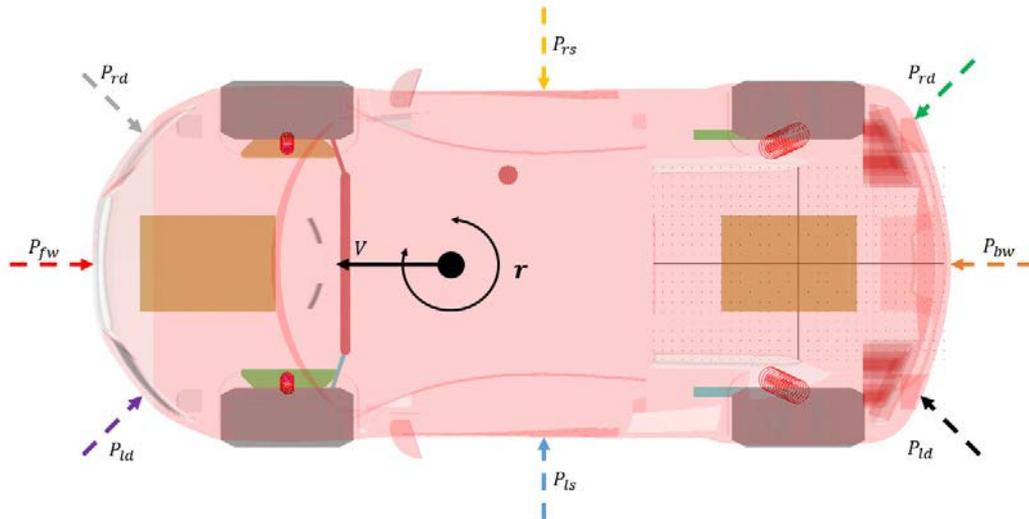


Figura 9: Diagrama de campos potenciales sobre el vehículo

Para el cálculo de los potenciales, se utilizan las siguientes expresiones.

2.4.1 Potencial respecto al vehículo a adelantar:

$$P_{fw} = \{[0 \text{ si } v_{B1} \geq v_{max}], [(v_{max} - v_1)/d_f \text{ si } v_{B1} < v_{max}]\} \quad (1)$$

donde:

- v_{max} – velocidad máxima de la vía
- v_1 – velocidad del vehículo que va a ser adelantado
- d_f – distancia frontal entre los vehículos

2.4.2 Potencial respecto al vehículo que se tiene detrás:

$$P_{bw} = \{[0 \text{ si } v_A \geq v_{B2}], [v_2 - v_A)/d_{bw} \text{ si } v_A < v_{B2}]\} \quad (2)$$

donde:

- v_2 – velocidad del vehículo que ejecuta la maniobra de adelantamiento
- v_A – velocidad del vehículo que le sigue
- d_{bw} – distancia trasera con el vehículo que le sigue

2.4.3 Potenciales respecto a los límites de la vía:

$$P_s = P_{rs} + P_{ls} = 1/d_{rs}^2 - 1/d_{ls}^2 \quad (3)$$

donde:

- d_{rs} – distancia lateral derecha
- d_{ls} – distancia lateral izquierda

2.4.4 Potenciales diagonales:

$$P_d = P_{rd} + P_{ld} = 1/d_{fr}^2 - 1/d_{fl}^2 \quad (4)$$

donde:

- d_{fr} – distancia diagonal derecha
- d_{fl} – distancia diagonal izquierda

2.4.5 Potencial total:

El potencial total es la suma de cada potencial, multiplicado por el valor de su ganancia:

$$P_T = \sum K_i \cdot P_i = K_s \cdot P_s + K_d \cdot P_d + K_{fw} \cdot P_{fw} + K_{bw} \cdot P_{bw} \quad (5)$$

Siendo K_i la constante de proporcionalidad.

Del modelo virtual se obtienen las distancias entre los vehículos, las cuales son las entradas del control de giro con potenciales. En la Figura 10, se muestra el diagrama de bloques para el control según los campos potenciales. Si la propuesta se llevase a cabo en un vehículo real, sería necesario la instrumentación de este, con LiDAR, visión artificial, u otras tecnologías que permitan medir distancias. La salida del control es directamente el giro de volante.

