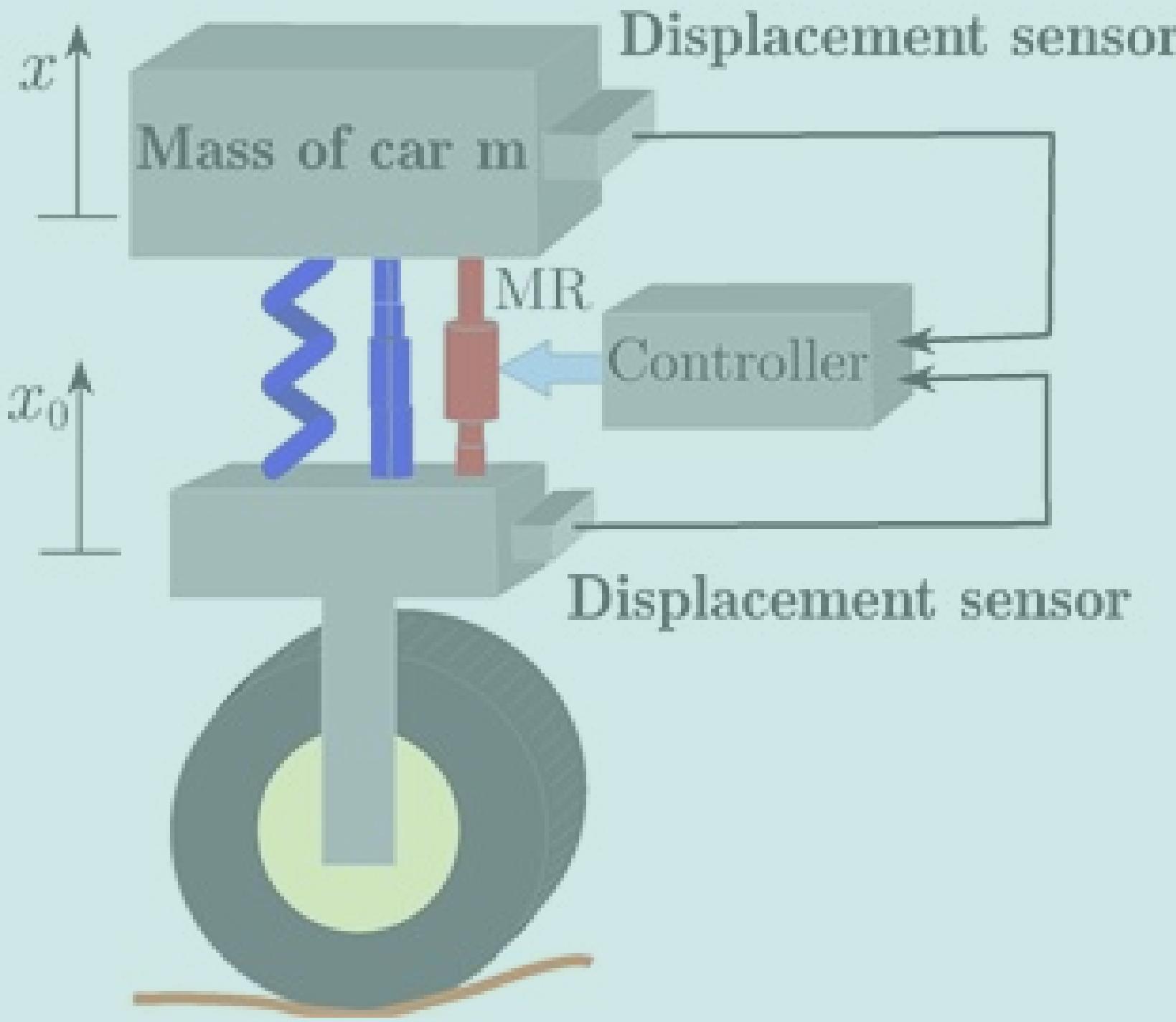


# QUARTER-CAR

JUAN PABLO SOTELO RATIVA  
ANDRES FELIPE SALAZAR MALAGON  
JULIÁN DAVID PÉREZ CHAPARRO



# Introducción

Diseñar un controlador para una suspensión activa tipo quarter-car que atenúe las vibraciones de la carrocería ante perfiles de vía reales, sin perder adherencia ni exceder límites físicos.

