

Diseño de un control de estabilidad para un automóvil Kyburz eRod

Autor: Pablo Ferraz Martínez

Tutores:

Miguel Ángel Naya Villaverde

Antonio Joaquín Rodríguez González

Trabajo Fin de Grado – Ingeniería Mecánica

12 de julio de 2024

1. Introducción

- Seguridad vial
- ADAS
- Estructura del control
- Objetivos del trabajo
- Vehículo real

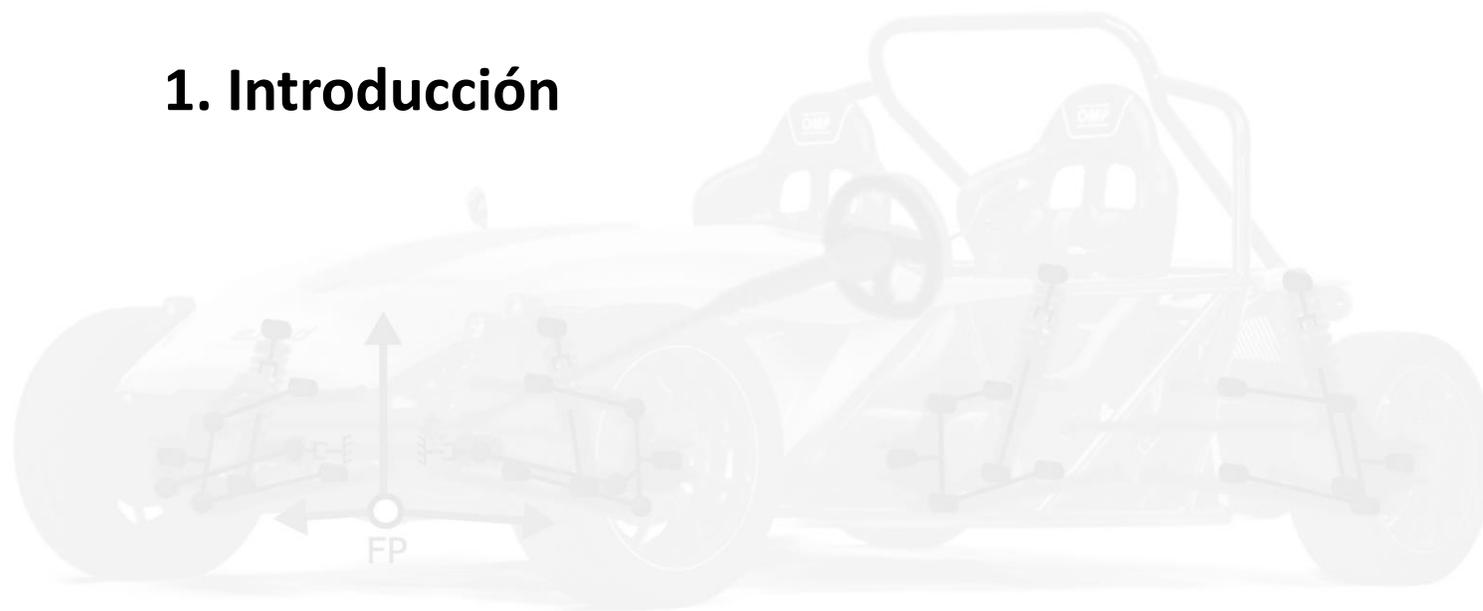
2. Análisis de soluciones

- Modelos de vehículo
- Modelos de neumático
- Control
- Filtro de Kalman

3. Resultados

4. Conclusiones

1. Introducción

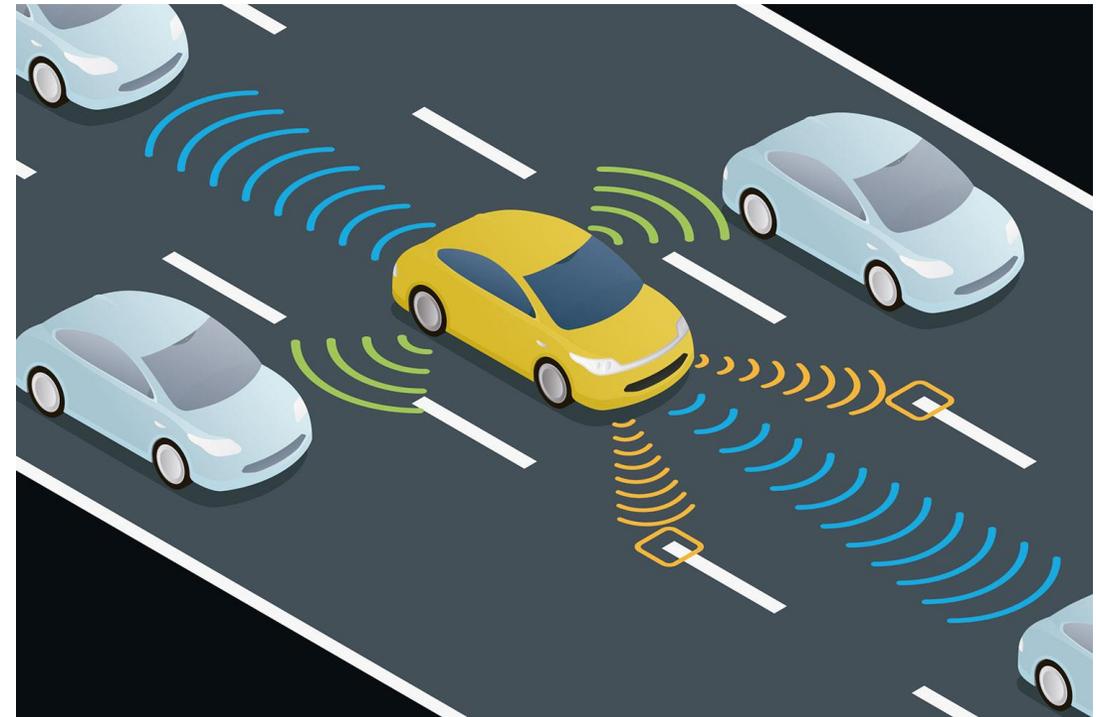


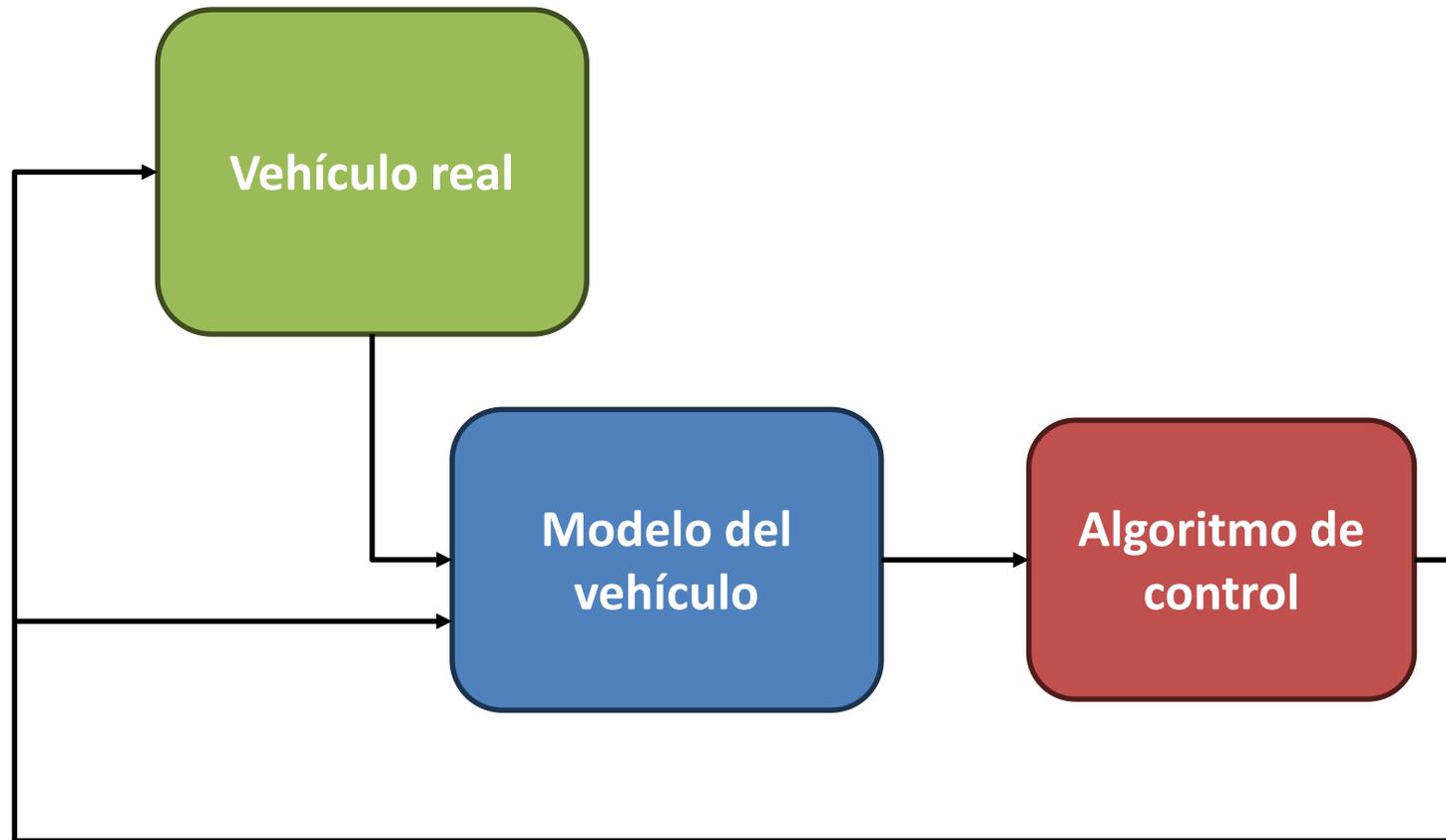
Accidentes de tráfico: una de las principales causas de mortalidad en el rango de edad de 5 a 29