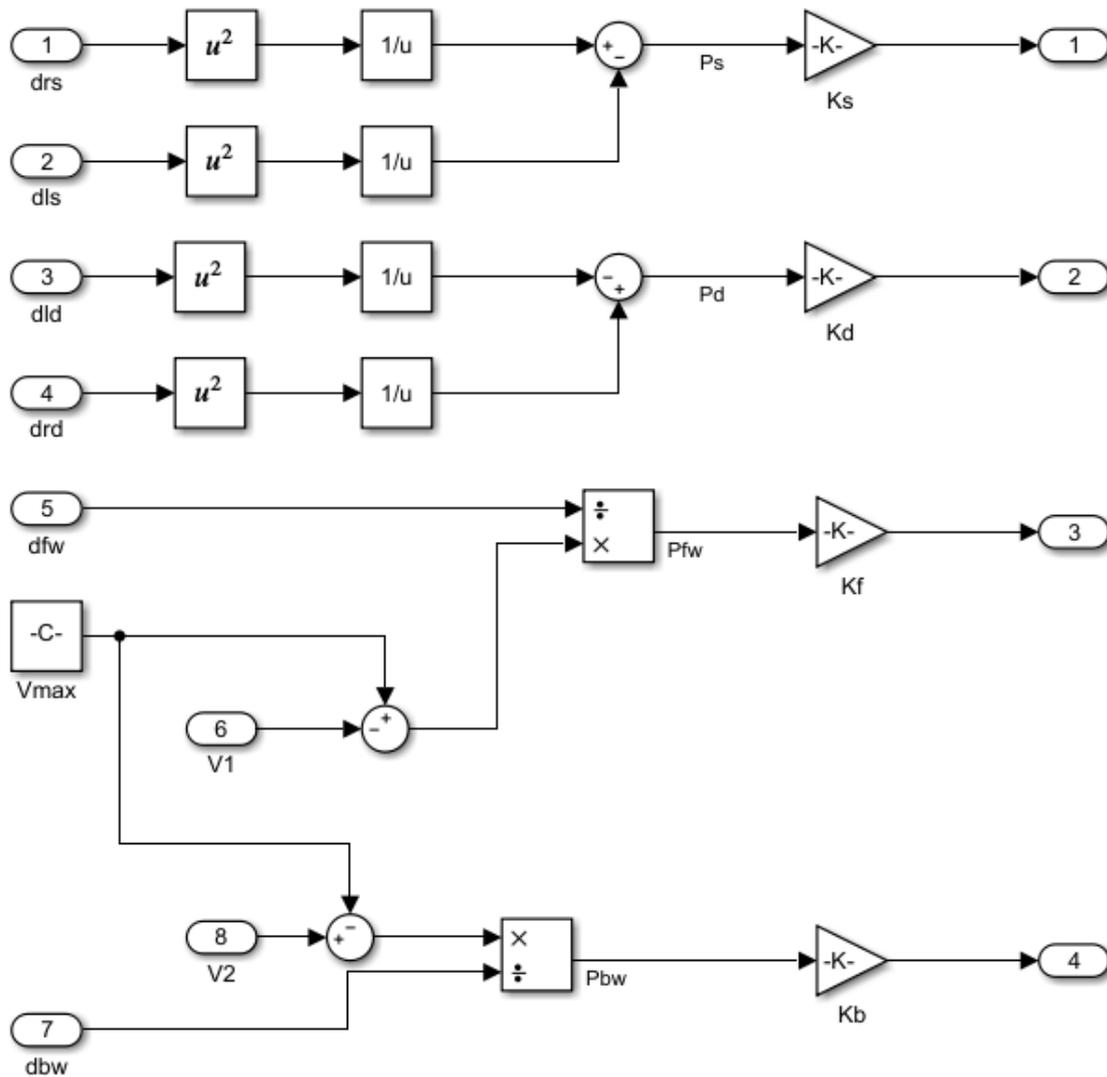


Figura 10: Diagrama de bloques para el control según los potenciales

2.5 Control aplicando regiones de estabilidad

El control de la dinámica vehicular se realiza a través de las denominadas regiones de estabilidad, determinadas por los valores límite de velocidad de guiñada y ángulo de deriva del neumático ($\dot{r} - \beta$), cuya representación se puede apreciar en la Figura 11.