EL modelo incluye elementos cuyas fuerzas no son proporcionales lo que rompe la linealidad del modelo.

# Introducción



Se busca un control que reduce la aceleración vertical de la carrocería, contiene las deflexiones y mantiene el contacto rueda-carretera, lo que impacta directamente en seguridad vial y fatiga del ocupante.

Control difuso: adaptativo, robusto y sin modelo exacto. Ajusta la acción en tiempo real con reglas que absorben no linealidades, incertidumbre y saturaciones, sin exigir un modelo exacto; mejorando confort–estabilidad que las leyes fijas.

# Estado del arte

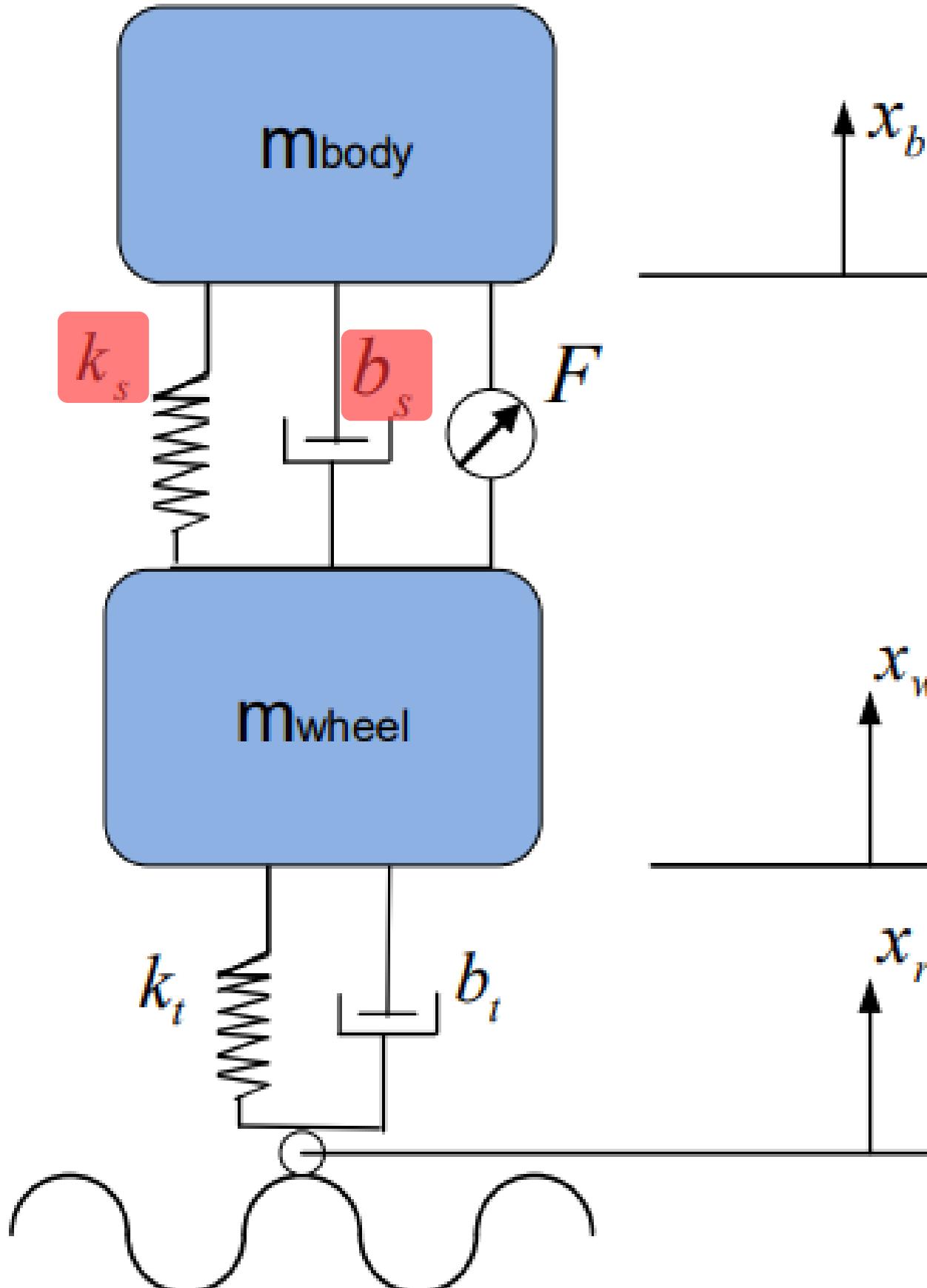


Optimizan métricas estándar (RMS, ITAE) en quarter-car y demuestran mejoras en simulación, y comparten retos como: la necesidad de información de vía suficiente, incertidumbre/ruido de sensores (de ahí amortiguador adaptativo) y complejidad computacional. De ahí que comparar controladores sobre un quarter-car no lineal con restricciones, como hace nuestro proyecto nos permite identificar que es un problema actual que sigue siendo relevante y busca soluciones innovadoras. [1], [2], [3], [4] y [5].



El enfoque Fuzzy optimizado con PSO reduce de forma consistente el ITAE (Integral of Time-weighted Absolute Error) en viaje de carrocería, aceleración, deflexión y esfuerzo del actuador; el modelo base es quarter-car obtenido por Lagrange-Euler. En paralelo, un  $H^\infty$  en dos escalas de tiempo usa perturbaciones singulares para separar dinámicas rápida/lenta y mejorar la respuesta transitoria respecto a  $H^\infty$  convencional. [1], [2] y [4]

