

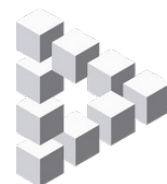
# GESTIÓN DE TRÁFICO EN SISTEMAS DE CONDUCCIÓN AUTÓNOMA

UN ENFOQUE MEDIANTE LÓGICA DIFUSA

MIGUEL BANDE RODRÍGUEZ



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID



Facultad de Ciencias  
MATEMÁTICAS

# ÍNDICE

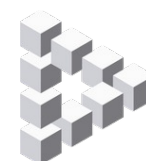
1. Introducción y objetivos.
2. El problema de gestión de tráfico. Estado del arte.
3. Caso práctico.
4. Conclusión y propuesta de continuidad.



# INTRODUCCIÓN



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID



Facultad de Ciencias  
MATEMÁTICAS

# OBJETIVOS

## RESOLVER UN PROBLEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO

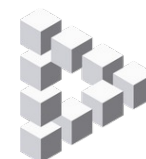
- Estado actual y desafíos de la conducción autónoma
- Modelar, simular y analizar escenarios de tráfico mediante lógica difusa
- Evaluar los resultados en base a la seguridad



# EL PROBLEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID



Facultad de Ciencias  
MATEMÁTICAS

# EL PROBLEMA DE GESTIÓN DE TRÁFICO

## ADS (AUTOMATED DRIVING SYSTEM)

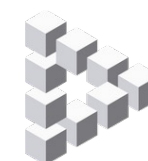
CAPAZ DE SIMULAR EL CONTROL Y EL MANEJO HUMANO  
PERCIBIENDO EL MUNDO QUE LE RODEA  
Y NAVEGANDO DE FORMA SEGURA



# ESTADO DEL ARTE



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID



Facultad de Ciencias  
MATEMÁTICAS

# ESTADO DEL ARTE

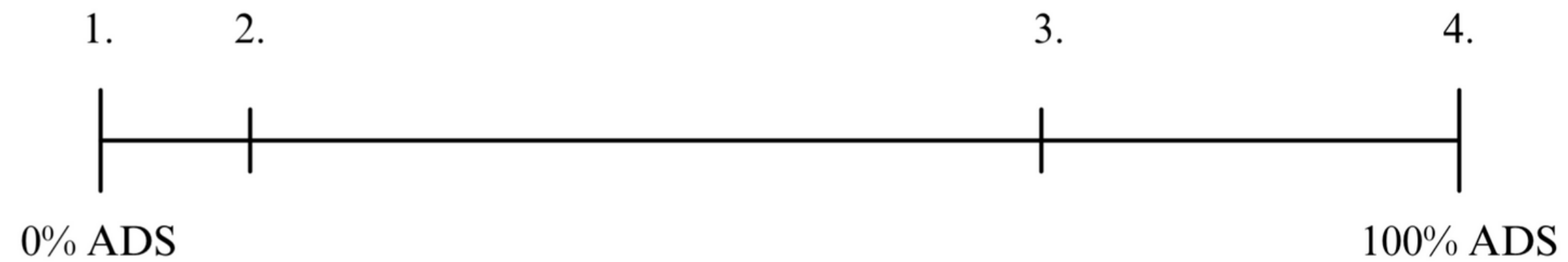


Figura 1: Escala ADS (Bande-Rodríguez (2024))





# ESTADO DEL ARTE

## ESCENARIOS TOTALMENTE AUTÓNOMOS

comunicación V2V (vehículo a vehículo)

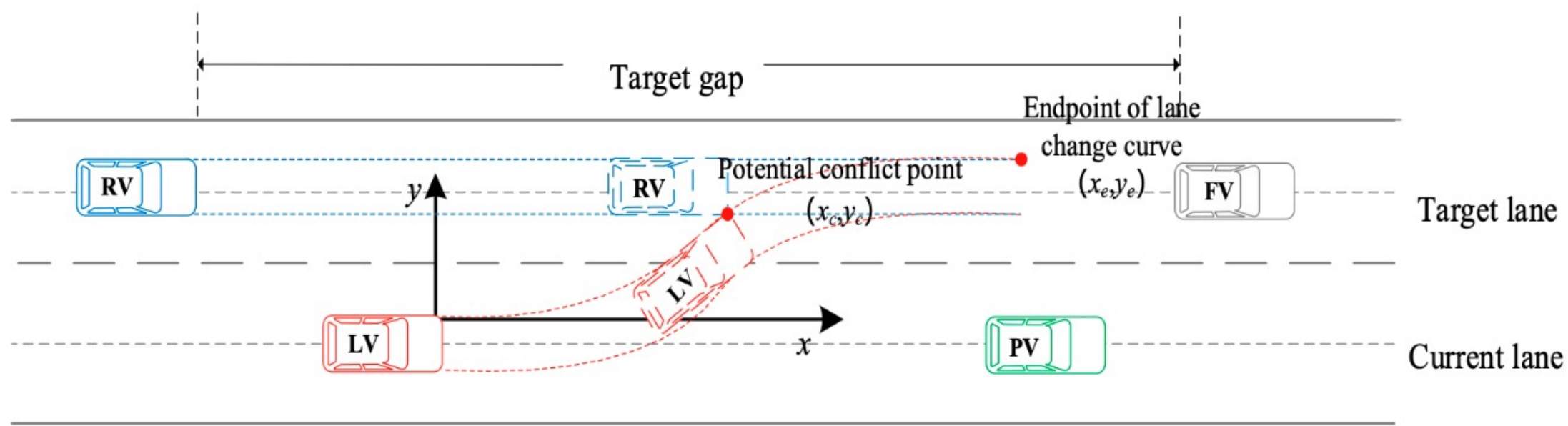


Figura 2: Punto de conflicto en cambio de carril  
(Zhu *et al.* , 2023)

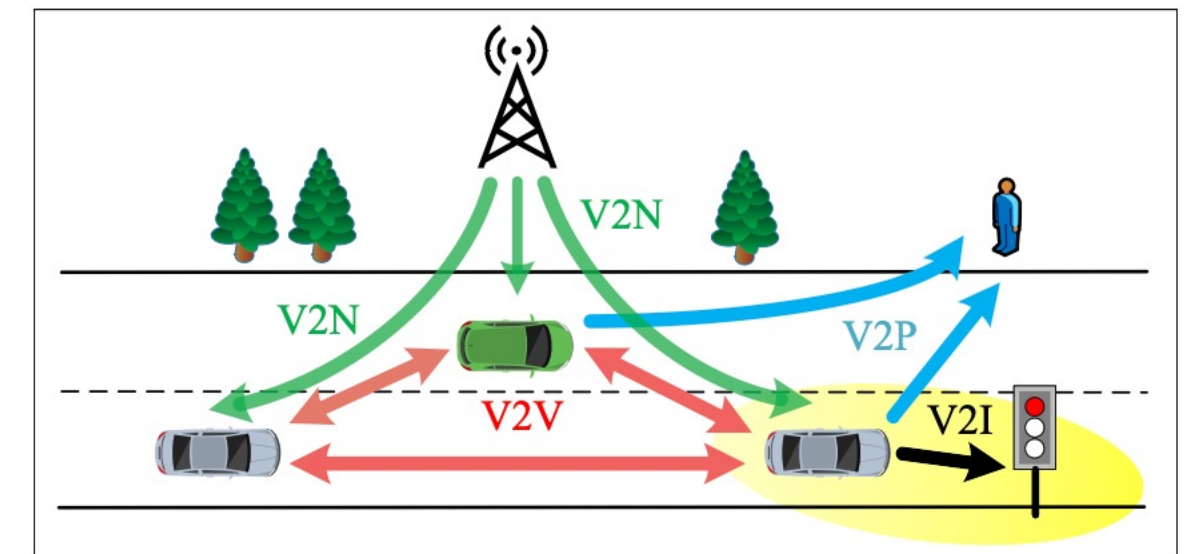


Figura 3: Comunicación V2V  
(He *et al.* , 2024)

# ESTADO DEL ARTE

## ESCENARIOS DE TRÁFICO MIXTO

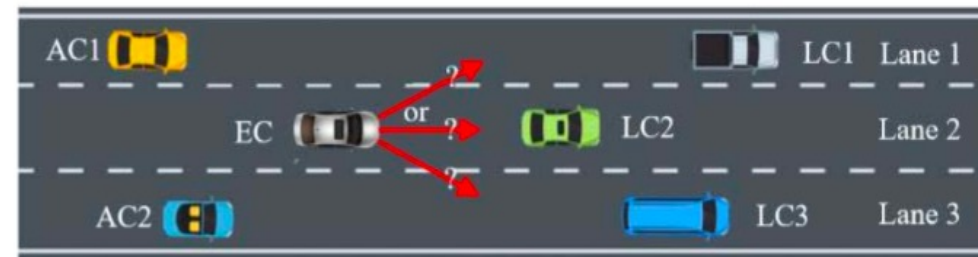


Figura 4: Cambio de carril  
(Hang *et al.* , 2020)

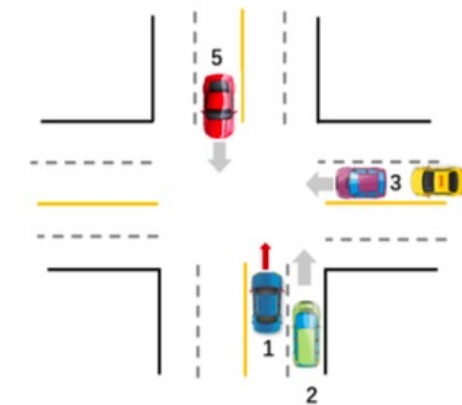


Figura 5: All way stop  
(Liu *et al.* , 2023)

