



Estrategias de control para suspensiones activas vehiculares: revisión sistemática

Control strategies for vehicle active suspensions: a systematic review

Christian Andrés Cisneros Cadena 
christian.cisneros@uisek.edu.ec

Diana Belén Peralta Zurita 
diana.peralta@uisek.edu.ec

Jaime Vinicio Molina Osejos 
jaime.molina@uisek.edu.ec

Universidad Internacional SEK-Ecuador. Quito, Ecuador

Artículo recibido: 13 de febrero 2026 | Aceptado: 10 de abril 2026 | Publicado: 04 de mayo 2026

Resumen

Introducción: Los sistemas de suspensión activa vehicular buscan conciliar el confort de marcha, la adherencia neumático-calzada y la estabilidad del vehículo ante perturbaciones del camino.

Objetivo: Analizar las estrategias de control aplicadas a suspensiones activas vehiculares, al considerar sus efectos sobre el confort de marcha, la estabilidad dinámica, la adherencia neumático-calzada, la robustez, el esfuerzo de control y el nivel de validación experimental.

Método: Se realizó un arevisión sistemática, basada en las directrices PRISMA 2020 mediante una búsqueda en Scopus e IEEE Xplore de estudios publicados entre 2015 y 2025. **Resultados:** Los hallazgos muestran una evolución desde controladores reactivos hacia esquemas robustos, predictivos y anticipativos apoyados en observadores, control predictivo y percepción exteroceptiva, con reducciones de hasta el 68% en la aceleración vertical. **Conclusión:** Se evidencia que no existe una estrategia universalmente superior, pues su selección depende del confort, la adherencia, el consumo energético y la viabilidad en tiempo real.

Palabras clave: Confort de marcha; Control robusto; Dinámica vehicular; Fusión sensorial; Suspensión activa.

Abstract

Introduction: Active vehicle suspension systems aim to reconcile ride comfort, tire-road adhesion, and vehicle stability in response to road disturbances. **Objective:** To analyze control strategies applied to active vehicle suspensions, considering their effects on ride comfort, dynamic stability, tire-road adhesion, robustness, control effort, and the level of experimental validation. **Method:** A systematic review was conducted following the PRISMA 2020 guidelines, based on searches conducted in Scopus and IEEE Xplore for studies published between 2015 and 2025. **Results:** The findings reveal an evolution from reactive controllers toward robust,

predictive, and anticipatory control schemes supported by observers, model predictive control, and exteroceptive sensing, with reductions of up to 68% in vertical acceleration. **Conclusion:** The evidence indicates that there is no universally superior strategy, as the selection of a control approach depends on ride comfort, tire-road adhesion, energy consumption, and real-time feasibility.

Keywords: Ride comfort; Robust control; Vehicle dynamics; Sensor fusion; Active suspension.

Introducción

A escala global, la transición hacia una movilidad eléctrica y autónoma más segura depende de los sistemas de suspensión activa y del control integrado de chasis, pilares fundamentales en la evolución automotriz. En este sentido en el ámbito académico, se ha observa una tendencia hacia tecnologías orientadas a maximizar el equilibrio entre confort de marcha y estabilidad lateral, mediante algoritmos avanzados que responden anticipadamente a las irregularidades del terreno ([Viadero-Monasterio et al., 2025](#)). Esta evolución responde a la necesidad de trascender la naturaleza reactiva de los sistemas tradicionales, donde la generación de fuerzas de compensación se activa tras detectar una desviación en el estado del vehículo.

Además, la búsqueda de la sostenibilidad y la eficiencia energética ha impulsado la aplicación de sistemas inteligentes en arquitecturas de vehículos modernos que combinan la detección predictiva con un control sólido, lo que permite una gestión óptima de los recursos computacionales y energéticos del chasis ([Li et al., 2021](#)). También las técnicas de control han evolucionado significativamente desde enfoques clásicos como el control Skyhook o el regulador cuadrático lineal hasta esquemas más robustos, incluido el control por modos deslizantes con observadores de perturbaciones que compensan las no linealidades inherentes al sistema dinámico vehicular ([Ghasemalizadeh et al., 2014](#)). Asimismo, el enfoque Ground-Hook ha sido adaptado para controladores por modos deslizantes con el fin de optimizar la adherencia neumático-calzada en condiciones adversas ([Piwowarczyk et al., 2025](#)).

De manera similar, se ha evidenciado una tendencia en la ingeniería automotriz hacia la integración de inteligencia artificial, redes neuronales y modelos difusos en el chasis. Este esfuerzo colectivo persigue un objetivo primordial: gestionar los retardos temporales, las variaciones de masa no anticipadas y los estados dinámicos indetectables por sensores mecánicos convencionales. Adicionalmente, los inerter activos sintonizados han demostrado ser componentes altamente eficaces para el aislamiento de vibraciones en estructuras inteligentes, y su aplicabilidad se ha extendido al dominio automotriz mediante la optimización robusta en el dominio de la frecuencia ([Zhao et al., 2019](#)). Estos avances reflejan una convergencia entre la teoría de control clásica y los paradigmas emergentes de aprendizaje automático.

Desde la perspectiva de la seguridad activa, las redes neuronales han demostrado ser herramientas eficaces en el control del chasis, pues mejoran la seguridad en condiciones extremas mediante la coordinación proactiva entre los movimientos longitudinales y laterales del vehículo (Li et al., 2022). Por otra parte, la regulación coordinada del deslizamiento y la dirección frontal en vehículos eléctricos con motores integrados en las ruedas ha permitido establecer restricciones dinámicas sobre la relación de deslizamiento, lo que optimiza la estabilidad en maniobras críticas (Zhou et al., 2025). Estos desarrollos evidencian la importancia de abordar el control del chasis como un sistema integrado, en el que la suspensión activa, la dirección y la tracción interactúan de manera sinérgica para garantizar la seguridad dinámica del vehículo.

En relación con las teorías asociadas al confort vehicular, los sistemas de chasis actuales exhiben una respuesta reactiva caracterizada por la omisión en la detección de irregularidades del camino hasta el impacto mecánico directo en las ruedas. Particularmente, la ingeniería automotriz ha identificado que la comodidad de los pasajeros se ve afectada principalmente en el rango de frecuencias de 2 a 8 Hz, al incluir los movimientos de cabeceo y balanceo, conforme a la norma ISO 2631-1:1997 sobre la evaluación de la exposición humana a vibraciones de cuerpo completo (Gysen et al., 2010). La complejidad de este escenario se incrementa con la llegada de los vehículos eléctricos equipados con motores integrados en las ruedas, dado que el notable incremento de la masa no suspendida puede degradar la calidad del viaje y comprometer la adherencia neumático-calzada (Crolla y Cao, 2012).