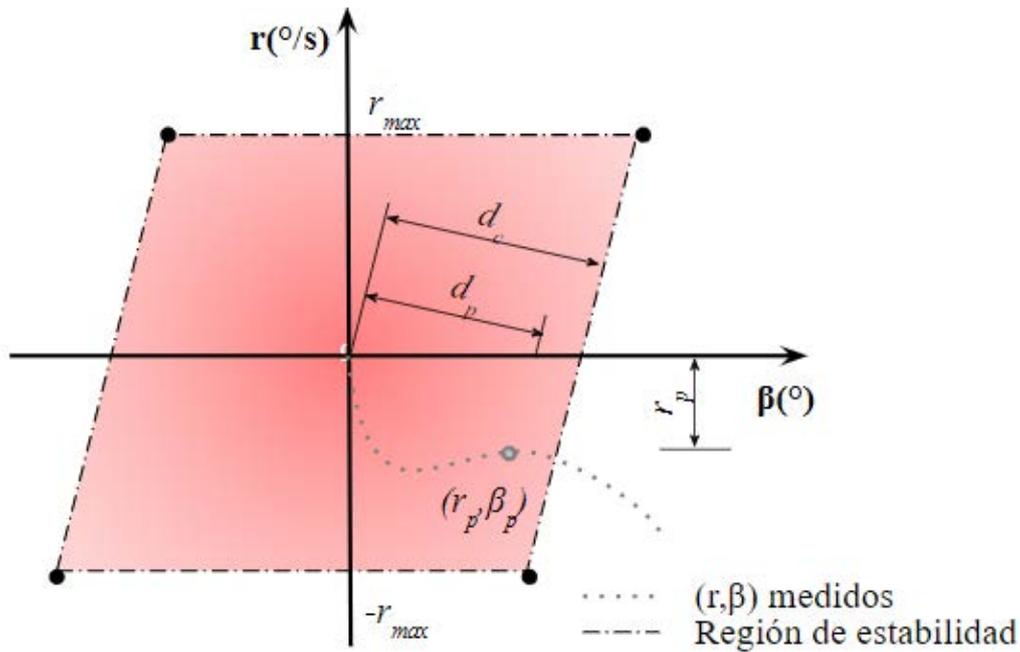


Figura 11: Parámetros para definir la seguridad disponible en cada caso

El uso de estas regiones, en conjunto con el control de la sobreaceleración, evita que el vehículo alcance situaciones comprometidas, como derrapes o pérdida de la dirección en casos más graves (Alonso, 2019).

$$\beta_{demandada}(\%) = d_p/d_c \cdot 100 \quad (6)$$

$$\dot{r}_{demandada}(\%) = r_p/r_{max} \cdot 100 \quad (7)$$

donde:

- d_p – deriva del vehículo parar una condición e instante determinado
- d_c – deriva máxima parar una condición e instante determinado
- r_p – guiñada del vehículo parar una condición e instante determinado
- r_{max} – guiñada máxima

3. RESULTADOS

En el desarrollo de la metodología, se ha considerado un adelantamiento a alta velocidad en una autopista, Figura 12. Para simplificar el caso, se han considerado velocidades constantes de todos los vehículos implicados en la maniobra.