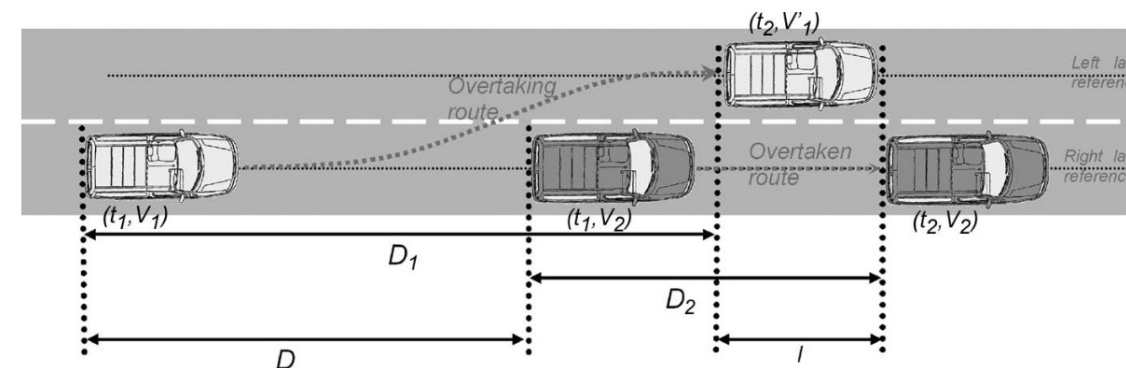


Figura 6: Cambio de carril  
(Naranjo *et al.* , 2008)

# 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](https://github.com/miguelbande)



UNIVERSIDAD  
COMPLUTENSE  
MADRID



Facultad de Ciencias  
MATEMÁTICAS

# DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

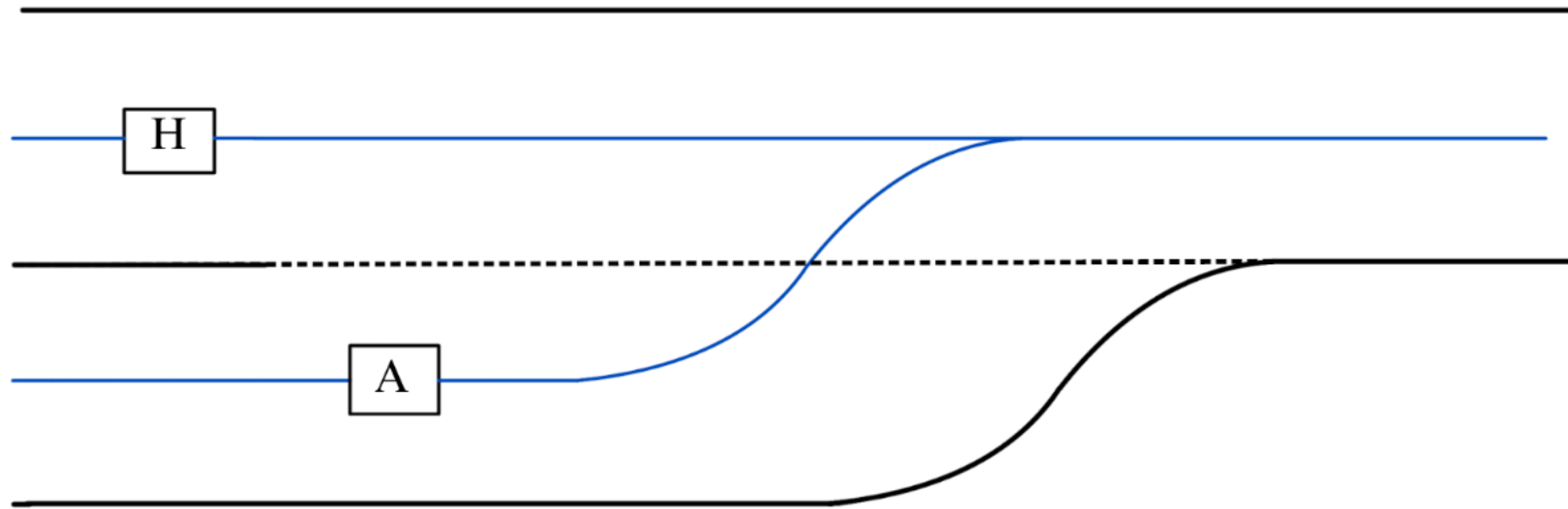


Figura 7: Escena de tráfico: incorporación a una vía principal (Bande-Rodríguez (2024))

# DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## ECUACIONES MRUA

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

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

$$v_{\text{máx}} \quad v_{\text{mín}} = \frac{v_{\text{máx}}}{2}$$

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

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

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



# DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## Variables difusas

Velocidad relativa

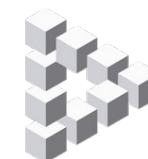
$$v_{rel}(t) = v_H(t) - v_{ADS}(t)$$

Distancia de seguridad

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

Decisión acción

$$a_{ADS}(t)$$



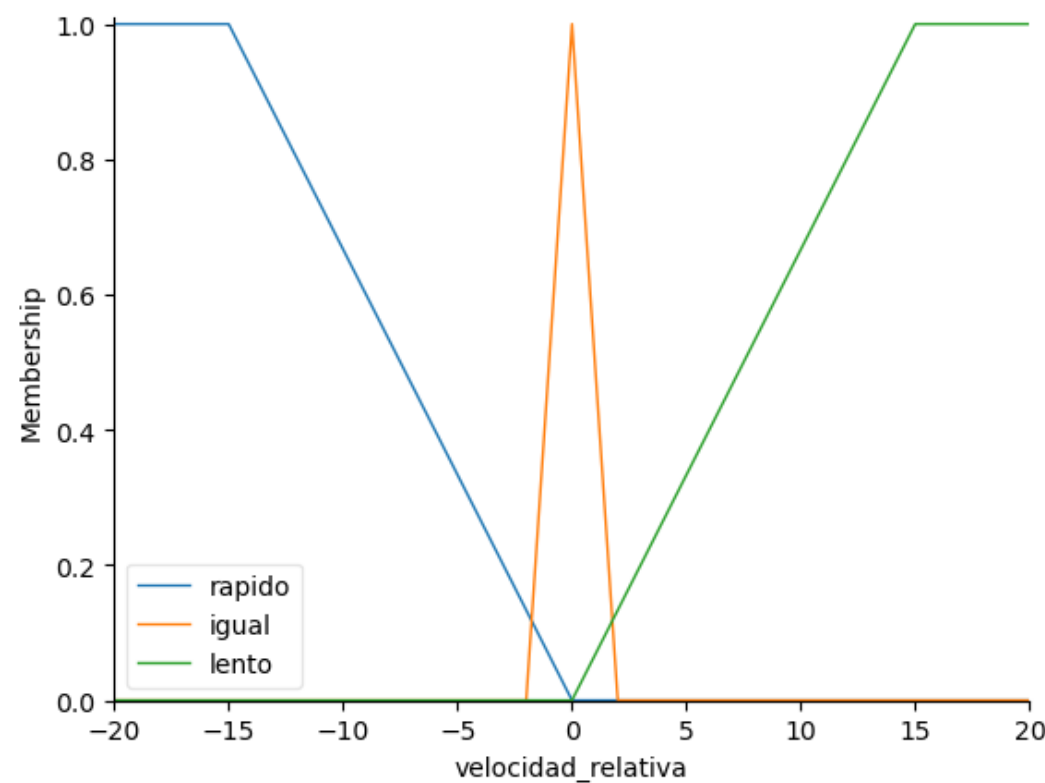


# DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## Variables difusas

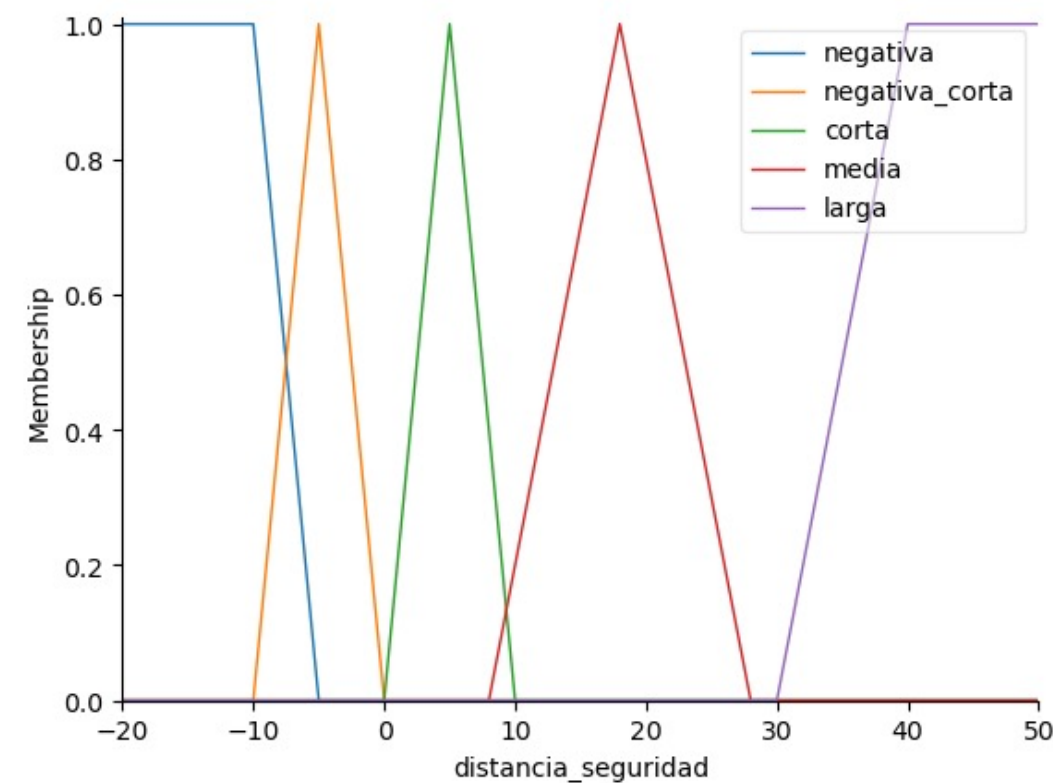
Velocidad relativa

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



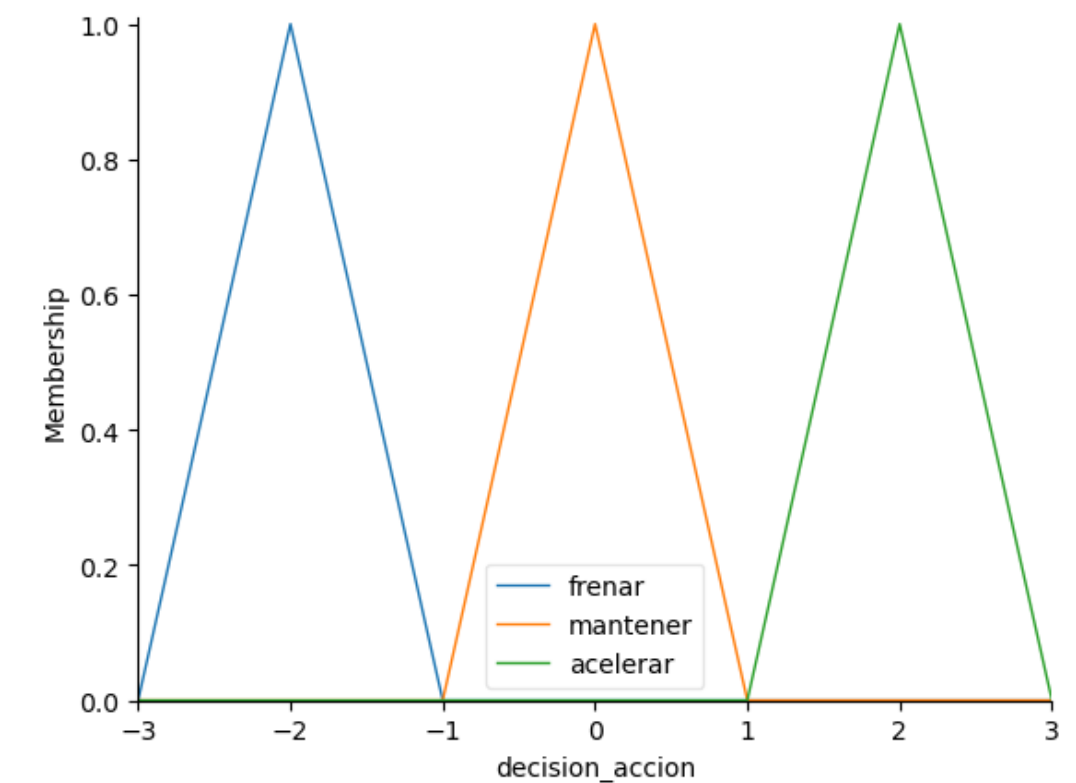
Distancia de seguridad

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



Decisión acción

$$a_{ADS}(t)$$



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

# DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## **Reglas difusas**



# 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
<b>R3</b>	<b>lenta</b>	<b>Corta</b>	<b>Frenar</b>	<b>El otro va más rápido y estás cerca → frenar</b>
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	Rebase reciente, misma velocidad → acelerar
	igual	Corta	Acelerar	Cerca pero misma velocidad → acelerar
	igual	Media	Mantener	Igual velocidad y distancia media → mantener
	igual	Larga	Mantener	Situación ideal → mantener
	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

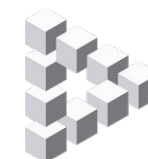
# DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## 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
<b>R13</b>	<b>rápida</b>	<b>Corta</b>	<b>Frenar</b>	<b>Lo estás alcanzando rápido estando muy cerca → frenar</b>
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**



# 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.

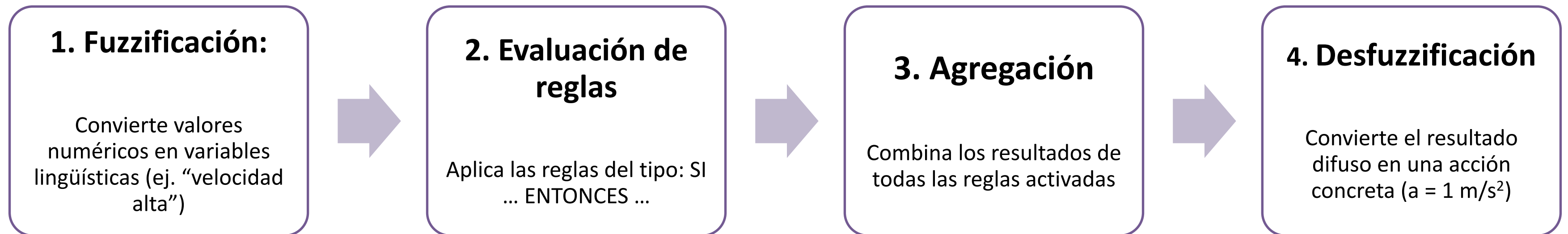




# DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

## 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

$x_{A_0}$	$v_{A_0}$	$x_{H_0}$	$v_{H_0}$	$v_{\min}$	$v_{\max}$	$x_{fin}$
15	20	0	24	12,5	25	200

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

$x_{A_0}$	$v_{A_0}$	$x_{H_0}$	$v_{H_0}$	$v_{\min}$	$v_{\max}$	$x_{fin}$
15	20	0	24	12,5	25	120