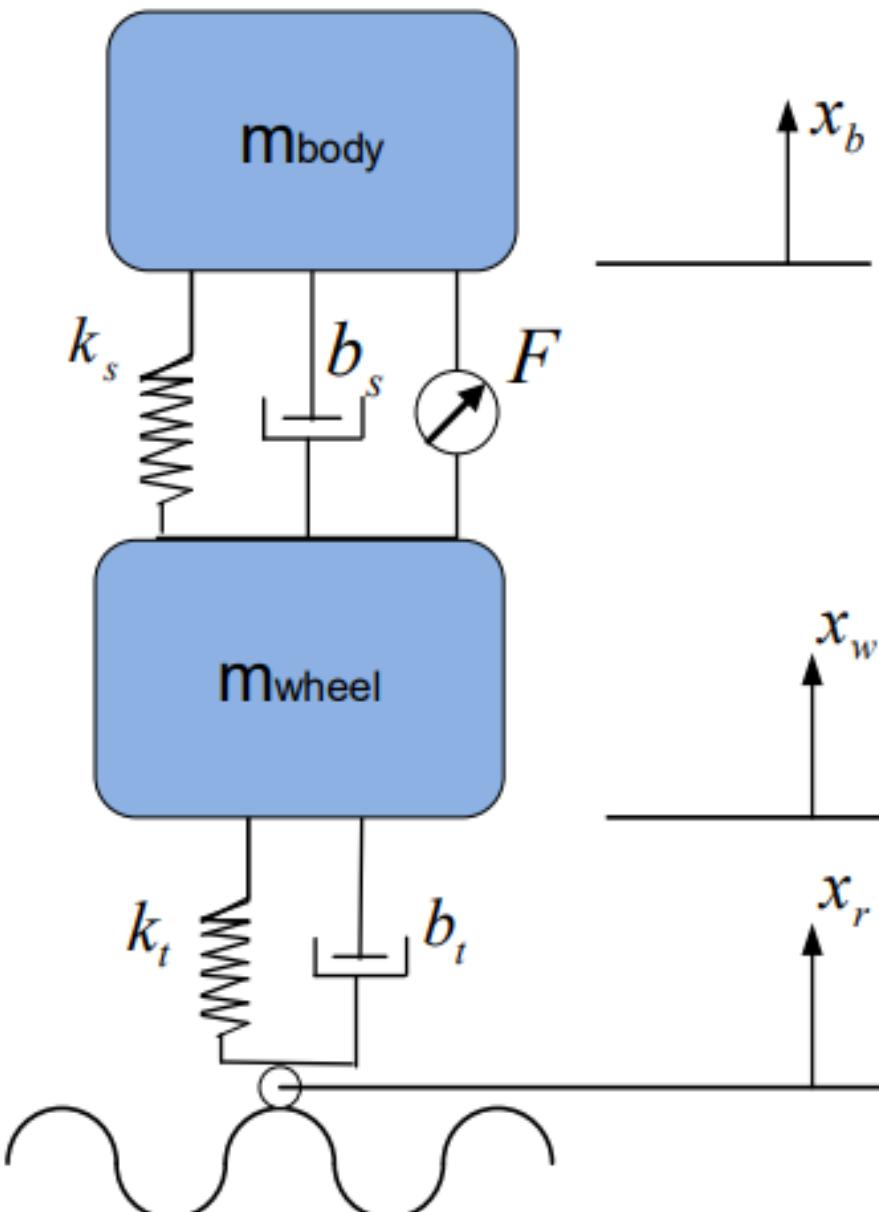
# Modelo no lineal de Quarter-car



$$m_b \ddot{x}_b + F_B s + F_K s - F_u = 0 \quad (1)$$
$$m_w \ddot{x}_w + b_t (\dot{x}_w - \dot{x}_r) + k_t (x_w - x_r) - F_B s - F_K s - F_u = 0 \quad (2)$$
$$F_K s = k_1 (x_b - x_w) + k_2 (x_b - x_w)^3 \quad (3)$$
$$F_B s = b_1 (\dot{x}_b - \dot{x}_w) + b_2 |\dot{x}_b - \dot{x}_w| (\dot{x}_b - \dot{x}_w) \quad (4)$$

- $m_b$ : masa del chasis (cuerpo del vehículo).
- $m_w$ : masa de la rueda.
- $k_s$ : constante de rigidez de la suspensión (resorte entre chasis y rueda).
- $b_s$ : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión (amortiguador entre chasis y rueda).
- $k_t$ : constante de rigidez del neumático.
- $b_t$ : coeficiente de amortiguamiento del neumático.
- $x_b$ : desplazamiento vertical del chasis.
- $x_w$ : desplazamiento vertical de la rueda.
- $x_r$ : desplazamiento impuesto por el perfil de la carretera.
- $F_s$ : fuerza ejercida por el resorte de la suspensión.
- $F_d$ : fuerza ejercida por el amortiguador de la suspensión.
- $F_u$ : fuerza externa de control (actuador), si se considera.

# Modelo lineal de Quarter-car



$$m_b \ddot{x}_b + b_s(\dot{x}_b - \dot{x}_w) + k_s(x_b - x_w) - F_s = 0 \quad (1)$$

$$m_w \ddot{x}_w + b_t(\dot{x}_w - \dot{x}_r) + k_t(x_w - x_r) - b_s(\dot{x}_b - \dot{x}_w) - k_s(x_b - x_w) - F_s = 0 \quad (2)$$

$$\ddot{x}_b = -\frac{1}{m_b} [b_s(\dot{x}_b - \dot{x}_w) + k_s(x_b - x_w) - F_s] \quad (3)$$