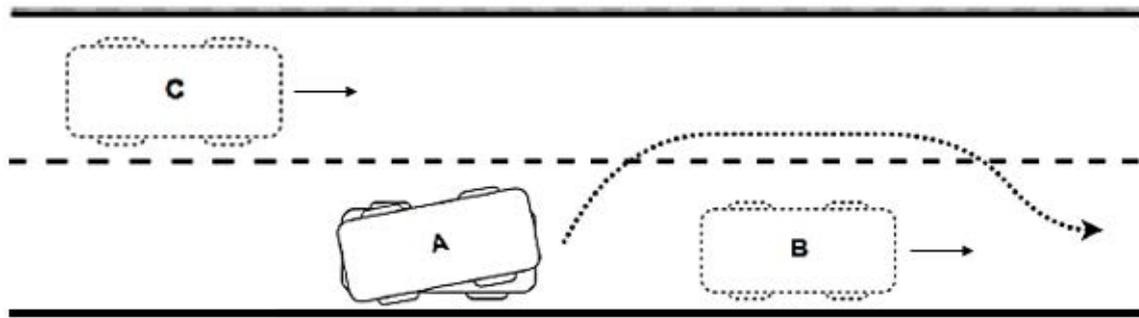


Figura 12: Adelantamiento a alta velocidad

En la Figura 13, se muestran los valores de los potenciales sobre el vehículo, frontal/trasero, laterales y diagonales. Se puede apreciar, que cuando se produce el adelantamiento el potencial frontal cambia de signo, pasa de ser positivo a negativo, también, el efecto en el potencial lateral de la maniobra de cambio de carril.

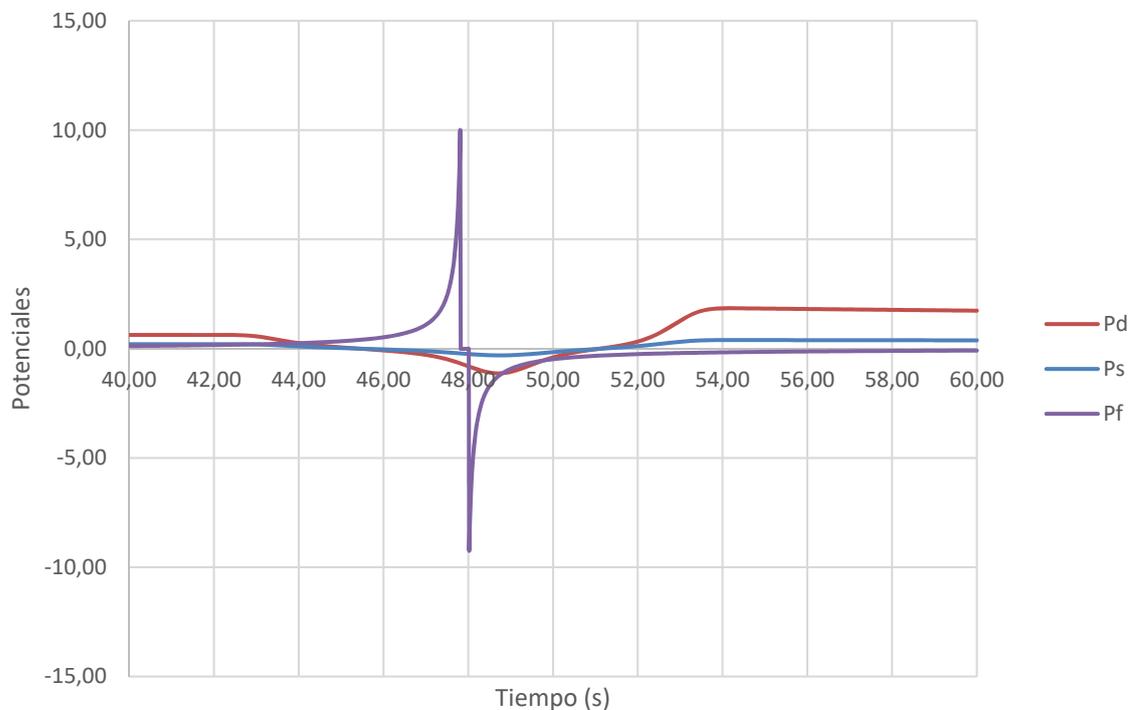


Figura 13: Potenciales sobre el vehículo

Los potenciales, no son indicativos de la seguridad con la que se realiza la maniobra, por lo que es necesario analizar los parámetros que si la determinan. La aceleración lateral y la sobreaceleración representadas en la Figura 14, alcanzan el valor definido como límite para la sobreaceleración, mientras que la aceleración lateral se mantiene por debajo de 1m/s^2 .

