

GESTIÓN DE TRÁFICO EN SISTEMAS DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA

UN ENFOQUE MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

MIGUEL BANDE RODRÍGUEZ



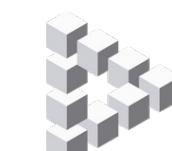
UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

ÍNDICE

1. Introducción y objetivos.
2. El problema de gestión de tráfico. Estado del arte.
3. Caso práctico.
4. Conclusión y propuesta de continuidad.



INTRODUCCIÓN



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

OBJETIVOS

RESOLVER UN PROBLEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO

- Estado actual y desafíos de la conducción autónoma
- Modelar, simular y analizar escenarios de tráfico mediante lógica difusa
- Evaluar los resultados en base a la seguridad



EL PROBLEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

EL PROBLEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO

ADS (AUTOMATED DRIVING SYSTEM)

CAPAZ DE SIMULAR EL CONTROL Y EL MANEJO HUMANO
PERCIBIENDO EL MUNDO QUE LE RODEA
Y NAVEGANDO DE FORMA SEGURA



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

ESTADO DEL ARTE



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

ESTADO DEL ARTE

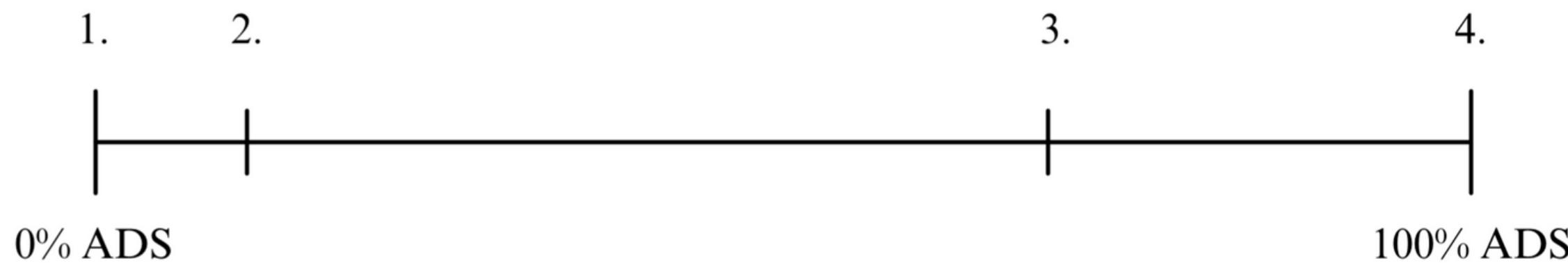


Figura 1: Escala ADS (Bande-Rodríguez (2024))



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

ESTADO DEL ARTE

ESCENARIOS TOTALMENTE AUTÓNOMOS

comunicación V2V (vehículo a vehículo)

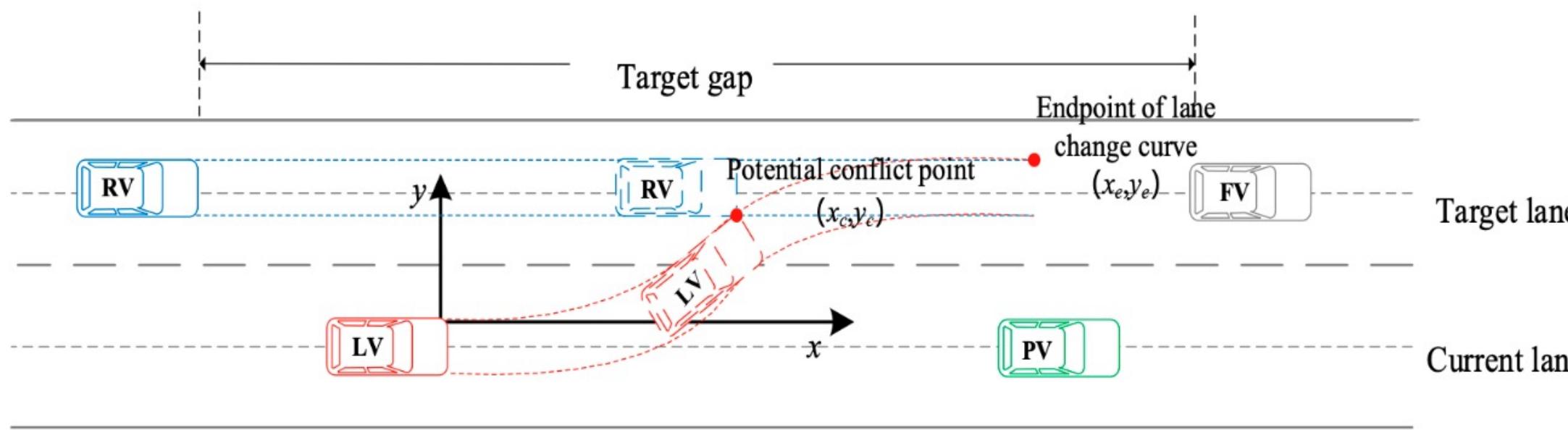


Figura 2: Punto de conflicto en cambio de carril
(Zhu et al. , 2023)

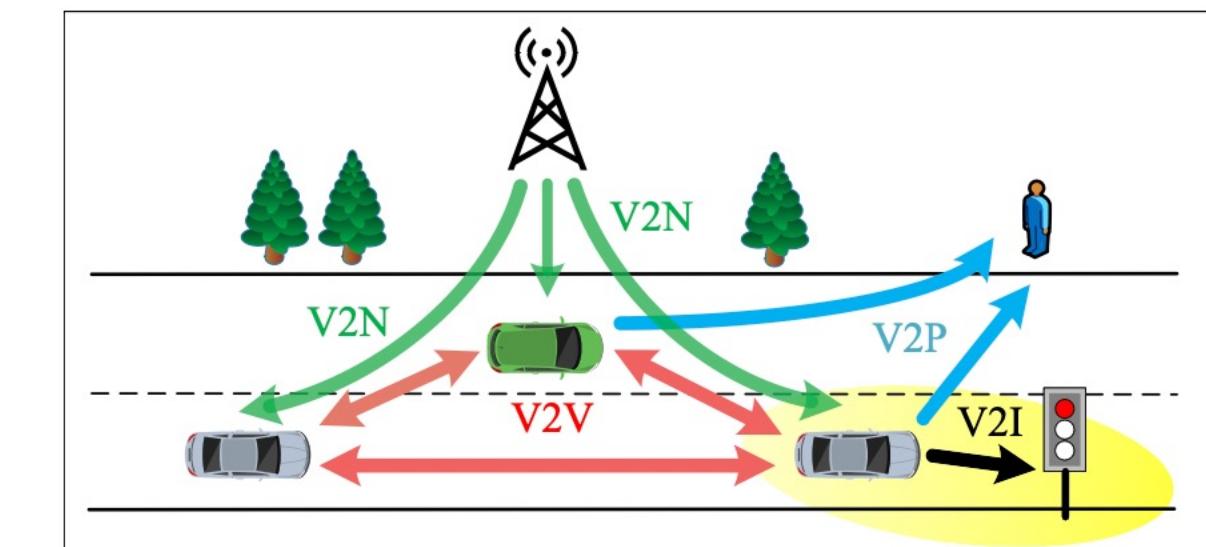


Figura 3: Comunicación V2V
(He et al. , 2024)



ESTADO DEL ARTE

ESCENARIOS DE TRÁFICO MIXTO

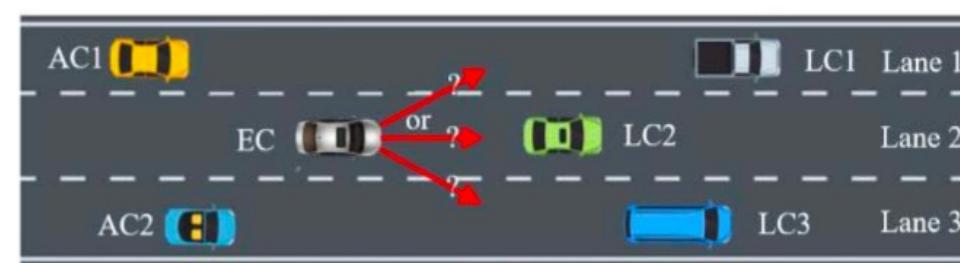


Figura 4: Cambio de carril
(Hang *et al.*, 2020)

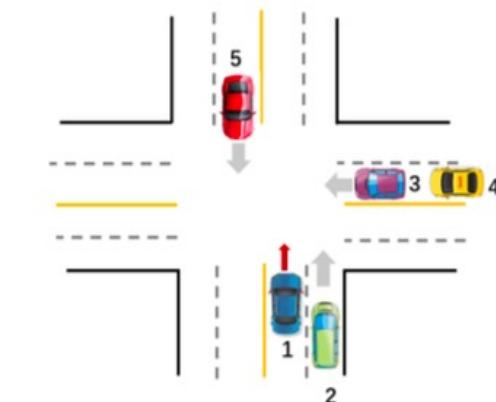


Figura 5: All way stop
(Liu *et al.*, 2023)

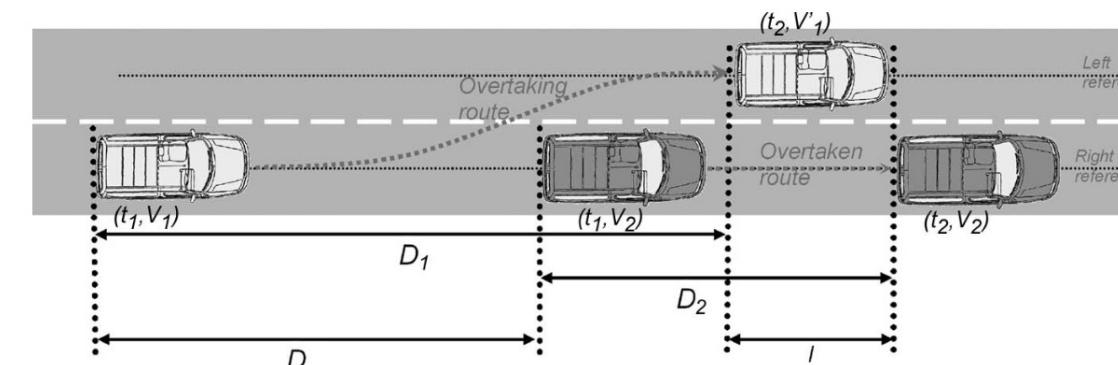


Figura 6: Cambio de carril
(Naranjo *et al.*, 2008)