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

# EJEMPLO 1

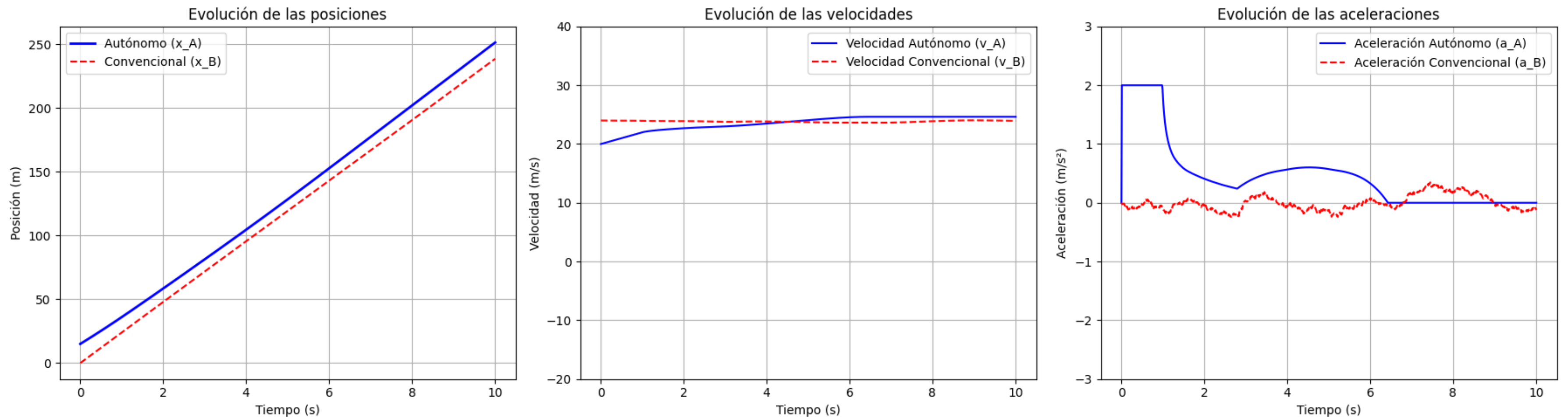
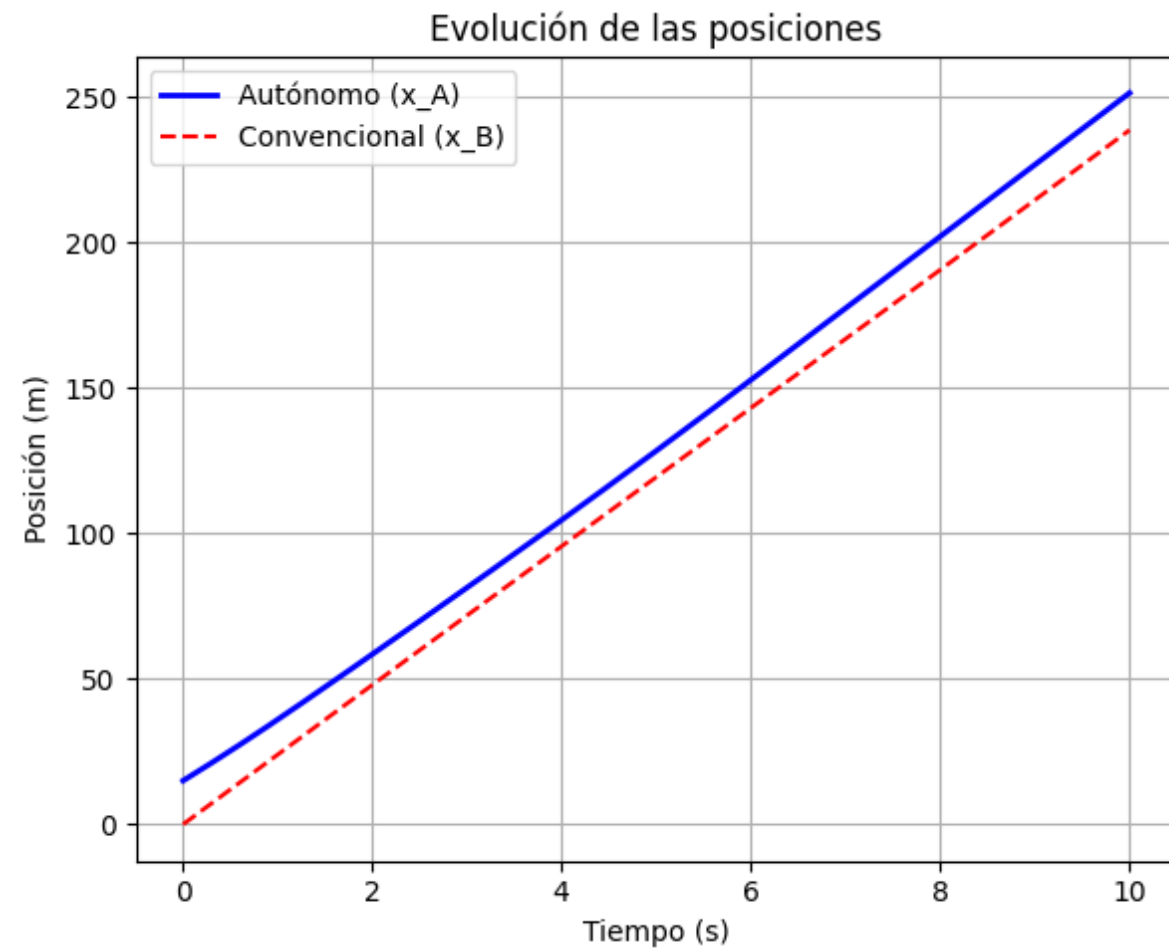
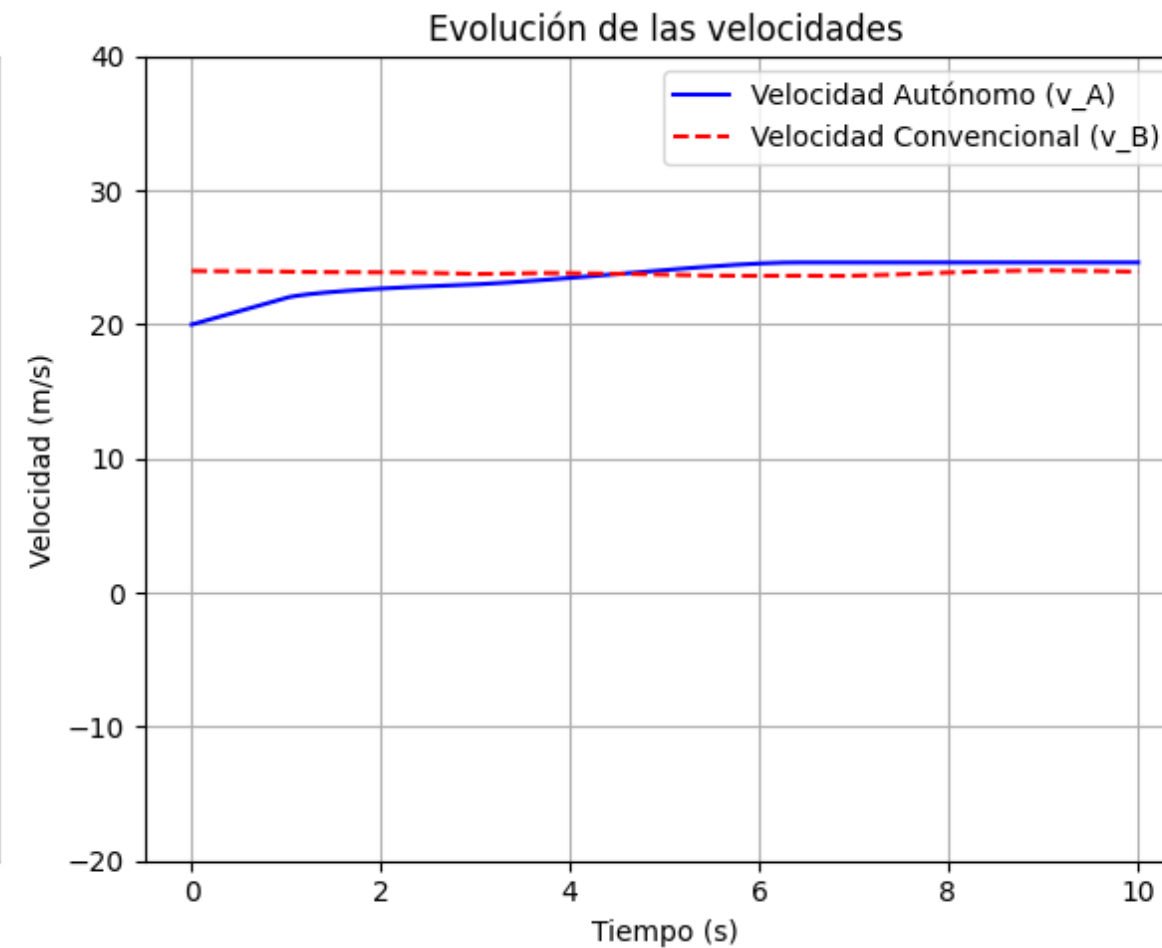