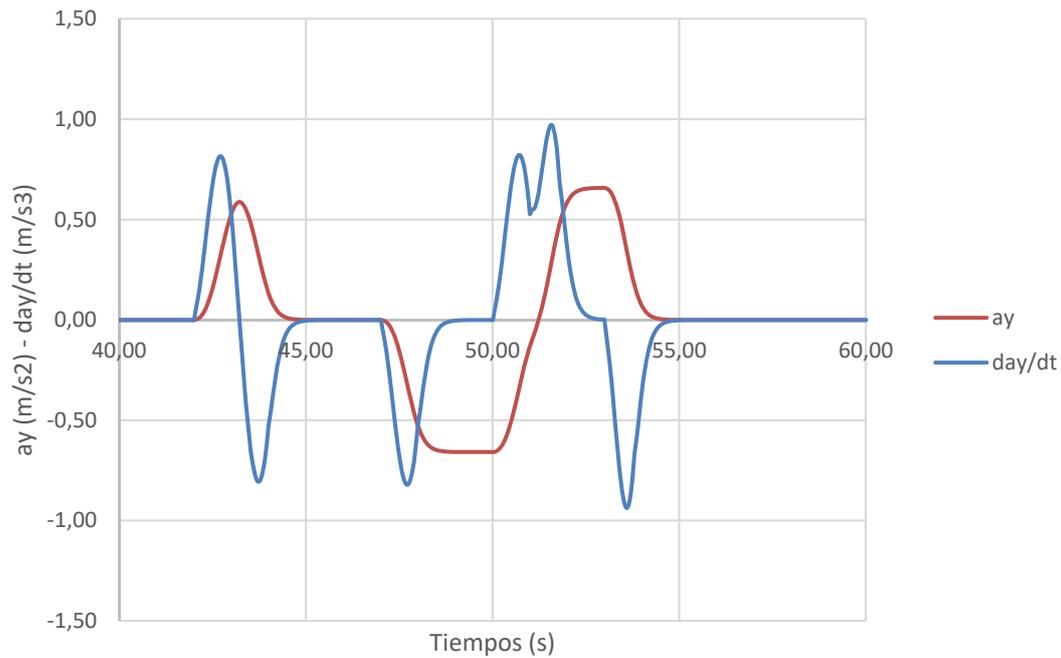


Figura 14: Aceleración y sobreaceleración en la maniobra

En el análisis de la velocidad de guiñada de la Figura 15 se aprecia que los valores obtenidos están muy por debajo del valor límite.