ESTADO DEL ARTE

ESCENARIOS DE TRÁFICO MIXTO

Lógica difusa

- seguridad, comodidad y eficiencia de los conductores
- Implementación de técnicas de optimización
- Implementación de simulación tipo car-sim
- Estimadores de colisión basado en lógica difusa



CASO PRÁCTICO



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



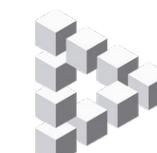
Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

CASO PRÁCTICO

github.com/miguelbande



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

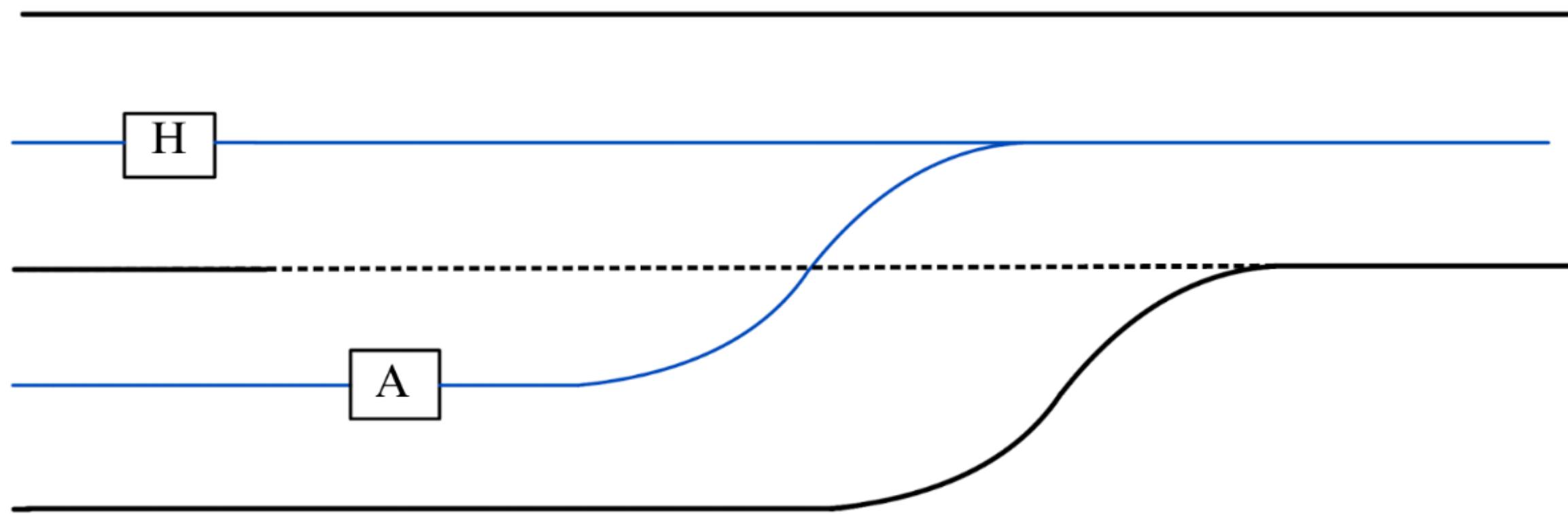


Figura 7: Escena de tráfico: incorporación a una vía principal (Bande-Rodríguez (2024))



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

ECUACIONES MRUA

$$x_A(t) = x_{A_0} + v_{A_0} \cdot t + \frac{a_A}{2} \cdot t^2$$

$$x_H(t) = x_{H_0} + v_{H_0} \cdot t + \frac{a_H}{2} \cdot t^2$$

$$v_A(t) = v_{A_0} + a_A \cdot t$$

$$v_H(t) = v_{H_0} + a_H \cdot t$$

$$v_{\max} \quad v_{\min} = \frac{v_{\max}}{2}$$

Para la simulación se discretizará el tiempo
(método de Euler)



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Variables difusas

Velocidad relativa

$$v_{rel}(t) = v_H(t) - v_{ADS}(t)$$

Distancia de seguridad

$$d(t) = x_H(t) - x_{ADS}(t)$$

Decisión acción

$$a_{ADS}(t)$$



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



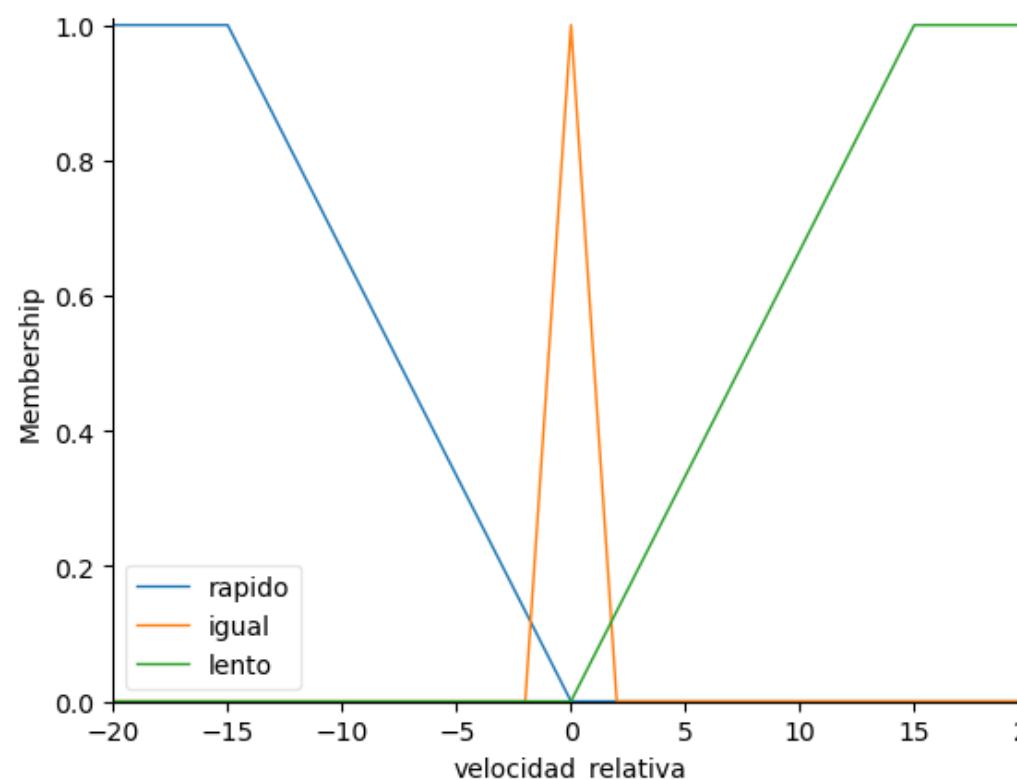
Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Variables difusas