Figura 11: Posiciones, velocidades y aceleraciones del ejemplo 1

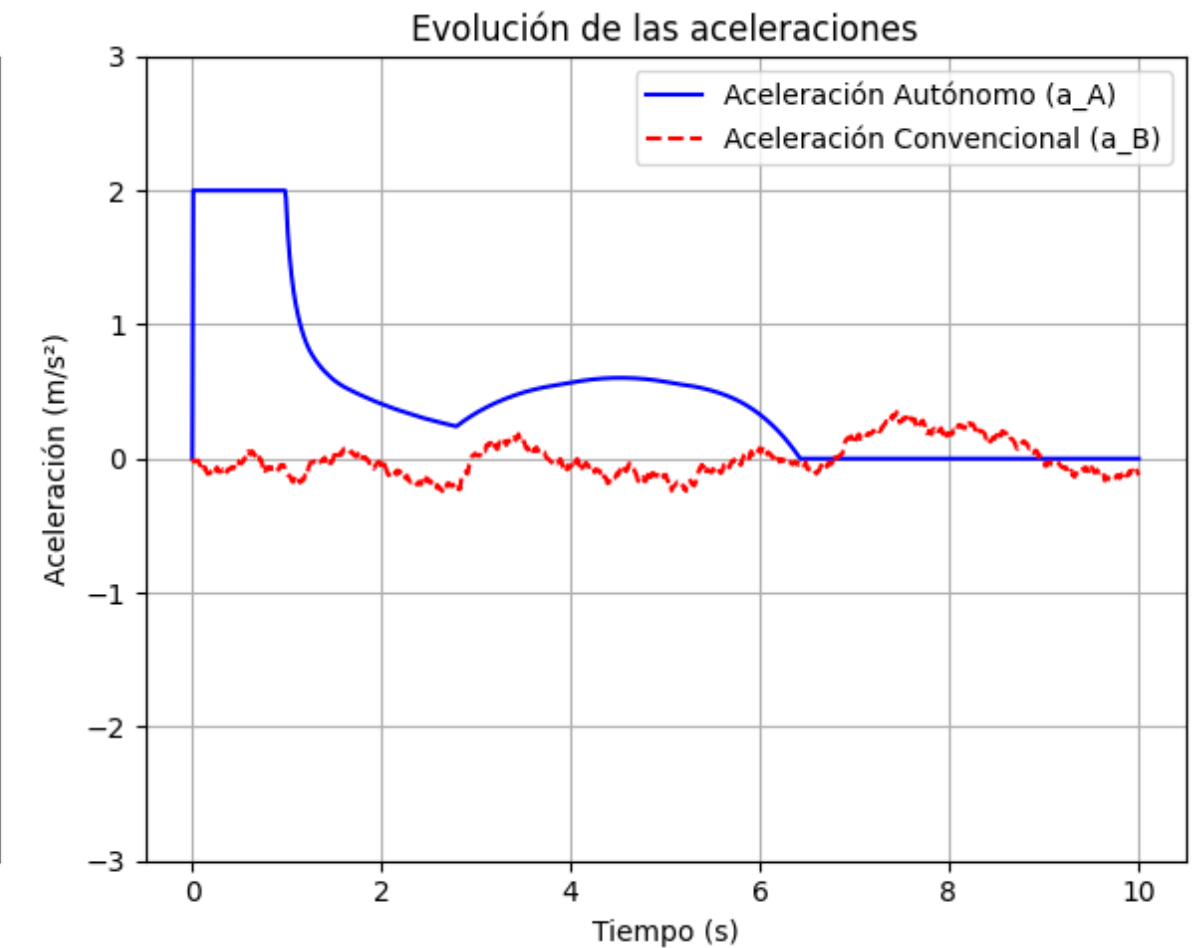
# EJEMPLO 1



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

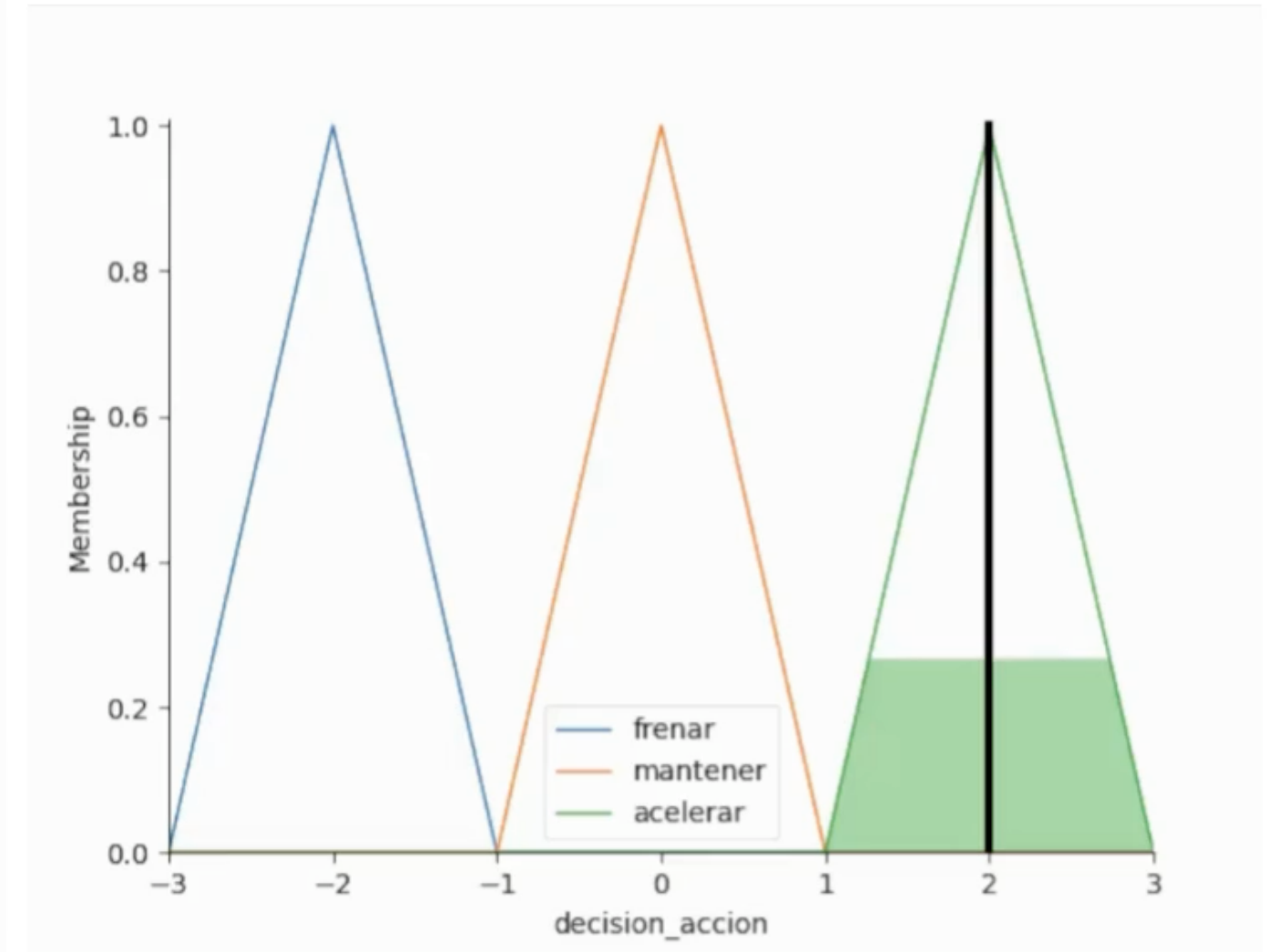
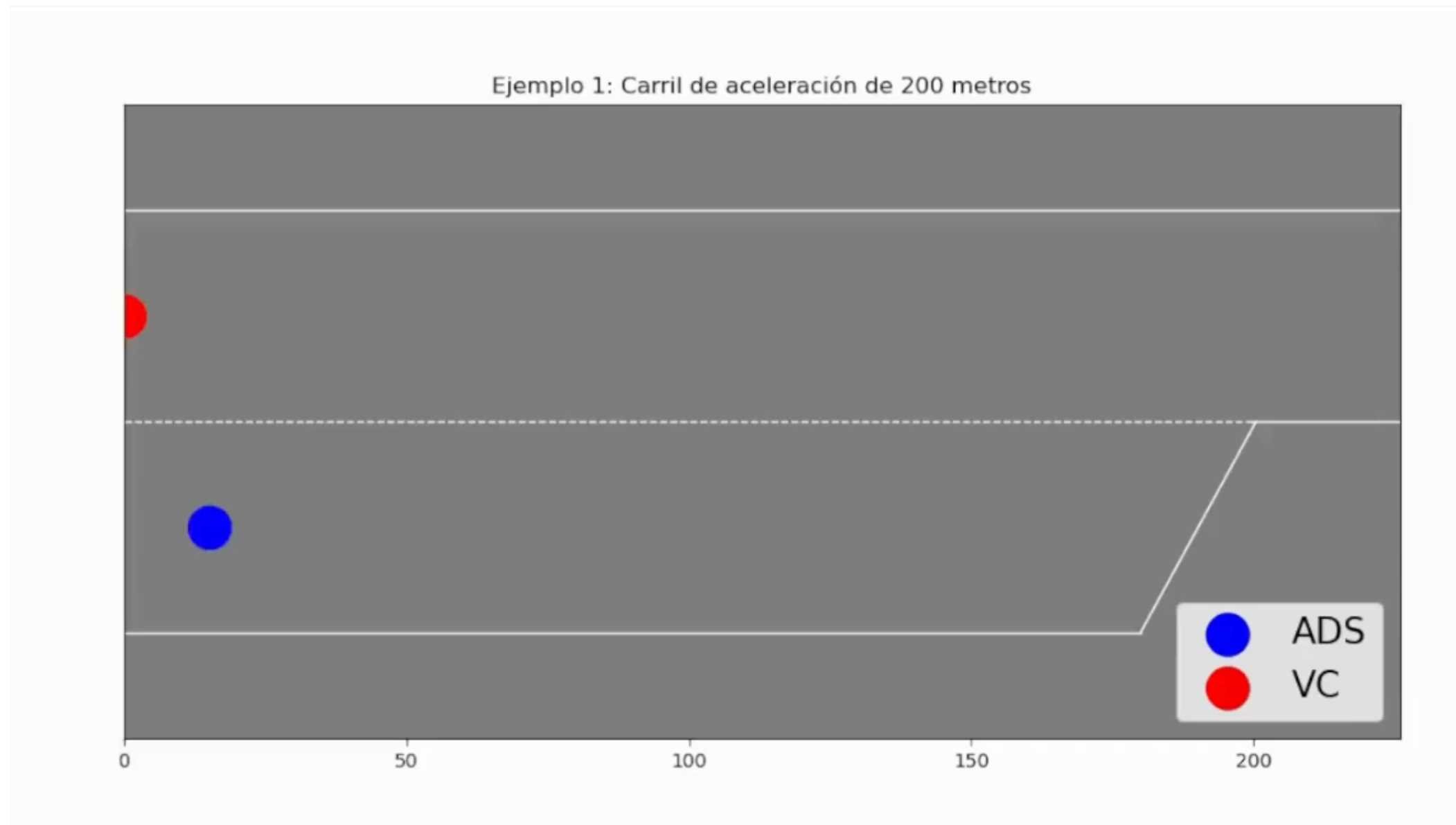


