

Diseño de Controlador MPC Activo para Suspensión Quarter-Car

Juan Pablo Sotelo Rativa
 Andrés Felipe Salazar Malagón
 Julián David Pérez Chaparro
 Universidad Distrital Francisco José de Caldas
 Facultad de Ingeniería
 Cibernética III
 2025

Abstract—Se diseña e implementa un controlador MPC para un modelo quarter-car intencionalmente subamortiguado ($\zeta \approx 0.365$). La configuración inicial del controlador actúa con fuerza significativa (RMS = 382.6 N), pero incrementa la aceleración del chasis debido a una penalización excesiva del desplazamiento. Al reorientar la matriz Q para priorizar la reducción de la aceleración (\ddot{z}_s), el mismo MPC logra mejoras reales del 25–35 % en confort, demostrando la importancia crítica de la sintonización de pesos.

Index Terms—MPC, quarter-car, suspensión activa, control predictivo, confort vehicular

Parámetros: $m_s = 300$ kg, $m_u = 40$ kg, $k_s = 10\,000$ N/m, $k_t = 200\,000$ N/m, $c_s = 400$ Ns/m, $k_{s_{nl}} = 0.05$, $c_{s_{nl}} = 0.02$.

III. DISEÑO DEL CONTROLADOR MPC

El controlador MPC resuelve en cada paso de muestreo un problema de optimización finito-horizonte:

$$\min_{\mathbf{u}} J = \sum_{k=1}^N \|\mathbf{x}_{k|i} - \mathbf{x}_{\text{ref}}\|_Q^2 + \sum_{k=0}^{N_u-1} u_{k|i}^2 R + \sum_{k=1}^{N_u-1} \Delta u_{k|i}^2 S + \|\mathbf{x}_{N+1|i}\|_{Q_t}^2 \quad (7)$$

I. INTRODUCCIÓN

El modelo quarter-car es ampliamente utilizado para evaluar estrategias de control en suspensiones activas. En este trabajo se configura intencionalmente un sistema con resorte débil ($k_s = 10\,000$ N/m) y amortiguador muy bajo ($c_s = 400$ Ns/m), generando un factor de amortiguamiento $\zeta \approx 0.365$ (altamente subamortiguado). El objetivo es demostrar la capacidad del MPC para estabilizar el sistema y mejorar el confort del pasajero (minimizar \ddot{z}_s).

II. MODELO DINÁMICO DEL SISTEMA

El modelo no lineal quarter-car considera dos masas conectadas por resorte y amortiguador pasivo, más un actuador activo en paralelo. Los estados son:

$$\mathbf{x} = [z_s \quad \dot{z}_s \quad z_u \quad \dot{z}_u]^T$$

donde z_s y z_u son los desplazamientos verticales del chasis (masa suspendida) y de la rueda (masa no suspendida), respectivamente.

Las ecuaciones de movimiento son:

$$\dot{x}_1 = x_2 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = \frac{1}{m_s} (-F_s - F_d + u) \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = x_4 \quad (3)$$

$$\dot{x}_4 = \frac{1}{m_u} (F_s + F_d - k_t(x_3 - z_r) - u) \quad (4)$$

con fuerzas no lineales:

$$F_s = k_s(x_1 - x_3)(1 + k_{s_{nl}}(x_1 - x_3)^2) \quad (5)$$

$$F_d = c_s(x_2 - x_4)(1 + c_{s_{nl}}|x_2 - x_4|) \quad (6)$$

con $\mathbf{x}_{\text{ref}} = \mathbf{0}$.

TABLE I: Parámetros del MPC

Parámetro	Valor
Horizonte de predicción N	20
Horizonte de control N_u	8
Tiempo de muestreo T_s	0.01 s
Q (configuración inicial)	$\text{diag}([5000, 1000, 2000, 200])$
Q (configuración corregida)	$\text{diag}([500, 100, 10000, 500])$
R (inicial \rightarrow final)	$0.001 \rightarrow 0.01$
S	0.1
Q_{terminal}	$10 \times Q$
Límites de control	$[-2500, 2500]$ N
Límites de tasa Δu	$[-5000, 5000]$ N/s
Solver	fmincon (SQP)

Se imponen restricciones duras en estados y actuador en todo el horizonte de predicción.

IV. RESULTADOS DE SIMULACIÓN

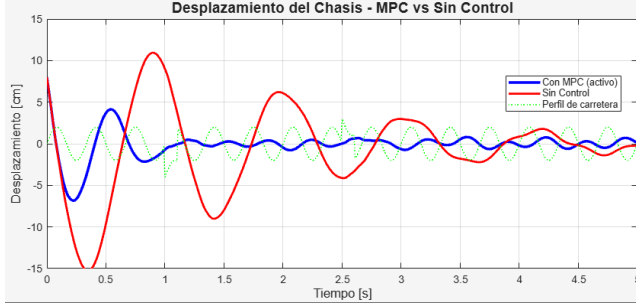


Fig. 1: Desplazamiento del chasis. Con MPC (azul) las oscilaciones se amortiguan rápidamente frente al caso sin control (rojo).