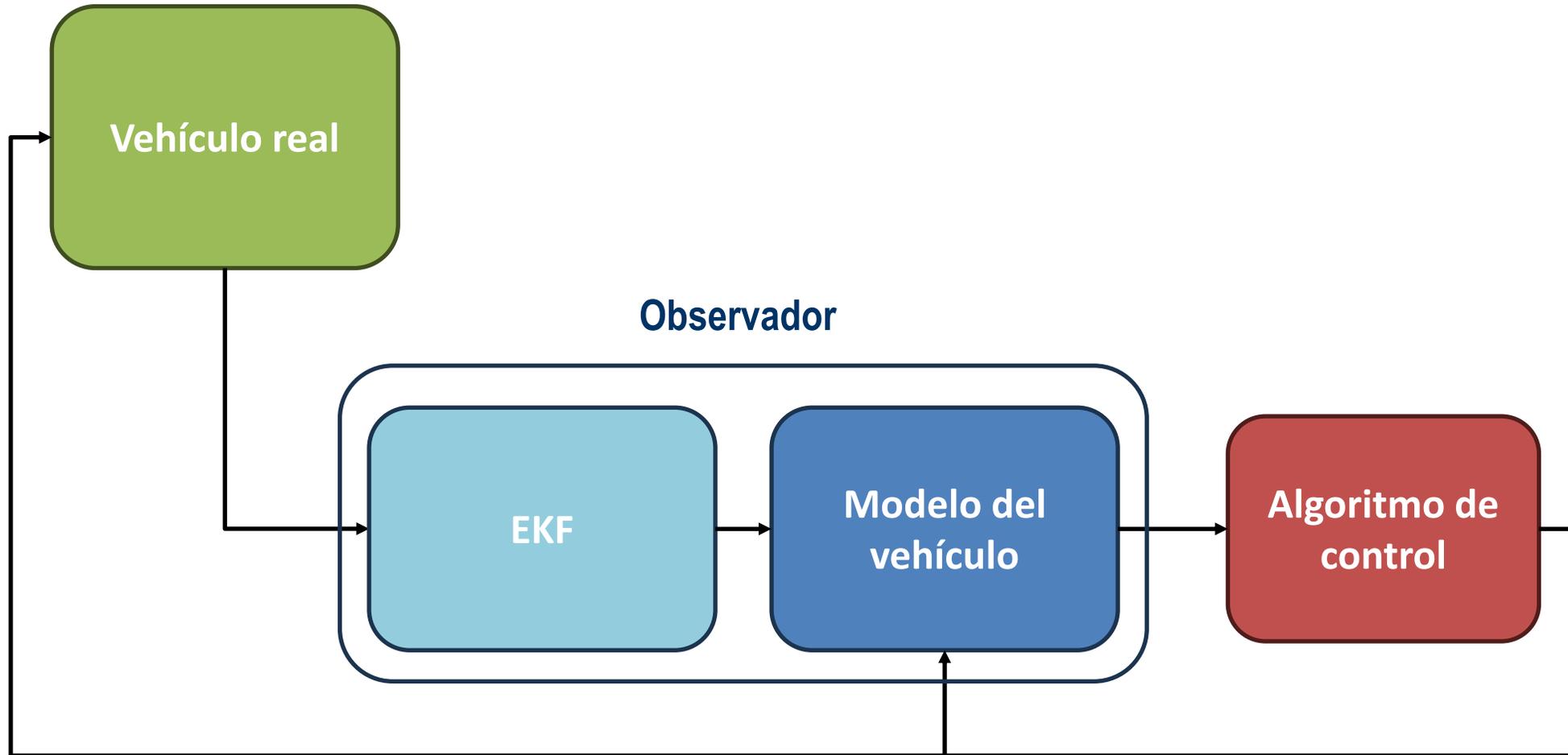


Algunos de los principales ADAS:

- Sistema de Frenado de Emergencia Automático (AEB)
- Asistencia de Mantenimiento de Carril (LKA)
- Monitor de Atención del Conductor (DAW)
- Detección de Puntos Ciegos (BSD)
- Control de Estabilidad Electrónico (ESC)







Objetivos:

- Estudiar distintas alternativas de modelos de vehículo y neumáticos
- Estudiar algoritmos de control
- Creación de los observadores a partir de los modelos
- Evaluar la efectividad y diferencias de las soluciones propuestas
- Estudiar la influencia de los distintos observadores en los resultados