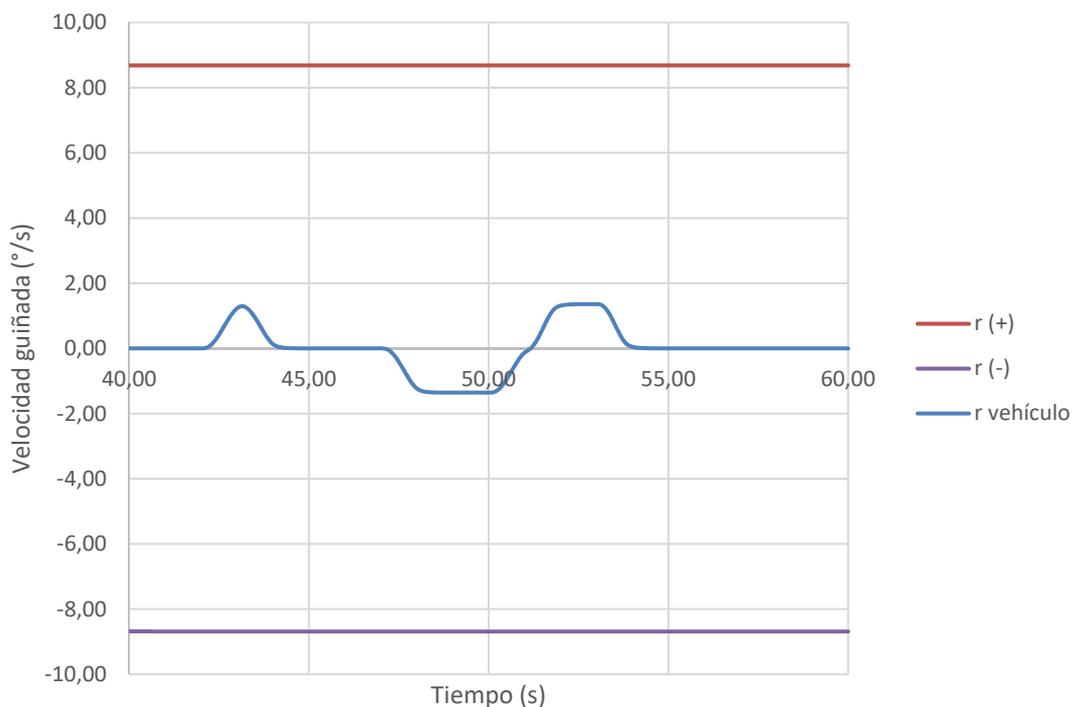


Figura 15: Valor de velocidad de guiñada del vehículo y límites

En el caso del ángulo de deriva que se representa en la Figura 16, ocurre como ocurría en el caso anterior, se tienen valores muy por debajo del límite.

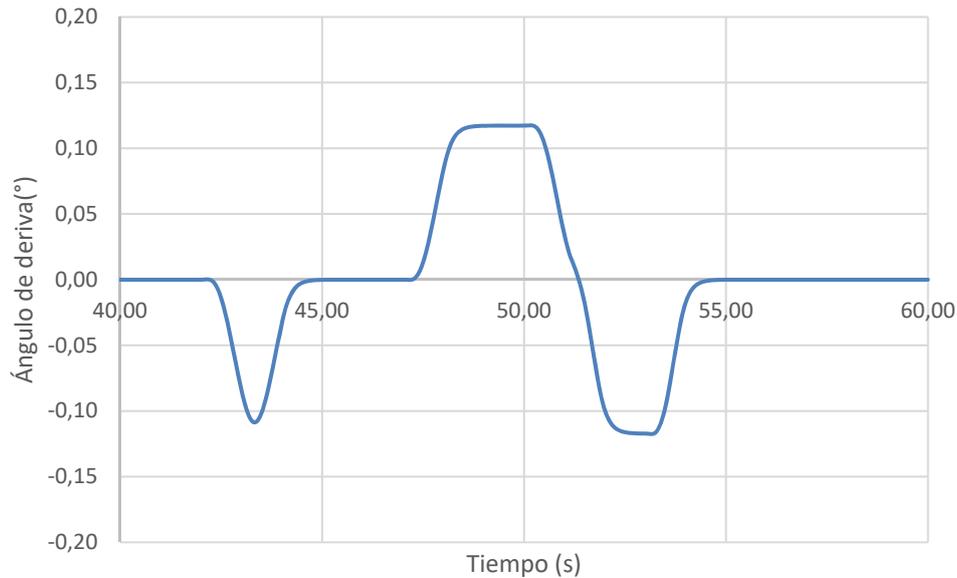


Figura 16: Ángulo de deriva del vehículo y límites

Con estos últimos análisis, se deduce que la maniobra se ha realizado con total seguridad para los conductores.

4. CONCLUSIONES

Se implementa el control para la realización de una maniobra de adelantamiento, en la que prima la seguridad de los pasajeros, ya que se asegura que no se superan los límites que puedan ocasionar lesiones al ser humano.