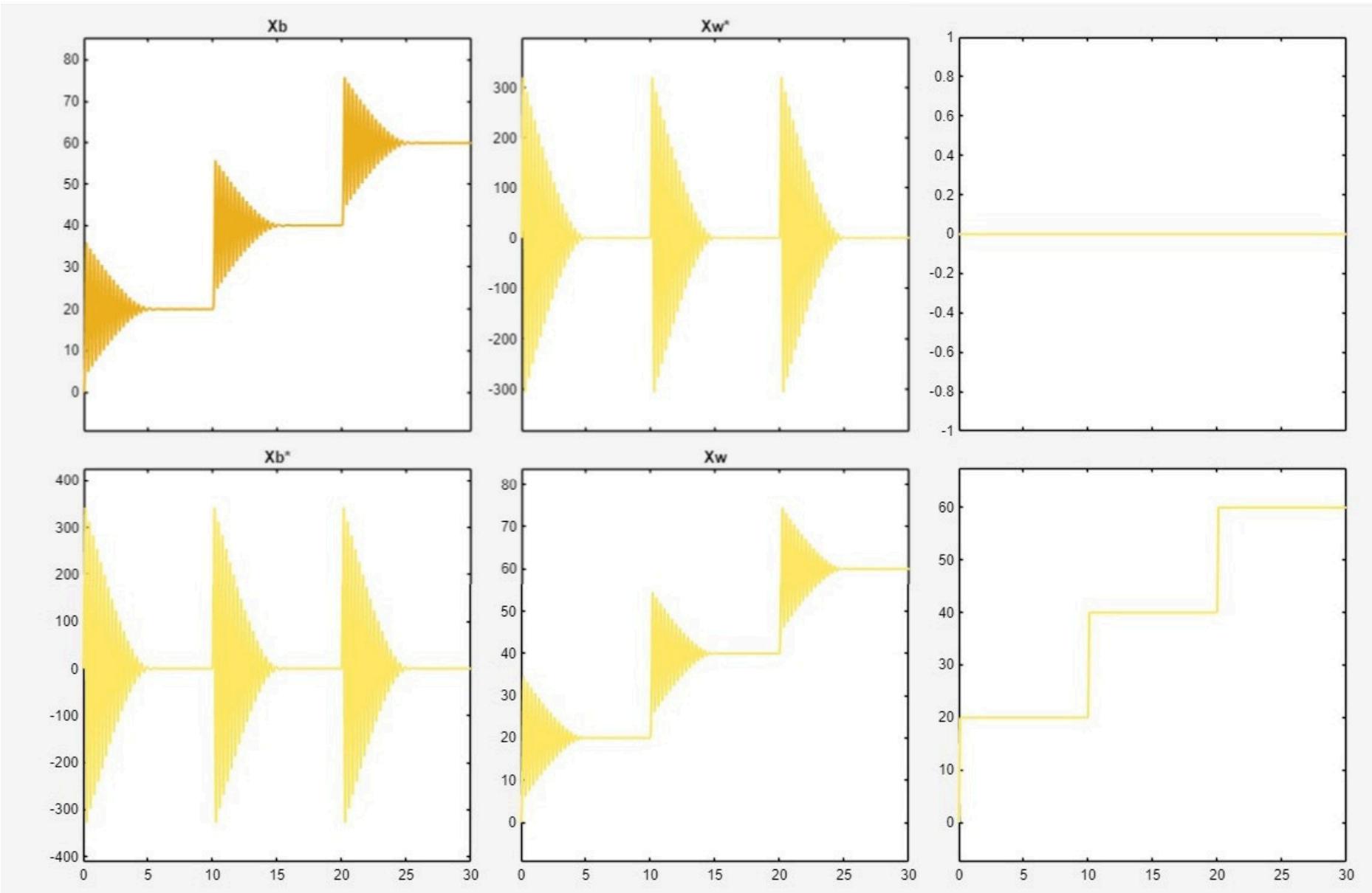
$$\ddot{x}_w = -\frac{1}{m_w} [b_t(\dot{x}_w - \dot{x}_r) + k_t(x_w - x_r) - b_s(\dot{x}_b - \dot{x}_w) - k_s(x_b - x_w) - F_s] \quad (4)$$

Cuando el carro está en reposo sobre la carretera, se encuentra en equilibrio estático: el resorte está comprimido lo justo para sostener el peso. Si aparecen pequeñas vibraciones alrededor de esa posición, tanto los desplazamientos como las velocidades relativas son pequeños. Eso hace que los términos no lineales prácticamente desaparezcan y la suspensión se comporte como si fuera lineal. Por eso se justifica la linearización en ese punto.