1.4 Vehículo real



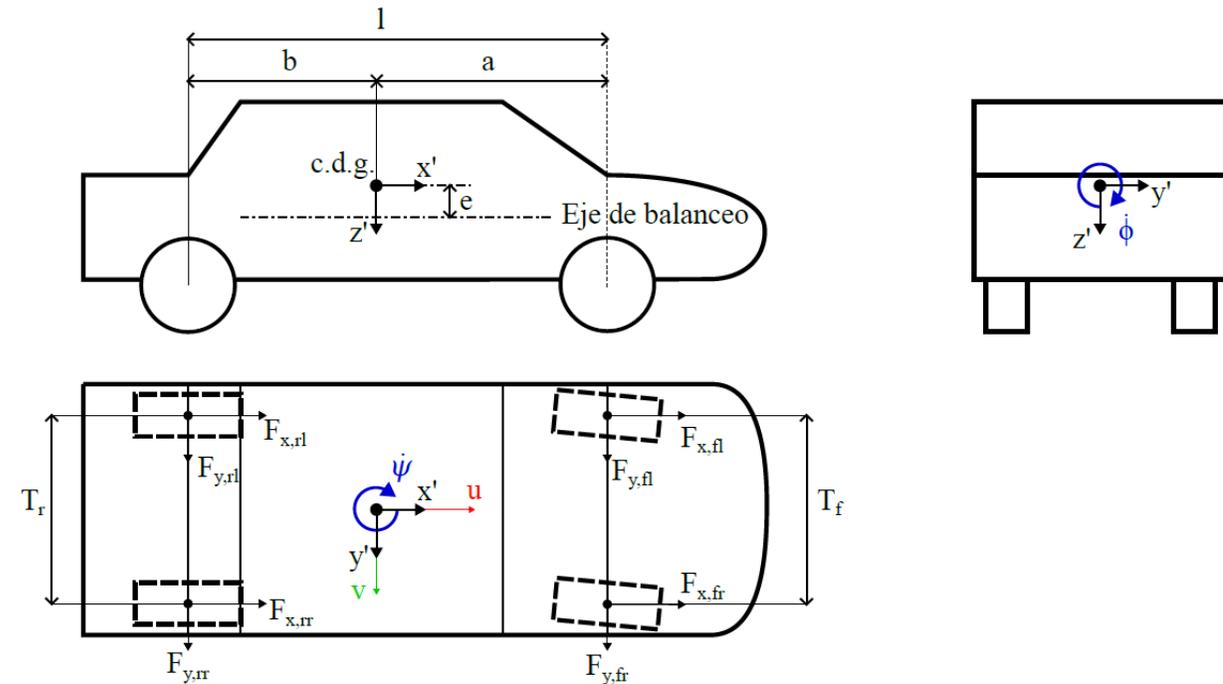


2. Análisis de soluciones



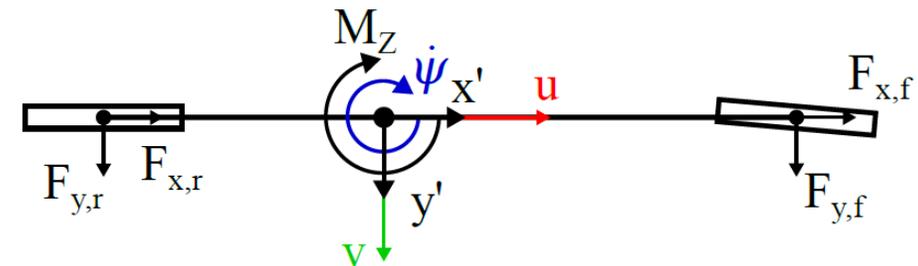
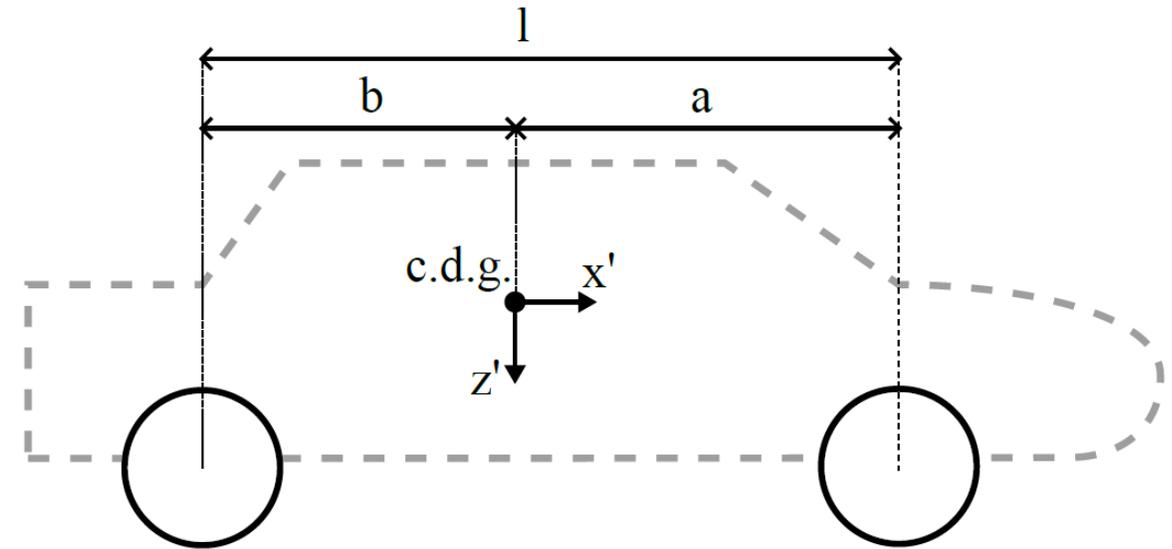
Modelo de 8 grados de libertad

- Desplazamiento en direcciones (x, y)
- Balanceo y guiñada
- Rotación de cada rueda

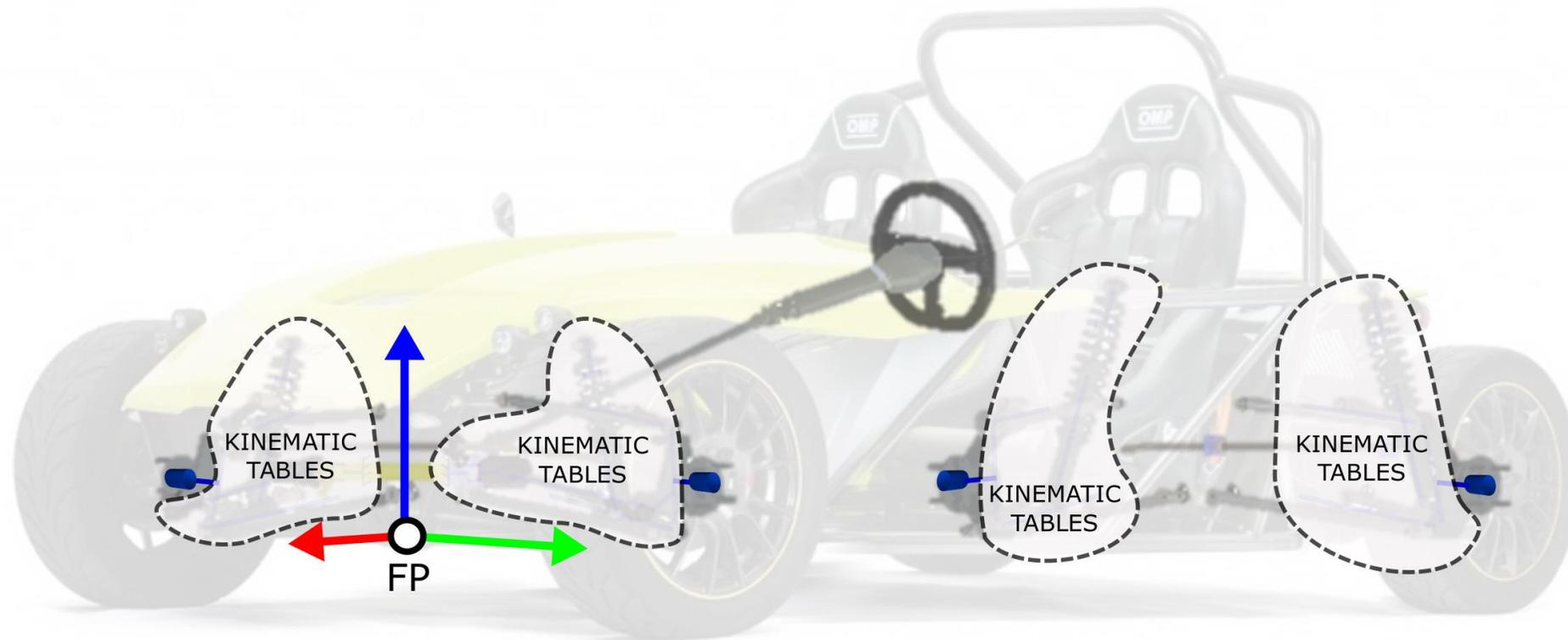


Modelo de 5 grados de libertad (bicicleta)

- Desplazamientos en direcciones (x, y)
- Guiñada
- Rotación de cada eje



Modelo multicuerpo simplificado mediante tablas



Modelos de neumático planteados

Modelo de Dugoff:

- Modelo sencillo
- Fuerzas estáticas

Modelo TMEasy:

- Modelo más complejo
- Deformaciones en los neumáticos
- Fuerzas dinámicas
- Par de autoalineamiento

Modelo de Dugoff

Variables de entrada

- $S_i = \frac{|u_{w,i} - R\omega_i|}{\max(u_{w,i}, R\omega_i)}$
- α_i

Constantes

- C_a
- C_b



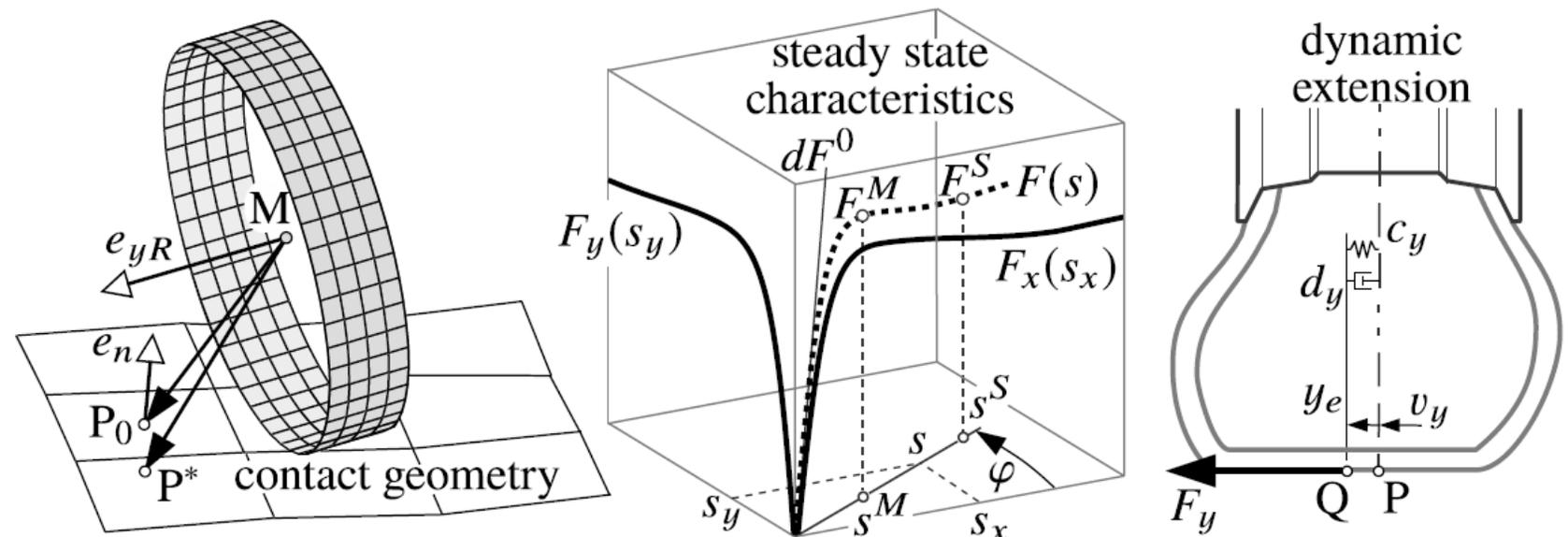
Fuerzas

- F_t
- F_s



TMEasy

- El neumático se deforma
- Rigidez y amortiguamiento



TMEasy

Variables de entrada

- $s_x^N = \frac{-(v_x - R\omega)}{R|\omega|\hat{s}_x + v_\varepsilon}$
- $s_y^N = \frac{-v_y}{R|\omega|\hat{s}_y + v_\varepsilon}$
- x_e
- y_e