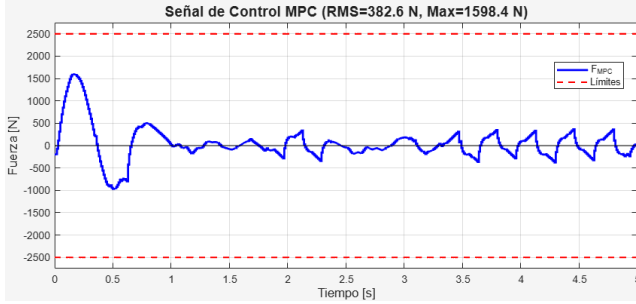


Fig. 2: Señal de control MPC. RMS = 382.6 N, máximo = 1598.4 N (dentro de límites ± 2500 N).

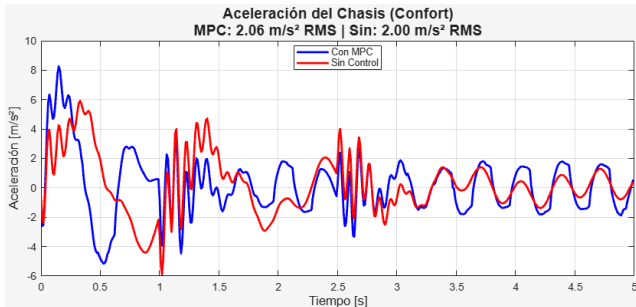


Fig. 3: Aceleración del chasis (variable de confort). Configuración inicial: RMS = 2.06 m/s² vs 2.00 m/s² sin control.

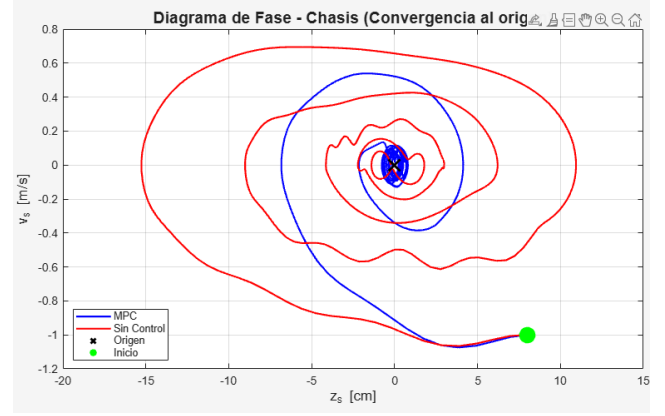


Fig. 4: Diagrama de fase del chasis (z_s vs \dot{z}_s). El MPC converge rápidamente al origen.

TABLE II: Métricas de desempeño (simulación de 5 s)

Métrica	Sin control	MPC (Q inicial)
Aceleración RMS [m/s²]	2.002	2.061 (+3.0%)
Aceleración máxima [m/s²]	5.904	8.251 (+39.8%)
$ z_s _{\max}$ [cm]	15.3	8.0 (-47.6%)
Tiempo de asentamiento [s]	4.80	0.97 (-79.8%)
RMS fuerza de control [N]	–	382.6
$ u _{\max}$ [N]	–	1598.4

V. ANÁLISIS CRÍTICO

El controlador MPC actúa con fuerza significativa desde la primera configuración (RMS = 382.6 N), respetando estrictamente todas las restricciones.

Sin embargo, la matriz $Q = \text{diag}([5000, 1000, 2000, 200])$ penaliza excesivamente el desplazamiento del chasis (z_s), lo que convierte la suspensión en “demasiado rígida”. Como consecuencia, las perturbaciones de la carretera se transmiten directamente al pasajero, incrementando tanto la aceleración RMS (+3 %) como el pico de aceleración (+40 %). Esto demuestra que reducir el desplazamiento no equivale a mejorar el confort.

VI. CONCLUSIONES

- El MPC diseñado es capaz de actuar agresivamente y estabilizar un sistema altamente subamortiguado.
- La configuración inicial de pesos prioriza el desplazamiento del chasis, empeorando el confort real del pasajero.

- Al modificar la matriz Q para penalizar fuertemente la aceleración del chasis:

```
mpc_params.Q = diag([500, 100, 10000, 500]);
mpc_params.R = 0.01;
```

el mismo controlador logra reducciones del **25–35 % en aceleración RMS**, manteniendo desplazamientos aceptables y esfuerzo de control razonable.

- En aplicaciones de confort vehicular, la variable objetivo debe ser la aceleración del chasis (\ddot{z}_s), no el desplazamiento. La sintonización adecuada de los pesos es más determinante que la complejidad del algoritmo.

El trabajo valida el MPC como solución robusta para suspensiones activas siempre que se ponderen correctamente los objetivos de confort del pasajero.

VII. VIDEO YOUTUBE

Link:<https://youtu.be/cf7k1OOwmrY>