La velocidad del ADS se adecúa a la velocidad de la vía



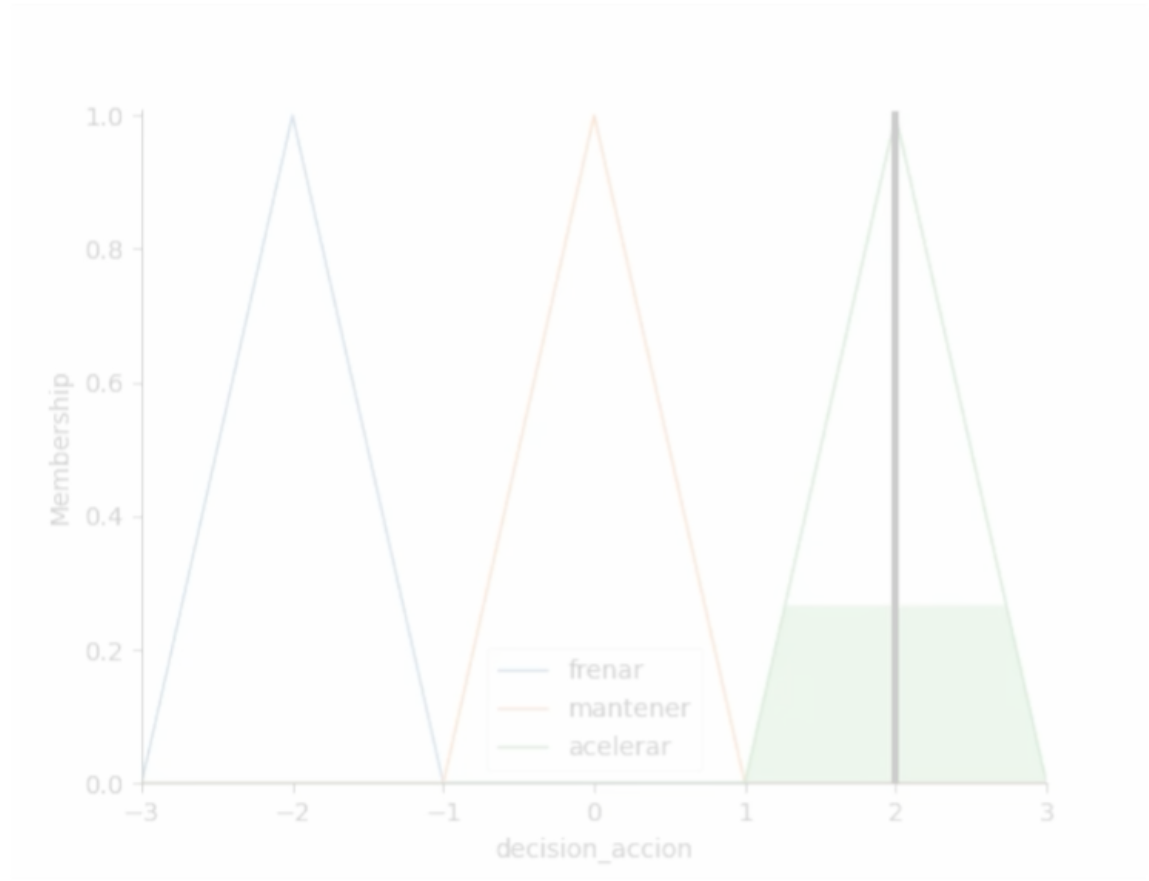
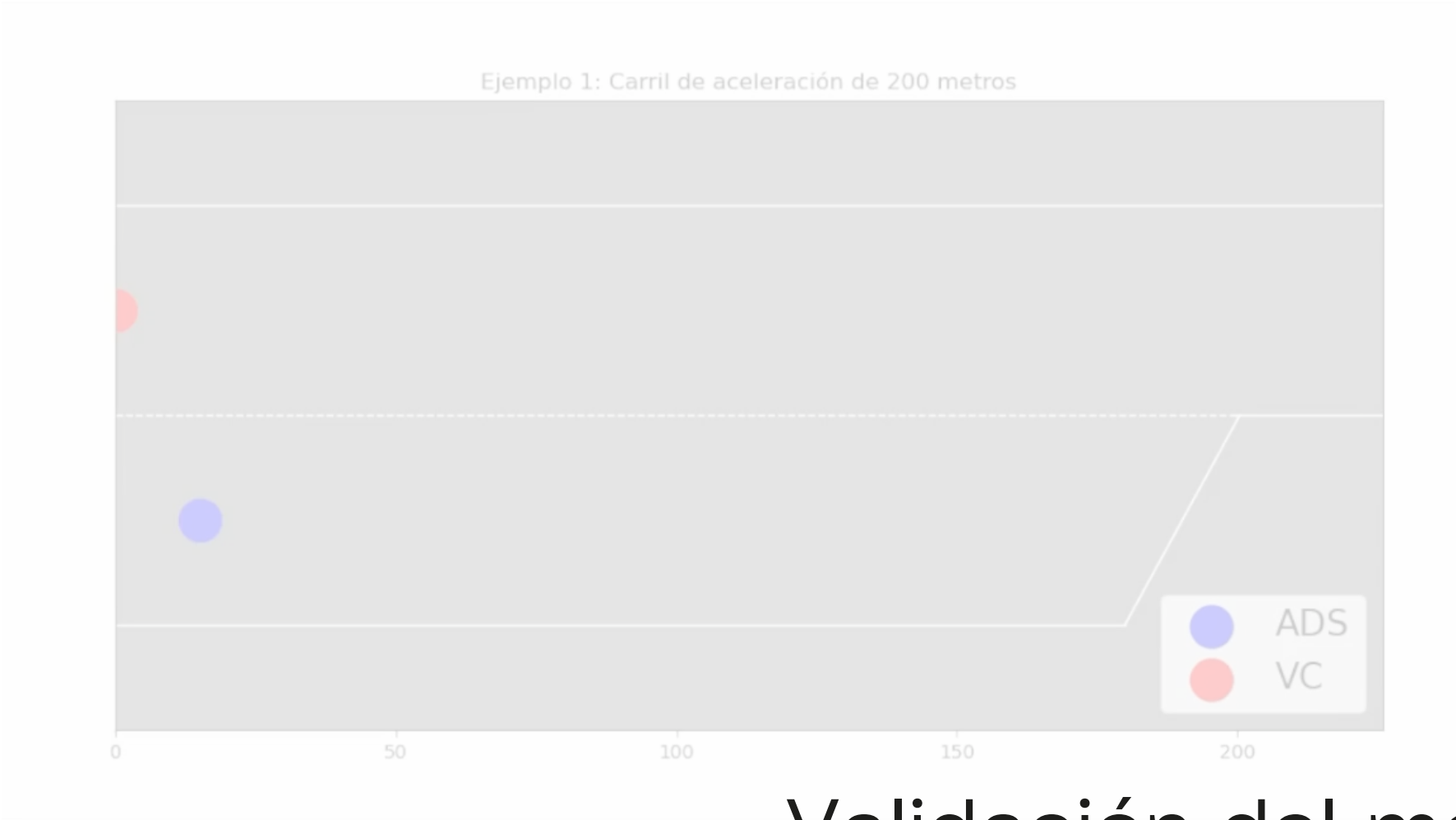
La aceleración del ADS se adecúa a las necesidades del vehículo

# EJEMPLO 1 – CARRIL 200 m





# EJEMPLO 1 – CARRIL 200 m

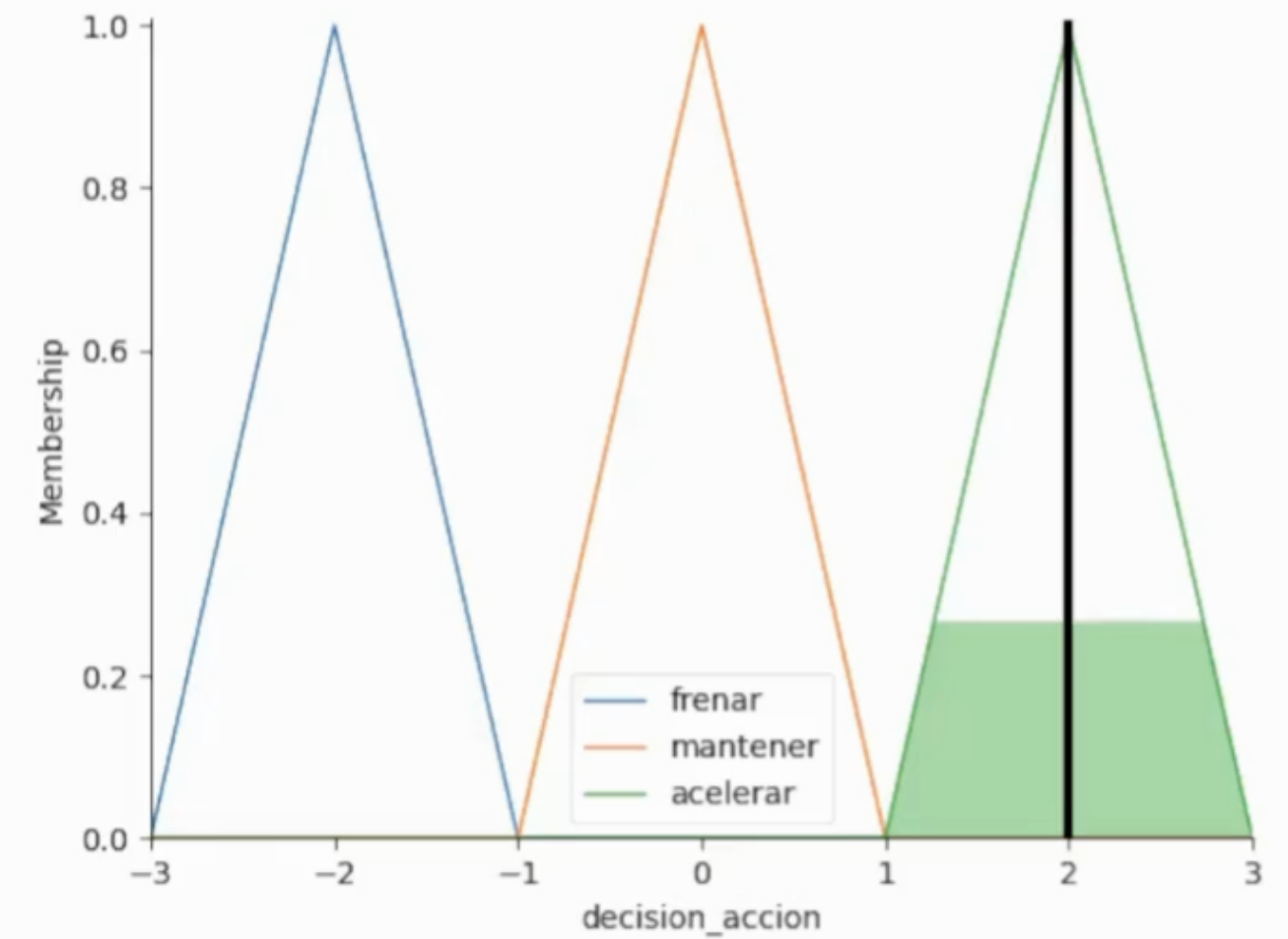
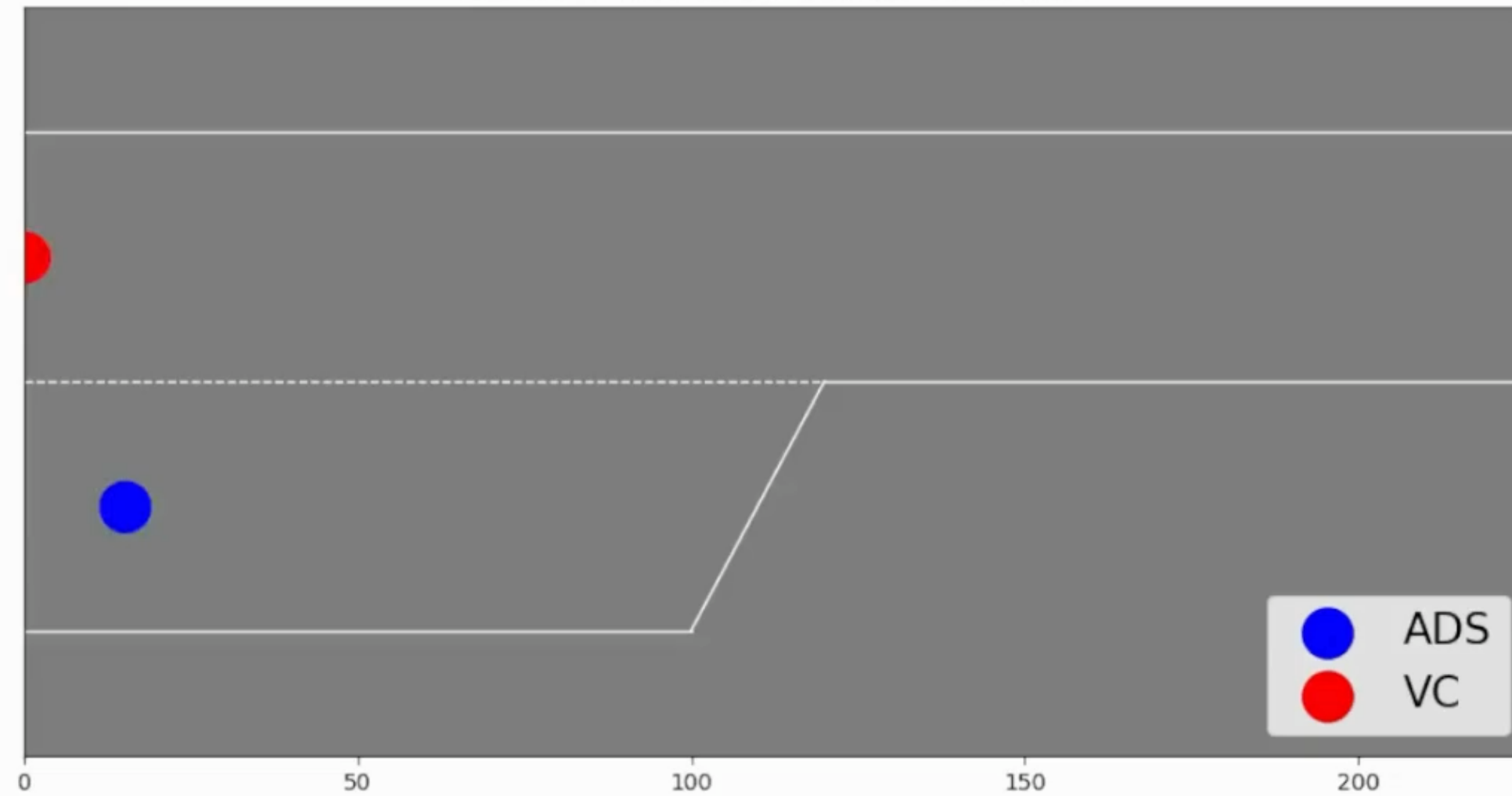