$$s = \sqrt{(s_x^N)^2 + (s_y^N)^2}$$

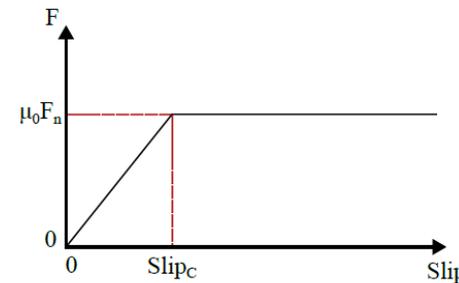
Constantes

- c_x
- c_y
- d_x
- d_y

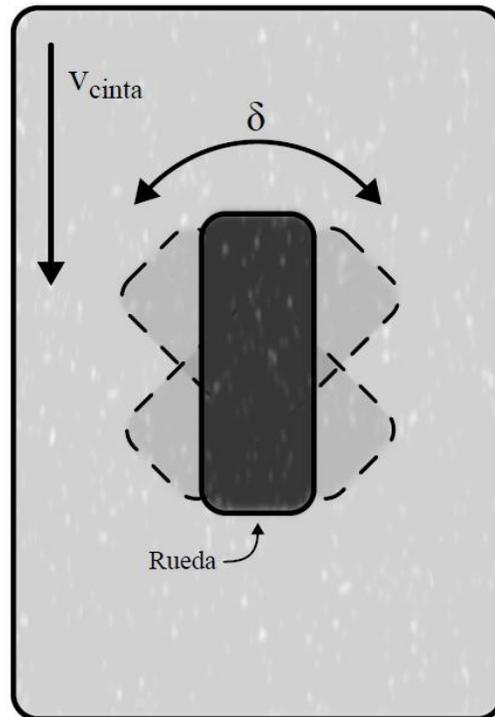


Fuerzas

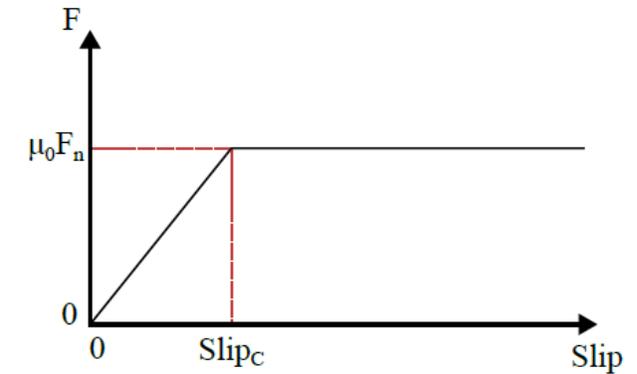
- F_x^D
- F_y^D



Comparación de los modelos



TMEasy:



$$c_x = 300000 \quad d_x = 550$$
$$c_y = 150000 \quad d_y = 150$$

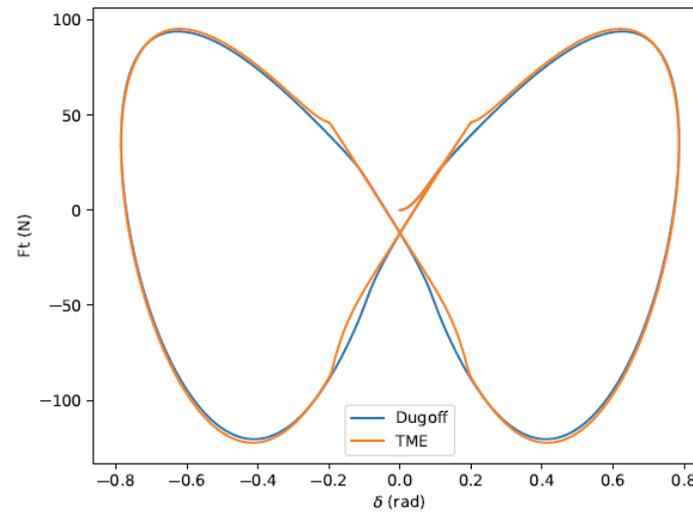
Dugoff:

$$C_a = ?$$
$$C_b = ?$$

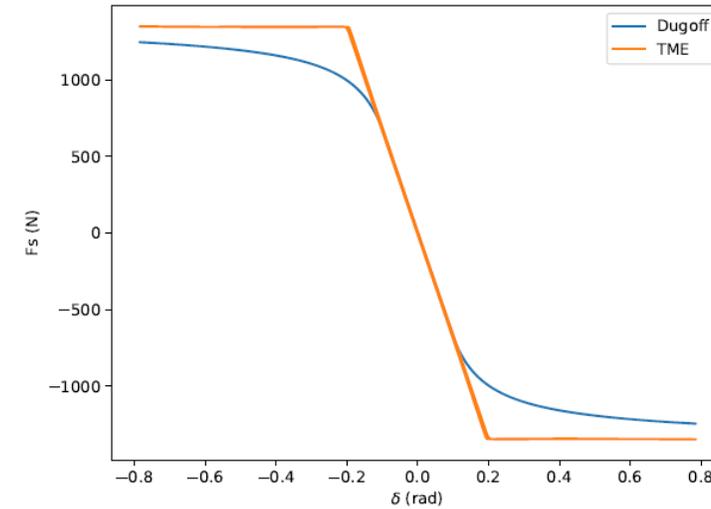
Valores finales

$$C_a = 7000$$

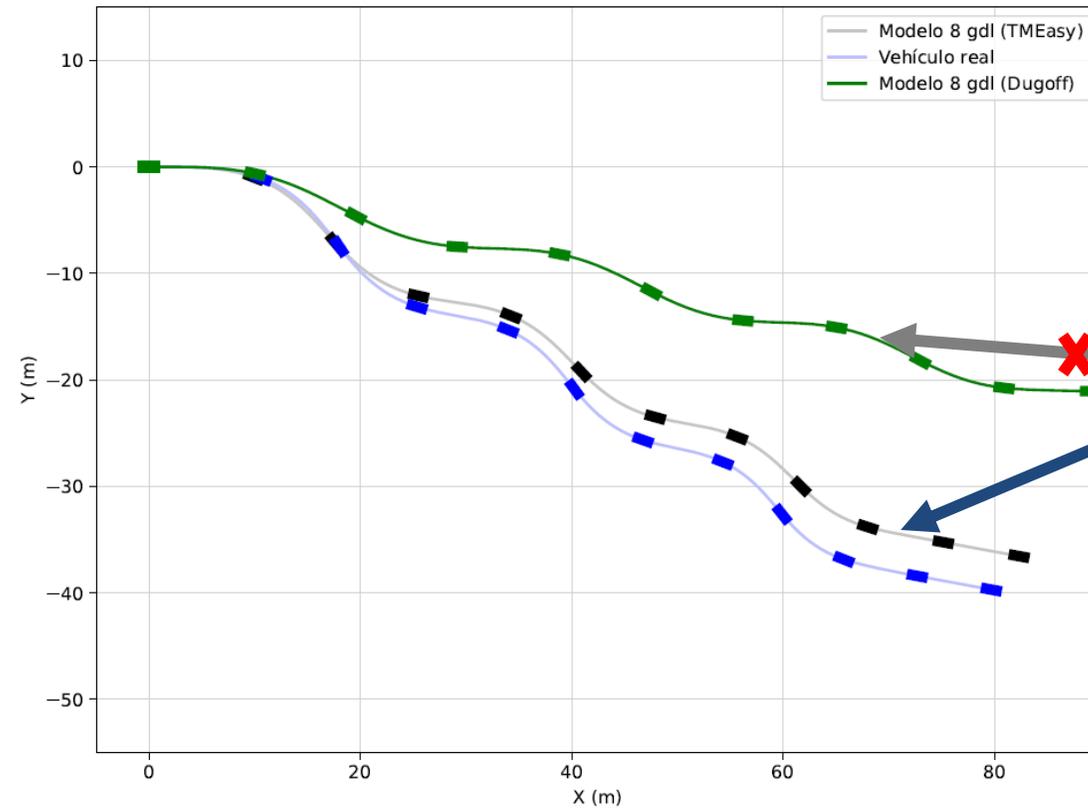
$$C_b \approx 6730.77$$



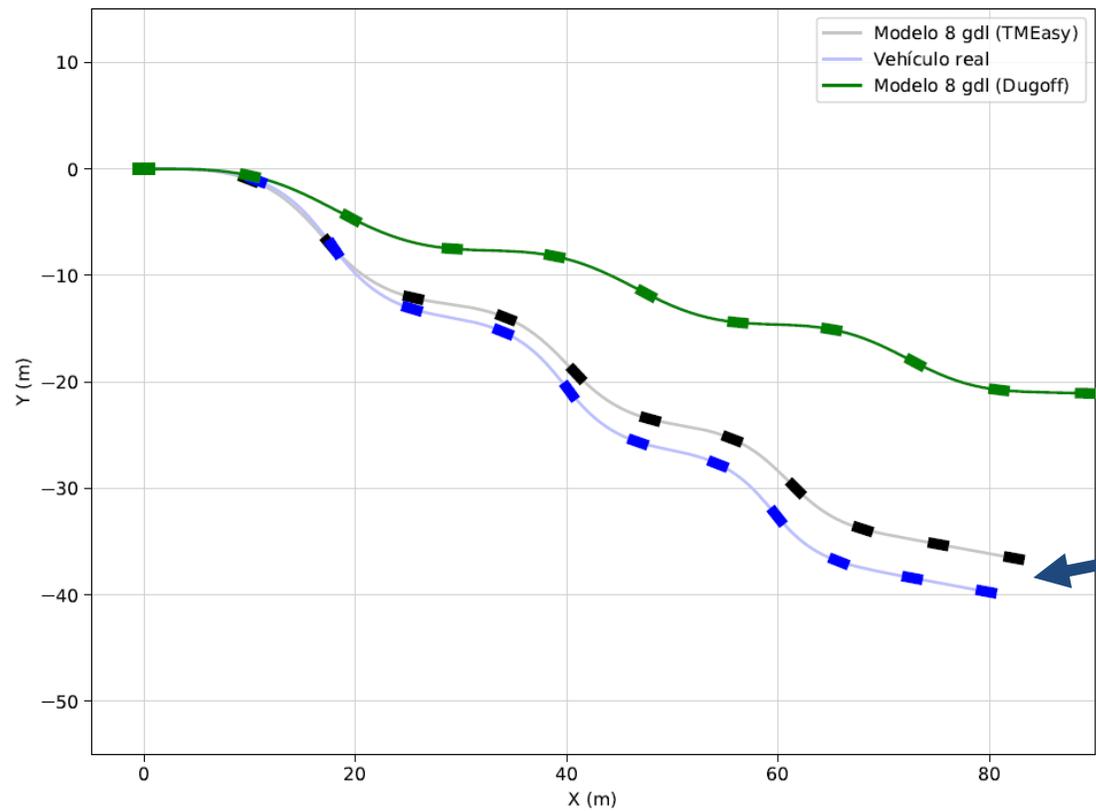
Fuerza longitudinal en función del ángulo de giro



Fuerza lateral en función del ángulo de giro

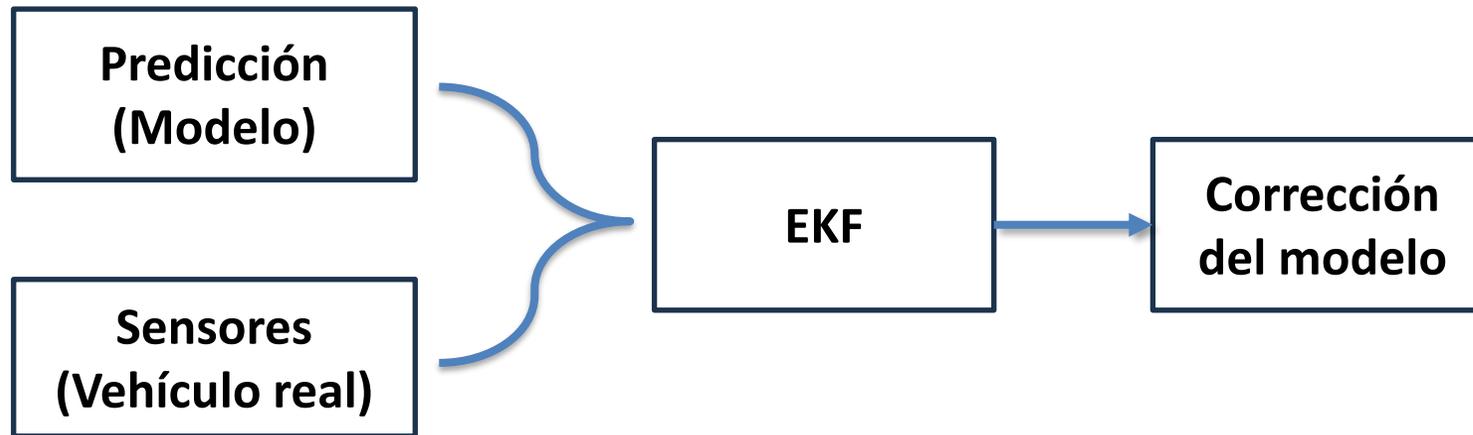


**Emplearemos
TMEasy**



Corregir las diferencias

Corrección del modelo: Filtro de Kalman Extendido (EKF)



Filtro de Kalman Extendido (EKF)

Predicción

$$\text{Estados: } X_k^- = f(X_{k-1}^+, U_k)$$

$$\text{Covarianza: } P_k^- = f_x P_{k-1}^+ f_x^T + Q$$

Corrección

$$\text{Ganancia: } K_k = P_k^- H_{x,k}^T (H_{x,k} P_k^- H_{x,k}^T + R)^{-1}$$

$$\text{Estados: } X_k^+ = X_k^- + K_k (Y_k - h(X_k^-))$$

$$\text{Covarianza: } P_k^+ = (I - K_k H_{x,k}) P_k^-$$

Filtro de Kalman Extendido (EKF)

Ejemplo: Modelo de bicicleta

$$f_x = \frac{\partial f(X_{k-1}^+, U_k)}{\partial X} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & \cos(\psi)dt & -\sin(\psi)dt & \cos(\psi)\frac{dt^2}{2} & -\sin(\psi)\frac{dt^2}{2} & 0 \\ 0 & 1 & -\sin(\psi)dt & -\cos(\psi)dt & -\sin(\psi)\frac{dt^2}{2} & -\cos(\psi)\frac{dt^2}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & rdt & dt & 0 & vdt \\ 0 & 0 & -rdt & 1 & 0 & dt & -udt \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$X = (x \quad y \quad u \quad v \quad a_{x'} \quad a_{y'} \quad r)$$

Filtro de Kalman Extendido (EKF)

Ejemplo: Modelo de bicicleta

$$H_{x,k} = \frac{\partial h(X_k^-)}{\partial X} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin(\psi) & -\cos(\psi) & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -r & 1 & 0 & -v \\ 0 & 0 & r & 0 & 0 & 1 & u \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$X = (x \quad y \quad u \quad v \quad a_{x'} \quad a_{y'} \quad r)$$

$$Y = (x \quad y \quad \dot{x} \quad \dot{y} \quad a_{x'} \quad a_{y'} \quad r)$$

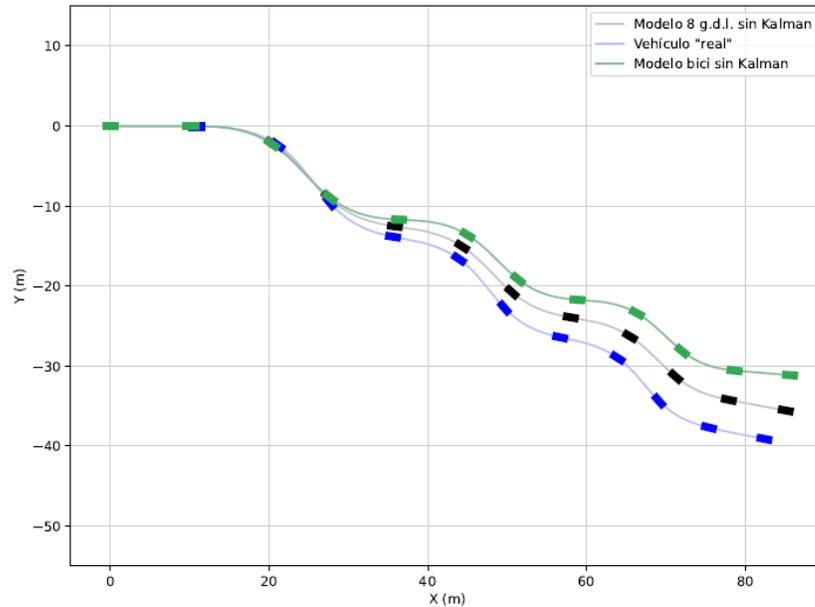
Filtro de Kalman Extendido (EKF)

Ejemplo: Modelo de bicicleta

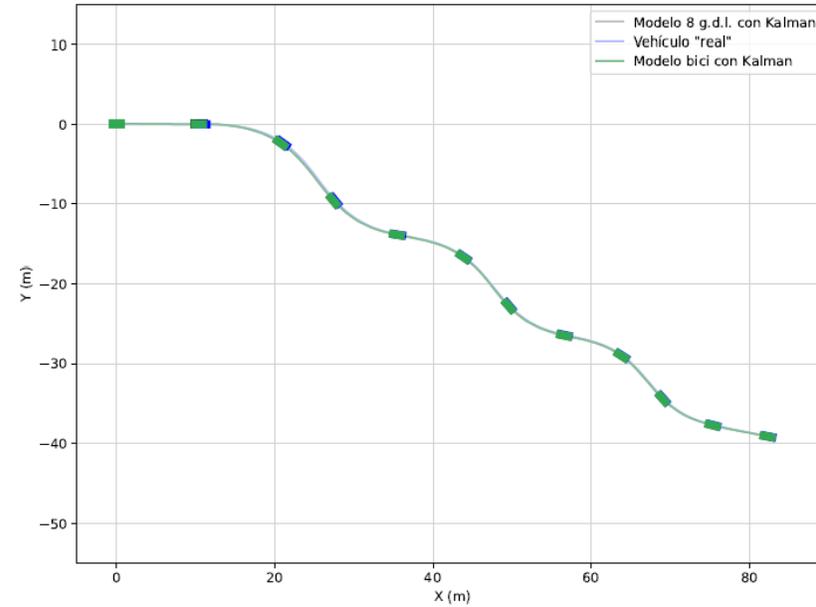
$$R = \begin{pmatrix} 1.785 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1.785 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.053 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.053 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.447 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.447 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.011 \end{pmatrix}$$