En esta línea los sistemas de suspensión integrados de vehículo completo han surgido como una respuesta técnica a la necesidad de conciliar simultáneamente el confort de marcha y la adherencia al terreno, mediante la coordinación de múltiples grados de libertad que incluyen los modos verticales, de cabeceo y de balanceo (Merah et al., 2022). Entre las variables que influyen en el desempeño de estos sistemas se destacan el perfil de la carretera, la velocidad de operación, las propiedades del actuador, la masa suspendida variable y las restricciones computacionales del bus de comunicaciones. La interacción entre estos factores determina la eficacia de la estrategia de control y su viabilidad para la implementación en tiempo real, lo que requiere un análisis integral del conflicto entre el aislamiento de vibraciones y la carga dinámica del neumático.

En el contexto regional, la adopción de controles avanzados para suspensiones activas se encuentra en una etapa temprana, especialmente en la industria automotriz latinoamericana, donde la implementación de tecnología con actuadores inteligentes representa una estrategia efectiva para reducir los efectos del terreno y mantener el equilibrio durante maniobras de vuelco brusco. La importancia de abordar este tema radica en la necesidad de sintetizar el conocimiento disperso sobre las estrategias de control más eficaces, al identificar los vacíos metodológicos que limitan la transferencia tecnológica hacia aplicaciones industriales, pues existe una carencia de estudios que

integren de manera conjunta la percepción predictiva del perfil de vía, los observadores de perturbaciones no lineales y los modelos difusos para la compensación de retardos digitales en escenarios de incertidumbre paramétrica extrema.

Finalmente, ante el escenario descrito, surge la siguiente pregunta problemática ¿de qué manera influyen las estrategias de control aplicadas a suspensiones activas vehiculares? En consecuencia, el objetivo de esta revisión consistió en analizar las estrategias de control aplicadas a suspensiones activas vehiculares, al considerar sus efectos sobre el confort de marcha, la estabilidad dinámica, la adherencia neumático-calzada, la robustez, el esfuerzo de control y el nivel de validación experimental. Este análisis proporciona una base estructurada para la selección de arquitecturas de control en el diseño de chasis inteligentes.

Método

La presente investigación corresponde a una revisión sistemática con un diseño cualitativo de síntesis narrativa orientada a la clasificación taxonómica de estrategias de control. El estudio se estructura bajo los estándares de la metodología PRISMA 2020, lo que garantiza la transparencia, la replicabilidad y el rigor científico. La revisión se delimitó al período de 2015 a 2025, con el propósito de capturar la transición tecnológica desde sistemas reactivos hacia el control predictivo basado en inteligencia artificial y fusión sensorial. El alcance comprende modelos de cuarto de carro, medio carro y carro completo, así como arquitecturas desde esquemas clásicos hasta enfoques híbridos avanzados.

Los criterios de elegibilidad se definieron para asegurar la pertinencia temática y la calidad metodológica. Los criterios de inclusión comprendieron: investigaciones empíricas sobre suspensión activa o semiactiva vehicular; algoritmos con arquitectura explícita y reproducible; métricas cuantitativas de confort o estabilidad; y validación mediante simulación, Hardware-in-the-Loop o pruebas experimentales. Los criterios de exclusión abarcaron: textos no empíricos; literatura no indexada y ponencias sin arbitraje; estudios en idiomas diferentes al español, inglés o portugués; aquellos sin acceso libre al texto completo; y descripciones conceptuales sin arquitectura explícita. Las bases de datos consultadas fueron Scopus e IEEE Xplore, seleccionadas por su cobertura especializada.

La estrategia de búsqueda se diseñó mediante cadenas booleanas optimizadas para la recuperación semántica en las bases de datos seleccionadas. En Scopus, se empleó la consulta: TITLE-ABS-KEY (("vehicle" OR "automobile") AND ("active suspension" OR "active vehicle suspension") AND ("Full-car" OR "Quarter-car" OR "Half-car" OR "Multi-axle") AND ("control strategy" OR "control algorithm" OR "sliding mode control" OR "predictive control" OR "disturbance observer" OR "preview control") AND ("robust" OR

"road preview" OR "sensor fusion" OR "perception" OR "virtual sensor")) AND PUBYEAR > 2015 AND PUBYEAR < 2025, con lo que se obtuvieron 193 documentos. En IEEE Xplore, se utilizó una consulta análoga con términos específicos de control robusto y predictivo, y se recuperaron 30 documentos. La búsqueda se realizó entre los meses de mayo y junio de 2026.

El proceso de identificación proporcionó un total de 223 registros. Una vez eliminados 28 duplicados, la suma de registros fue de 195. A continuación, 137 artículos fueron excluidos a través de la lectura del título y el resumen, quedando 58 artículos para evaluación preliminar, y de estos últimos se excluyeron 28 artículos por no cumplir contra los criterios establecidos. Finalmente, 30 artículos fueron objeto de revisión, de los cuáles todos se pudieron recuperarse en texto completo, es decir, los 34 cumplieron con los requisitos exigidos. Esta depuración rigurosa permitió mantener la coherencia temática y garantizar la representatividad de los trabajos analizados (ver Figura 1).

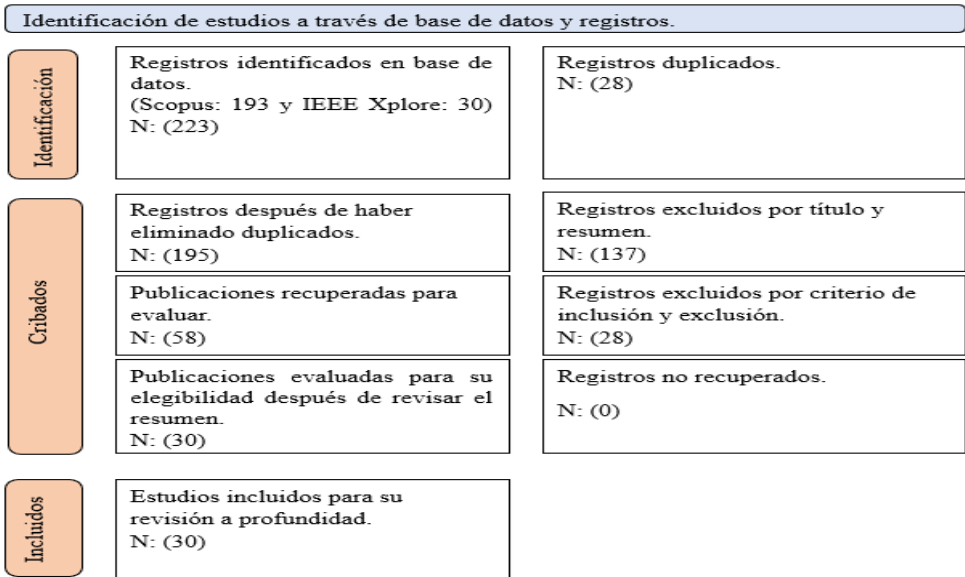


Figura 1. Diagrama de flujo para la selección de los artículos según PRISMA 2020

El presente estudio se rigió por los principios éticos de la investigación científica, y aseguró la integridad académica mediante la atribución rigurosa de las fuentes y la verificación de su accesibilidad. Al tratarse de una revisión sistemática, no requirió aprobación de comité de ética institucional, pues no involucró sujetos humanos ni datos sensibles. Se garantizó el respeto a los derechos de autor mediante la citación adecuada conforme a las normas APA de séptima edición. La transparencia metodológica se preservó mediante la documentación detallada de cada etapa, lo que permite la replicabilidad y la verificación independiente de los hallazgos.