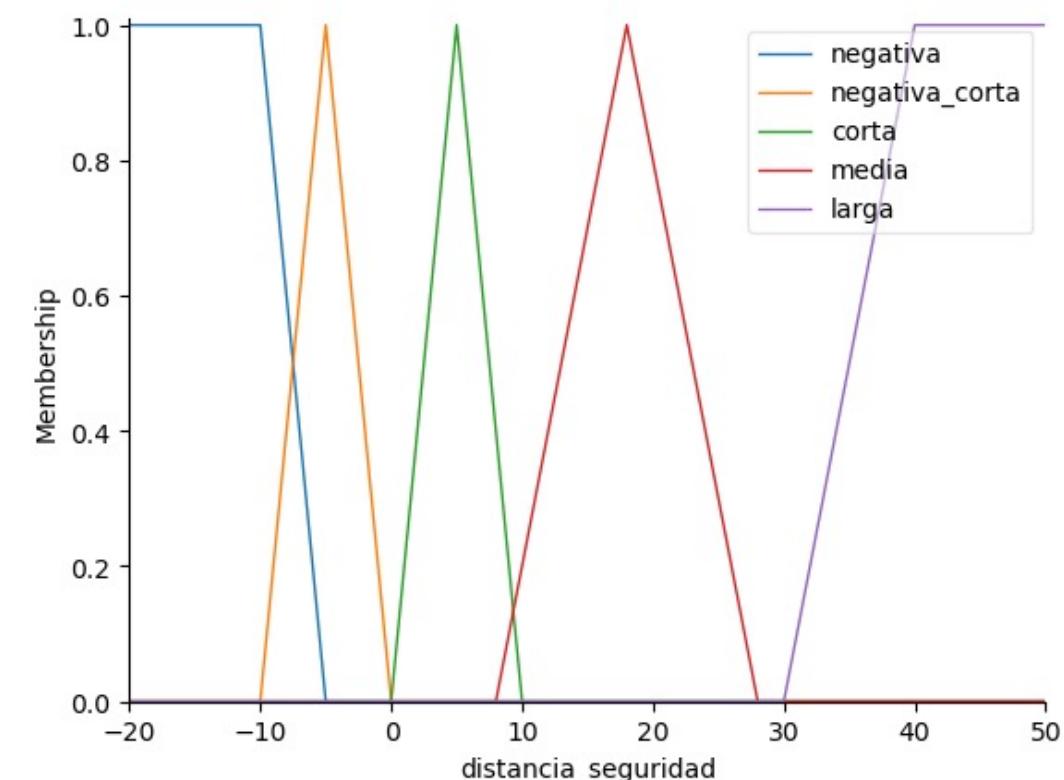
Velocidad relativa

$$v_{rel}(t) = v_H(t) - v_{ADS}(t)$$



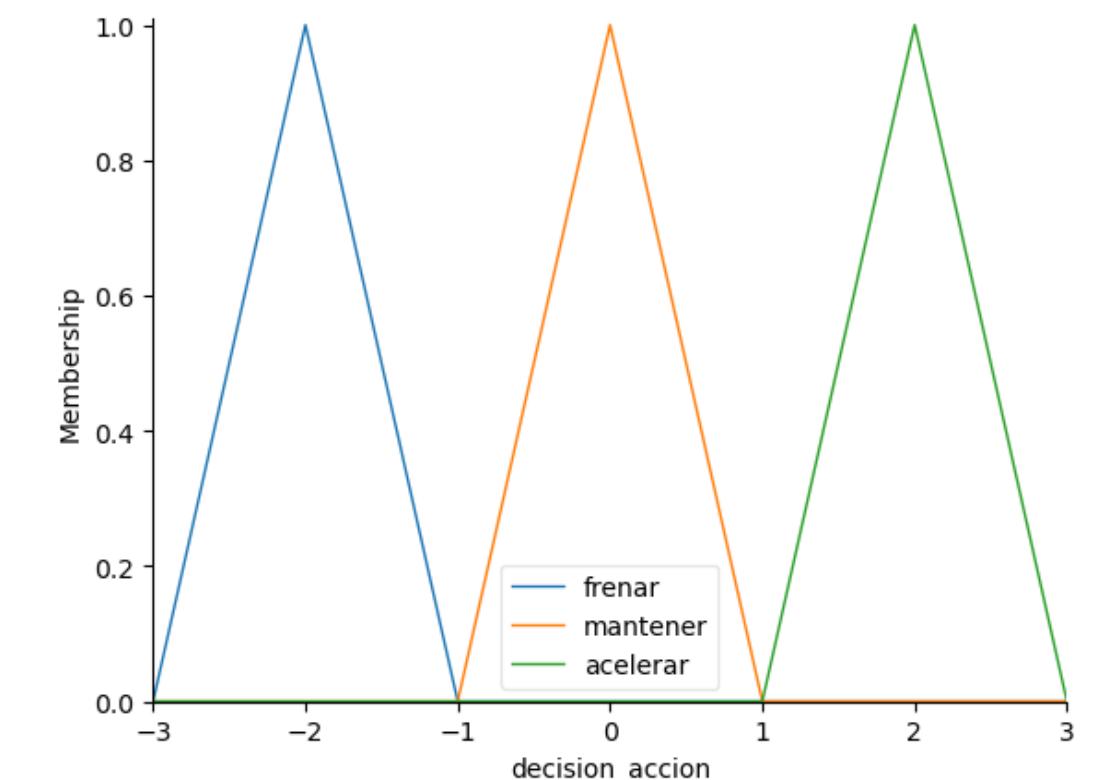
Distancia de seguridad

$$d(t) = x_H(t) - x_{ADS}(t)$$



Decisión acción

$$a_{ADS}(t)$$



Figuras 8-10: Funciones de pertenencia de las variables difusas



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Reglas difusas



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Reglas difusas

Regla	Vel. Relativa	Dist. Seguridad	Acción	Interpretación
R1	lenta	Negativa	Acelerar	El otro va más rápido y ya lo has rebasado mucho → riesgo de ser alcanzado → acelerar
R2	lenta	Negativa_corta	Acelerar	El otro va más rápido y está muy cerca desde atrás (rebase reciente) → acelerar
R3	lenta	Corta	Frenar	El otro va más rápido y estás cerca → frenar
R4	lenta	Media	Mantener	El otro va más rápido y hay distancia media → mantener
R5	lenta	Larga	Mantener	El otro va más rápido y hay mucha distancia → mantener
R6	igual	Negativa	Mantener	Lo has rebasado y vais igual → mantener
R7	igual	Negativa_corta	Acelerar	Rebase reciente, misma velocidad → acelerar
R8	igual	Corta	Acelerar	Cerca pero misma velocidad → acelerar
R9	igual	Media	Mantener	Igual velocidad y distancia media → mantener
R10	igual	Larga	Mantener	Situación ideal → mantener
R11	rápida	Negativa	Mantener	Tú vas más rápido y ya lo rebasaste bien → mantener
R12	rápida	Negativa_corta	Acelerar	Tú vas más rápido y estás justo rebasando → acelerar
R13	rápida	Corta	Frenar	Lo estás alcanzando rápido estando muy cerca → frenar
R14	rápida	Media	Mantener	Vas más rápido, pero con distancia aceptable → mantener
R15	rápida	Larga	Mantener	Tú vas más rápido y hay mucha distancia → mantener

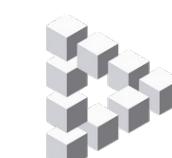
Tabla 1: Reglas difusas



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Reglas difusas

Regla	Vel. Relativa	Dist. Seguridad	Acción	Interpretación
R1	lenta	Negativa	Acelerar	El otro va más rápido y ya lo has rebasado mucho → riesgo de ser alcanzado → acelerar
R2	lenta	Negativa_corta	Acelerar	El otro va más rápido y está muy cerca desde atrás (rebase reciente) → acelerar
R3	lenta	Corta	Frenar	El otro va más rápido y estás cerca → frenar
R4	lenta	Media	Mantener	El otro va más rápido y hay distancia media → mantener
R5	lenta	Larga	Mantener	El otro va más rápido y hay mucha distancia → mantener
R6	igual	Negativa	Mantener	Lo has rebasado y vais igual → mantener
R7	igual	Negativa_corta	Acelerar	Rebase reciente, misma velocidad → acelerar
R8	igual	Corta	Acelerar	Cerca pero misma velocidad → acelerar
R9	igual	Media	Mantener	Igual velocidad y distancia media → mantener
R10	igual	Larga	Mantener	Situación ideal → mantener
R11	rápida	Negativa	Mantener	Tú vas más rápido y ya lo rebasaste bien → mantener
R12	rápida	Negativa_corta	Acelerar	Tú vas más rápido y estás justo rebasando → acelerar
R13	rápida	Corta	Frenar	Lo estás alcanzando rápido estando muy cerca → frenar
R14	rápida	Media	Mantener	Vas más rápido, pero con distancia aceptable → mantener
R15	rápida	Larga	Mantener	Tú vas más rápido y hay mucha distancia → mantener



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Reglas difusas

Regla	Vel. Relativa	Dist. Seguridad	Acción	Interpretación
R1	lenta	Negativa	Acelerar	El otro va más rápido y ya lo has rebasado mucho → riesgo de ser alcanzado → acelerar
R2	lenta	Negativa_corta	Acelerar	El otro va más rápido y está muy cerca desde atrás (rebase reciente) → acelerar
R3	lenta	Corta	Frenar	El otro va más rápido y estás cerca → frenar
R4	lenta	Media	Mantener	El otro va más rápido y hay distancia media → mantener
R5	lenta	Larga	Mantener	El otro va más rápido y hay mucha distancia → mantener
R6	igual	Negativa	Mantener	Lo has rebasado y vais igual → mantener
R7	igual	Negativa_corta	Acelerar	Acelerar Rebase reciente, misma velocidad → acelerar
no	igual	Corta	Acelerar	Cerca pero misma velocidad → acelerar
R9	igual	Media	Mantener	Igual velocidad y distancia media → mantener
R10	igual	Larga	Mantener	Situación ideal → mantener
R11	rápida	Negativa	Mantener	Tú vas más rápido y ya lo rebasaste bien → mantener
R12	rápida	Negativa_corta	Acelerar	Tú vas más rápido y estás justo rebasando → acelerar
R13	rápida	Corta	Frenar	Lo estás alcanzando rápido estando muy cerca → frenar
R14	rápida	Media	Mantener	Vas más rápido, pero con distancia aceptable → mantener
R15	rápida	Larga	Mantener	Tú vas más rápido y hay mucha distancia → mantener



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Reglas difusas

Regla	Vel. Relativa	Dist. Seguridad	Acción	Interpretación
R1	lenta	Negativa	Acelerar	El otro va más rápido y ya lo has rebasado mucho → riesgo de ser alcanzado → acelerar
R2	lenta	Negativa_corta	Acelerar	El otro va más rápido y está muy cerca desde atrás (rebase reciente) → acelerar
R3	lenta	Corta	Frenar	El otro va más rápido y estás cerca → frenar
R4	lenta	Media	Mantener	El otro va más rápido y hay distancia media → mantener
R5	lenta	Larga	Mantener	El otro va más rápido y hay mucha distancia → mantener
R6	igual	Negativa	Mantener	Lo has rebasado y vais igual → mantener
R7	igual	Negativa_corta	Acelerar	Rebase reciente, misma velocidad → acelerar
R8	igual	Corta	Acelerar	Cerca pero misma velocidad → acelerar
R9	igual	Media	Mantener	Igual velocidad y distancia media → mantener
R10	igual	Larga	Mantener	Situación ideal → mantener
R11	rápida	Negativa	Mantener	Tú vas más rápido y ya lo rebasaste bien → mantener
R12	rápida	Negativa_corta	Acelerar	Tú vas más rápido y estás justo rebasando → acelerar
R13	rápida	Corta	Frenar	Lo estás alcanzando rápido estando muy cerca → frenar
R14	rápida	media	mantener	vas mas rapido, pero con distancia aceptable → mantener
R15	rápida	Larga	Mantener	Tú vas más rápido y hay mucha distancia → mantener



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Sistema de control difuso Mamdani



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Sistema de control difuso Mamdani

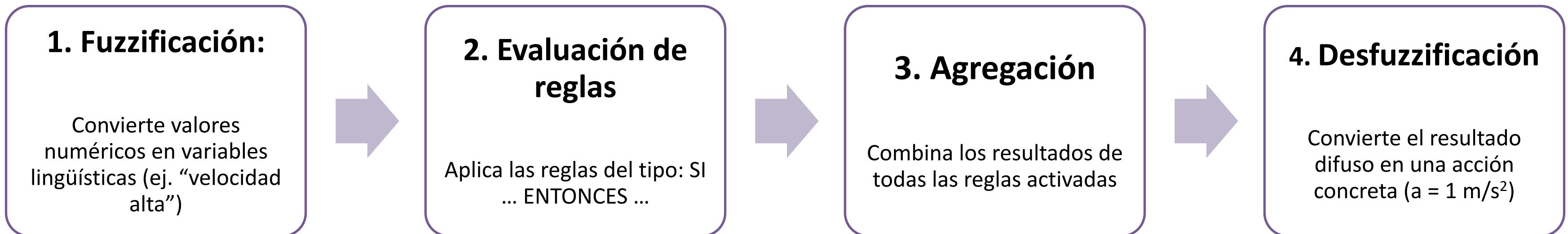
- Utiliza reglas difusas del tipo:
Si (condición 1) y (condición 2) **entonces** (acción)
- Reproduce decisiones similares a las que tomaría un ser humano en condiciones inciertas.