Filtro de Kalman Extendido (EKF)

$$Q = \begin{pmatrix} q \frac{(dt)^5}{20} & 0 & q \frac{(dt)^4}{8} & 0 & q \frac{(dt)^3}{6} & 0 & 0 \\ 0 & q \frac{(dt)^5}{20} & 0 & q \frac{(dt)^4}{8} & 0 & q \frac{(dt)^3}{6} & 0 \\ q \frac{(dt)^4}{8} & 0 & q \frac{(dt)^3}{3} & 0 & q \frac{(dt)^2}{2} & 0 & 0 \\ 0 & q \frac{(dt)^4}{8} & 0 & q \frac{(dt)^3}{3} & 0 & q \frac{(dt)^2}{2} & 0 \\ q \frac{(dt)^3}{6} & 0 & q \frac{(dt)^2}{2} & 0 & qdt & 0 & 0 \\ 0 & q \frac{(dt)^3}{6} & 0 & q \frac{(dt)^2}{2} & 0 & qdt & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & q_r \end{pmatrix}$$



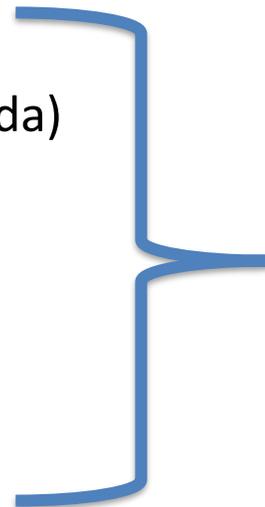
Sin filtro de Kalman



Con filtro de Kalman

Algoritmo de control

- PID (Error de velocidad de guiñada)
- PID (Error de ángulo de deslizamiento)
- Lógica difusa (ambos)



Par de guiñada (M_z) → Actuación: Frenada diferencial

PID

- Error velocidad de guiñada

$$r_D = \frac{u}{l(1 + k_{us}u^2)} \delta \longrightarrow e_r = r - r_D$$

[14]

$$M_z = -k_{p1}e_r - k_{i1} \int_0^t e_r dt - k_{d1} \frac{de_r}{dt}$$

$$k_{p1} = 10000$$

$$k_{i1} = 2000$$

$$k_{d1} = 1500$$

- Error ángulo de deslizamiento

$$\beta_D = 0 \longrightarrow e_\beta = \beta - \beta_D = \beta$$

$$M_z = k_{p2}e_\beta + k_{i2} \int_0^t e_\beta dt + k_{d2} \frac{de_\beta}{dt}$$

$$k_{p2} = 4000$$

$$k_{i2} = 250$$

$$k_{d2} = 200$$

¿Qué es la lógica difusa (fuzzy logic)?

- **Lógica convencional**

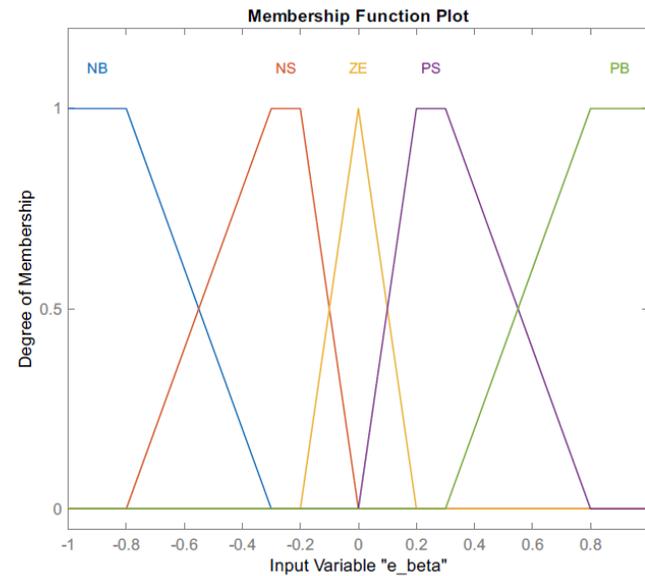
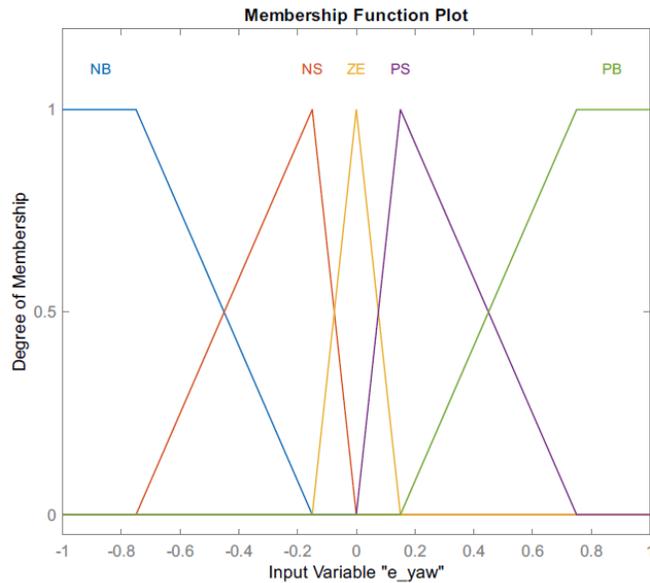
“Si A es verdadero y B es falso, entonces C”

- **Lógica difusa**

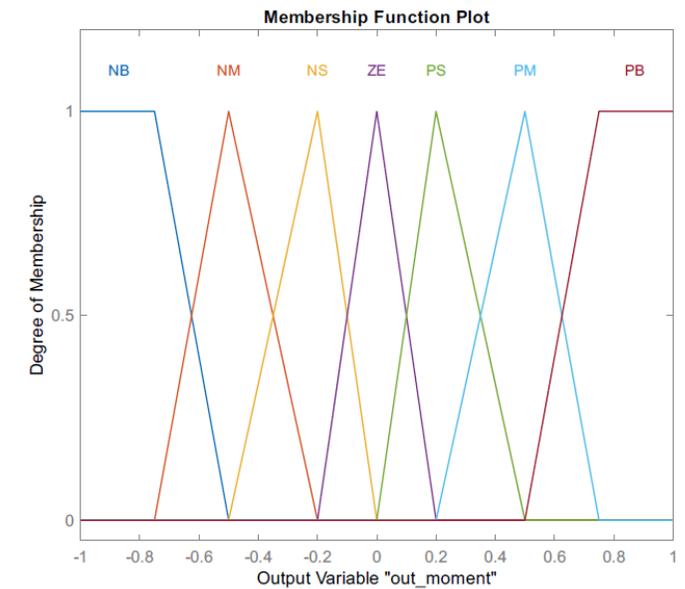
“Si A es un poco verdadero y B es muy falso, entonces un poco de C”

Conjuntos de entrada y salida

Entradas



Salida



$$e_r: (-0.2, 0.2)\text{rad/s} \rightarrow (-1, 1)$$

$$e_\beta: (-0.4, 0.4)\text{rad} \rightarrow (-1, 1)$$

$$M_z: (-1, 1) \rightarrow (-2000, 2000)\text{Nm}$$

Tabla de reglas de la lógica difusa

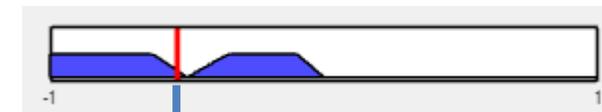
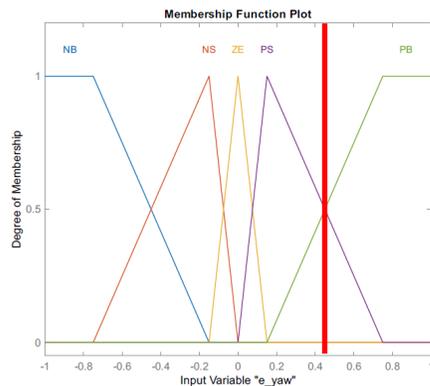
M_z en función de e_r y e_β					
$e_\beta \backslash e_r$	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB	PS	NS	NM	NB
NS	PB	PS	NS	NM	NB
ZE	PB	PS	ZE	NS	NB
PS	PB	PM	PS	NS	NB
PB	PB	PM	PS	NS	NB

