

Edición especial 25 años del doctorado en ingeniería

Implementación de pruebas técnicas para la estimación de centro de gravedad, rigidez y confort en vehículos de pasajeros (parte 1)

Implementation of technical tests for the estimation of center of mass, stiffness, and comfort in passenger vehicles (part 1)

Cómo citar: Collazos-Burbano. D.A., Ospina, J.F., Ealo, J., Implementación de pruebas técnicas para la estimación de centro de gravedad, rigidez y confort en vehículos de pasajeros. (parte 1) Ingeniería y Competitividad, 2023, 25(suplemento), e- 21113139. doi: 10.25100/iyv25iSuplemento13139

David A. Collazos-Burbano^{2,3}; Jhon F. Pazos Ospina^{1,2,*}; Joao L. Ealo^{1,2}

¹ Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

² Grupo de Inovação em Instrumentação Médica e Ultrassom, GIMUS, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto 14040-901, Brasil.

³ Centro de Investigación e Innovación en Bioinformática y Fotónica, Universidad del Valle, Cali, Colombia.

Abstract

Este artículo presenta la implementación de pruebas técnicas para evaluar el comportamiento de vehículos de pasajeros categoría M1, en particular, la medición del centro de gravedad, la rigidez y el confort. Los desarrollos experimentales realizados se ajustan a las normas ISO 10392 e ISO 2631, así como a la metodología propuesta por la SAE para medir rigidez a flexión y a torsión. Como vehículo de prueba se utilizó el JAC E10X, vehículo eléctrico comercial tipo hatchback (cero kilómetros) que se encuentra entre los más vendidos en Colombia durante 2023. Se encontró que el centro de gravedad de este automóvil está desplazado hacia el copiloto y más cerca del eje delantero, no obstante, su altura se encuentra dentro del rango medido para otros vehículos de su categoría. La rigidez obtenida se encuentra dentro de los rangos comúnmente aceptados en la industria, no obstante, se observó que la presencia de las baterías en el piso del vehículo juega un papel importante en la medición de este parámetro. El análisis de confort fue realizado en dos escenarios: en vías con y sin pavimento. Para ambos casos, el vehículo se tipifica en la categoría de "algo incómodo" según la norma ISO 2631, lo cual es un dato importante considerando las condiciones de las carreteras en países en vía de desarrollo, como Colombia, y que se trata de un vehículo comercial nuevo. Además de proveer una infraestructura física que fortalece la industria automotriz en el Valle del Cauca.

Palabras clave: Centro de Gravedad, Confort, ISO 10392, ISO 2631, Rigidez global estática, Vehículo Eléctrico, Retrofit.

Resumen

This paper presents the implementation of technical tests to assess the behavior of M1 category passenger vehicles, specifically focusing on the measurement of the center of gravity, global stiffness, and comfort. The experimental procedures conducted adhere to the ISO 10392 and ISO 2631 standards, as well as the methodology established by SAE for flexural and torsional stiffness measurements. The JAC E10X car, a commercial electric hatchback that ranks among the top sellers in Colombia in 2023, was used as the test vehicle. It was found that the center of gravity of this car is displaced towards the passenger side and closer to the front axis. Nevertheless, its height falls within the measured range for other vehicles in its category. The obtained stiffness falls within the commonly accepted ranges in the industry. However, we observed that the presence of the battery package on the vehicle's floor plays an important role in measuring this parameter. The comfort analysis was carried out in two scenarios: on roads with and without pavement. In both cases, the vehicle was categorized as "somewhat uncomfortable" according to the ISO 2631 standard. This finding holds significance considering the road conditions in developing countries like Colombia and the fact that the vehicle under study is brand new. In addition to providing infrastructure that bolsters the automotive industry in Valle del Cauca.

Keywords: Center of Gravity, Comfort, Electrical Vehicle, ISO 10392, ISO 2631, Stiffness, Retrofitting.



Introducción

En la industria automotriz, la optimización del confort vehicular es un objetivo primordial para garantizar una experiencia de conducción placentera y segura. El centro de gravedad (CdG) y la rigidez de un vehículo son dos factores fundamentales que influyen en el comportamiento dinámico, así como en el confort de los ocupantes. El CdG determina la estabilidad y la capacidad de respuesta del vehículo, mientras que la rigidez del chasis juega un papel crucial en el soporte estructural, la absorción de vibraciones y la reducción del ruido. Existe una compleja interacción entre estos factores y el confort percibido por los ocupantes, especialmente en carreteras poco cuidadas o en sitios donde las autopistas no cumplen con normas de calidad. Este es un punto de mucha importancia para usuarios de países en vía de desarrollo, como Colombia, donde frecuentemente los vehículos sufren un deterioro acelerado por las condiciones de las vías.

Existen diversas formas de determinar el CdG de un vehículo, tales como los métodos analíticos (los cuales emplean la geometría y la distribución de masas del vehículo), la simulación asistida por computadora (empleando técnicas de elementos finitos y/o aproximaciones semi-analíticas), y las técnicas experimentales (1)–(4). Para medir las tres coordenadas espaciales experimentalmente, el sector automotriz utiliza frecuentemente el método de transferencia o distribución de pesos sobre los ejes delantero y trasero (5). El marco normativo al respecto se encuentra en la norma técnica colombiana NTC 3991:1996 (6) y en su equivalente internacional la ISO 10392:2011 (7). Estas normas establecen los requerimientos del banco de pruebas y la metodología de medición ya sea empleando básculas o celdas de carga. Ambas aproximaciones son igualmente efectivas y la selección depende de la versatilidad que persiga el laboratorio de diagnóstico. En este trabajo, se ha seleccionado la opción de las celdas de carga debido a que permite tener control de todos los aspectos de la adquisición, y brinda la posibilidad extender la capacidad instalada a otros tipos de vehículos.

Por su parte, los métodos para la evaluación de rigidez en vehículos, tanto a flexión como a torsión, pueden ser de tipo analítico, numérico (elementos finitos o aplicaciones CAE – Computer Aided Engineering), y/o experimental (8). Los más empleados son los métodos CAE para la determinación de la rigidez global, sobre todo en las etapas de desarrollo donde se conoce la geometría de la carrocería y del chasis (9), (10). Cabe mencionar que este tipo de análisis siempre se acompaña de datos experimentales para validar los modelos implementados. Desde el punto de vista experimental, los ensayos estáticos se han convertido en un referente (8), (11). Aunque se ha buscado estandarizar la técnica de prueba de rigidez, su aplicación actual se percibe como semi estandarizada debido a la flexibilidad que cada casa automotriz tiene para adaptar el procedimiento según sus propios criterios. A pesar de que los ensayos mantienen cierta uniformidad, la introducción de detalles específicos por parte de los fabricantes genera variaciones en la metodología de las pruebas y, en consecuencia, en la interpretación de los resultados. Este escenario plantea desafíos significativos, como la dificultad para establecer una base de datos estandarizada que permita una comparación precisa de resultados y el riesgo de percepciones sesgadas sobre el rendimiento de los vehículos. En este contexto, iniciativas como las propuestas por la Sociedad de Ingenieros Automotrices de Estados Unidos (SAE) y el Instituto de Ingeniería Automotriz de Alemania (IKA) buscan avanzar hacia una mayor estandarización del método (9), (12). La SAE propone una metodología de medición de la rigidez torsional en carrocerías en blanco, mientras el IKA propone un estudio sobre la relevancia de la rigidez de los vehículos cuando colisionan y su respuesta en función de los componentes de la carrocería.