El análisis de contenido se desarrolló mediante una categorización taxonómica de las estrategias de control, orientada a diagnosticar la aproximación bibliográfica al conflicto entre aislamiento de vibraciones y carga dinámica del neumático. Los datos heterogéneos se transformaron en información estructurada, y se organizaron según caracterización metodológica, diagnóstico técnico y aspectos específicos. Se aplicaron

herramientas de análisis bibliométrico y de tendencias temporales. La síntesis narrativa integró los hallazgos para fundamentar la clasificación propuesta, lo que validó la pertinencia del control proactivo frente a las arquitecturas reactivas.

Resultados

El presente análisis categoriza las estrategias de control robusto y las modalidades de percepción en el chasis de vehículos modernos reportadas en la literatura científica indexada. La selección final comprendió 30 estudios publicados entre 2016 y 2025, los cuales abordan desde modelos de cuarto de carro hasta configuraciones de vehículo completo, con énfasis en la gestión de la incertidumbre paramétrica, la compensación de retardos digitales y la integración de información predictiva del perfil de vía. A continuación, se presentan las tablas con la caracterización de los estudios seleccionados y los principales hallazgos técnicos reportados.

En la Tabla 1 se observa que la caracterización bibliográfica revela una distribución geográfica concentrada en Asia, con China como principal contribuyente. El enfoque metodológico predominante es cuantitativo, orientado a la validación numérica mediante MATLAB/Simulink o Hardware-in-the-Loop. Las revistas de mayor representación corresponden a IEEE Access, Sensors y publicaciones especializadas en dinámica vehicular.

Tabla 1. Descripción de los estudios seleccionados según autor, año, país y revista

No.	Autor (año)	País	Enfoque	Revista
1	Huang et al. (2025)	China	Cualitativo	Sensors
2	Li y Chen (2025)	China	Cuantitativo	Sensors
3	Wu et al. (2024)	China	Cuantitativo	Shock and Vibration
4	Kikuchi y Inaba (2024)	Japón	Mixto	SAE Int. J. Adv. Prac. Mob.
5	Srinidhi et al. (2025)	India	Cuantitativo	Automation
6	Achnib y Sename (2023)	Francia	Mixto	Control Engineering Practice
7	Guo et al. (2021)	China	Cuantitativo	Sensors
8	Bai et al. (2025)	China	Cuantitativo	IEEE Trans. Cybernetics
9	Ho et al. (2021)	Vietnam	Cuantitativo	J. Sound and Vibration
10	Pusadkar et al. (2019)	India	Cuantitativo	J. Sound and Vibration
11	Li et al. (2019)	China	Cuantitativo	Mech. Syst. Signal Proc.
12	Lin et al. (2019)	China	Cuantitativo	Asian J. Control
13	Ren et al. (2016)	China	Mixto	Vehicle System Dynamics
14	Chen et al. (2025)	China	Cualitativo	SAE Int. J. Vehicle Dynamics
15	Ferhath y Kasi (2023)	Malasia	Cualitativo	Int. J. Auto. Mech. Eng.

16	Afshar et al. (2023)	Polonia	Cuantitativo	IEEE Access
17	Zhu et al. (2022)	China	Cuantitativo	IEEE Access
18	Choi y Kim (2021)	Corea del Sur	Cuantitativo	IEEE Access
19	Cao et al. (2020)	China	Cuantitativo	IEEE Access
20	Lu et al. (2025)	China	Cuantitativo	IEEE Access
21	Luo et al. (2022)	China	Cuantitativo	IEEE Access
22	Yu et al. (2019)	Reino Unido	Mixto	IEEE Trans. Control Syst. Tech.
23	Wang et al. (2018)	China	Cuantitativo	IEEE Access
24	Dinh y Nguyen (2020)	Vietnam	Cuantitativo	IEEE Access
25	Yeneneh et al. (2024)	Etiopía	Cuantitativo	Int. J. Auto. Mech. Eng.
26	Soudani et al. (2024)	Argelia	Cuantitativo	Measurement
27	Hariharan et al. (2025)	India	Cuantitativo	Systems Science & Control
28	Samaroo et al. (2025)	Pakistán	Cuantitativo	Algorithms
29	Guo et al. (2025)	China	Cuantitativo	PLoS ONE
30	Zheng et al. (2025)	China	Cuantitativo	Measurement and Control

La síntesis de los hallazgos técnicos ilustrada en la Tabla 2 evidencia una progresión metodológica desde esquemas de control reactivo hacia arquitecturas predictivas y adaptativas. Los estudios más recientes incorporan información exteroceptiva del terreno mediante sensores LiDAR y visión binocular, mientras que las contribuciones intermedias se centran en la robustez ante incertidumbres paramétricas y retardos digitales. Las reducciones reportadas en la aceleración de la masa suspendida oscilan entre valores moderados y reducciones superiores al 60%, dependiendo del modelo vehicular, el perfil de carretera y la métrica de comparación empleada. La heterogeneidad de los resultados refleja la complejidad inherente al conflicto entre confort de marcha y adherencia neumático-calzada.

Tabla 2. Principales hallazgos y caracterización metodológica según estudios revisados

No.	Caracterización Metodológica	Diagnóstico y Resultados Técnicos
1	Carro completo 7-DOF; actuador inteligente; vehículo autónomo.	Fusión jerárquica (LiDAR, visión, GPS/IMU); conmutación de modos según carretera; reducción de aceleraciones vía HIL.
2	Medio carro 4-DOF; amortiguamiento controlable; dinámica dependiente de velocidad.	MPC-LPV con información anticipada; filtro de Kalman adaptativo; mejora del 40% en aceleración RMS.
3	Medio carro 6-DOF; actuador electromagnético; EV con motores en rueda.	H_{∞} para suprimir acoplamiento mecánico-eléctrico; previsión mediante Padé; reducción del 47–68% en aceleración vertical.

