

# Caracterización de los parámetros mecánicos, modelización y control de la estabilidad dinámica en carretera de vehículos industriales pesados

Guillermo Alcalde Fernández, Emilio Larrodé Pellicer, Fernando Pascual Andreu

Grupo de Investigación *Smart and Sustainable Logistics & Supply Chains* (SSLSC)

Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A)

Universidad de Zaragoza, Mariano Esquillor s/n, 50018, Zaragoza, Spain.

Tel. +34-976762707, e-mail: [galf@unizar.es](mailto:galf@unizar.es)

## Resumen

La estabilidad dinámica en carretera de los vehículos industriales pesados es crucial para la prevención de accidentes de tráfico. Debido al gran número de variables que afectan a este fenómeno, se plantea el desarrollo de un modelo mecánico multicuerpo y la posterior identificación de estrategias de control activo de estabilidad.

## Introducción

Los vehículos industriales pesados articulados presentan particularidades dinámicas que los distinguen de la mayoría de los vehículos de carretera. Su configuración estructural, formada por una unidad tractora y uno o varios remolques articulados, introduce grados de libertad adicionales respecto al comportamiento de un sólido rígido convencional, lo que incrementa la complejidad de su respuesta dinámica. A ello se suma su elevada relación entre superficie lateral expuesta y peso total, así como su relativamente bajo coeficiente de penetración aerodinámica, factores que los hacen especialmente sensibles a perturbaciones externas como el viento lateral. Asimismo, variables operativas como la distribución de carga en el conjunto y la velocidad de circulación o características geométricas de la infraestructura como curvas o pendientes pueden generar efectos relevantes sobre la estabilidad y la maniobrabilidad de los vehículos.

La interacción entre estos factores puede comprometer la estabilidad dinámica del conjunto, particularmente en condiciones de circulación a alta velocidad propias del transporte por carretera. En situaciones desfavorables, estas perturbaciones pueden provocar pérdidas de control o incluso el vuelco del vehículo, con las consiguientes implicaciones para la seguridad vial. Por este motivo, la comprensión y modelización de estos fenómenos constituye un objetivo de gran relevancia desde el

punto de vista de la ingeniería del transporte. Diversos estudios recientes han puesto de manifiesto que los enfoques tradicionales basados en modelos simplificados, como los modelos de masa puntual utilizados en el diseño geométrico de carreteras, resultan insuficientes para describir adecuadamente el comportamiento real de los vehículos pesados en condiciones complejas. En consecuencia, la investigación reciente ha evolucionado hacia el uso de simulaciones dinámicas avanzadas, modelos aerodinámicos computacionales y métodos estadísticos aplicados al análisis de la seguridad vial.

En este contexto, distintos trabajos han analizado el efecto combinado de variables ambientales, operativas y geométricas sobre la estabilidad vehicular. Estudios basados en simulación dinámica han mostrado la influencia del viento lateral, la velocidad de operación y el radio de curva en la propensión al vuelco de camiones articulados [1]. De forma complementaria, se han llevado a cabo investigaciones basadas en dinámica de fluidos computacional analizando la interacción aerodinámica entre vehículos durante maniobras de adelantamiento [2] o evaluando la eficacia de medidas de gestión de velocidad en tramos descendentes y curvos mediante métodos de inferencia causal aplicados a datos reales de tráfico [3]. En conjunto, estos estudios evidencian la necesidad de enfoques integrados que permitan considerar simultáneamente la dinámica del vehículo, los efectos aerodinámicos y las características de la infraestructura.

## Objetivos generales

La finalidad de la presente investigación es desarrollar un modelo mecánico capaz de representar el comportamiento dinámico de vehículos industriales pesados articulados en condiciones de circulación por carretera, considerando como variables de entrada los parámetros anteriormente descritos. A partir de este modelo, se pretende

identificar estrategias de actuación sobre las variables controlables del vehículo con el fin de mantener su estado dinámico dentro de los márgenes de seguridad establecidos.