Además del CdG y la rigidez del chasis, que forman parte esencial de la seguridad y la integridad de los pasajeros del vehículo (13), resulta necesario estudiar los diferentes fenómenos asociados con el ruido y la vibración dado que afectan el confort percibido por los usuarios (14). En particular, las vibraciones pueden afectar física y psicológicamente a los pasajeros, y por lo tanto alterar la sensación de satisfacción percibida por estos durante el viaje (15)–(17). Las consecuencias sobre el bienestar de los usuarios dependen de la magnitud y frecuencia de las vibraciones, pudiendo



derivar en diversas afecciones, que abarcan desde dolencias en la zona lumbar o afectaciones en la columna vertebral hasta trastornos temporales de algunas habilidades para realizar actividades cotidianas (15), (18)–(21). Es importante destacar que las afecciones lumbares y de columna en vehículos no deben atribuirse exclusivamente a las vibraciones. Además, otros factores cruciales a considerar son el diseño ergonómico, la elección de materiales y la estabilidad dinámica del vehículo, los cuales desempeñan roles fundamentales. Una forma de estudiar el confort consiste en realizar ensayos asistidos por computadora (22)–(24). No obstante, esta alternativa asume que el vehículo se comporta idealmente, lo cual frecuentemente se aleja de la realidad pues no incluye los efectos de las carreteras, la falta de mantenimiento y las modificaciones físicas sobre el automóvil. La mejor alternativa es observar experimentalmente la respuesta vibratoria del automóvil en condiciones de operación real (25)–(28). Para esto, se cuenta con la norma ISO 2631-1:2011 que propone una metodología para el estudio de las vibraciones de cuerpo completo (29).

A nivel nacional, hasta donde consta a los autores, este aspecto no ha sido abordado para vehículos de uso personal por fuera de las pruebas realizadas por centros de diagnóstico especializados. Tampoco se dispone de laboratorios independientes que permitan una caracterización rápida y directa de aspectos claves del automóvil tales como el CdG, la rigidez del chasis o el confort de los pasajeros. Además, no se conoce de iniciativas que conduzcan hacia una metodología que permita valorar el deterioro de los automóviles como función del tiempo de uso sobre carreteras reales. En consecuencia, la realización de este trabajo establece una infraestructura para la realización de ensayos estandarizados, con carácter independiente, que permite a diferentes usuarios, especializados o no, la determinación de estas características. Los resultados experimentales mostrados fueron obtenidos tomando como vehículo de prueba el modelo JAC e10x, uno de los vehículos eléctricos más vendidos en Colombia durante el 2023, recientemente calificado con 0 estrellas Latin NCAP (30) y del cual no se cuenta con información técnica relacionada con los resultados experimentales incluidos en este trabajo. La pertinencia de la infraestructura implementada se refuerza dada la creciente presencia en el parque automotor colombiano de vehículos que ha sido sometidos a la conversión de su fuente de energía, pasando a ser propulsados por un motor eléctrico en lugar de un impulsor de combustión interna; proceso usualmente denominado "retrofit" o "retrofitting" por su significado en inglés (31). Hasta donde nos consta, en Colombia existen más de 5 empresas que ofrecen este servicio, ubicadas en las principales ciudades, y que se espera que este número continúe creciendo en los próximos años conforme la electrificación del parque automotor siga evolucionando.

En este trabajo, que plantea la creación de un laboratorio para la realización de pruebas técnicas vehiculares, con carácter independiente, para el Valle del Cauca y el País, inicialmente, se realiza una descripción detallada del esquema experimental propuesto para los ensayos mencionados y de la normatividad que los soporta. Luego, se presentan los resultados obtenidos con el sistema experimental implementado utilizando como objeto de prueba un vehículo eléctrico comercial. Finalmente, se presentan la discusión y las conclusiones de este trabajo.

Materiales y métodos

A continuación, se presentan cuatro secciones que describen cada uno de los elementos principales de este trabajo como son el vehículo eléctrico estudiado (sec. 2.1) y los sistemas desarrollados para estimar el CdG (sec. 2.2), la rigidez (sec. 2.3) y el confort (sec. 2.4). Para la digitalización de las señales y la posterior transferencia de los datos a un PC, en todos los casos, se utilizó el chasis cDAQ-9178 de National Instruments (U.S.A.) y se seleccionó una frecuencia de muestreo de 100 Hz.



Vehículo eléctrico estudiado

El automóvil de pruebas es un vehículo eléctrico comercial tipo hatchback (JAC E10X, JAC Motors, China), cero km, con un peso de 1160 kg, distancia entre ejes de 2390 mm, ancho de 1670 mm y largo de 3650 mm (32). Su motor es de 60 hp y provee un par máximo de 111 lb-pie. El sistema de frenado es regenerativo. Su batería, ubicada en el piso del vehículo, tiene una capacidad de 30.2 kWh, y brinda una autonomía nominal de 360 km.

Medición del Centro de Gravedad (CdG)

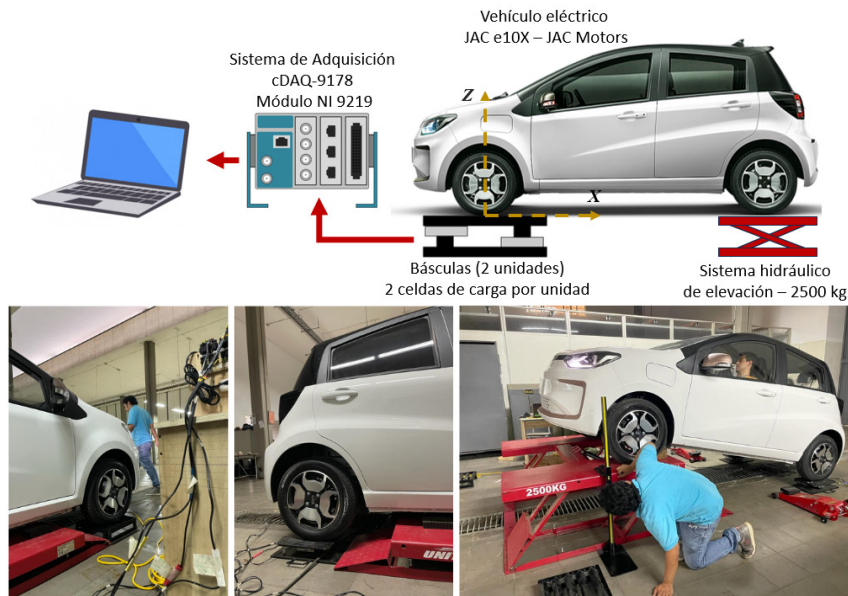


Figura 1. Implementación de la prueba de centro de gravedad (CdG). Arriba: Descripción del aparato experimental; Abajo: Fotografías del vehículo de prueba en diferentes momentos de la prueba: medición de la masa del eje trasero y elevación del eje delantero para medición de la coordenada en Z del centro de gravedad.