4	Carro completo; caja gris; amortiguador electrónico; autos de lujo.	Ingeniería Kansei y modelado sensorial subjetivo; optimización banda 3-6 Hz; reducción del 28% en PSD.
5	Cuarto de carro; actuador activo; EV con motor en rueda.	Control disipativo con observador no frágil; gestión de retardos variables mediante LMI; robustez ante fallas.
6	Cuarto de carro escala 1/5; amortiguador electro-reológico; semiactiva.	Filtro feedforward-preview en dominio frecuencia; rendimiento mixto L_2/L_∞ ; validación en banco INOVE.
7	Multieje 3 ejes; suspensión hidroneumática activa; vehículo rescate 6x6.	Control basado en IMU con actitud inverso; filtro paso alto anti-deriva; estabilización en terrenos no estructurados.
8	Carro completo 7-DOF; hidráulicos; incertidumbre de parámetros.	SMC integral combinado con LQR; estabilización robusta bajo variaciones paramétricas extremas.
9	Cuarto de carro 2-DOF; resortes neumáticos; masa variable.	SMC adaptativo con NDOB; reducción del 41,5% en aceleración RMS de la masa suspendida.
10	Cuarto de carro 2-DOF; actuador no ideal (histéresis/zona muerta).	LDO-SMC; supera al control nominal en reducción de aceleraciones bajo incertidumbre.
11	Cuarto de carro 2-DOF; actuador activo; no linealidades.	Modelo T-S Fuzzy para masa y retardos; control en frecuencia finita (4-8 Hz) alineado con biomecánica.
12	Cuarto de carro 2-DOF; actuador activo; incertidumbre acoplada.	Fuzzy SMC con observador PD; mitigación del efecto de oscilación de alta frecuencia.
13	Carro completo; suspensión semiactiva hidroneumática.	Observador UKF; coordinación Skyhook/Groundhook en maniobras críticas.
14	Cuarto de carro; marco conceptual; estimación de vía.	Revisión de técnicas para estimar TRFC, rugosidad y gradiente; clasifica observadores KF/EKF/UKF/SMO.
15	Cuarto de carro; marco conceptual; taxonomía.	Mapeo de estrategias desde Skyhook/LQR hasta MPC e IA para mitigar conflicto confort-estabilidad.
16	Medio carro 4-DOF; inerter activo; incertidumbre paramétrica.	Control multiobjetivo H_2/H_∞ mediante LMI; maneja incertidumbre del 14% en masa y 8% en inercia.
17	Cuarto de carro 2-DOF; amortiguador magneto-reológico.	SMC dependiente del retardo; identifica retardo crítico de 32,4 ms; estabilidad asintótica.
18	Cuarto de carro 2-DOF; actuador activo; control disipativo con retardo.	Síntesis disipativa (Q,S,R) con Lyapunov-Krasovskii; matriz de pesado libre generalizada.
19	Cuarto de carro 2-DOF; hidráulico electroservo; no linealidad.	Maestro-esclavo; H_∞ para retardos e incertidumbre; backstepping adaptativo para fluido hidráulico.
20	Cuarto de carro 2-DOF; actuador activo; robusto multiobjetivo.	Sistemas Hamiltonianos disipativos; computación simbólica para optimizar controlador H_∞ .
21	Medio carro 4-DOF; actuador activo; preservación del rendimiento.	Modelado LFT de incertidumbre; combina H_2 (confort) y H_∞ (seguridad) optimizados con algoritmos genéticos.

22	Medio carro 4-DOF; actuador activo; tolerante a fallos.	Modelo T-S Fuzzy; observador PI para estimar estados y fallas del actuador simultáneamente.
23	Cuarto de carro; suspensión de geometría variable; validación experimental.	H^∞ con modelo lineal equivalente; compensa no linealidad geométrica; penaliza ruido sensorial.
24	Carro completo 7-DOF; electro-hidráulico; control predictivo robusto.	RMPC independiente de precisión absoluta; optimización de horizonte finito; lógica difusa para no lineales.
25	Cuarto de carro 2-DOF; Macpherson no lineal; actuador saturado; retardo.	Control de saturación suave; Lyapunov-Krasovskii para retardos hasta 200 ms sin linealización.
26	Cuarto de carro; H^∞ + síntesis- μ ; balance confort-manejo.	Diseño robusto con incertidumbres estructuradas; reducción del 50% en desplazamiento de carrocería.
27	Cuarto de carro; comparación H^∞ , síntesis- μ , DDPG.	Síntesis- μ modela ruidos y degradación; DDPG mostró mayor reducción en entornos no lineales.
28	Cuarto de carro 2-DOF; comparación activa/semiactivo/pasivo.	Semiactivo: 65% de reducción RMS vs. 40% del activo; necesidad de métodos más robustos.
29	Medio carro; servo-electrohidráulico; optimización inteligente.	FOPID optimizado con algoritmo MSIBWO; mejora en seguimiento de fuerza y robustez.
30	Cuarto de carro no lineal; geometría diferencial y algoritmos genéticos.	LQR mejorado que preserva no linealidad; reducción del 22,1% en RMS de aceleración vertical.

Por otra parte, en la Tabla 3 se revela que aproximadamente el 23% de los estudios incorporan observadores de disturbios no lineales, mientras que el 17% emplea modelos difusos Takagi-Sugeno. La previsualización del perfil de vía está presente en el 20% de los estudios. La gestión explícita de la incertidumbre de masa se aborda en el 27% de las contribuciones. Las reducciones reportadas en la aceleración RMS presentan una amplia variabilidad, desde mejoras marginales del 5% hasta reducciones superiores al 65%, dependiendo del esquema de control y las condiciones de validación.

Tabla 3. Aspectos específicos de las estrategias de control robusto y predictivo

No.	Estrategia de Control	Preview	NDOB	T-S Fuzzy	Inc. Masa	Retardo Comp.	RMS Red. (%)
1	Fusión jerárquica + BP-PID	Sí	No	No	No	Sensorial	5–15
2	MPC-LPV + Kalman adapt.	Sí	No	No	No	Padé	40
3	H^∞ Preview robusto	Sí	No	No	No	Acoplo	47–68
4	Ingeniería Kansei + sensorial	No	No	No	No	No	28 (PSD)
5	Control disipativo no frágil	No	Sí	No	Sí	Variable	N/R
6	Feedforward-Preview L_2/L^∞	Sí	No	No	No	No	N/R

7	ASCS basado en IMU	No	No	No	No	No	N/R
8	SMC + LQR integral	No	No	No	Sí	No	N/R
9	SMC-NDOB neumático	No	Sí	No	Sí	No	41.5
10	LDO-SMC actuador no ideal	No	Sí	No	Sí	No	Signif.
11	Fuzzy frecuencia finita SOF	No	No	Sí	Sí	Actuador	Superior
12	Fuzzy SMC + observador PD	No	Sí	Sí	Sí	No	Signif.
13	UKF + Skyhook/Groundhook	No	No	No	No	No	N/R
14	Revisión estimación vía	—	—	—	—	—	—
15	Taxonomía de estrategias	—	—	—	—	—	—
16	H2/H ∞ inerter (LMI)	No	No	No	Sí	Restric.	N/R
17	SMC dependiente retardo	No	No	No	No	32.4 ms	N/R
18	Control disipativo LK	No	No	No	No	Variable	N/R
19	Maestro-esclavo H ∞	No	No	No	Sí	No	N/R
20	Hamiltoniano disipativo	No	No	No	No	No	N/R
21	LFT + H2/H ∞ + GA	No	No	No	No	No	Óptimo
22	T-S Fuzzy + PIO	No	No	Sí	Sí	No	N/R
23	H ∞ SAVGS geom. variable	No	No	No	No	No	N/R
24	RMPC + lógica difusa	No	No	Sí	No	Horizonte	N/R
25	Saturación suave + LK	No	No	No	No	200 ms	N/R
26	H ∞ + síntesis- μ	No	No	No	Sí	No	50
27	H ∞ vs. μ vs. DDPG	No	No	No	No	No	Máx. (DDPG)
28	Comparación activa/semi/pas.	No	No	No	No	No	65 (semi)
29	FOPID + algoritmo lobo	No	No	No	No	No	Signif.
30	LQR + geom. diferencial + GA	No	No	No	No	No	22.1

Nota. NDOB = Nonlinear Disturbance Observer; T-S = Takagi-Sugeno; MPC = Model Predictive Control; LPV = Linear Parameter Varying; LQR = Linear Quadratic Regulator; SMC = Sliding Mode Control; N/R = No Reportado.