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Sistema de control difuso Mamdani

4 fases:



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Sistema de control difuso Mamdani



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

VALIDACIÓN DE LA MANIOBRA

El ADS simula el comportamiento humano, pero ...

¿Es la maniobra factible?



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

VALIDACIÓN DE LA MANIOBRA

Tiempo de realización de la maniobra a lo sumo 4 segundos (Dang et al., 2017)

$$d_{AH}(t) = |x_A(t) - x_H(t)| \geq d_{min} = 5$$

$$d(t) = x_{fin} - x_A(t) \geq 0$$



DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

PROBLEMAS A CONSIDERAR

x_{A_0}	v_{A_0}	x_{H_0}	v_{H_0}	$v_{mín}$	$v_{máx}$	x_{fin}
15	20	0	24	12,5	25	200

Tabla 2: Valores iniciales del **ejemplo 1** del caso práctico

x_{A_0}	v_{A_0}	x_{H_0}	v_{H_0}	$v_{mín}$	$v_{máx}$	x_{fin}
15	20	0	24	12,5	25	120

Tabla 3: Valores iniciales del **ejemplo 2** del caso práctico



EJEMPLO 1

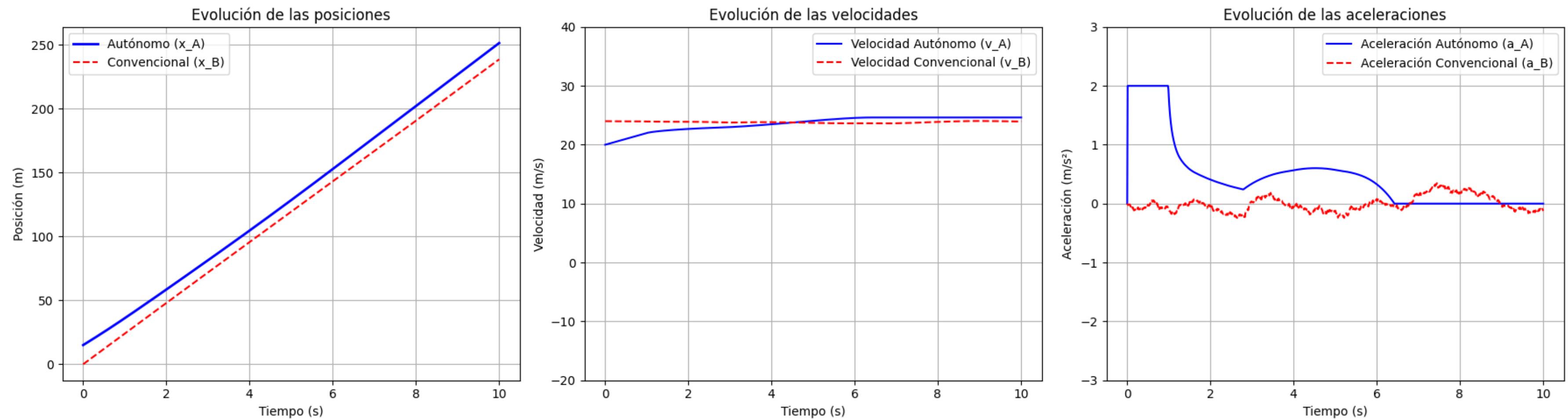
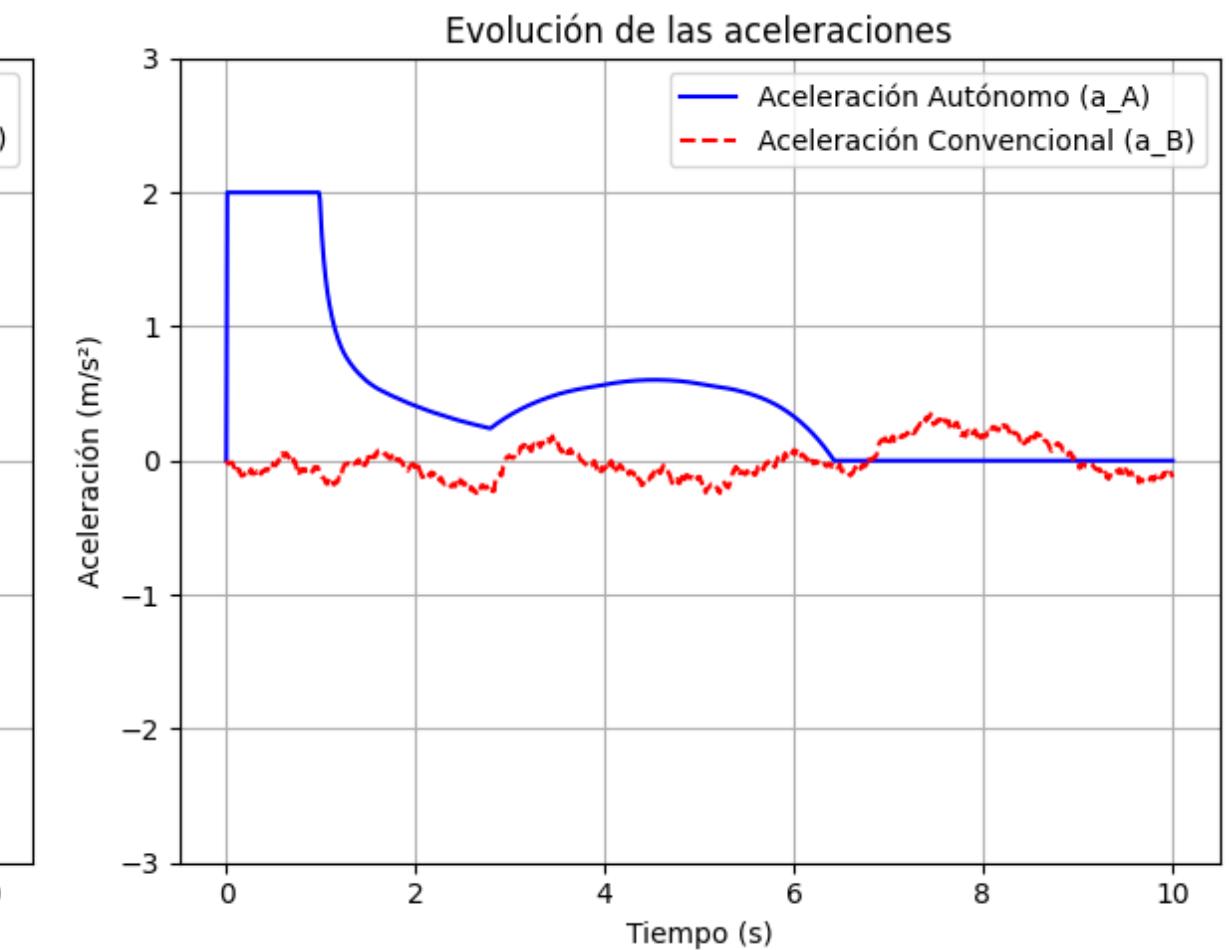
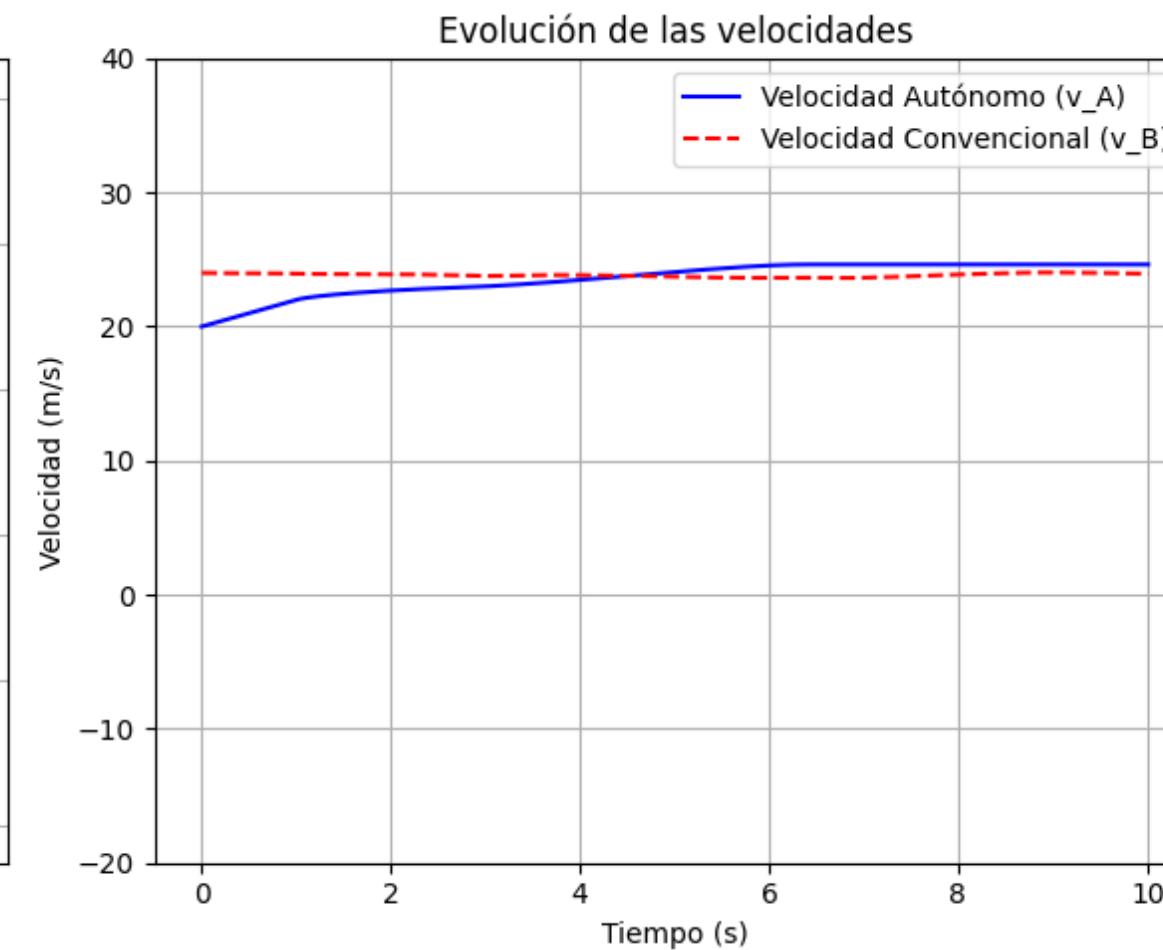
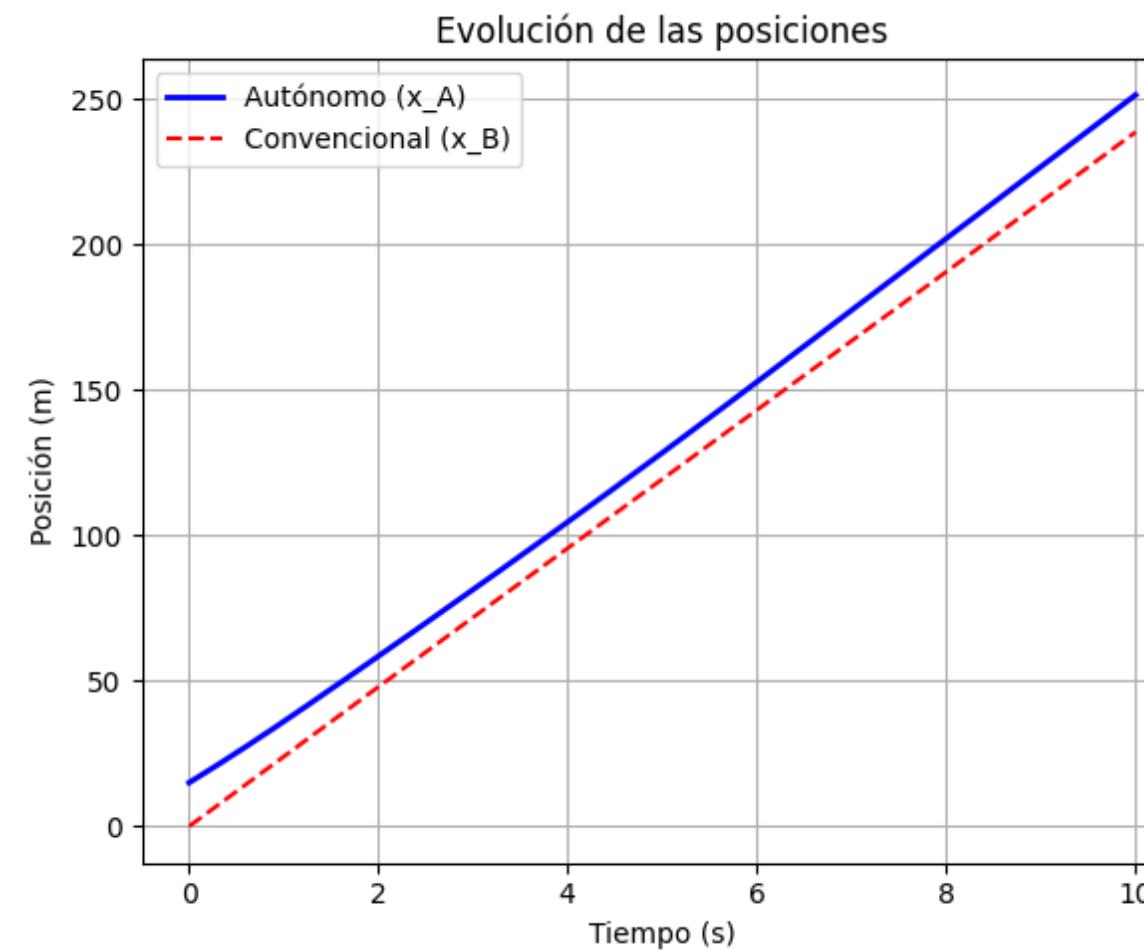