Para medir el CdG se construyeron básculas a partir de celdas de carga (modelo 5123, Reverse Transducers - Vishay Precision Group, U.S.A.), permitiendo la implementación del método de "elevación de eje" según la norma ISO 10392:2011. En la Figura 1(a) se muestra un esquema del sistema implementado. En total, el sistema de básculas tiene la capacidad de medir vehículos con un peso inferior a 1600 kg. Cada celda de carga se alimentó con 12 V regulados y se conectó un módulo de entrada analógica universal (NI 9219, National Instruments, U.S.A.) compatible con el chasis cDAQ-9178. Cada báscula emplea dos celdas de carga, y se calibraron empleando patrones con peso estándar, con lo cual se obtuvo un error de exactitud inferior al 1.5 %.

La ubicación espacial del CdG está determinada por su posición longitudinal (x_{cg}), transversal (y_{cg}) y altura (z_{cg}), los cuales se calculan a partir de las siguientes expresiones (7):

$$x_{cg} = \frac{m_t}{m_v} l \quad (1)$$

$$y_{cg} = \frac{b_f(m_1 - m_2) + b_t(m_3 - m_4)}{2m_v} \quad (2)$$

$$z_{cg1} = \frac{l(m'_t - m_t)}{m_v \tan \theta} + r_{est,t}, \quad z_{cg2} = \frac{l(m'_f - m_f)}{m_v \tan \theta} + r_{est,f}, \quad r_{est} = d'_w - \frac{d_w}{2} \quad (3)$$

$$z_{cg} = \frac{z_{cg1} + z_{cg2}}{2} \quad (4)$$

donde la letra m indica masa, y los subíndices asociados $t, v, 1, 2, 3$ y 4 se refieren al eje trasero, al vehículo, las ruedas izquierda y derecha del eje frontal, y las ruedas izquierda y derecha del eje trasero, respectivamente; l es la distancia promedio entre ejes; b_f y b_t son los anchos de vía del eje frontal y trasero, respectivamente; m'_f y m'_t son las masas del eje frontal y el trasero cuando el otro eje se encuentra levantado, respectivamente; θ es el ángulo de inclinación del vehículo; $r_{est,t}$ y $r_{est,f}$ son, respectivamente, los radios de rueda estática cuando los ejes trasero y frontal están levantados de manera que la rueda no entra en contacto con el suelo, d_w y d'_w son, respectivamente, el diámetro de rueda y el diámetro de rueda cargado.

Antes de llevar a cabo la prueba, se siguió meticulosamente el protocolo establecido por la norma ISO 10392 para el alistamiento del vehículo. Este proceso incluyó la verificación y ajuste de diversos aspectos fundamentales, tales como asegurar que la presión de las llantas se aproximara al valor recomendado por el fabricante, garantizar que los depósitos de combustible y líquido refrigerante estuvieran completamente llenos para evitar posibles interferencias en los resultados de la prueba, y asegurarse de que el vehículo no tuviera cargas adicionales. Adicionalmente, se tomaron precauciones para evitar el desplazamiento de objetos durante la elevación del vehículo mediante su fijación adecuada. Se confirmó que la suspensión del vehículo no estuviera bloqueada, la caja de cambios se encontrara en posición neutra, y el freno de aparcamiento estuviera liberado durante la elevación del vehículo. Para prevenir el desplazamiento del eje no elevado, se utilizaron tacos de madera, y se aseguró que las ruedas delanteras estuvieran alineadas hacia adelante tanto como fuera posible. Este riguroso cumplimiento de las recomendaciones normativas garantizó condiciones óptimas para la realización precisa y confiable de la prueba del Centro de Gravedad.

Como se mencionó anteriormente, la prueba para determinar el Centro de Gravedad se llevó a cabo conforme al método de "elevación del eje" del vehículo, tal como lo establece la norma ISO 10392. Este procedimiento se realiza en dos fases: la primera con el vehículo en posición horizontal para medir las coordenadas x_{cg} y y_{cg} en el plano horizontal del vehículo, y la segunda con el vehículo en posición inclinada para determinar la coordenada z_{cg} .

El procedimiento para la medición de coordenadas x_{cg} y y_{cg} inicia determinando la distancia entre ejes, mientras el vehículo permanece en posición plana sobre el suelo. Luego, se determina el ancho de vía del eje frontal y eje trasero. Se mide la masa de las ruedas de cada eje utilizando las dos básculas, primero un eje y luego el otro, como se muestra en la Figura 1 (abajo-izquierda y abajo-centro). Con los parámetros obtenidos y las mediciones, se calculan los valores de x_{cg} y y_{cg} utilizando las Ec. (1)-(2).

En cuanto al procedimiento de medición de coordenadas z_{cg} , se determina elevando uno de los dos ejes del vehículo, en este caso, el eje delantero (Ver Figura 1 Abajo-derecha). La norma sugiere medir en más de tres niveles de altura diferentes, por lo que se decidió elevar el vehículo en seis niveles entre 11 y 61 cm, con incrementos iguales de 10 cm. Se determina el radio estático de la rueda midiendo el diámetro de la rueda y el diámetro de la rueda cargada del lado derecho e izquierdo del eje trasero. Luego, se mide la masa del eje trasero para cada nivel de altura del

eje delantero utilizando las dos básculas. Paralelamente, se determina el ángulo de inclinación del vehículo para cada altura. Finalmente, una vez realizadas todas las mediciones, se calcula $Z_{c,q}$ utilizando las Ec. (3)-(4).