La evidencia experimental demuestra la robustez y eficacia de la integración de visión binocular y LiDAR, articulada mediante una arquitectura de fusión jerárquica, para la implementación de un control proactivo confiable. El LiDAR garantiza la precisión del relieve a larga distancia, mientras que la visión binocular y el sensado virtual facilitan una respuesta ágil ante obstáculos discretos y fallas de actuador. Esta integración mitiga la discrepancia entre la percepción ambiental y la dinámica del chasis inteligente, como se muestra en la Figura 2.

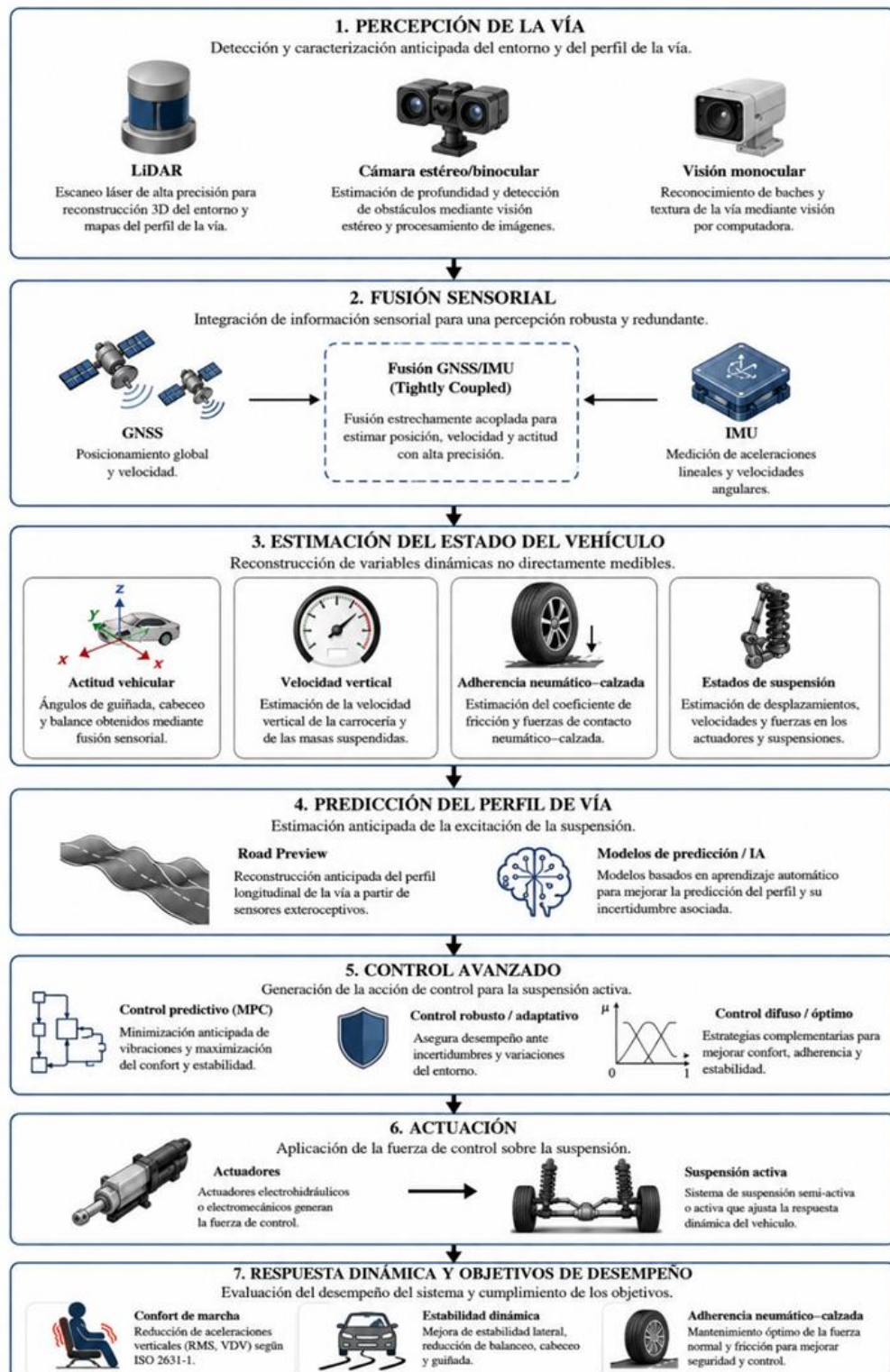


Figura 2. Tecnologías de percepción del perfil de vía para control proactivo de chasis

En síntesis, se evidenció una progresión desde estrategias de control reactivo hacia arquitecturas predictivas y adaptativas, donde predominaron enfoques cuantitativos validados numéricamente, con China como principal contribuyente. Además, las reducciones en aceleración RMS oscilaron entre 5% y más del 65%, reflejando el conflicto confort-adherencia. Asimismo, aproximadamente el 23% emplearon observadores de disturbios no lineales, 17% modelos Takagi-Sugeno, 20%

previsualización de vía y 27% gestión explícita de incertidumbre de masa. Cabe señalar que los estudios recientes integran fusión jerárquica de LiDAR y visión binocular para control proactivo confiable, mitigando la discrepancia entre percepción ambiental y dinámica del chasis.

Discusión

El confort de marcha vehicular se define como la sensación de vibración percibida por los ocupantes debido a las aceleraciones generadas en la carrocería por el desplazamiento vertical de la carretera a través del sistema de suspensión. La evaluación se rige por la norma ISO 2631-1:1997, que permite cuantificar el impacto de las vibraciones en la fatiga y el bienestar del ocupante. No obstante, la evaluación basada únicamente en métricas mecánicas presenta limitaciones, dado que minimizar la amplitud total no garantiza mayor confort percibido, pues la sensibilidad humana varía según la banda de frecuencia ([van der Sande y te Kronnie, 2024](#)). Por tanto, la biomecánica del ocupante debe integrarse en el diseño del controlador.

En esta línea, el chasis inteligente ha alcanzado una fase crítica en la que la eficacia se determina no solo por la potencia de los actuadores, sino por la capacidad predictiva del vehículo respecto al entorno. Históricamente, el desarrollo de suspensiones y dirección se ha abordado de forma aislada, lo que ha derivado en interferencias durante maniobras críticas. La transición hacia el control proactivo se logra mediante la integración de la percepción ambiental de largo alcance con algoritmos robustos para procesar información predictiva del perfil de vía ([Termous, 2020](#)). Este enfoque jerárquico representa un cambio paradigmático respecto a las arquitecturas desacopladas convencionales.