Figura 11: Posiciones, velocidades y aceleraciones del ejemplo 1



EJEMPLO 1



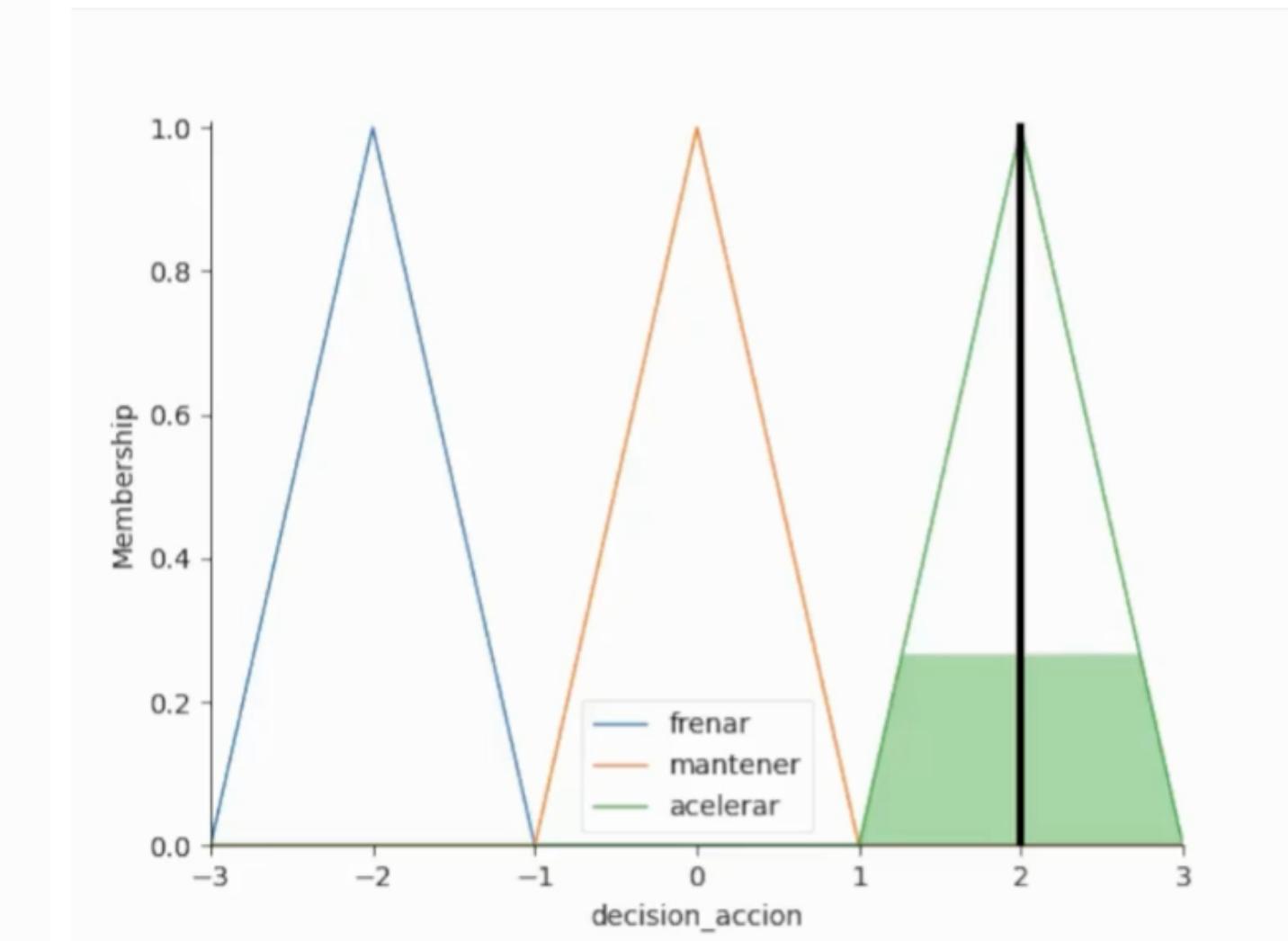
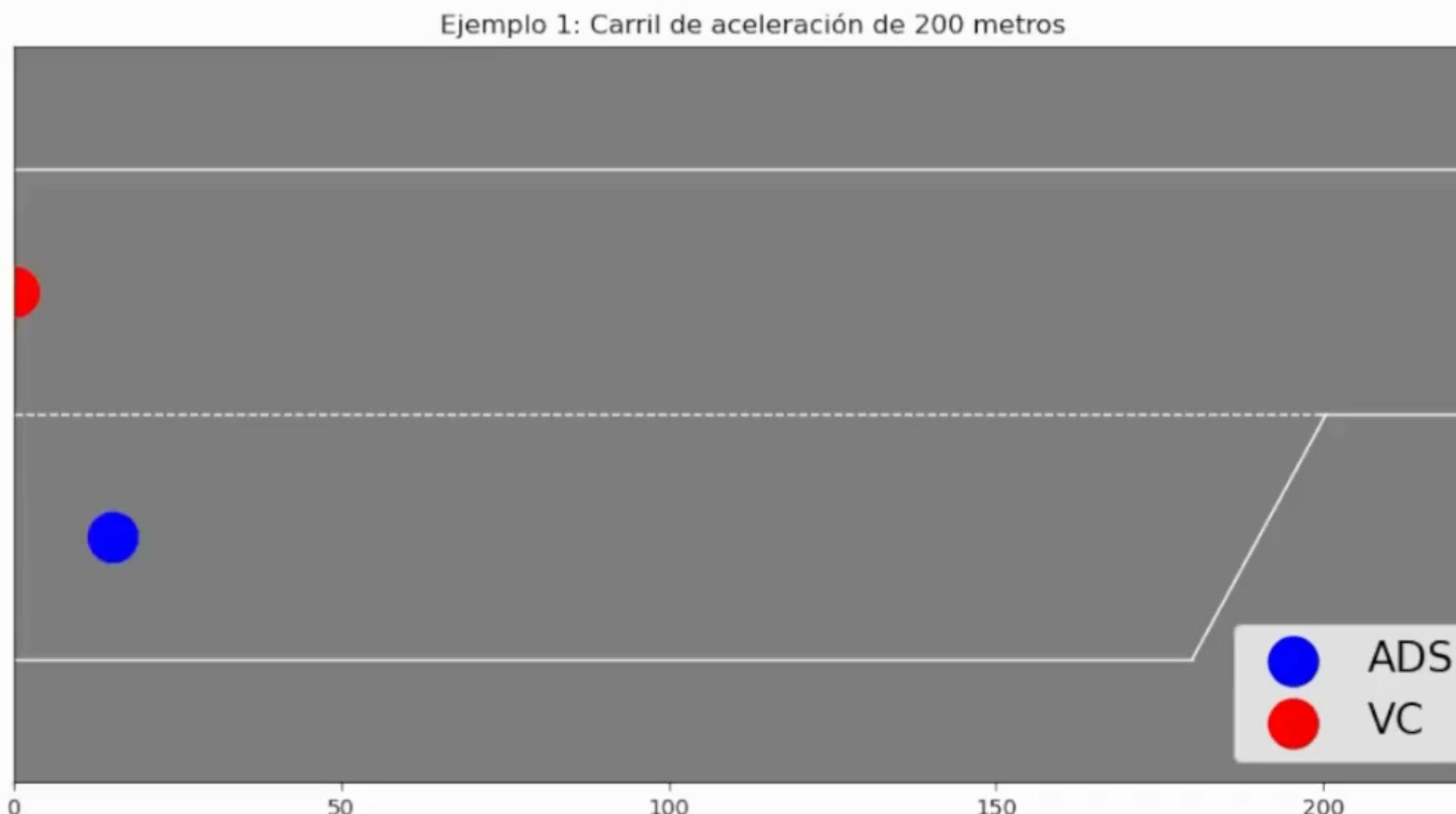
La separación entre ambos vehículos se mantiene similar en toda la simulación