Prueba de Rigidez Global del Vehículo

La medición de rigidez contempló dos casos: a flexión y a torsión. En la Figura 2 se muestra el esquema de la implementación realizada para medir la rigidez a flexión. El vehículo es soportado en cuatro apoyos fijos (torres de bloqueo mostrados en la Figura 2(b)), en cada uno de los extremos del chasis. La carga P en la Figura 2(a) se aplica dentro del vehículo añadiendo masas externas en los asientos traseros, lo cual ocasiona una deflexión h_i y un ángulo de desviación α . La rigidez a flexión se puede calcular como sigue (9):

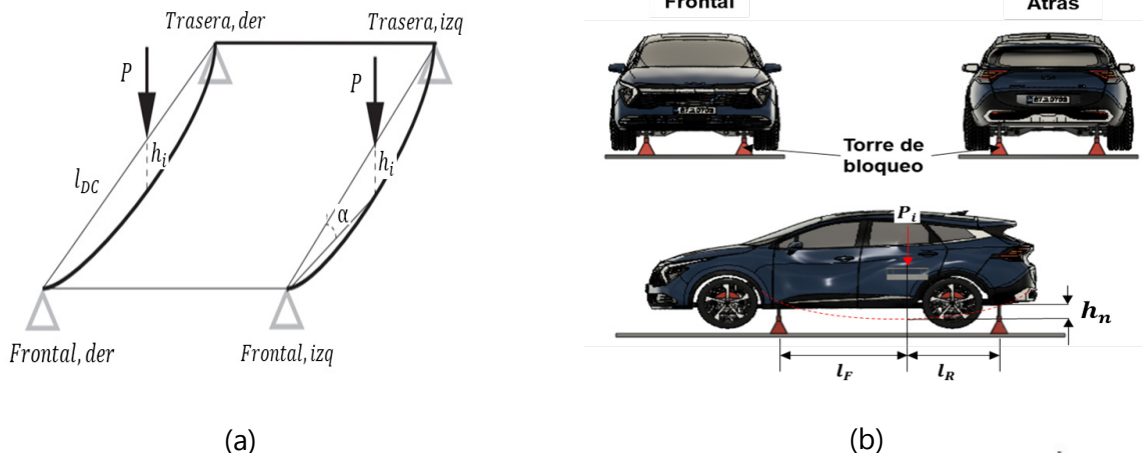


Figura 2. Medición de rigidez a flexión. (a): diagrama que representa la aplicación de la carga, la deflexión (h_i) y el ángulo de desviación (α); (b): Ubicación de las torres de bloqueo y aplicación de la carga.

$$Rig_{fx} = \frac{P}{\alpha} \quad (5)$$

Asumiendo que la deflexión es pequeña tal que $\tan(\alpha) \approx \alpha$, la rigidez en Ec. (5) se puede aproximar en términos del momento de flexión, M_{if} , y la deflexión h_i , como:

$$Rig_{fx} = \frac{M_{if}}{h_i} \quad (6)$$

La ecuación (6) muestra una relación lineal entre el momento y la deflexión vertical. Al someter la estructura a diversos niveles de cargas conocidas y medir los desplazamientos resultantes, es posible obtener una rigidez consistente mediante el ajuste de la pendiente de la curva de momento flector vs deflexión. En particular, para estas pruebas, se implementó el siguiente procedimiento para determinar la rigidez a flexión: se midió la distancia al punto de aplicación de la carga con respecto a la torre de bloqueo trasera del vehículo. Se incorporaron distintos niveles de carga, comenzando en 0 kg y aumentando en incrementos de 40 kg hasta alcanzar un total de 200 kg. En cada nivel de carga, se midió la deflexión, garantizando en todo momento que la señal se mantuviera estable. Se calculó el momento flector y se generó la gráfica momento flector vs deflexión, a partir de la cual, mediante un análisis de regresión, se determinó la rigidez de manera precisa.

Para medir la rigidez a torsión se ejerce un par estático a través de la aplicación de una fuerza, P , como se muestra en la Figura 3(a). El procedimiento implementado busca encontrar la rigidez

torsional global del vehículo en condiciones estáticas. El movimiento del vehículo es restringido por medio dos torres de bloqueo en la parte trasera del chasis, mientras se aplica un momento estático en la parte delantera. Ver Figuras 3(b) y 3(c). En la práctica, para lograr inducir la torsión deseada, la carga P es aplicada en uno de los extremos de una estructura con pivote central, unida solidariamente a la sección delantera del chasis, como se muestra en la Figura 3(c).

En este caso, el momento de torsión genera una deflexión h_i y un ángulo de desviación Φ .

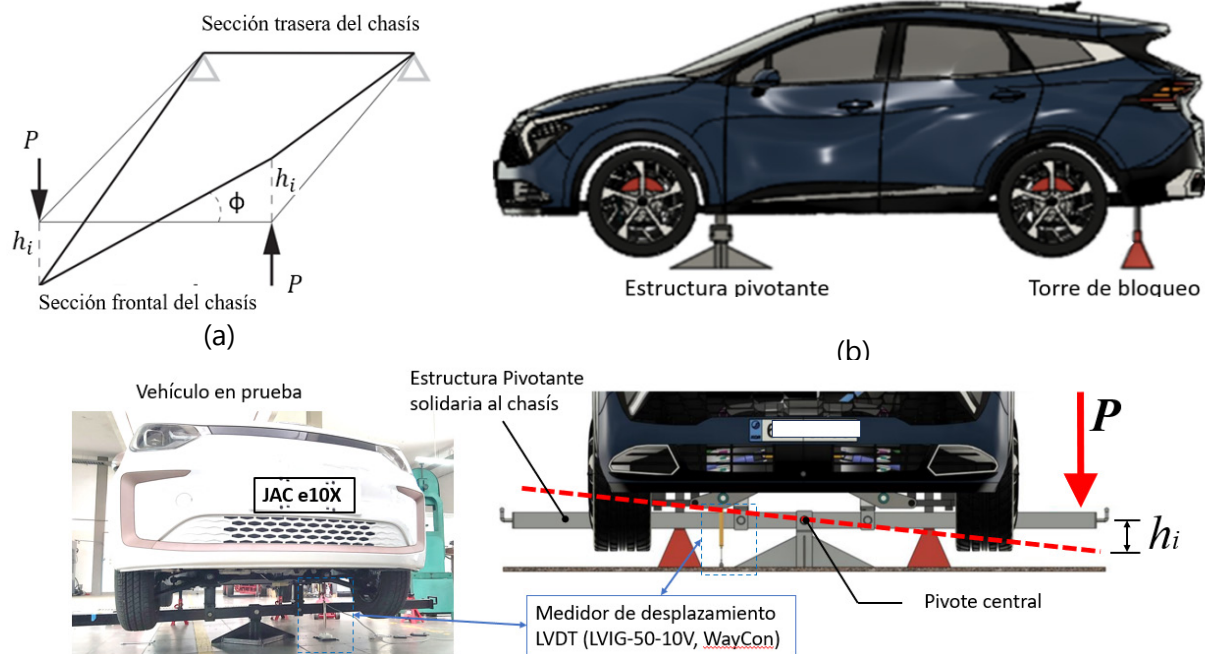


Figura 3. Medición de rigidez a torsión. (a): diagrama que representa la aplicación de la carga, la deflexión (h_i) y el ángulo de desviación (Φ); (b): Vista lateral de la ubicación de las torres de bloqueo y estructura pivotante del ensayo; (c): Vista frontal del banco de rigidez diseñado, indicando la carga aplicada P , así como el vehículo de prueba y el instrumento Diagrama de esquemático del banco de rigidez diseñado para medir la respuesta del vehículo a torsión.