Adicionalmente, la transición reviste importancia crítica para vehículos con configuraciones complejas, en los que el exceso de masa no suspendida degrada el contacto neumático-suelo sin respuesta anticipatoria. La literatura ha demostrado que el empleo de información predictiva optimiza la fiabilidad del actuador al limitar la demanda de fuerza máxima. Esta integración permite aprovechar la sinergia entre sensores de visión y modelos dinámicos, lo que reduce la incertidumbre en la estimación del perfil de carretera ([Choudhary et al., 2023](#)). La fusión jerárquica integra datos heterogéneos para construir un repositorio predictivo unificado del entorno.

En relación con la categorización de arquitecturas de control, las configuraciones contemporáneas se clasifican en desacopladas, coordinadas, integradas y proactivas. Las desacopladas operan con controladores independientes y, aunque presentan implementación sencilla, no demuestran integración sistémica. Las coordinadas intercambian información entre subsistemas vía bus CAN, pero mantienen segregación en los algoritmos de decisión ([Zhang et al., 2017](#)). Las integradas consolidan funciones

en una unidad centralizada, lo que optimiza la distribución de rigidez de balanceo. Las proactivas utilizan esquemas predictivos o inteligencia artificial para procesar nubes de puntos LiDAR y mapas GPS/IMU.

Asimismo, la evolución cronológica de los algoritmos evidencia una transición desde esquemas reactivos hacia marcos de control proactivo adaptativo. En los estudios iniciales, la combinación del control por modos deslizantes con observadores de perturbaciones sentó las bases para compensar irregularidades del camino mediante la estimación en línea de las dinámicas desconocidas (Huang et al., 2022). Posteriormente, la literatura enfatizó la robustez ante fallos y no idealidades del hardware, lo que permitió incrementar la precisión del modelo mediante la integración de observadores lineales de perturbaciones para sistemas con actuadores no ideales.

De manera similar, los modelos difusos Takagi-Sugeno se han consolidado como una herramienta matemática fundamental en la aproximación de la dinámica vehicular no lineal. Su arquitectura descompone un sistema complejo en subsistemas lineales locales, lo que facilita la aplicación de control robusto mediante desigualdades matriciales lineales. La técnica de compensación paralela distribuida garantiza la estabilidad asintótica bajo restricciones de saturación del actuador (Lopes et al., 2021).

La tolerancia a fallos del actuador constituye un aspecto crítico que diferencia las estrategias de control robusto de las nominalmente adaptativas. Los esquemas observador-based disipativos permiten mantener el desempeño del sistema incluso ante la degradación parcial o la falla completa del actuador, garantizando la seguridad dinámica del vehículo (Pan et al., 2022). Esta característica resulta particularmente relevante en vehículos autónomos, donde la ausencia de un conductor humano que pueda intervenir ante una falla exige que el sistema de control mantenga la estabilidad en todos los escenarios operativos concebibles. La redundancia sensorial y la detección temprana de fallas se complementan con estrategias de control reconfigurable.

La coordinación entre la suspensión activa y otros subsistemas del chasis, como la dirección integral y el control longitudinal, representa una dirección de evolución hacia el control integrado de chasis. Los enfoques jerárquicos permiten descomponer el problema de control en capas de decisión que coordinan las acciones de los distintos actuadores del vehículo (Zhao et al., 2024). Esta arquitectura facilita la gestión de conflictos entre objetivos contrapuestos, como el confort de marcha y la estabilidad direccional, mediante la asignación dinámica de prioridades. La estandarización de las interfaces de comunicación entre subsistemas constituye un habilitador técnico para la implementación de estas arquitecturas coordinadas.

Adicionalmente, respecto a la evaluación de desempeño frente a controladores lineales, los esquemas difusos T-S muestran adaptabilidad superior al no presentar fallos ante variaciones paramétricas extremas. Comparados con el control por modos deslizantes, reducen el fenómeno de oscilación de alta frecuencia, lo que optimiza el confort en el

rango de 4 a 8 Hz conforme a la norma ISO 2631 (Zhang y Zhao, 2017). Las limitaciones del presente estudio incluyen la restricción a dos bases de datos y la heterogeneidad metodológica, lo que dificulta la síntesis cuantitativa.

Finalmente, la revisión identifica direcciones para futuras investigaciones: la integración de aprendizaje profundo por refuerzo con control robusto clásico, la exploración de fusión sensorial distribuida basada en computación en el borde, y el desarrollo de protocolos de validación experimental estandarizados. Se requiere modelar la interacción conductor-vehículo-entorno, al incorporar variables biomecánicas en el lazo de control (Yang et al., 2023). Estas líneas consolidarán el chasis inteligente como un sistema ciberfísico robusto para la movilidad autónoma.

Conclusiones

La presente revisión permitió clasificar las estrategias de control aplicadas a suspensiones activas vehiculares en cuatro categorías principales: arquitecturas reactivas nominales, esquemas robustos basados en observadores, control predictivo con previsualización del perfil de vía y arquitecturas proactivas con fusión sensorial jerárquica. La evidencia sintetizada confirmó que la transición desde sistemas reactivos hacia esquemas proactivos, fundamentada en la integración de LiDAR, visión binocular y GPS/IMU, permitió reducir la aceleración de la masa suspendida en más del 10% y optimizar la estabilidad lateral mediante el control integrado de suspensión activa y dirección.

Además, se determinó que el desarrollo hacia chasis inteligentes dependió de superar la fragmentación perceptual mediante la fusión jerárquica de múltiples sensores, lo que requirió la integración de tecnologías exteroceptivas para lograr la precisión en la estimación del perfil de la carretera. Asimismo, se sintetizó un esquema de control robusto basado en la sinergia entre previsualización, observadores de disturbios no lineales y modelos difusos Takagi-Sugeno, capaz de compensar simultáneamente incertidumbres de masa y retardos de comunicación de 5 a 20 ms.

Por otra parte, se estableció que un excelente confort de conducción no se consiguió únicamente mediante la minimización del valor RMS global, sino que requirió la optimización de los indicadores sensoriales en las bandas de frecuencia críticas para la sensibilidad humana. Esta conexión tecnosensorial formó la base de un diseño de chasis autónomo orientado no solo a garantizar la seguridad dinámica, sino también a optimizar la respuesta biomecánica del pasajero.

Por último, se recomendó que futuras investigaciones priorizaran la validación experimental de las arquitecturas proactivas mediante protocolos estandarizados, así como la integración de técnicas de aprendizaje profundo por refuerzo con esquemas de control robusto clásico. Adicionalmente, se propuso el desarrollo de plataformas de

Hardware-in-the-Loop que permitieran evaluar el desempeño de las estrategias bajo condiciones operativas reales, lo que facilitaría la transferencia tecnológica hacia aplicaciones industriales en el contexto de la movilidad autónoma y electrificada.

Acerca de

Contribución de los autores: Los autores contribuyeron a la conceptualización del estudio, al desarrollo metodológico, al análisis e interpretación de los datos, a la redacción del manuscrito y a la revisión crítica de su contenido intelectual. Todos los autores aprobaron la versión final para su publicación.