La velocidad del ADS se adecúa a la velocidad de la vía

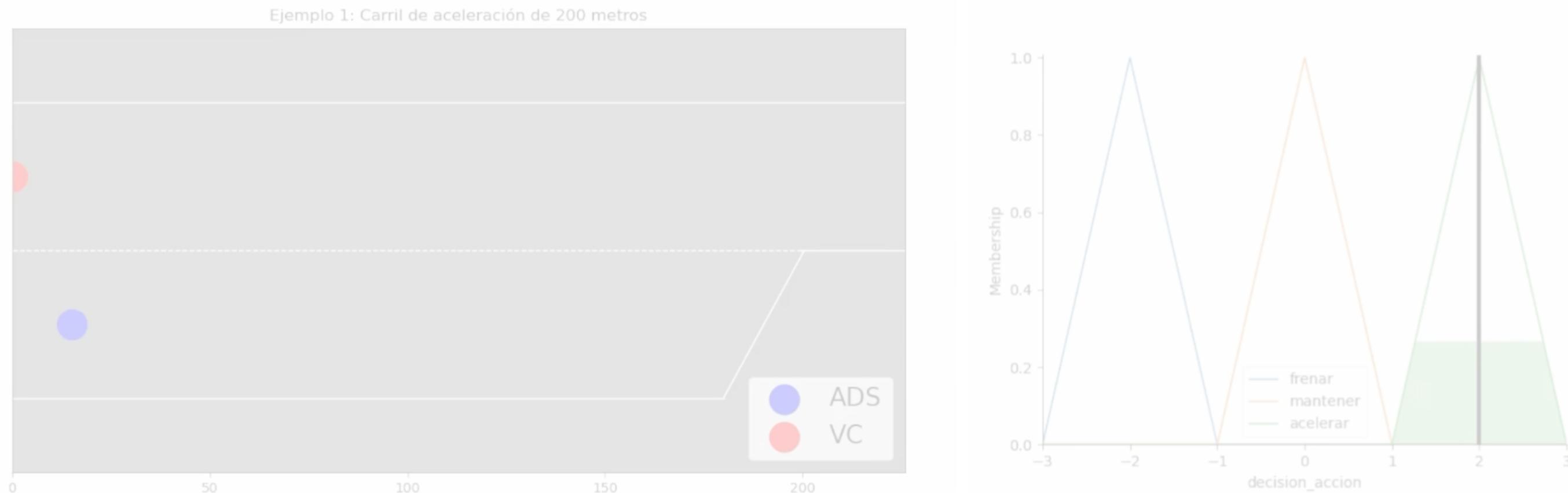
La aceleración del ADS se adecúa a las necesidades del vehículo



EJEMPLO 1 – CARRIL 200 m



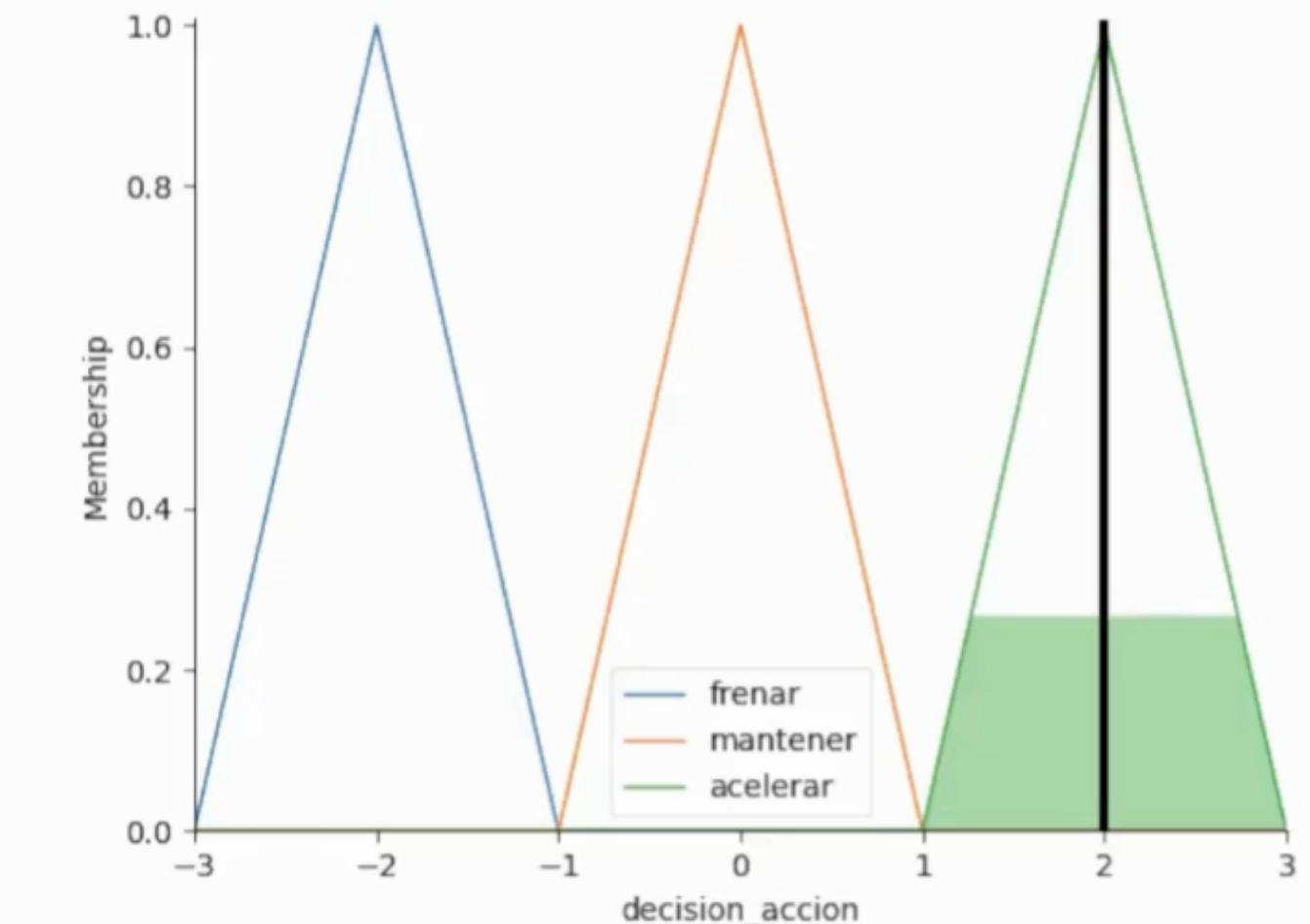
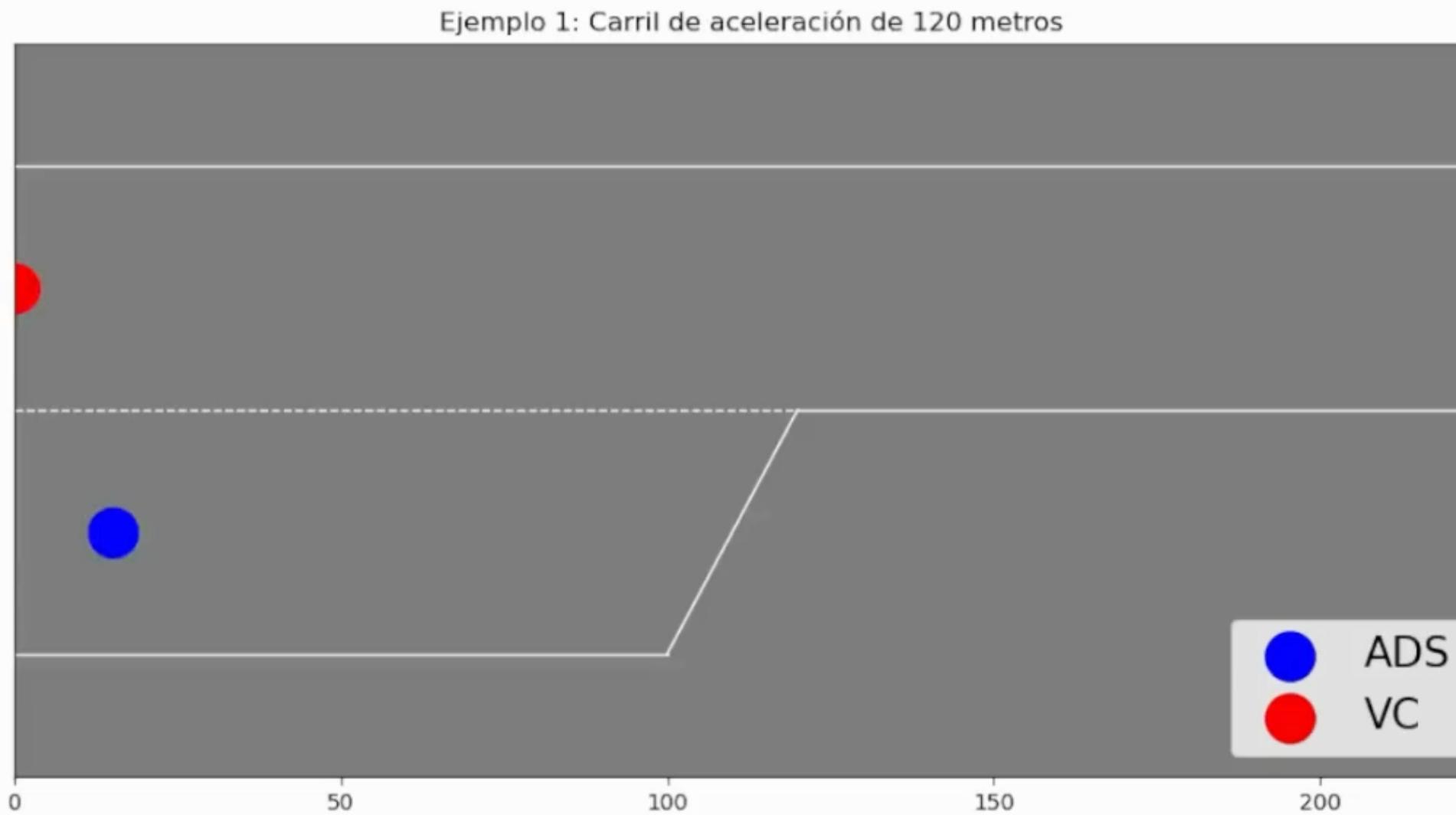
EJEMPLO 1 – CARRIL 200 m