Para realizar esta prueba se diseñó y fabricó la estructura de pruebas mostrada en la Figura 3(c), capaz de soportar un vehículo de hasta 3000 kg. El vehículo es anclado por su parte delantera de manera que el pivote central coincide con el plano medio del automóvil. A la izquierda, se muestra una fotografía de la implementación de la prueba con el vehículo. El sistema de medición tiene la ventaja de que no se requiere remover las llantas para realizar la prueba. La carga que induce la torsión se aplica en el extremo de la estructura pivotante, como se indica en la Figura 3(c)-derecha. La rigidez torsional se puede calcular a partir de la carga, P , y el ángulo de torsión Φ , definido este como la deformación angular resultante entre la parte frontal del vehículo y las torres de bloqueo traseras:

$$Rig_{tr} = \frac{P}{\Phi} \quad (7)$$

Asumiendo que la deflexión es pequeña, la rigidez en Ec. (7) se puede aproximar en términos del momento de torsión, M_{it} , y la deflexión h_i , con una expresión idéntica a la Ec. (6).

Al igual que en el caso de flexión, la obtención de un valor consistente de rigidez es posible al aplicar diferentes cargas de torsión y medir los correspondientes desplazamientos para generar la gráfica momento torsor vs deflexión, seguida de un análisis de regresión lineal. En esta prueba, se siguió un procedimiento similar al descrito anteriormente para la flexión, con la única diferencia de que fue necesario medir la posición de aplicación de la carga con respecto al centro de giro del tubo pivote. Además, los niveles de carga aplicados variaron desde 0 kg hasta 140 kg, con incrementos de 20 kg.

Para medir los desplazamientos del chasis, se emplearon dos sensores inductivos tipo LVDT (LVIG-50-10V, WayCon, Alemania), con un rango de medida de 50 mm, al lado derecho e izquierdo (viendo de frente al vehículo), ubicados en los puntos donde ocurren desplazamientos comparables al rango del instrumento. Para ambos casos, a flexión y a torsión, por cada medición se realizaron tres repeticiones, y el valor almacenado corresponde al promedio de estas. Los sensores fueron conectados a un módulo de adquisición analógica universal (NI 9219, National Instruments, U.S.A) insertado en el chasis cDAQ-9178.

Medición de confort

La prueba de confort se basa en la evaluación de la exposición a cuerpo entero establecido por la norma UNE-ISO 2631-1:2008. Para ello, se mide la vibración, en las tres direcciones ortogonales, en el asiento del conductor por medio de un acelerómetro triaxial (4529-B, Brüel and Kjaer, Dinamarca), tal como se muestra en la Figura 4. Este instrumento cuenta con un rango de frecuencia entre 0.3 Hz y 12.8 kHz, así como una sensibilidad de 10 mV/m/s². Cabe mencionar que no se realizaron mediciones subjetivas para conocer la sensación de confort percibida por el conductor. Para preservar la integridad del acelerómetro, garantizar una medición adecuada y preservar la comodidad del conductor, se construyó una caja para el sensor y se cubrió con una espuma suficientemente rígida para no añadir amortiguamiento adicional ni afectar la comodidad del asiento. El acelerómetro es alimentado con un módulo de voltaje y aislamiento (NI-9239, National Instruments, U.S.A.) y, además, se conecta a un módulo de medición de vibraciones (NI-9230, National Instruments, U.S.A.), ambos compatibles con el chasis cDAQ-9178.

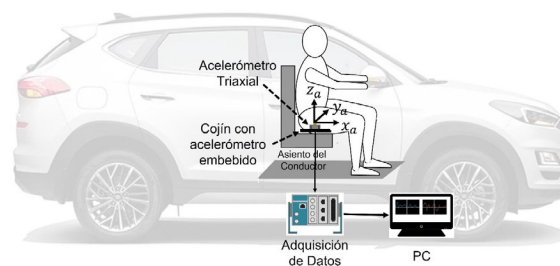


Figura 4. Izquierda: Esquema que representa la ubicación del acelerómetro en el asiento del conductor. Los parámetros X_a , Y_a y Z_a indican las direcciones ortogonales de la vibración medida. Derecha: Encapsulado y fijación del acelerómetro según norma ISO 2631.



Figura 5. Fotografías del vehículo en prueba (JAC E10X) en condiciones de camino diferentes. Izquierda: vía pavimentada. Derecha: vía sin pavimento.

Se analizaron dos escenarios para estudiar el confort: camino con (Figura 5-Izquierda) y sin pavimento (Figura 5-Derecha). Aunque la norma ISO 2631-1 no menciona un tiempo específico de duración para las pruebas, sí establece que debe ser lo suficientemente largo como para que las señales contengan el comportamiento vibratorio del vehículo. Por esta razón, se tomó la precaución de realizar las pruebas con duración de 5 minutos. Las trayectorias del recorrido de la prueba se mantuvieron lineales, sin virajes, a lo largo de 3 kilómetros en ambos casos. Las pruebas se caracterizaron por una aceleración moderada y un rango de velocidades que osciló entre los 0 km/h y los 40 km/h. La velocidad media alcanzada fue de 33 km/h en la trayectoria pavimentada y de 20 km/h en la trayectoria sin pavimentar. A lo largo de toda la duración del recorrido, el acelerómetro registró de manera continua los datos pertinentes.

Un índice ampliamente utilizado para interpretar las señales de vibración es el factor de cresta, el cual calcula la relación entre el máximo valor de pico instantáneo de la señal, a_{pico} , y su valor eficaz ponderado, a_{rms} , como sigue:

$$\text{Factor de cresta} = \frac{a_{pico}}{a_{rms}} \quad (8)$$

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (a(t))^2 dt} \quad (9)$$

donde $a(t)$ es la aceleración medida por el acelerómetro, y t_1 y t_2 son el tiempo de inicio y final de la ventana temporal empleada para realizar el análisis.