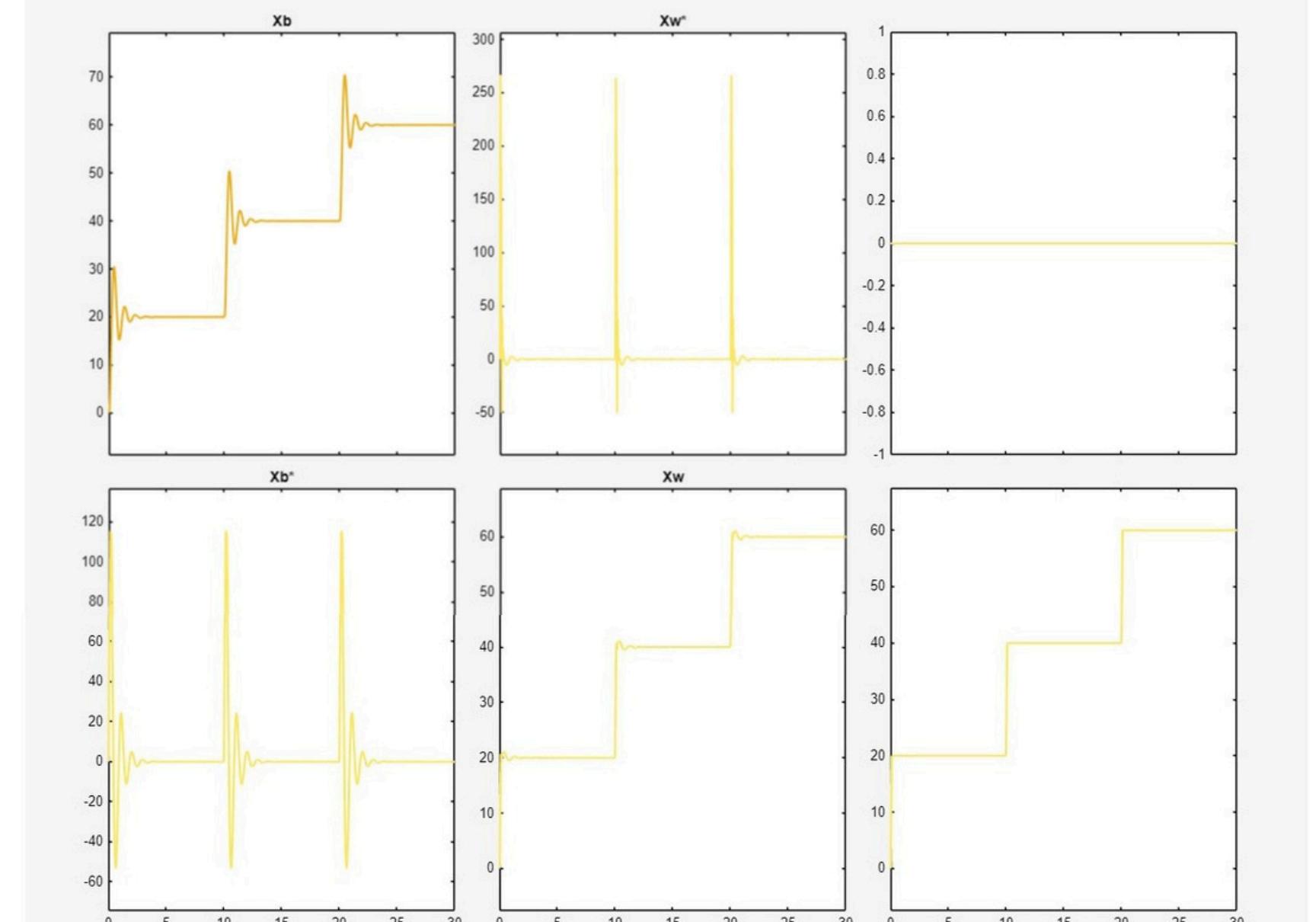
- Si  $\Delta x$  es pequeño  $\Rightarrow (\Delta x)^3 \approx 0$ .
- Si  $\Delta v$  es pequeña  $\Rightarrow |\Delta v|\Delta v \approx 0$ .