Ejemplo: $e_r = 0.45$ y $e_\beta = 0$

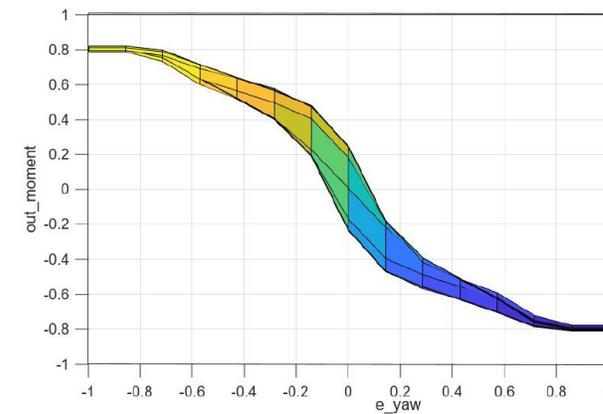
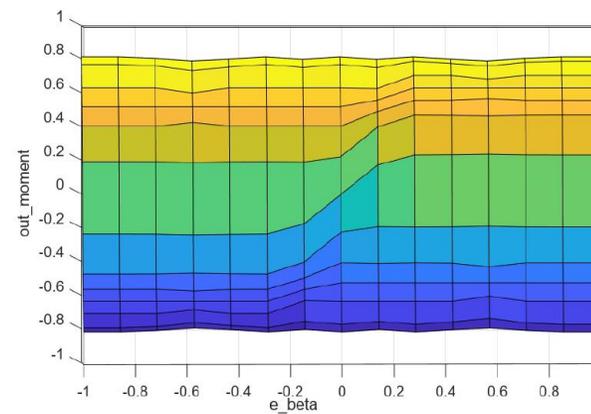
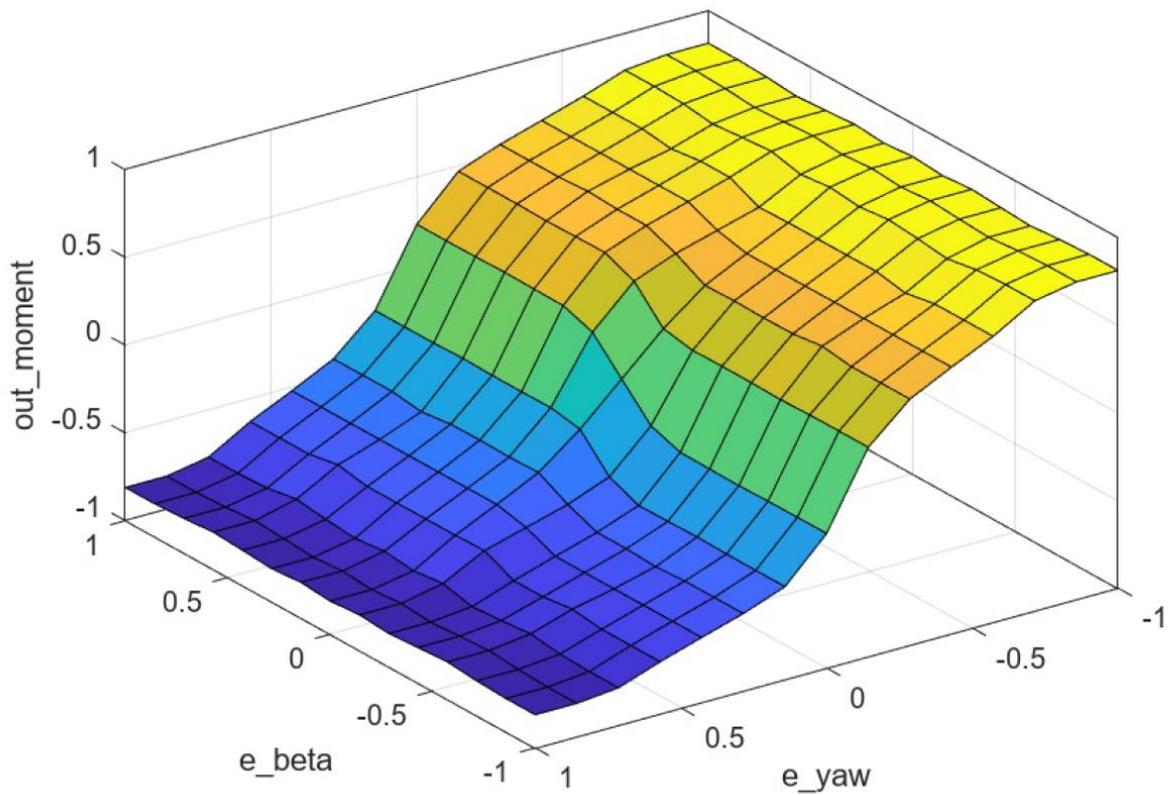
- Si $e_\beta = ZE$ y $e_r = PS$, entonces $M_z = NS$



- Si $e_\beta = ZE$ y $e_r = PB$, entonces $M_z = NB$



$$M_z = -0.536$$



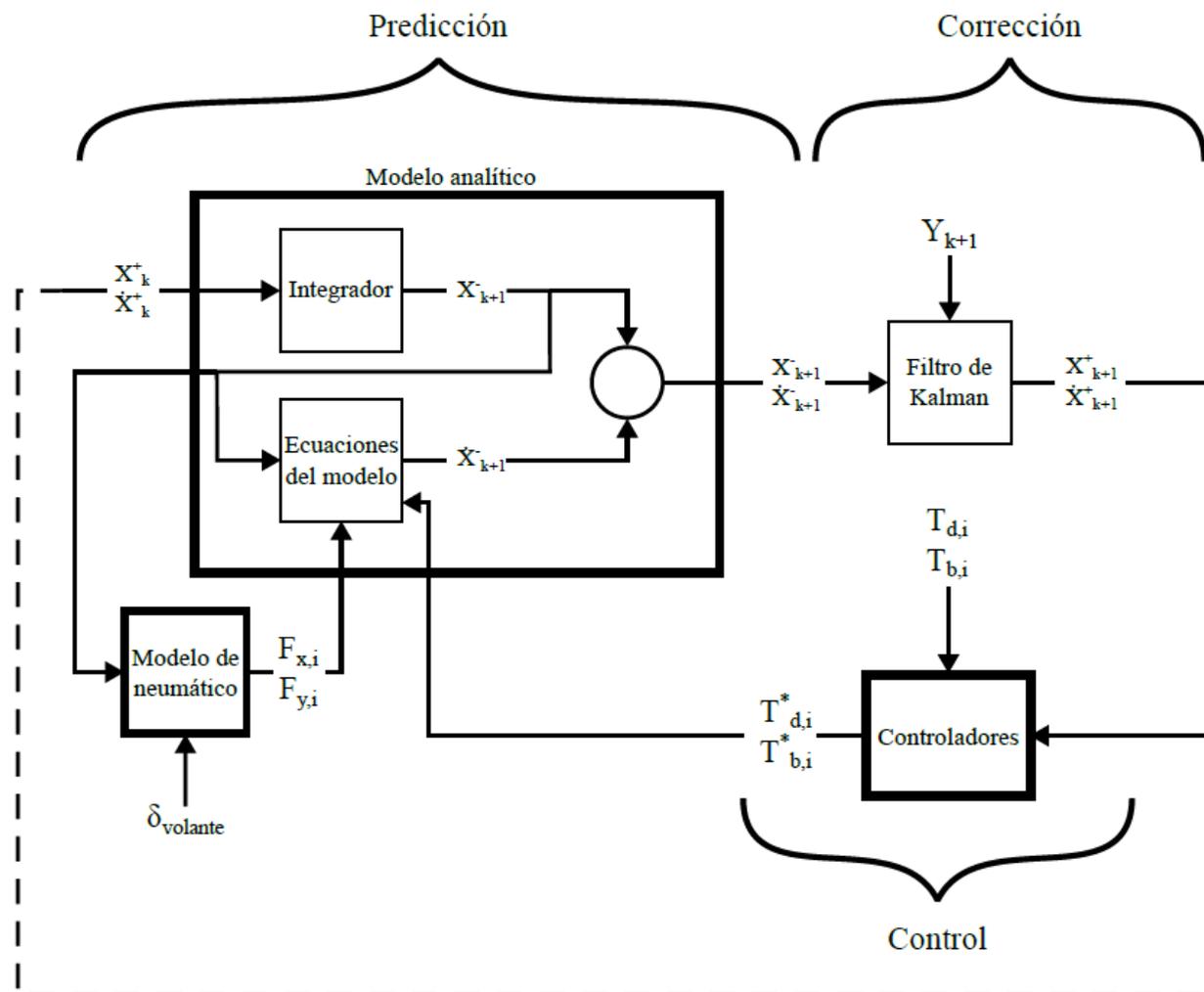
PID – Control de velocidad

$$T_{d,rl} = T_{d,rr} = \begin{cases} 0 & \text{si } e_u < 0 \\ \text{mín} \left(200, k_{p3}e_u + k_{i3} \int_0^t e_u dt + k_{d3} \frac{de_u}{dt} \right) & \text{si } e_u > 0 \end{cases}$$