Para vibraciones con factores de cresta iguales o menores a 9, el nivel de confort se puede estimar empleando la Tabla 1 y la aceleración eficaz ponderada total ($a_{rms\ total}$):

$$a_{rms\ total} = \sqrt{1.4^2 (a_{rms\ x})^2 + 1.4^2 (a_{rms\ y})^2 + 1.0^2 (a_{rms\ z})^2} \quad (10)$$

Tabla 1. Escala de confort debido a la vibración según la norma ISO 2631 y BS 6841

| $a_{rms\ total}$ (m/s ²) | Grado de Confort | $a_{rms\ total}$ (m/s ²) | Grado de Confort |
|--------------------------------------|------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| Menor a 0.315 | Cómodo | 0.8 - 1.6 | Incómodo |
| 0.315 - 0.5 | Poco incómodo | 1.25 - 2.5 | Muy incómodo |
| 0.5 - 1.0 | Algo incómodo | Mayor a 2.0 | Extremadamente incómodo |

Si el factor de cresta supera el umbral de 9, el método para evaluar el confort exige que se calcule la exposición diaria, $A_{(8)}$, que representa la aceleración continua equivalente para un tiempo de ocho horas, y el valor de dosis de la vibración VDV. El índice $A_{(8)}$ se calcula, para cada dirección ortogonal, como sigue:

$$A_{x(8)} = 1.4(a_{rms\ x}) \sqrt{\frac{t_{exp}}{8}}, \quad A_{y(8)} = 1.4(a_{rms\ y}) \sqrt{\frac{t_{exp}}{8}}, \quad A_{z(8)} = 1.0(a_{rms\ z}) \sqrt{\frac{t_{exp}}{8}},$$

donde t_{exp} es el tiempo de duración de la prueba en horas. Para realizar el análisis se toma el valor $A_{(8)}$ más alto.

Por su parte, el VDV se calcula como:

$$VDV = \left(\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (a_{rms}(t))^4 dt \right)^{1/4} \quad (12)$$

donde $a_{rms}(t)$ es la aceleración eficaz ponderada, como función del tiempo.

Empleando el VDV obtenido en cada dirección ortogonal, el VDV_{total} se calcula como sigue:

$$VDV_{total} = (VDV_x^4 + VDV_y^4 + VDV_z^4)^{1/4} \quad (13)$$

Resultados

En esta sección se presentan los resultados obtenidos para cada una de las tres pruebas técnicas estandarizadas implementadas, a saber: centro de gravedad, rigidez estática global del vehículo y estimación del confort.

Centro de Gravedad (CdG)

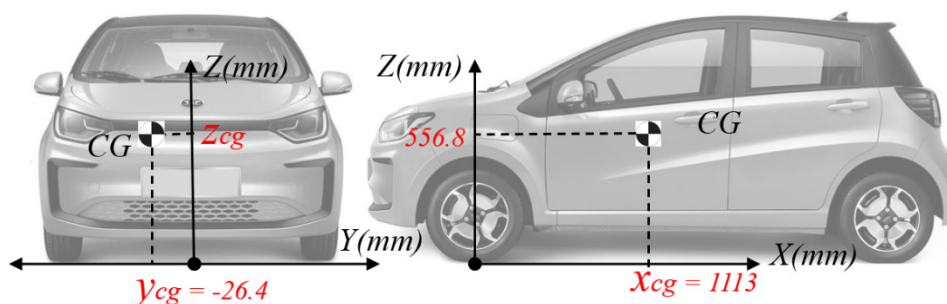


Figura 6. Coordenadas del centro de gravedad medidas para el vehículo JAC E10X, sin conductor:

$$[x_{cg}, y_{cg}, z_{cg}] = [1113, -26.4, 556.8] \text{ mm.}$$

Antes de iniciar el ensayo, se realizó un chequeo previo del vehículo y se comprobó que se satisfacen las siguientes condiciones: la presión de las llantas se encuentran en el valor establecido por el fabricante; los niveles de combustible y de líquido refrigerante al máximo; el vehículo se encuentra libre de masas externas (sin conductor); la suspensión del vehículo está desbloqueada; la caja de cambios en posición neutra y freno de aparcamiento liberado durante la elevación del vehículo (para evitar que el eje no elevado se mueva se utilizaron tacos/topes

externos para frenar las llantas). En la Figura 6 se muestran las tres coordenadas espaciales del CdG obtenidas para el vehículo JAC E10X sin conductor. Aunque la ficha técnica del vehículo no reporta este dato, se realizó una comparación con los datos reportados por la Agencia Federal de Administración de Seguridad del Tráfico en Carreteras Nacionales (NHTSA, por sus siglas en inglés), de Estados Unidos. Así, para un vehículo hatchback, con peso de 1160 kg, se reporta que la altura del CdG oscila entre 500 mm y 600 mm, lo cual muestra que el valor encontrado en este trabajo (556.82 mm) se encuentra dentro de la media de vehículos de su tipo (33). También se realizó la medición del CdG del vehículo siendo conducido por una persona de 68 kg. Las coordenadas obtenidas fueron $[x_{cg}, y_{cg}, z_{cg}] = [1379, 29.9, 659]$ mm, mostrando un desplazamiento significativo en la dirección del piloto (Y), e incrementos del 24% y 18.3% en las direcciones X y Z respectivamente. Cabe anotar que la desviación estándar de las coordenadas obtenidas en las diferentes repeticiones no excedió el 5% con respecto a la media.

Pruebas de Rigidez Global

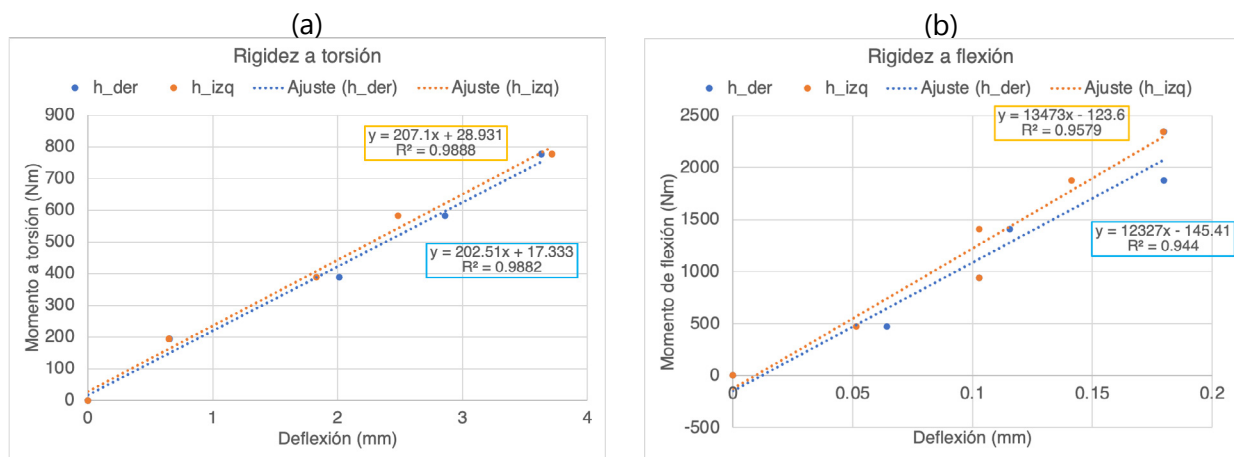


Figura 7. Cálculo de la rigidez a partir de los ensayos a torsión, (a), y a flexión, (b).