# Resultados

Modelo No Lineal



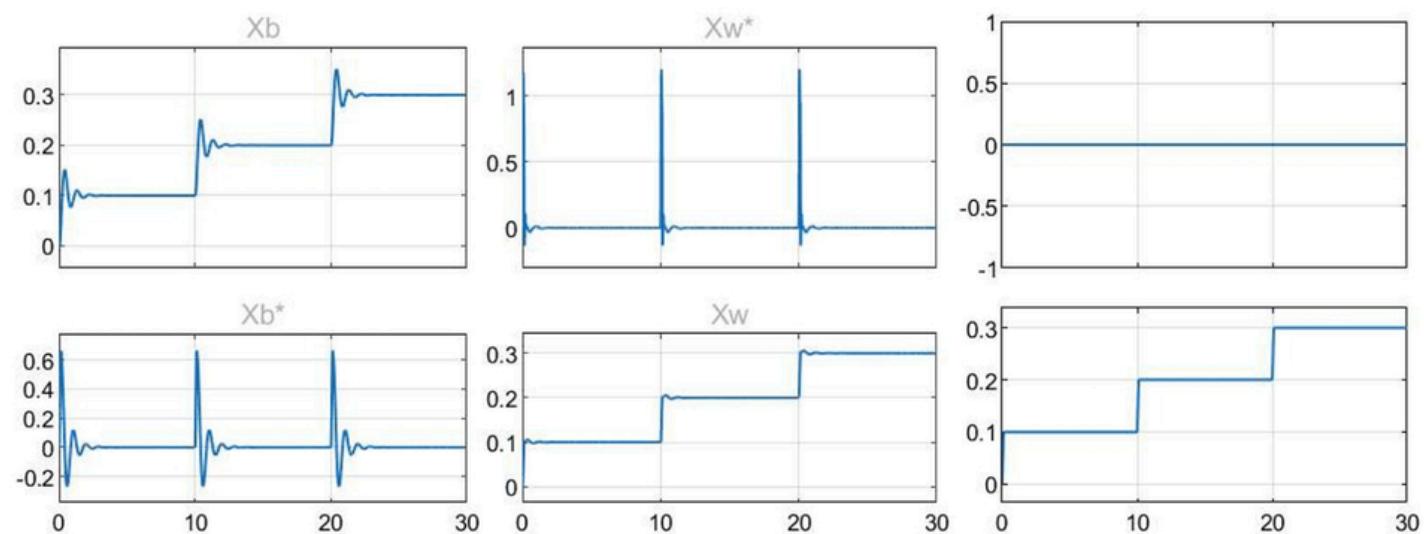
Modelo Lineal



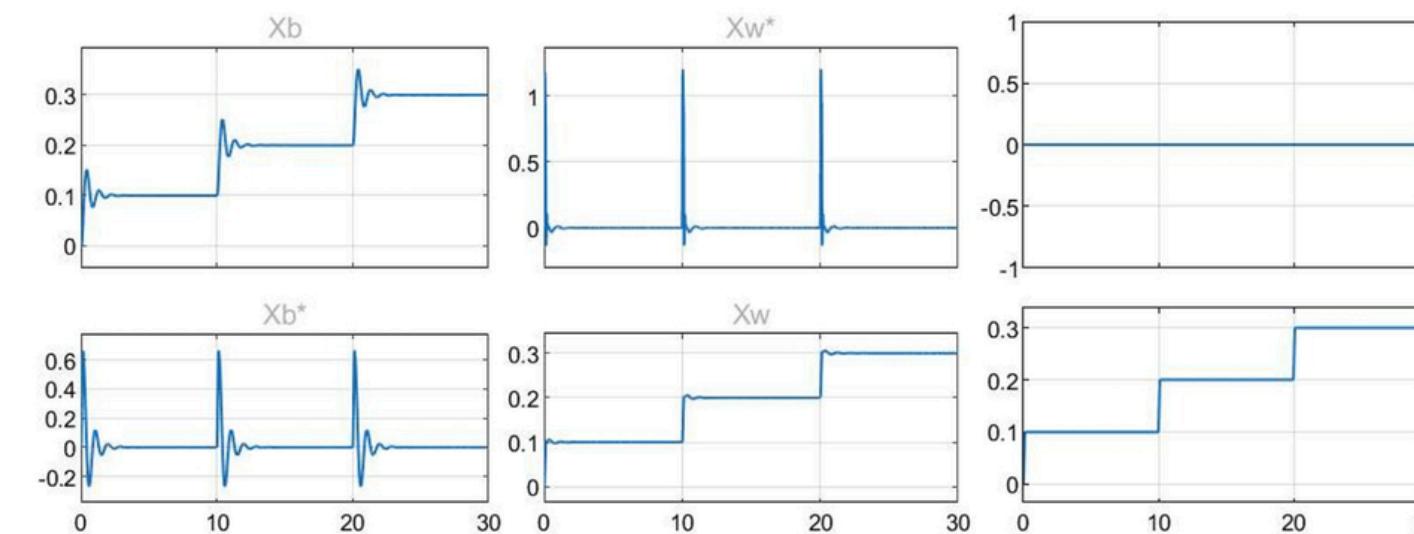
# Resultados

Usando un valor cerca del equilibrio como desplazamiento impuesto de la carretera  $X_r = 0.1$

Modelo No Lineal



Modelo Lineal



# Conclusiones

- El modelo quarter-car describe el movimiento vertical del vehículo y permite comparar un enfoque lineal y uno no lineal. El modelo linealizado es útil para análisis preliminares y perturbaciones pequeñas, pero subestima vibraciones y no refleja fenómenos reales como picos de aceleración, armónicos y variación de frecuencia.
- El modelo no lineal, al incluir rigidez cúbica y amortiguamiento dependiente de la velocidad, muestra con mayor realismo la pérdida de confort y adherencia frente a baches grandes.
- Cuando la excitación de la carretera es pequeña, es decir, el desplazamiento  $x_r$  presenta valores reducidos y el sistema opera cerca del equilibrio, las respuestas del modelo lineal y no lineal son prácticamente iguales.
- El problema de control consiste en equilibrar comodidad y estabilidad, lo que no se logra sin acción activa. En consecuencia, se requieren técnicas de control avanzadas: óptimas ( $LQR$ ,  $H^\infty$ ) para condiciones nominales, y adaptativas, no lineales o semiactivas (skyhook, lógica difusa) para garantizar desempeño robusto en condiciones reales.