Financiamiento: Los autores declaran que no recibieron financiamiento para esta investigación.

Conflicto de interés: Los autores declaran no tener conflicto de intereses para la publicación del presente artículo científico.

Certificación ética: El protocolo del presente estudio fue sometido a revisión y aprobado por el Comité de Ética en Investigación de la Universidad, en cumplimiento de los principios éticos y normativas institucionales aplicables.

Cómo citar: Cisneros Cadena, C. A., Peralta Zurita, D. B., & Molina Osejos, J. V. (2026). Estrategias de control para suspensiones activas vehiculares: revisión sistemática. *Ingeniería y sus Alcances. Revista de Investigación*, 10(27), 1–19. <https://doi.org/10.33996/revistaingenieria.v10i27.143>

Referencias

- Achnib, A., & Sename, O. (2023). Discrete-time multi-model preview control: Application to a real semi-active automotive suspension system. *Control Engineering Practice*, 137, 105553. <https://doi.org/10.1016/j.conengprac.2023.105553>
- Afshar, K. K., Korzeniowski, R., & Konieczny, J. (2023). Constrained dynamic output-feedback robust H_∞ control of active inerter-based half-car suspension system with parameter uncertainties. *IEEE Access*, 11, 46051–46072. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3272328>
- Bai, M., Wang, J., & Sun, W. (2025). Coupled control of preview active suspension and longitudinal dynamics for autonomous vehicle. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, 55(7), 4656–4669. <https://doi.org/10.1109/TSMC.2025.3552829>
- Cao, Z., Zhao, W., Hou, X., & Chen, Z. (2020). Multi-objective robust control for vehicle active suspension systems via parameterized controller. *IEEE Access*, 8, 7455–7465. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2963359>
- Chen, Z., Duan, Y., Wu, J., & Zhang, Y. (2025). A comprehensive review of vehicle and road condition estimation techniques. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 9(2), 253–283. <https://doi.org/10.4271/10-09-02-0014>

- Choi, H. D., & Kim, S. K. (2021). Delay-dependent state-feedback dissipative control for suspension systems with constraints using a generalized free-weighting-matrix method. *IEEE Access*, 9, 145573–145582. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3123363>
- Choudhary, A., Fatima, S., & Panigrahi, B. K. (2023). State-of-the-art technologies in fault diagnosis of electric vehicles: A component-based review. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 9(2), 2324–2347. <https://doi.org/10.1109/TTE.2022.3209166>
- Crolla, D. A., & Cao, D. (2012). The impact of hybrid and electric powertrains on vehicle dynamics, control systems and energy regeneration. *Vehicle System Dynamics*, 50(Suppl. 1), 95–109. <https://doi.org/10.1080/00423114.2012.676651>
- Dinh, H. T., & Nguyen, T. G. (2020). Saturated feedback control to improve ride comfort for uncertain nonlinear Macpherson active suspension system with input delay. *IEEE Access*, 8, 129136–129145. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3008875>
- Ferhath, A. A., & Kasi, K. (2023). A review on various control strategies and algorithms in vehicle suspension systems. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 20(3), 10720–10735. <https://doi.org/10.15282/ijame.20.3.2023.14.0828>
- Ghasemalizadeh, O., Taheri, S., Singh, A., & Goryca, J. (2014). *Semi-active suspension control using modern methodology: A comprehensive comparison study*. 2014 Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium, Novi, MI, United States. <https://doi.org/10.4271/2024-01-3481>
- Guo, Q., Wang, M., Liu, R., Chen, Y., Wang, S., & Wang, H. (2025). Dynamic response force control of electrohydraulic servo actuator of active suspension based on intelligent optimization algorithm. *PLOS ONE*, 20(6), e0323066. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0323066>
- Guo, Q., Zhao, D., Zhao, X., Li, Z., & Shi, X. (2021). Active suspension control strategy of multi-axle emergency rescue vehicle based on inertial measurement unit. *Sensors*, 21(20), 6877. <https://doi.org/10.3390/s21206877>
- Gysen, B. L. J., Paulides, J. J. H., Janssen, J. L. G., & Lomonova, E. A. (2010). Active electromagnetic suspension system for improved vehicle dynamics. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 59(3), 1156–1163. <https://doi.org/10.1109/TVT.2009.2038706>
- Hariharan, A., Rajeswara Rao, K. V. S., Hruthik, K. K., Patil, A. S., Krishna, V., Kinange, S., & Yadav, A. (2025). Simulation-based comparison of robust control and deep reinforcement learning control techniques for active suspension systems. *Systems Science & Control Engineering*, 13(1), 2600770. <https://doi.org/10.1080/21642583.2025.2600770>
- Ho, C. M., Tran, D. T., & Ahn, K. K. (2021). Adaptive sliding mode control based nonlinear disturbance observer for active suspension with pneumatic spring. *Journal of Sound and Vibration*, 509, 116241. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116241>

- Huang, C., Liu, Y., Sun, X., & Wang, Y. (2025). Intelligent active suspension control method based on hierarchical multi-sensor perception fusion. *Sensors*, 25(15), 4723. <https://doi.org/10.3390/s25154723>
- Huang, Y., Wu, J., Na, J., Han, S., & Gao, G. (2022). Unknown system dynamics estimator for active vehicle suspension control systems with time-varying delay. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(8), 8504–8514. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3063225>
- Kikuchi, H., & Inaba, K. (2024). Evaluation of a design support tool incorporating sensory performance model of ride comfort for conceptual design of controlled suspensions. *SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility*, 7(1), 500–521. <https://doi.org/10.4271/2024-01-2292>
- Li, C., Xie, Y. F., Wang, G., Zeng, X. F., & Jing, H. (2021). Lateral stability regulation of intelligent electric vehicle based on model predictive control. *Journal of Intelligent and Connected Vehicles*, 4(3), 104–114. <https://doi.org/10.1108/JICV-03-2021-0005>
- Li, Q., & Chen, Z. (2025). Vehicle active suspension control considering parameter uncertainty and velocity variation. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 44(2), 1200–1219. <https://doi.org/10.1177/14613484241305865>
- Li, W., Xie, Z., Zhao, J., Wong, P. K., & Li, P. (2019). Fuzzy finite-frequency output feedback control for nonlinear active suspension systems with time delay and output constraints. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 132, 315–334. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.06.018>
- Li, Z., Chen, H., Liu, H., Wang, P., & Gong, X. (2022). Integrated longitudinal and lateral vehicle stability control for extreme conditions with safety dynamic requirements analysis. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(10), 19285–19298. <https://doi.org/10.1109/TITS.2022.3152485>
- Lin, B., Su, X., & Li, X. (2019). Fuzzy sliding mode control for active suspension system with proportional differential sliding mode observer. *Asian Journal of Control*, 21(1), 264–276. <https://doi.org/10.1002/asjc.1882>
- Lopes, A. N. D., Guelton, K., Arcese, L., & Leite, V. J. S. (2021). Local sampled-data controller design for T-S fuzzy systems with saturated actuators. *IEEE Control Systems Letters*, 5(4), 1169–1174. <https://doi.org/10.1109/LCSYS.2020.3019215>
- Lu, J., Xu, Z., Wang, R., & Wan, C. (2025). Optimal performance-preserving control of active suspension considering parameter uncertainty and genetic algorithm optimization. *IEEE Access*, 13, 157352–157364. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3606564>
- Luo, J., Pang, H., Wang, M., & Yao, R. (2022). PI observer-based fault-tolerant tracking controller for automobile active suspensions. *IEEE Access*, 10, 47203–47218. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3171580>
- Merah, A., Hartani, K., Yazid, N. E. H., & Mohammed Chikouche, T. (2022). New integrated full vehicle suspension system for improvements in vehicle ride comfort and road holding. *SAE International Journal of Vehicle Dynamics, Stability, and NVH*, 6(3), 267–281. <https://doi.org/10.4271/10-06-03-0018>