En la Figura 7(a) y 7(b) se muestran los valores estimados de rigidez a torsión y flexión, respectivamente. Las etiquetadas "h_der" y "h_izq" identifican la medición del medidor de desplazamiento ubicado, respectivamente, a la izquierda o derecha del pivote central que soporta el chasis. A torsión, se encontró que la rigidez del vehículo se encuentra entre 202.51 Nm/mm y 207.10 Nm/mm. En la literatura se encuentra que la rigidez a torsión típica para este tipo de vehículos oscila entre 19 Nm/mm y 76 Nm/mm (9), (34), (35) (la hoja de datos del vehículo no brinda información sobre la rigidez). Es decir, la rigidez a torsión del vehículo JAC E10X supera en un 166% los valores esperados de acuerdo con la literatura. La diferencia encontrada entre la referencia de la literatura y lo medido se explica por la presencia de las baterías del automóvil, lo cual incrementa el valor de la pendiente ajustada en la Figura 7-(a). En relación con la rigidez a flexión, en (34) se establece que un automóvil con suficiente rigidez a torsión también presenta una adecuada rigidez a flexión. Esto sugiere que típicamente los valores a flexión son mayores que aquellos obtenidos a torsión, lo cual se puede constatar con los resultados de la Figura 7-(b) (entre 12327 Nm/mm y 13473 Nm/mm). La ausencia de resultados reportados en vehículos eléctricos con baterías similares se atribuye a la falta de estandarización en la prueba de rigidez. La diversidad en los métodos utilizados para evaluar la rigidez en vehículos eléctricos complica la comparación directa de resultados entre distintos estudios. Este vacío en la estandarización destaca la necesidad de establecer criterios uniformes y procedimientos normalizados para llevar a cabo pruebas de rigidez en vehículos eléctricos.

Como trabajo futuro, se plantea la comparación del método empleado en este estudio con algún modelo de automóvil comercial a combustión que cuente con datos reportados, permitiendo así una evaluación más precisa y significativa de los resultados obtenidos. Esta comparación con vehículos a combustión contribuirá a contextualizar y validar la efectividad del método propuesto en el ámbito más amplio de la industria automotriz.

Medición del confort

Tabla 2. Aceleración eficaz ponderada (a_{rms}), factor de cresta, exposición a vibraciones diaria ($A_{(8)}$) y valor de dosis de vibraciones (VDV), obtenidos en el ensayo de confort.

| | Eje | a_{rms} (m/s ²) | Factor de cresta | $A_{(8)}$ | VDV (m/s ^{1.75}) |
|----------------------|----------|-------------------------------|------------------|-----------|----------------------------|
| Con pavimento | X | 0.2264 | 28.4576 | 0.0653 | 0.7064 |
| | Y | 0.1996 | 9.0150 | 0.0576 | 0.3007 |
| | Z | 0.3697 | 11.2267 | 0.0762 | 0.6044 |
| Sin pavimento | X | 0.2783 | 4.8700 | N.A. | N.A. |
| | Y | 0.4514 | 4.1995 | N.A. | N.A. |
| | Z | 0.5187 | 4.5405 | N.A. | N.A. |

En la Tabla 2 se consignan los valores empleados para estudiar el confort del vehículo bajo condiciones de camino con y sin pavimento. En ambos casos, la aceleración vertical (dirección Z) se destaca sobre aquella en las otras dos direcciones, lo cual resalta la importancia de esta componente sobre el cuerpo del conductor. La siguiente componente más alta es la que corresponde a la dirección X, lo cual tiene sentido considerando que se trata de la dirección en la cual se mueve el vehículo. Sobre la vía pavimentada, debido a que el factor de cresta en los tres ejes es mayor que 9, se hace necesario evaluar la exposición a vibraciones y el confort del vehículo. Para esto, empleando Ec. (10), se obtiene que $a_{rms\ total} = 0.5615 \frac{m}{s^2}$. En consecuencia, con base en la clasificación de la Tabla 1, se puede concluir que el confort del vehículo se puede clasificar como "algo incómodo". Adicionalmente, de Ec. (13) se obtiene que $VDV_{total} = 0.7906 \text{ m/s}^{1.75}$. La norma ISO 2631 establece que los valores donde $A_{(8)} \geq 0.9 \text{ m/s}^2$ y $VDV_{total} \geq 17 \text{ m/s}^{1.75}$ conllevan una alta probabilidad de riesgo para la salud (29). Por consiguiente, dado que $A_{(8)} = 0.0762$ (Tabla 2), se puede concluir que aun cuando el vehículo puede resultar algo incómodo no es necesario tomar medidas correctivas frente a la exposición a vibraciones. Para el caso de la vía sin pavimento, el factor de cresta es menor que 9, por lo que, de acuerdo con la norma, no se hace necesario evaluar la exposición a vibraciones y se puede concluir que tampoco haría falta tomar medidas correctivas. Para evaluar el confort, nuevamente se aplica Ec. (10) y se obtiene que $a_{rms\ total} = 0.9057 \frac{m}{s^2}$, lo cual de acuerdo con la Tabla 1 se puede considerar como "incómodo". Este resultado guarda congruencia con aquel obtenido para la pista pavimentada, en cuyo caso el vehículo se clasificó como "algo incómodo" porque se encontraba $0.06 \frac{m}{s^2}$ por arriba de la frontera que lo separaba de "poco incómodo" (ver Tabla 1).

Si bien los resultados obtenidos no son comparados con los obtenidos con otros vehículos, sí constituyen una línea base para posteriores análisis con vehículos de características semejantes, sean estos propulsados eléctricamente o no.

Discusión y conclusiones

En el presente trabajo se aborda la iniciativa de implementar un laboratorio de pruebas técnicas vehiculares en las instalaciones de la Universidad del Valle (Cali-Colombia). En particular, se muestran resultados de ensayos técnicos para medir el CdG, la rigidez y el nivel de confort de vehículos de pasajeros categoría M1. El objeto de estudio fue el vehículo eléctrico comercial JAC E10X, apto para cuatro pasajeros (incluido el conductor). La prueba de CdG se estableció con base en la norma ISO 10392 y se emplean básculas diseñadas y fabricadas localmente. Así, se consiguió un sistema de básculas con una capacidad de hasta 1600 kg de peso, que permite medir la posición tridimensional del CdG. Para el JAC E10X, se encontró que el CdG, sin conductor, se encuentra ubicado en las direcciones X, Y, Z a 1113.0 mm, -26.4 mm, 556.8 mm, respectivamente. Es decir, el CdG se encuentra 26.42 mm hacia el asiento del copiloto, respecto al plano de simetría del vehículo. Por su parte, en la dirección vertical se encontró que el CdG está dentro del rango esperado para vehículos tipo hatchback con un peso de 1160 kg. Cabe anotar que en la implementación de los ensayos resultó decisivo asegurar la precisión de los instrumentos, así como establecer un protocolo estricto de ejecución que nos permitiera repetibilidad en los resultados.