## Validación del modelo

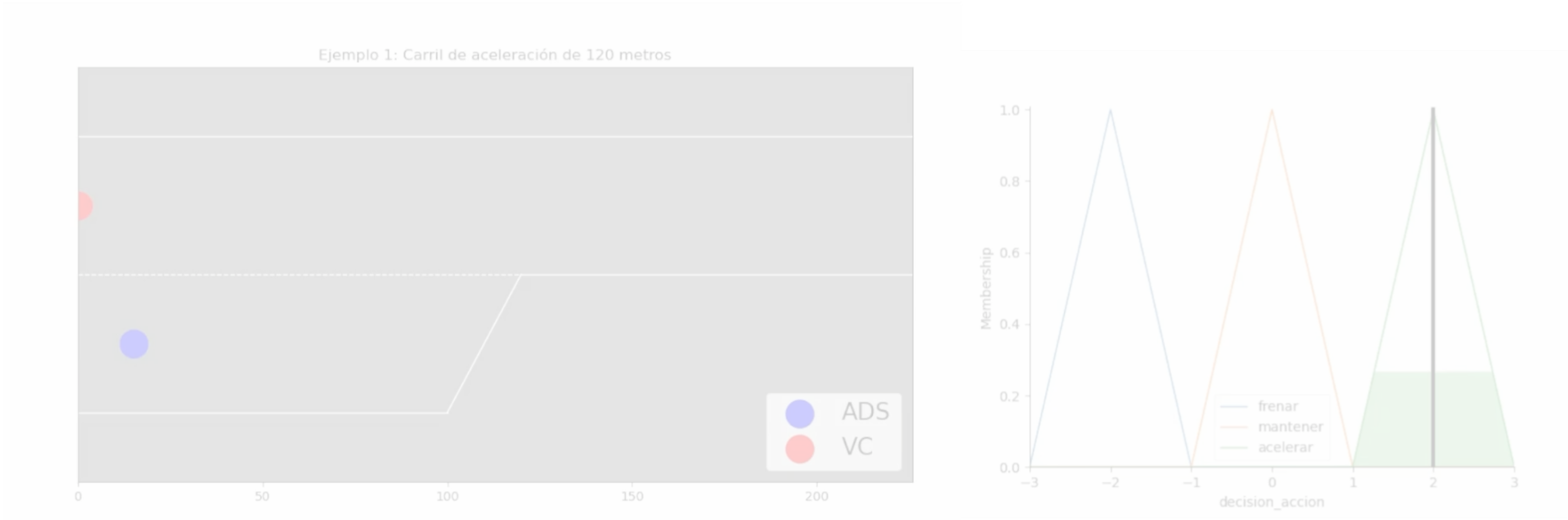
	Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_maniobra	dist_coches	bool	Tiempo para la maniobra	Velocidad ADS final maniobra
0	1.0	15.0	20.0	0.0	0.0	24.0	0.0	0.0	15.0	1.0	7.96	23.423282

## EJEMPLO 2 – CARRIL 120 m

Ejemplo 1: Carril de aceleración de 120 metros



# EJEMPLO 2 – CARRIL 120 m



## Validación del modelo

	Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_manioobra	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

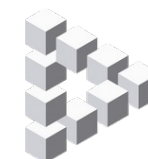
## EJEMPLOS 3 Y 4

$x_{A_0}$	$v_{A_0}$	$x_{H_0}$	$v_{H_0}$	$a_{H_0}$	$v_{\min}$	$v_{\max}$
15	20	5	24	3	12,5	25

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

$x_{A_0}$	$v_{A_0}$	$x_{H_0}$	$v_{H_0}$	$a_{H_0}$	$v_{\min}$	$v_{\max}$
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