Los potenciales sobre el vehículo permiten posicionar el vehículo en la carretera y evitar que éste se salga de los límites durante el adelantamiento, cuando vuelve al carril derecho o que colisione con el resto de los vehículos de la vía, ya vayan delante, detrás, o en el carril de la izquierda adelantando, además de guiar al vehículo en todo momento para que la maniobra se realice correctamente.

Las regiones de estabilidad y los límites de sobreaceleración determinan la seguridad con la que se realiza la maniobra, procurando que nunca se sobrepasen los límites del vehículo, atendiendo a cada condición operativa y los límites que los seres humanos somos capaces de soportar.

Al realizarse un adelantamiento progresivo y nada agresivo, se evita el efecto sorpresa sobre el otro conductor y se reduce la posibilidad de accidente. Se controlan los límites de aceleración lateral, que pueden hacer que el vehículo derrape, dando lugar a una situación comprometida incluso para el resto de los usuarios de la vía.

Además, se controla la sobreaceleración que sufren los pasajeros durante la maniobra de adelantamiento mejorando la sensación de confort.

REFERENCIAS

ALDIBAJA, M., KURAMOTO, A., YANASE, R., KIM, T.H., YONADA, K. & SUGANUMA, N. (2018). Lateral Road-mark Reconstruction Using Neural Network for Safe Autonomous Driving in Snow-wet Environments. IEEE International Conference on Intelligence and Safety for Robotics (ISR), Shenyang, 2018, pp. 486-493.

ALONSO M., MÁNTARAS D.A., LUQUE P. (2019). Toward a Methodology to Assess Safety of a Vehicle. Safety Science.

ALONSO, L., MILANÉS, V., TORRE-FERRERO, C., GODOY, J., ORIA, J.P. & DE PEDRO, T. (2011). Ultrasonic sensors in urban traffic driving-aid systems. Sensors, 11, 661–673.

BARAS, N., NANTZIOS, G., ZIOUZIOS, D. & DASYGENIS, M. (2019). Autonomous Obstacle Avoidance Vehicle Using LIDAR and an Embedded System. 8th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST), Thessaloniki, Greece, pp. 1-4.

BEAL C.E, GERDES J.C. (2013). Model Predictive Control for Vehicle Stabilization at the Limits of Handling. IEEE Transactions on Control Systems Technology. 21:1258–1269.

BERTOZZI, M., BROGGI, A. & FASCIOLI, A. (2000). Vision-based intelligent vehicles: State of the art and perspectives. Rob. Autom. Syst. 32, 1–16.

BISCHOFF, J. & MACIEJEWSKI, M. (2016). Simulation of city-wide replacement of private cars with autonomous taxis in berlin. Procedia Comput. Sci 2016, 83, 237–244.

BOBIER C.G, GERDES J.C. (2013). Staying within the nullcline boundary for vehicle envelope control using a sliding surface. Vehicle System Dynamics. 51:199–217.

BOBIER C.G. (2012) A phase portrait approach to vehicle stabilization and envelope control. Stanford University.

BROWN, M., AVERY, P. & STURGEON, P. (2014). Enhanced work zone safety through cooperative autonomous vehicle systems. International Conference on Connected Vehicles and Expo (ICCVE), Vienna, pp. 966-967.

ELTRASS, A. & KHALIL, M. (2018). An Automotive Radar System for Multiple-Vehicle Detection and Tracking in Urban Environments. IET Intell. Transp. Syst. 12, 783–792.

ERLIEN S.M. Shared vehicle control using safe driving envelopes for obstacle avoidance and stability. Stanford University; 2015.

EUROPEAN COMMISSION. (2016). Gear 2030 Discussion Paper—Roadmap on Highly Automated Vehicles; European Commission Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs: Geneva, Switzerland.

FAOUZI, N.E. & KLEIN, L.A. (2016). Data fusion for ITS: Techniques and research needs. Transportation Research Procedia 2016, 15, 495–512.