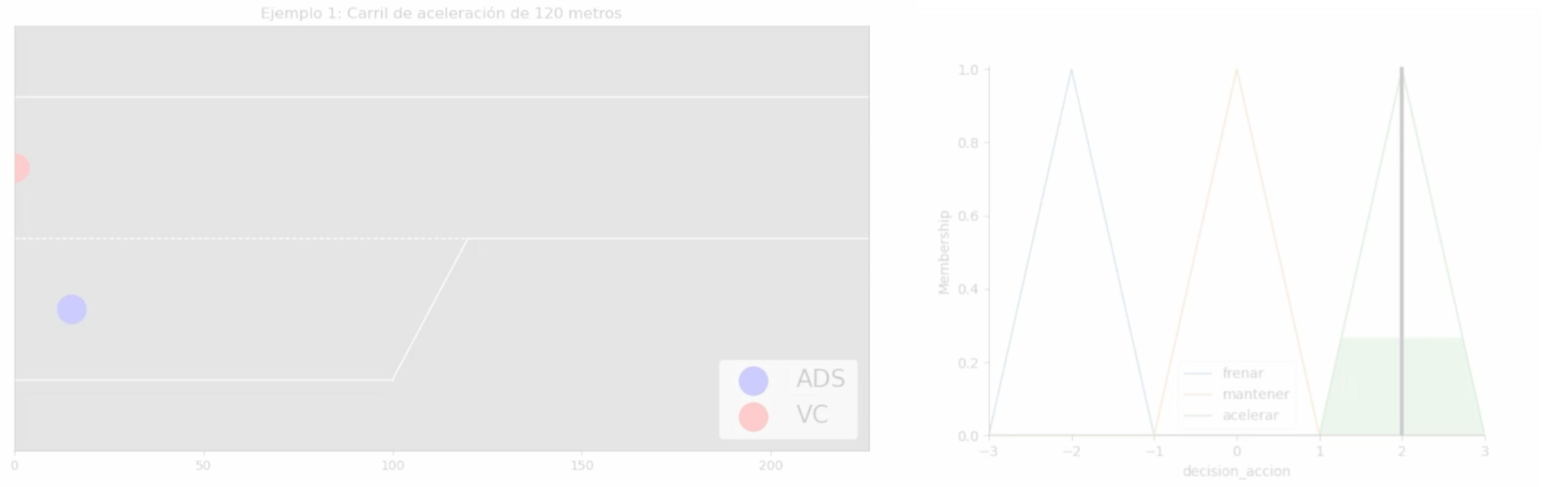
Validación del modelo

Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_maniobra	dist_coches	bool	Tiempo para la maniobra	Velocidad ADS final maniobra	
0	1.0	15.0	20.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	15.0	1.0	7.96	23.423282

EJEMPLO 2 – CARRIL 120 m



EJEMPLO 2 – CARRIL 120 m



Validación del modelo

	Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_maniobra	dist_coches	bool	Tiempo para la maniobra	Velocidad ADS final maniobra	
0		1.0	15.0	20.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	15.0	1.0	4.66	23.423282



EJEMPLOS 3 Y 4

x_{A_0}	v_{A_0}	x_{H_0}	v_{H_0}	a_{H_0}	$v_{mín}$	$v_{máx}$
15	20	5	24	3	12,5	25

Tabla 4: Valores iniciales del **ejemplo 3** del caso práctico

x_{A_0}	v_{A_0}	x_{H_0}	v_{H_0}	a_{H_0}	$v_{mín}$	$v_{máx}$
15	20	5	24	-3	12,5	25

Tabla 5: Valores iniciales del **ejemplo 4** del caso práctico



EJEMPLOS 3 Y 4

x_{A_0}	v_{A_0}	x_{H_0}	v_{H_0}	a_{H_0}	$v_{mín}$	$v_{máx}$
15	20	5	24	3	12,5	25

Tabla 4: Valores iniciales del **ejemplo 3** del caso práctico



El vehículo tripulado
pega un acelerón

x_{A_0}	v_{A_0}	x_{H_0}	v_{H_0}	a_{H_0}	$v_{mín}$	$v_{máx}$
15	20	5	24	-3	12,5	25

Tabla 5: Valores iniciales del **ejemplo 4** del caso práctico



El vehículo tripulado
pega un frenazo



EJEMPLO 3

El vehículo tripulado pega un acelerón

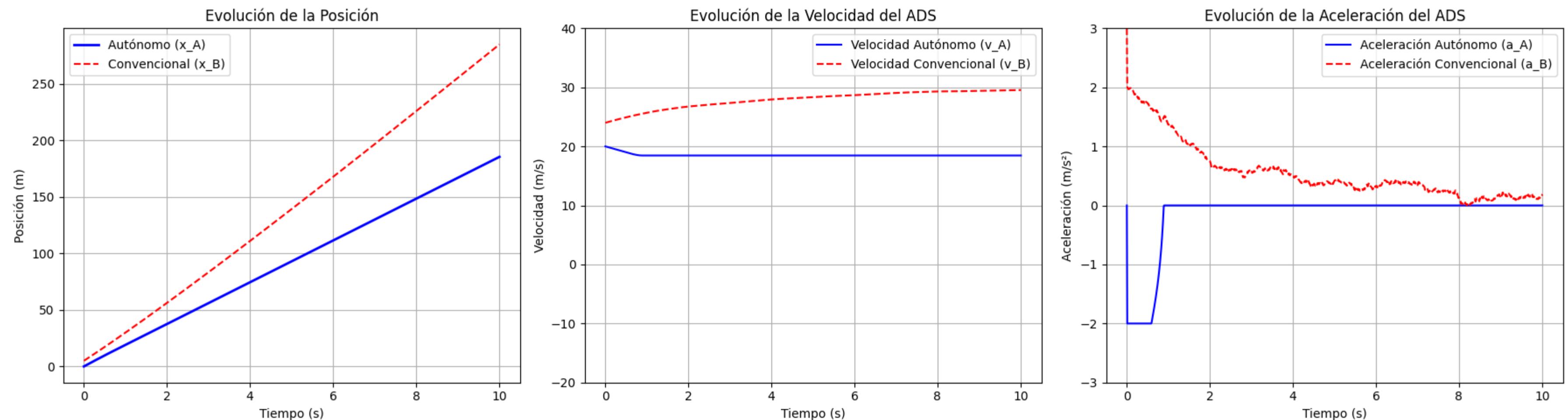


Figura 12: Posiciones, velocidades y aceleraciones del ejemplo 3



EJEMPLO 3

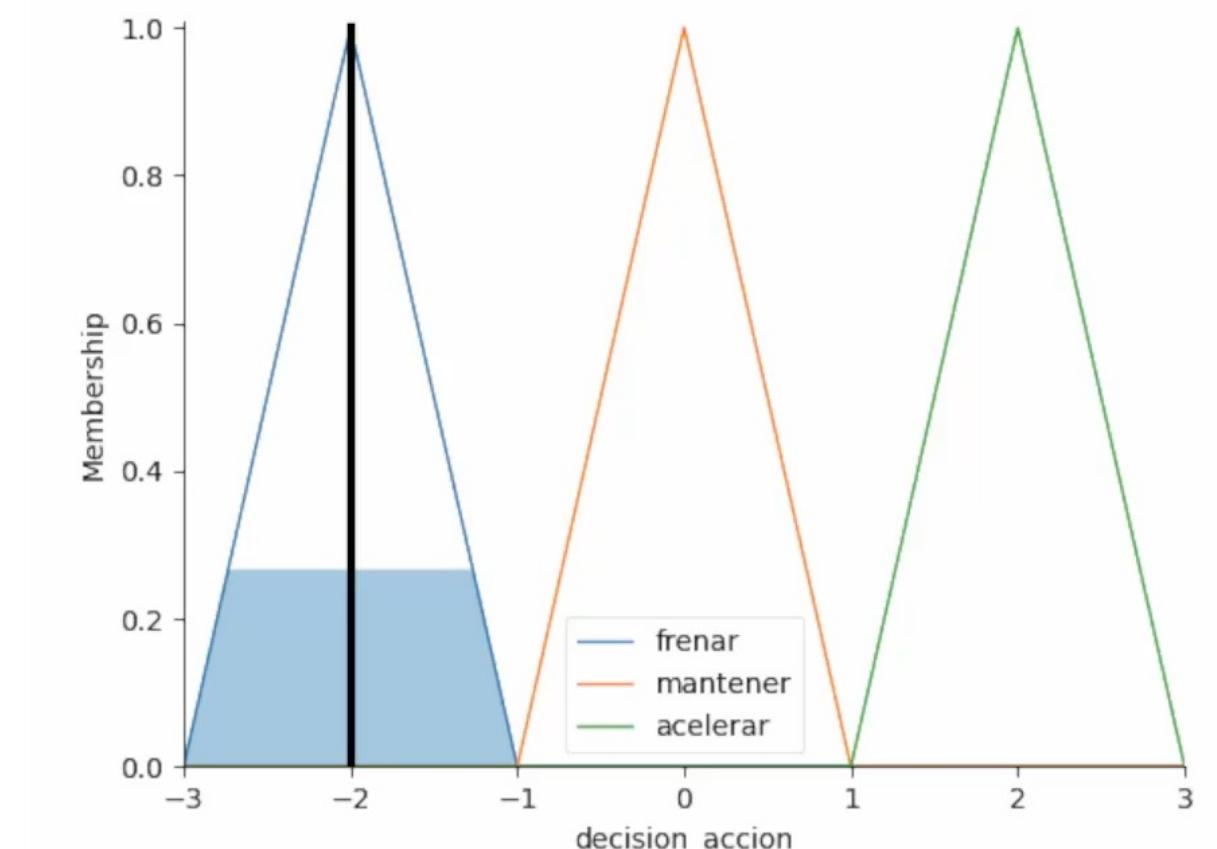
El vehículo tripulado pega un acelerón

Validación en un carril de 200 metros

Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_maniobra	dist_coches	bool	Tiempo para la maniobra	Velocidad ADS final maniobra	
0	1.0	0.1998	19.98	-2.0	5.2402	24.02	2.0	0.01	5.0404	1.0	10.01	18.450184