- Cuando el sistema se encuentra casi en equilibrio, con valores de entrada del terreno ( $X_r$ ) muy pequeños, se observa que el comportamiento del modelo lineal y no lineal es prácticamente indistinguible. Esto sugiere que, en condiciones de pequeñas perturbaciones o variaciones mínimas en el terreno, el modelo lineal puede ser suficiente para representar el comportamiento del sistema de suspensión activa.

# Referencias

- [1] T. Abut and E. Salkim, "Control of Quarter-Car Active Suspension System Based on Optimized Fuzzy Linear Quadratic Regulator Control Method," *Applied Sciences*, 2023.
- [2] Z.-J. Fu and X.-Y. Dong, " $H\infty$  optimal control of vehicle active suspension systems in two time scales," *Automatika*, 2021.
- [3] N. Zhang, S. Yang, G. Wu, H. Ding, Z. Zhang, and K. Guo, "Fast Distributed Model Predictive Control Method for Active Suspension Systems," *Sensors*, MDPI, 2023.
- [4] Q. Li, Z. Chen, H. Song, and Y. Dong, "Model Predictive Control for Speed-Dependent Active Suspension System with Road Preview Information," *Sensors*, MDPI, 2024.
- [5] E. Kemer and H. Başak, "Performance analysis of fuzzy-LQR and fuzzy-LQG controllers for active vehicle suspension systems," *Research on Engineering Structures & Materials*, 2024.

**Gracias por su  
atención!**