$$k_{p2} = 750$$

$$k_{i2} = 10$$

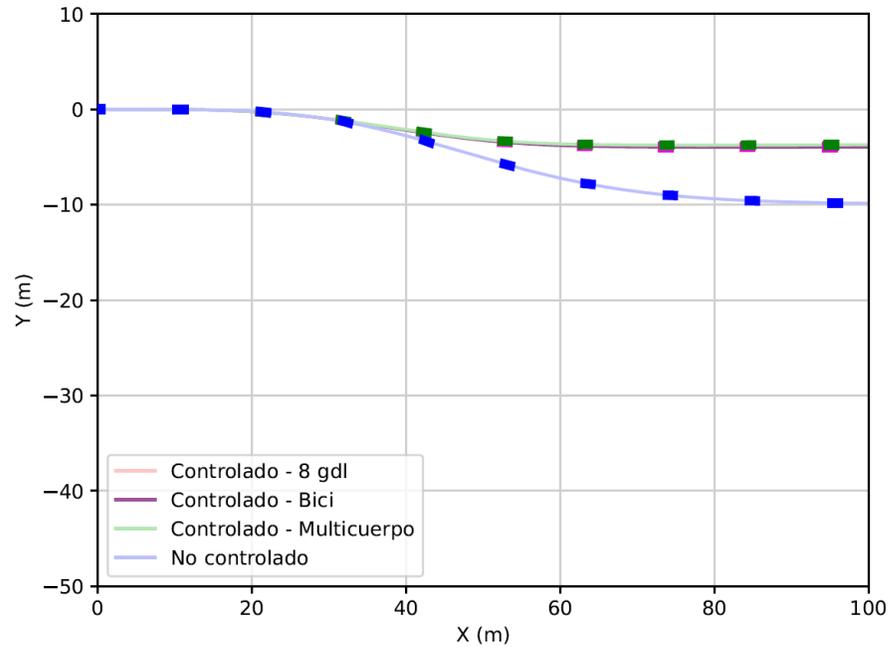
$$k_{d2} = 0.5$$



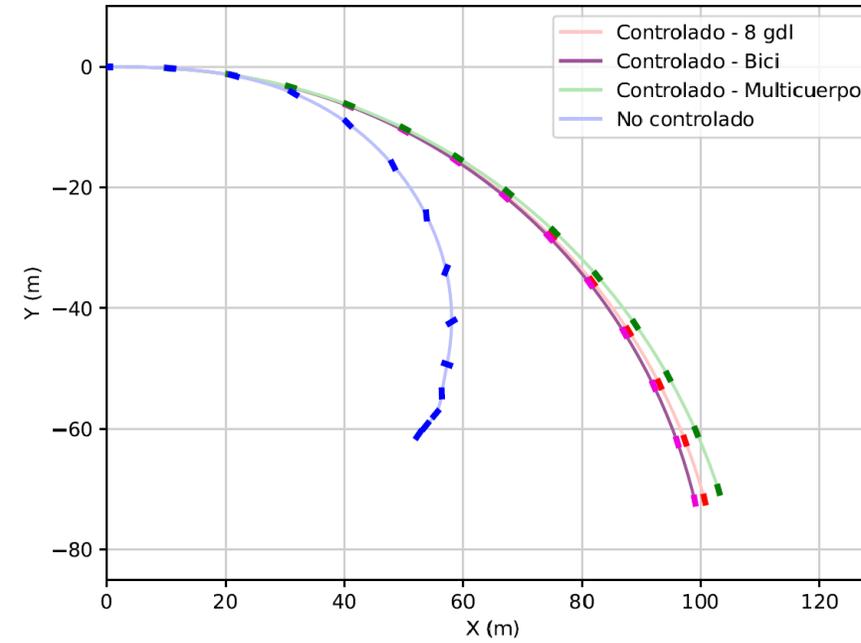
3. Resultados



Cambio de carril



Giro constante



Velocidad: 20 m/s y 30 m/s

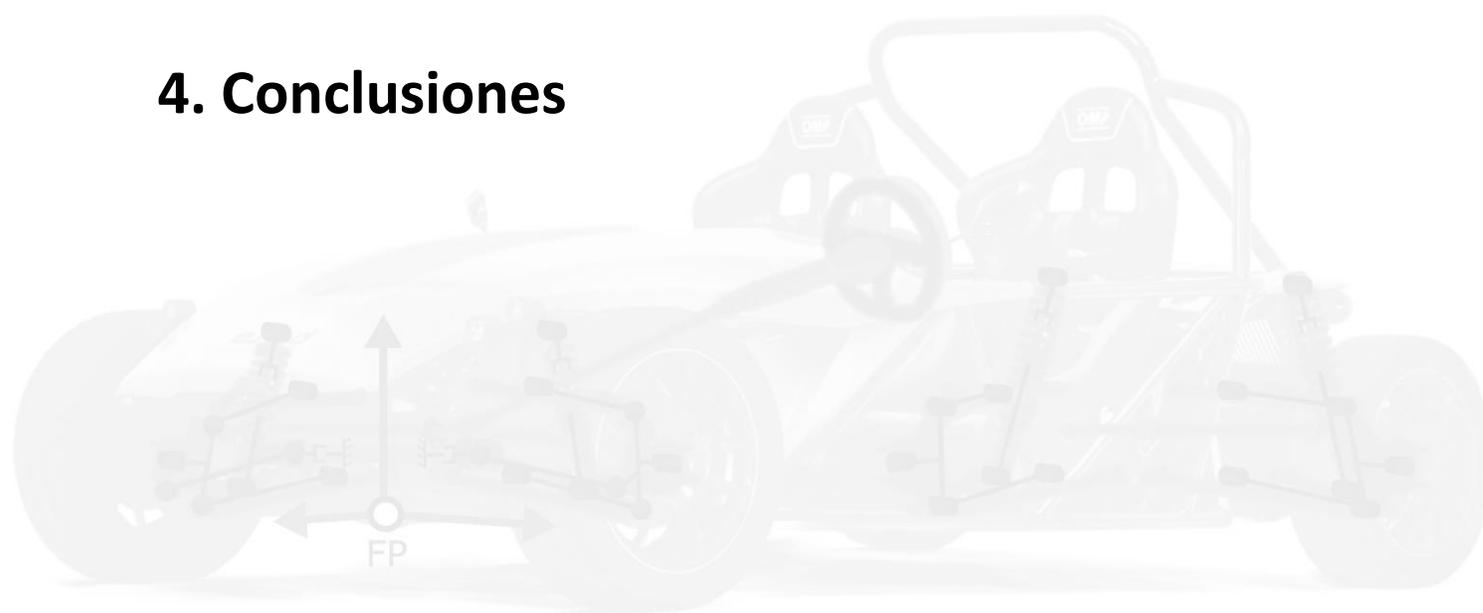
Valores de comparación:

- e_r máximo
- e_r RMS
- e_β máximo
- e_β RMS

Sin controlar
e_r máx: 0.1943 e_r RMS: 0.0907
e_β máx: 0.0670 e_β RMS: 0.0383

		Cambio de carril a 20 m/s		
		Algoritmo de control		
		Fuzzy	PID (e_r)	PID (e_β)
Modelo	e_r : rad/s e_β : rad			
	8 gdl	e_r máx: 0.0455 e_r RMS: 0.0177	e_r máx: 0.0619 e_r RMS: 0.0276	e_r máx: 0.1592 e_r RMS: 0.0763
	Bici	e_r máx: 0.0444 e_r RMS: 0.0170	e_r máx: 0.0497 e_r RMS: 0.0210	e_r máx: 0.1542 e_r RMS: 0.0726
	Multicuerpo	e_r máx: 0.0413 e_r RMS: 0.0158	e_r máx: 0.0565 e_r RMS: 0.0261	e_r máx: 0.1618 e_r RMS: 0.0770
	8 gdl	e_β máx: 0.0275 e_β RMS: 0.0137	e_β máx: 0.0342 e_β RMS: 0.0170	e_β máx: 0.0695 e_β RMS: 0.0332
	Bici	e_β máx: 0.0267 e_β RMS: 0.0129	e_β máx: 0.0302 e_β RMS: 0.0143	e_β máx: 0.0659 e_β RMS: 0.0309
	Multicuerpo	e_β máx: 0.0271 e_β RMS: 0.0130	e_β máx: 0.0335 e_β RMS: 0.0163	e_β máx: 0.0689 e_β RMS: 0.0328

4. Conclusiones



Conclusiones

- El control es exitoso en todas las combinaciones
- El algoritmo de lógica difusa proporciona ligeramente mejores resultados
- A efectos de control ningún estimador presenta ninguna desventaja frente a otro
- El estimador más sencillo (el de bicicleta) podría ser suficiente en estas maniobras
- El modelo de 8 gdl y el multicuerpo son útiles para obtener otras variables de control

Trabajo futuro

- Diseñar otros ADAS
- Otras vías de control: Ejemplo: control activo de la dirección (ASC)
- Maniobras en terrenos desiguales
- Maniobras con pérdida de contacto

Diseño de un control de estabilidad para un automóvil Kyburz eRod

Autor: Pablo Ferraz Martínez

Tutores:

Miguel Ángel Naya Villaverde

Antonio Joaquín Rodríguez González

Trabajo Fin de Grado – Ingeniería Mecánica

12 de julio de 2024