Validación en un carril de 120 metros

Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_maniobra	dist_coches	bool	Tiempo para la maniobra	Velocidad ADS final maniobra	
0	1.0	0.1998	19.98	-2.0	5.2402	24.02	2.0	0.01	5.0404	1.0	6.47	18.444925



EJEMPLO 4

El vehículo tripulado pega un frenazo

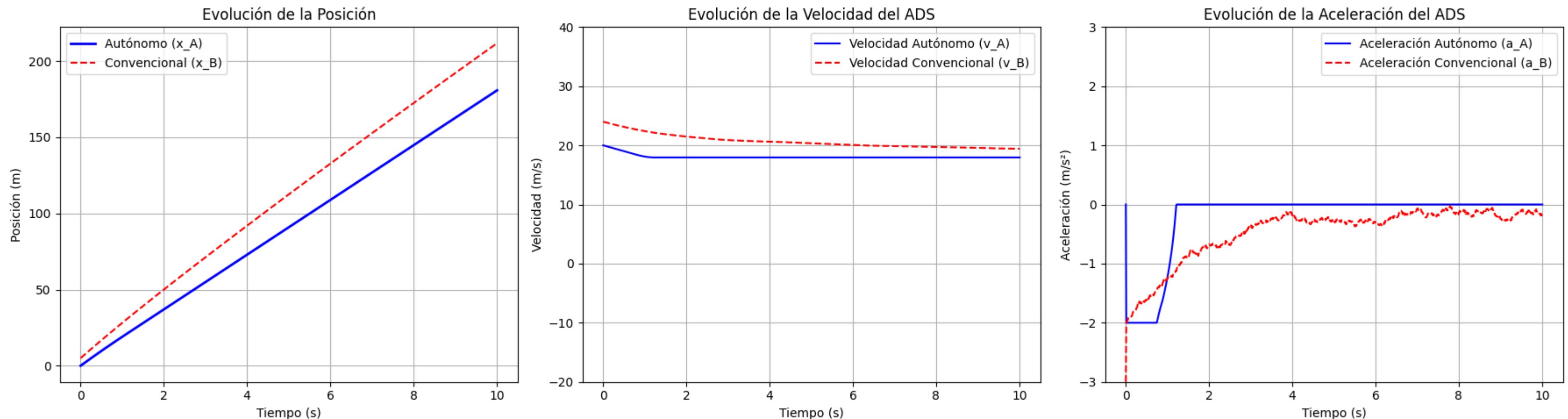


Figura 12: Posiciones, velocidades y aceleraciones del ejemplo 4



EJEMPLO 4

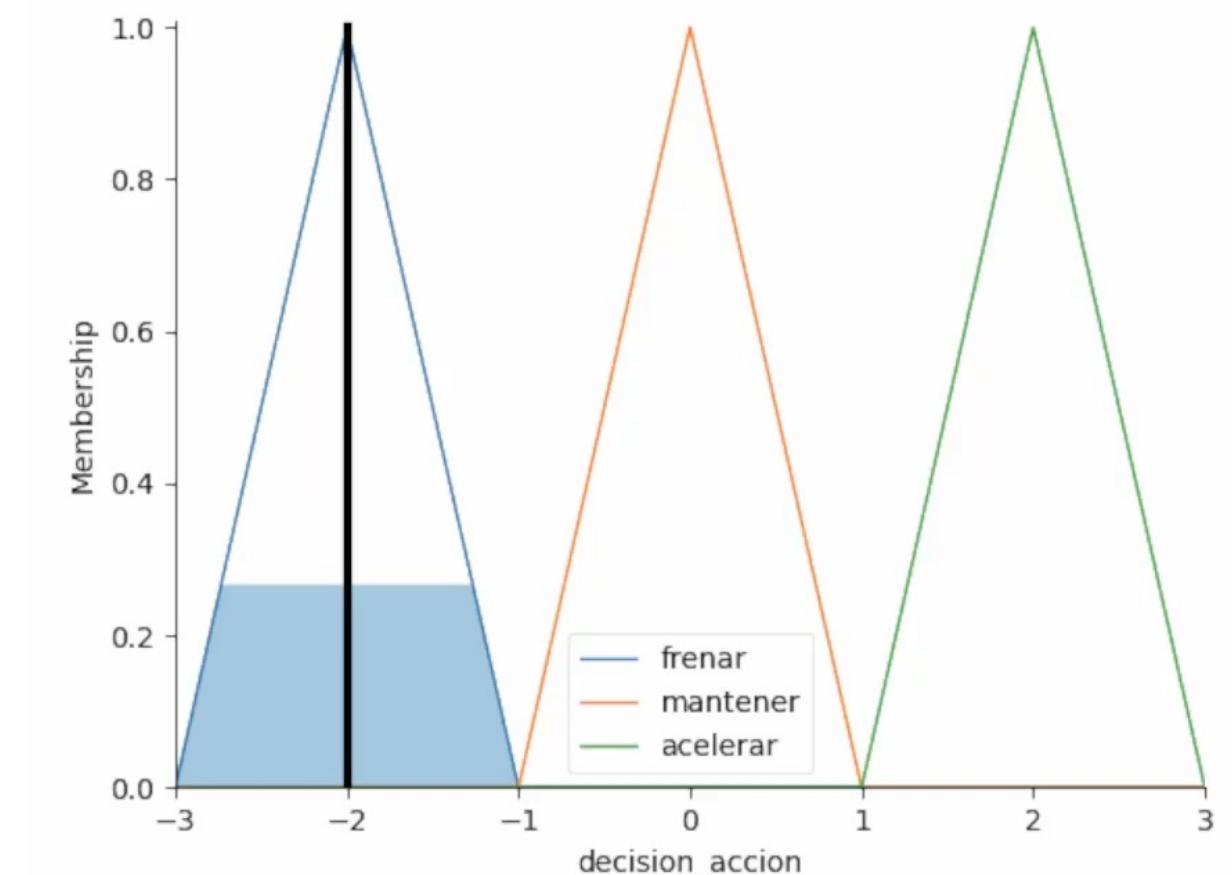
El vehículo tripulado pega un frenazo

Validación en un carril de 200 metros

	Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_maniobra	dist_coches	bool	Tiempo para la maniobra	Velocidad ADS final maniobra	
0		1.0	0.1998	19.98	-2.0	5.2398	23.98	-2.0	0.01	5.04	1.0	10.01	17.970386

Validación en un carril de 120 metros

	Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_maniobra	dist_coches	bool	Tiempo para la maniobra	Velocidad ADS final maniobra	
0		1.0	0.1998	19.98	-2.0	5.2398	23.98	-2.0	0.01	5.04	1.0	6.61	17.970386



CONCLUSIÓN



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

CONCLUSIÓN

LÓGICA DIFUSA - HERRAMIENTA CLAVE

RESULTADOS RAZONABLES CON UN
PROBLEMA SIMPLIFICADO



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

PROPUESTA DE CONTINUIDAD



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

PROPUESTA DE CONTINUIDAD

PROFUNDIZAR EN EL DISEÑO FÍSICO DEL
MODELO



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS

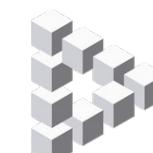
BIBLIOGRAFÍA PRINCIPAL

- Bande-Rodríguez, M. (2024). Gestión de tráfico en sistemas de conducción autónoma. un enfoque mediante teoría de juegos. *Trabajo Fin de Grado. Universidad Complutense de Madrid.*
- Dang, H. Q., Fürnkranz, J., Biedermann, A., y Hoepfl, M. (2017). Time-to-lane-change prediction with deep learning. En *2017 IEEE 20th International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*, pp. 1–7.
- Hang, P., Lv, C., Xing, Y., Huang, C., y Hu, Z. (2020). Human-like decision making for autonomous driving: A noncooperative game theoretic approach. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(4):2076–2087.
- He, C., Jiang, W., Li, J., Wei, J., Guo, J., y Zhang, Q. (2024). Fuzzy logic-based autonomous lane changing strategy for intelligent internet of vehicles: A trajectory planning approach. *World Electric Vehicle Journal*, 15(9):403.
- Liu, M., Kolmanovsky, I., Tseng, H. E., Huang, S., Filev, D., y Girard, A. (2023). Potential game-based decision-making for autonomous driving. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 22(8):8014–8027.
- Naranjo, J. E., Gonzalez, C., Garcia, R., y De Pedro, T. (2008). Lane-change fuzzy control in autonomous vehicles for the overtaking maneuver. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 9(3):438–450.
- Sharma, O., Sahoo, N., y Puhan, N. B. (2024). Dynamic planning of optimally safe lane-change trajectory for autonomous driving on multi-lane highways using a fuzzy logic-based collision estimator. *Journal on Autonomous Transportation Systems*, 1(1):1–50.
- Yu, H., Tseng, H. E., y Langari, R. (2018). A human-like game theory-based controller for automatic lane changing. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 88:140–158.
- Zhu, L., Yang, D., Cheng, Z., Yu, X., y Zheng, B. (2023). A model to manage the lane-changing conflict for automated vehicles based on game theory. *Sustainability*, 15(4):3063.

MUCHAS GRACIAS



UNIVERSIDAD
COMPLUTENSE
MADRID



Facultad de Ciencias
MATEMÁTICAS