Los resultados esperados contribuirán a mejorar la comprensión del comportamiento dinámico de los vehículos industriales pesados en condiciones adversas y a facilitar el desarrollo de herramientas de predicción y control orientadas a incrementar la seguridad vial. Asimismo, podrían abrir la puerta al diseño de infraestructuras más seguras y al perfeccionamiento de sistemas avanzados de asistencia a la conducción aplicados al transporte pesado.

## Metodología

La metodología propuesta se estructura en varias fases. En primer lugar, se realizará una revisión del estado del arte con el fin de identificar y caracterizar los parámetros mecánicos, aerodinámicos y geométricos que influyen de forma significativa en la estabilidad de los vehículos pesados. Entre los factores externos se considerarán principalmente la velocidad y dirección del viento lateral y la geometría de la vía, incluyendo radio de curva, pendiente longitudinal y peralte. Entre las variables propias del sistema se analizarán el peso total del vehículo, la distribución de la carga y la velocidad de operación.

Posteriormente se desarrollará un modelo dinámico del vehículo basado en una representación mecánica multicuerpo que permita capturar los grados de libertad asociados a las articulaciones entre tractor y remolque. Este tipo de representación es compatible con la gran mayoría de programas de cálculo mecánico en vehículos. El modelo integrará las ecuaciones de movimiento del sistema con representaciones simplificadas de las fuerzas aerodinámicas y de las fuerzas de contacto entre neumático y pavimento. A partir de esta formulación, se identificarán las variables sobre las que es posible actuar directamente y que han demostrado ser relevantes en estrategias de control activo de estabilidad lateral, como la posición del pedal del acelerador, el ángulo de dirección y los parámetros del sistema de suspensión [4], configurando un posible bucle de control orientado a mantener la estabilidad dinámica del conjunto.

Finalmente, el modelo de análisis desarrollado será validado mediante una combinación de simulaciones computacionales en los programas TruckSim y Ansys Fluent o similares, de modelización mecánica

de camiones y cálculo fluidodinámico respectivamente, y ensayos experimentales con vehículos equipados con sensores de viento. Esta validación permitirá contrastar las predicciones del modelo con datos obtenidos en condiciones reales de circulación. En cuanto al sistema de control, se prevé su verificación computacional mediante la implementación en el entorno de simulación MATLAB – Simulink así como el estudio empírico de la actuación sobre las variables controlables en condiciones de circulación. Se contempla el uso de otras herramientas de cálculo y simulación que pudieran resultar relevantes para la investigación, así como de otras verificaciones experimentales en condiciones de laboratorio o de circulación real.

## Conclusiones

Las aportaciones que se busca obtener son el desarrollo y la implementación de los modelos de análisis mecánico y de control de la estabilidad dinámica en carretera de vehículos industriales pesados así como el estudio de su aplicación real a la conducción extraurbana. Se pretende que los resultados de la investigación se traduzcan en una mejora de la seguridad vial y en un aumento de la fiabilidad del transporte pesado de mercancías, al igual que en otras consecuencias derivadas como el desarrollo de sistemas avanzados de asistencia a la conducción y herramientas predictivas de seguridad o el diseño de infraestructuras más seguras para estos vehículos.

## Referencias

- [1]. ALREJJAL, A., y KSAIBATI, K. Impact of crosswinds and truck weight on rollover propensity when negotiating combined curves. *International Journal of Transportation Science and Technology*. 2022, 12(1), 86-102.
- [2]. ALIC, D., MATIJOŠIUS, J., y KILIKEVIČIUS, A. Numerical modelling of the crosswind influence on vehicle aerodynamics in highway traffic conditions. *Facta Universitatis, Series: Mechanical Engineering*. 2025, 23(1), 065-077.
- [3]. AZATI, Y., WANG, X., YANG, X., ZAIDI, S. Z., y QUDDUS, M. Evaluation of the safety improvement effects and adaptability of speed limit measures on downhill curved sections of mountainous freeways. *Accident Analysis and Prevention*. 2026, 228, 108416.
- [4]. ZHOU, Q., QIU, Y., y HE, Y. Lateral stability control of truck and centre-axle-trailer combinations under crosswind disturbances. *International Journal of Heavy Vehicle Systems*. 2024, 31(3), 348-370.