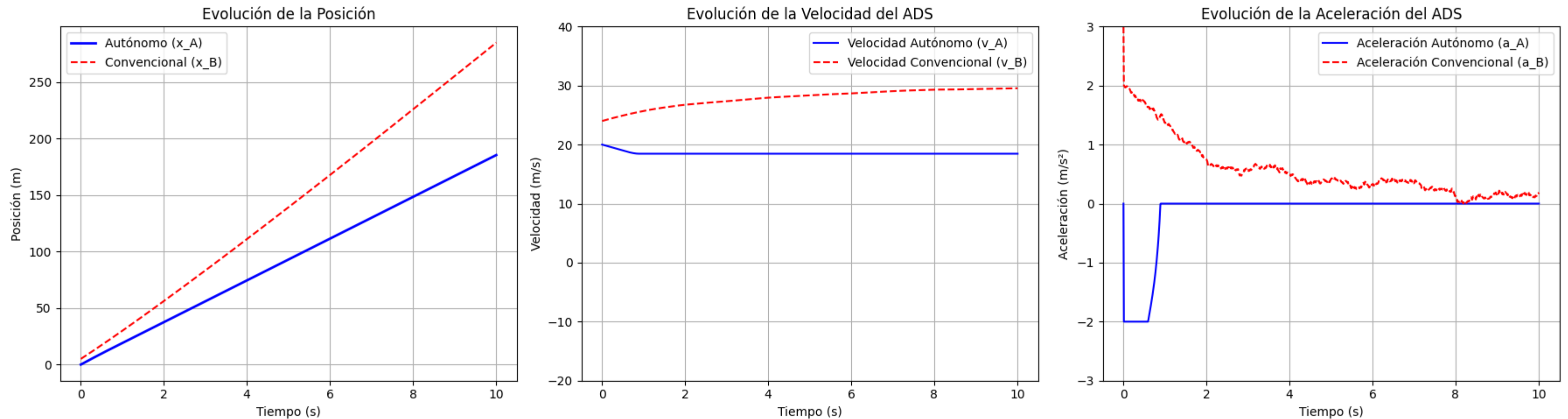


Figura 12: Posiciones, velocidades y aceleraciones del ejemplo 3

# EJEMPLO 3

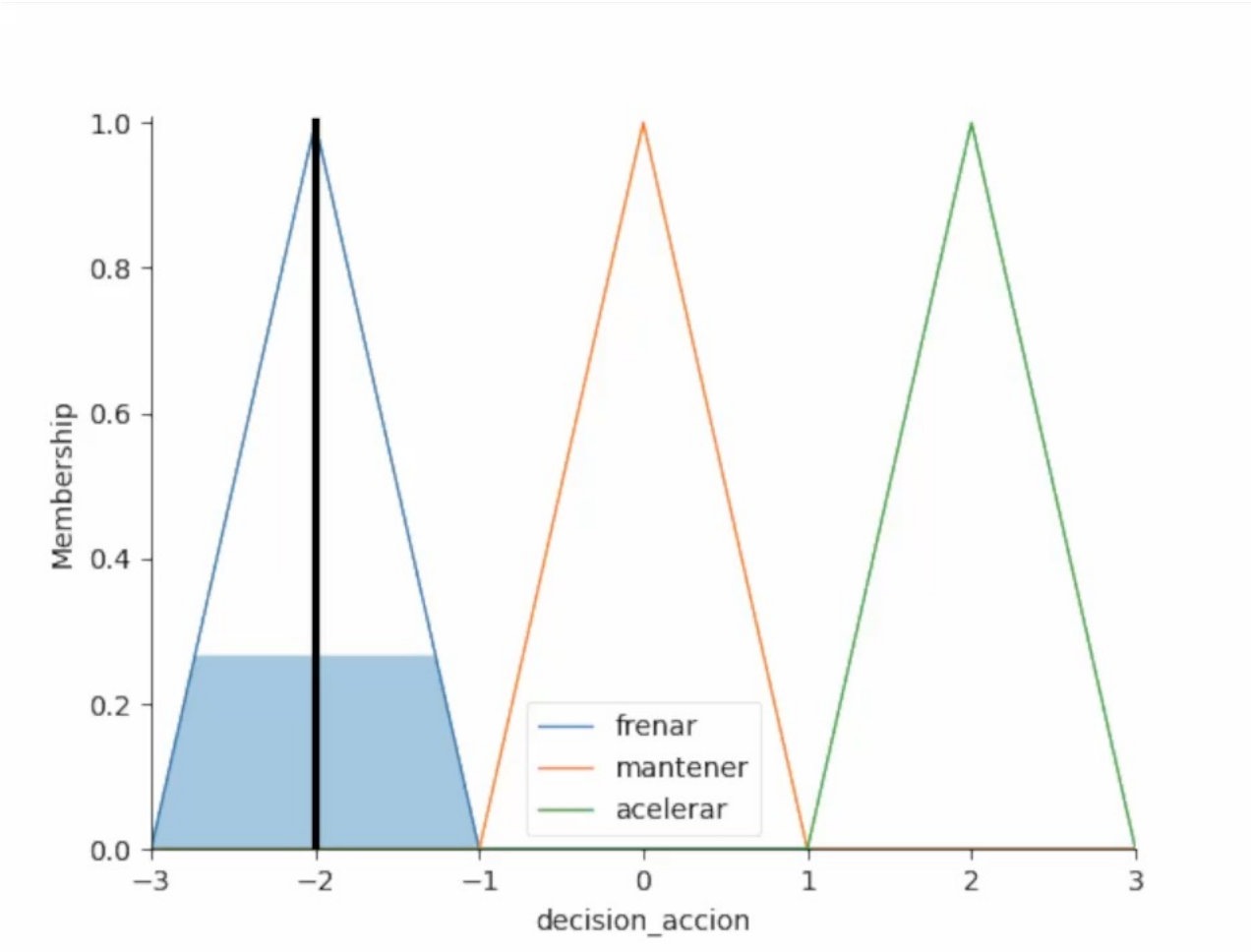
El vehículo tripulado pega un acelerón

## 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

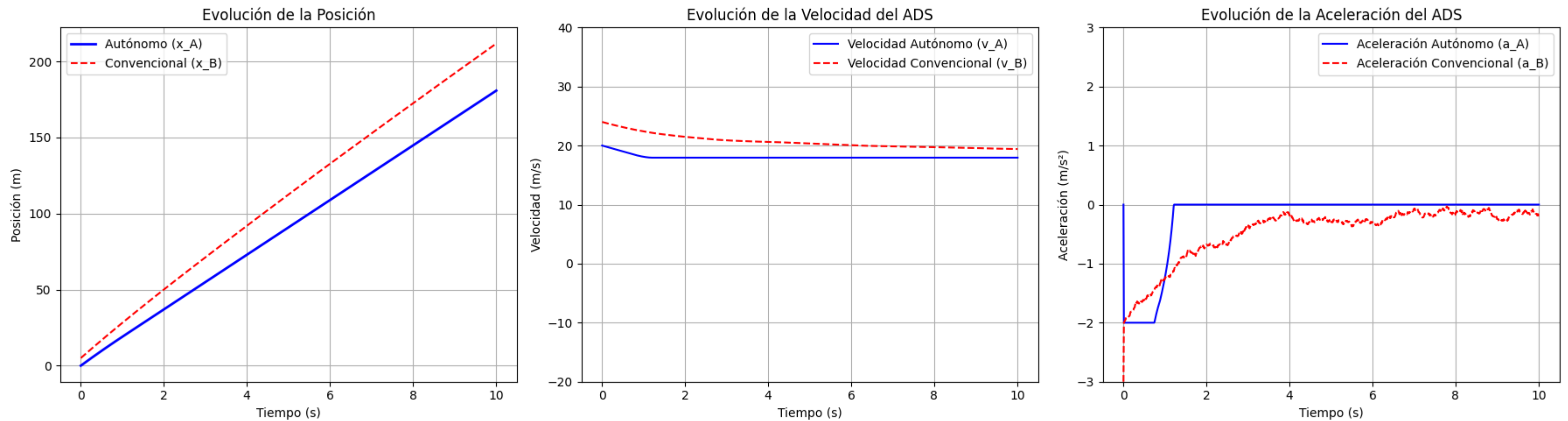


Figura 12: Posiciones, velocidades y aceleraciones del ejemplo 4



# EJEMPLO 4

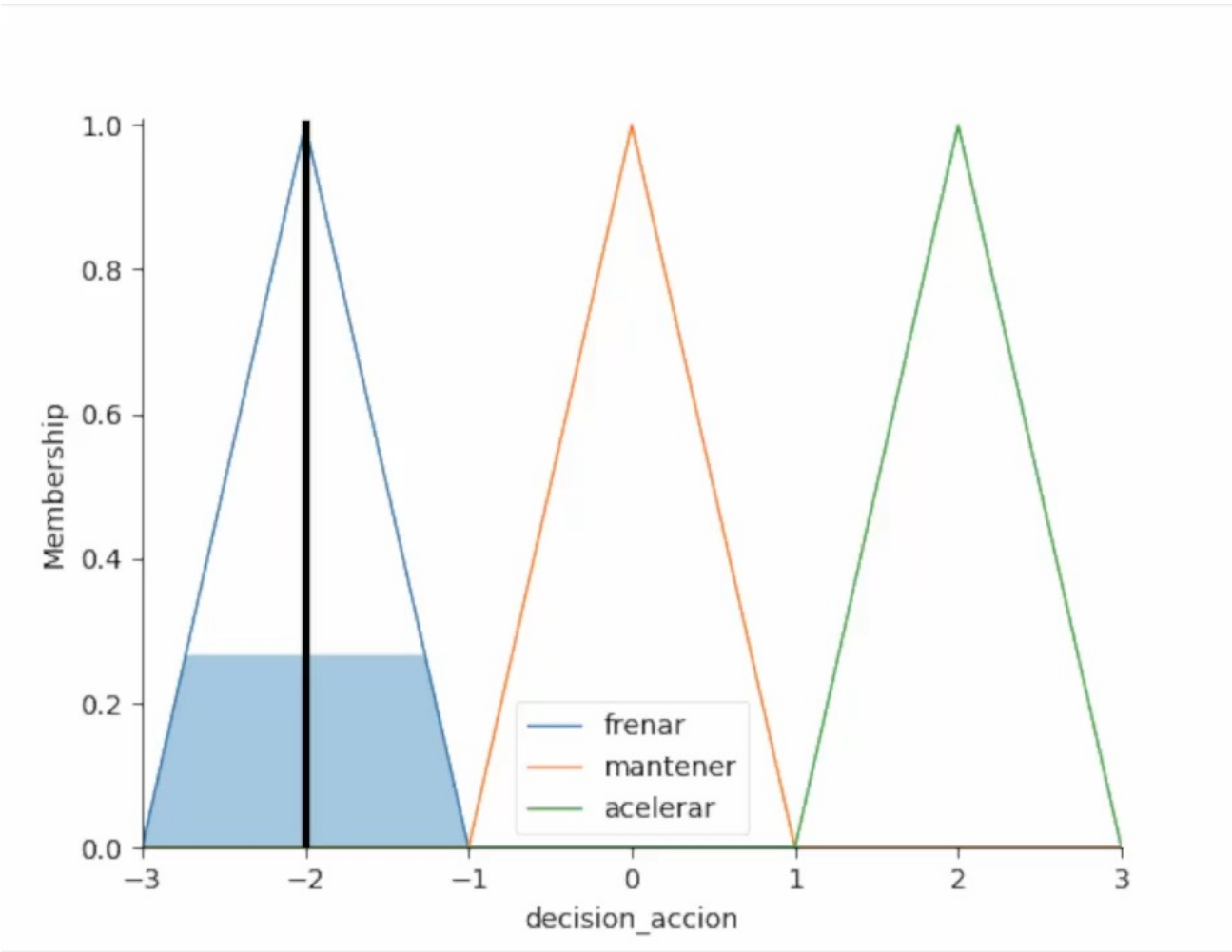
El vehículo tripulado pega un frenazo

Validación en un carril de 200 metros

	Maniobra	x_a	v_a	a_a	x_h	v_h	a_h	t_inicio_manio	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_manio	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

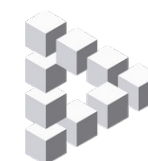
RESULTADOS RAZONABLES CON UN  
PROBLEMA SIMPLIFICADO



# PROPUESTA DE CONTINUIDAD



UNIVERSIDAD  
**COMPLUTENSE**  
MADRID



Facultad de Ciencias  
**MATEMÁTICAS**

# PROPUESTA DE CONTINUIDAD

PROFUNDIZAR EN EL DISEÑO FÍSICO DEL  
MODELO



# 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