- HARPER, C.D., HENDRICKSON, C.T., MANGONES, S. & SAMARAS, C. (2016). Estimating potential increases in travel with autonomous vehicles for the non-driving, elderly and people with travel-restrictive medical conditions. *Trans. Res. Part C*, 72, 1.
- JIA, D., LU, K., WANG, J., ZHANG, X. & SHEN, X. (2017). A survey on platoon-based vehicular cyber-physical systems. *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, 18, 263–284.
- JIMÉNEZ, F. (2018). *Intelligent Vehicles: Enabling Technologies and Future Developments*; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands.
- JIMÉNEZ, F., CLAVIJO, M., CASTELLANOS, F. & ÁLVAREZ, C. (2018). Accurate and detailed transversal road section characteristics extraction using laser scanner. *Appl. Sci.* 8, 724.
- KHALEGHI, B., KHAMIS, A., KARRAY, F.O. & RAZAVI, S.N. (2013). Multisensor data fusion: A review of the state-of-the-art. *Inf. Fusion*, 14, 28–44.
- KIDONO, K., MIYASAKA, T., WATANABE, A., NAITO, T. & MIURA, J. (2011). Pedestrian recognition using high-definition LIDAR. In *Proceedings of the 2011 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Baden-Baden, Germany, 5–9 June 2011; pp. 405–410.
- KURAMOTO, M. A., ALDIBAJA, R., YANASE, J., KAMEYAMA, K., YONEDA & N. SUGANUMA. (2018). Mono-Camera based 3D Object Tracking Strategy for Autonomous Vehicles. *IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, Changshu, pp. 459-464.
- MARTÍNEZ, C., & JIMÉNEZ, F. (2019). Implementation of a Potential Field-Based Decision-Making Algorithm on Autonomous Vehicles for Driving in Complex Environments
- MILANÉS, V., NARANJO, J., GONZÁLEZ, C., ALONSO, J., & DE PEDRO, T. (2008). Autonomous vehicle based in cooperative GPS and inertial systems. *Robotica*, 26(5), 627-633.
- NARANJO, J.E., JIMENEZ, F., ANGUIA, M. & RIVERA, J.L. (2019) Automation kit for dual-mode military unmanned ground vehicle for surveillance missions. *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*
- NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION. (2015). *Critical Reasons for Crashes Investigated in the National Motor Vehicle Crash Causation Survey*; NHTSA: Washington, DC, USA.
- PACEJKA, B.H. (2002). *Tyre and Vehicle Dynamics*. Butterworth-Heinemann, Oxford.
- PARK, J., LEE, J. & SON, S.H. (2016). A Survey of Obstacle Detection Using Vision Sensor for Autonomous Vehicles. *IEEE 22nd International Conference on Embedded and Real-Time Computing Systems and Applications (RTCSA)*, Daegu, pp. 264-264.
- RASEKHIPOUR, Y., KHAJEPOUR, A., CHEN, S.-K., & LITKOUHI, B. (2017). A Potential Field-Based Model Predictive Path-Planning Controller for Autonomous Road Vehicles. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*.

ROWLEY, J. ET AL. (2018). Examining the driverless future: An analysis of human-caused vehicle accidents and development of an autonomous vehicle communication testbed. Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS), Charlottesville, VA, pp. 58-63.

SAE INTERNATIONAL. (2018). J3016: Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles; SAE: Warrendale, PA, USA.

SANTINI, S., SALVI, A., VALENTE, A.S., PESCAPÉ, A., SEGATA, M. & LO CIGNO, R. (2017). A consensus-based approach for platooning with intervehicular communications and its validation in realistic scenarios. IEEE Trans. Veh. Technol, 66.

SOMOGYI, H., PUP, D., KÖRÖS, P., MIHALY, A., & SOUMELIDIS, A. (2018). Research of Required Vehicle System Parameters and Sensor Systems for Autonomous Vehicle Control. IEEE 12th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), Timisoara.

WANG, N., WANG, X., PALACHARLA, P. & IKEUCHI, T. (2017). Cooperative autonomous driving for traffic congestion avoidance through vehicle-to-vehicle communications," 2017 IEEE Vehicular Networking Conference (VNC), Torino.