- Pan, F., Luo, J., & Wu, W. (2022). Active disturbance rejection control of voice coil motor active suspension based on displacement feedback. *Actuators*, 11(12), 351. <https://doi.org/10.3390/act11120351>
- Piowarczyk, M., Sibiela, M., & Konieczny, J. (2025). *Ground-hook approach for sliding mode controller*. 2025 26th International Carpathian Control Conference (ICCC), 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICCC65605.2025.11022893>
- Pusadkar, U. S., Chaudhari, S. D., Shendge, P. D., & Phadke, S. B. (2019). Linear disturbance observer based sliding mode control for active suspension systems with non-ideal actuator. *Journal of Sound and Vibration*, 442, 428–444. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2018.11.003>
- Ren, H., Chen, S., Zhao, Y., Liu, G., & Yang, L. (2016). State observer-based sliding mode control for semi-active hydro-pneumatic suspension. *Vehicle System Dynamics*, 54(2), 168–190. <https://doi.org/10.1080/00423114.2015.1122818>
- Samaroo, K., Awan, A. W., Marimuthu, S., Iqbal, M. N., Daniel, K., & Shabbir, N. (2025). Performance investigation of active, semi-active and passive suspension using quarter car model. *Algorithms*, 18(2), 100. <https://doi.org/10.3390/a18020100>
- Soudani, M. S., Aouiche, A., Ghanai, M., & Chafaa, K. (2024). Advanced active suspension control: A three-input fuzzy logic approach with jerk feedback for enhanced performance and robustness. *Measurement*, 229, 114326. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114326>
- Srinidhi, A., Raja, R., Alzabut, J., Vimal Kumar, S., & Niezabitowski, M. (2025). Non-fragile observer-based dissipative control of active suspensions for in-wheel drive EVs with input delays and faults. *Automation*, 6(3), 28. <https://doi.org/10.3390/automation6030028>
- Termous, H. (2020). *Hierarchical approach for the global chassis control of an electric vehicle* [Doctoral dissertation, University of Bordeaux]. <https://theses.hal.science/tel-02977884>
- van der Sande, T., & te Kronnie, N. (2024). Vertical dynamics control using active tires and preview. In G. Mastinu, F. Braghin, F. Cheli, M. Corno, & S. M. Savaresi (Eds.), *16th International Symposium on Advanced Vehicle Control: AVEC 2024* (pp. 221–227). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70392-8_32
- Viadero-Monasterio, F., Meléndez-Useros, M., Jiménez-Salas, M., Gutiérrez-Moizant, R. A., García-Pozuelo Ramos, D., López Boada, M. J., & López Boada, B. (2025). Mejora de la seguridad y el confort en vehículos autónomos mediante control combinado de seguimiento de trayectoria y balanceo. *Anales de Ingeniería Mecánica*, 1(24). <https://doi.org/10.63450/aim.1.124.2025>
- Wang, D., Zhao, D., Gong, M., & Yang, B. (2018). Research on robust model predictive control for electro-hydraulic servo active suspension systems. *IEEE Access*, 6, 3231–3240. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2787663>
- Wu, H., Jiang, Y., Guo, D., Huang, J., & Huang, Q. (2024). Robust preview control for half-vehicle active suspension system of hub-driven electric vehicles with coupling effects. *Shock and Vibration*, 2024(1), 9904307. <https://doi.org/10.1155/2024/9904307>

- Yang, H., Qin, Y., Xiang, C., Bai, W., & Xu, B. (2023). Active suspension robust preview control by considering actuator delay. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 8(9), 4263–4274. <https://doi.org/10.1109/TIV.2023.3280599>
- Yeneneh, K., Mamo, T., Walle, M., & Birhanu, B. (2024). Robust H^∞ control design for improving handling and ride comfort in semi-active suspension systems. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering*, 21(3), 11542–11553. <https://doi.org/10.15282/ijame.21.3.2024.7.0890>
- Yu, M., Arana, C., Evangelou, S. A., & Dini, D. (2019). Quarter-car experimental study for series active variable geometry suspension. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 27(2), 743–759. <https://doi.org/10.1109/TCST.2017.2772912>
- Zhang, J., Yao, H., & Rizzoni, G. (2017). Fault diagnosis for electric drive systems of electrified vehicles based on structural analysis. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 66(2), 1027–1039. <https://doi.org/10.1109/TVT.2016.2556691>
- Zhang, N., & Zhao, Q. (2017). Fuzzy sliding mode controller design for semi-active seat suspension with neuro-inverse dynamics approximation for MR damper. *Journal of Vibroengineering*, 19(5), 3488–3511. <https://doi.org/10.21595/jve.2017.17654>
- Zhao, D., Gong, M., Zhao, D., Liu, W., & Chen, W. (2024). Active suspension and steering system control of emergency rescue vehicle based on sliding mode dual robust coordination control. *Advances in Mechanical Engineering*, 16(6). <https://doi.org/10.1177/16878132241259720>
- Zhao, G., Raze, G., Paknejad, A., Deraemaeker, A., Kerschen, G., & Collette, C. (2019). Active tuned inerter-damper for smart structures and its $\mathcal{H}^\infty$ optimisation. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 129, 470–478. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.04.044>
- Zheng, H., Xiong, H., Huang, Z., & Zhao, D. (2025). Research on LQR control of nonlinear active suspension cooperatively optimized by differential geometry and genetic algorithms. *Measurement and Control*, 1–12. <https://doi.org/10.1177/00202940251384542>
- Zhou, Z., Shen, W., Xu, F., & Yang, R. (2025). Coordinated control of acceleration slip regulation and active front steering for in-wheel motor driven electric vehicle based on dynamic slip ratio constraint. *PLOS ONE*, 20(10), e0334519. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0334519>
- Zhu, M., Lv, G., Zhang, C., Jiang, J., & Wang, H. (2022). Delay-dependent sliding mode variable structure control of vehicle magneto-rheological semi-active suspension. *IEEE Access*, 10, 51128–51141. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3173605>



Este artículo está bajo la licencia Creative Commons Atribución 4.0 Internacional (CC BY 4.0).