Al revisar la normativa para la medición de rigidez se concluyó que no existe una prueba estandarizada para este tipo de ensayos, más bien se trata de técnicas que cada casa matriz implementa ajustándose a las prácticas comúnmente aceptadas en el sector. Con el objetivo de llevar a cabo los ensayos en el marco de un procedimiento reconocido, se siguió la metodología propuesta por la SAE para medición rigidez global estática a flexión y a torsión. En ambos casos, la deflexión se registró empleando un sensor de desplazamiento tipo LVDT. No se encontraron diferencias significativas que permitan pensar que el automóvil se encuentra más reforzado de un lado u otro. A falta de valores reportados por el fabricante, se optó por comparar los resultados obtenidos con valores de referencia tomados de la literatura. De esta forma, se concluyó que el vehículo cuenta con una rigidez adecuada debido a que supera el límite inferior de rigidez aceptado en la industria. Asimismo, se pudo constatar que la relación entre rigidez a torsión y a flexión se mantiene como se indica en la literatura, a saber, que a flexión es mucho mayor que a torsión. En los resultados obtenidos se observó que la primera supera por más de cincuenta veces a la segunda. Actualmente, se adelantan trabajos para la determinación de la rigidez dinámica del vehículo, así como para la estimación de la rigidez estática, a partir de mediciones dinámicas simples (10). Esto con el fin de reducir los tiempos de implementación de la prueba, la cual resulta suficientemente laboriosa y exigente en términos de disponibilidad de personal técnico.

Para medir confort, este trabajo se basó en la norma ISO 2631-1, la cual se enfoca en las vibraciones de cuerpo completo. La evaluación contempló dos escenarios: carretera pavimentada y destapada (sin pavimento). En el primer escenario, se encontró que la experiencia de manejo puede resultar algo incómoda pero el nivel de inconformidad es bajo. Además, los niveles de vibraciones no ameritan una intervención del vehículo. En el segundo escenario, la sensación de confort disminuye hasta ubicarse muy cerca de una experiencia incómoda. Esto es especialmente importante considerando que se trata de un vehículo completamente nuevo. Aunque los datos no apuntan hacia una necesidad de intervenir el vehículo, sí muestran que el automóvil no es apto para vías destapadas o con un nivel de calidad bajo, por ejemplo, carreteras con ondulaciones, huecos o desniveles (situación que es muy frecuente en países en vía de desarrollo). Por tanto, los resultados anticipan una experiencia de manejo desagradable en trayectos largos o en zonas con un alto nivel de deterioro. Trabajo adicional es requerido con el fin de caracterizar comportamiento en vías terciarias, así como la respuesta ante irregularidades como baches, reductores de velocidad, entre otros.

El uso continuo de un automóvil en carreteras con un bajo nivel de calidad modifica sus características de desempeño, lo cual implica cambios trascendentales en sus parámetros de funcionamiento óptimo, que pueden llegar a poner en riesgo la salud/integridad de sus ocupantes. La iniciativa de creación de un "laboratorio independiente" ofrece la posibilidad de realizar diagnósticos

oportunos, que permitan evaluar los niveles de seguridad y comodidad de vehículos de consumo masivo, inclusive coadyuvando a la reducción costes de mantenimiento de los propietarios. Así mismo, medir el cambio de la rigidez, el CdG y el confort de vehículos populares o de uso masivo ofrece la posibilidad de realizar análisis estadístico, con impacto en el establecimiento de políticas públicas relacionadas con el riesgo psicosocial de sus ocupantes. Esto involucra no sólo la salud física de los usuarios, sino también la calidad de vida de los ciudadanos, por ejemplo, disminuyendo el estado de irritación y de desgaste emocional asociado con el nivel de comodidad percibido por los usuarios. Finalmente, en el corto plazo se espera avanzar en la acreditación de algunos de los ensayos ante la ONAC, no solo de los descritos en este trabajo sino también de otros como estabilidad, frenado y autonomía, los cuales hacen también parte de la iniciativa de laboratorio para la valoración técnica e independiente de vehículos. Como paso previo, se ofrecerá servicio gratuito a los vehículos que hayan sido sometidos a "retrofit" para convertirlos a eléctricos. Esto nos permitirá aportar en el proceso de cualificación de este tipo transformaciones y proponer recomendaciones técnicas y procedimentales según cada caso particular.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado por el Sistema General de Regalías del Ministerio Colombiano de Ciencia, Tecnología e Innovación (Fondo CTeI-SISTEMA GENERAL DE REGALIAS), contrato BPIN 2017000100062, a través del proyecto "Desarrollo experimental de un prototipo de vehículo eléctrico en el sector automotriz del departamento del Valle del Cauca".

Referencias

1. Solmaz S, Akar M, Shorten R. Online Center of Gravity Estimation in Automotive Vehicles using Multiple Models and Switching. En: 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, IEEE; 2006. doi: 10.1109/icarcv.2006.345080.
2. Zhao X, Jiang H, Zheng S, Han J. Precision Gravity Center Position Measurement System for Heavy Vehicles. Key Eng Mater. 2006; vol. 315–316: 788–791. doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.315-316.788.
3. Li A, Chen Y, Lin W, Du X. Estimation of Three-Dimensional Center of Gravity Relocation for Ground Vehicles with Tire Blowout. En American Control Conference (ACC), IEEE, 2022. doi: 10.23919/acc53348.2022.9867659.
4. Huang X, Wang J. Center of gravity height real-time estimation for lightweight vehicles using tire instant effective radius. Control Eng Pract. 2013 Apr;21(4):370-388. doi: 10.1016/j.conengprac.2012.12.003.
5. Barbecho Morales B, Palacios Ortiz G. Diseño y construcción de un banco para la determinación del centro de gravedad y transferencia de pesos en vehículos livianos. Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador; 2017.
6. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, "Vehículos automotores con los dos ejes. Determinación del centro de gravedad." ICONTEC, 1996.
7. International Organization for Standardization, "ISO 10392:2011 Road vehicles — Determination of centre of gravity." International Organization for Standardization, 2011.
8. Tebby S. Methods to Determine Torsion Stiffness in an Automotive Chassis. Comput Aided Des Appl. 2011 Dec;8: 67–75. doi: 10.3722/cadaps.2011.pace.67-75.



9. Ramachandran R, Dehariya N K, Kumar G, Agarwal H, Singh S. Methodology to Measure BIW Torsional Stiffness and Study to Identify and Optimize Critical Panels. SAE Technical Paper Series, SAE International. 2015. doi: 10.4271/2015-26-0224.
10. Helsen J, Cremers L, Mas P, Sas P. Global static and dynamic car body stiffness based on a single experimental modal analysis test. En: Proceedings of ISMA2010 – International Conference on Noise and Vibration Engineering including USD2010; 2010; p. 2505-2521..
11. Rediers B, Yang B, Juneja V. Static and Dynamic Stiffness: One Test, Both Results. En: Proceedings of the 16th International Modal Analysis Conference – IMAC; 1998; p. 30–35.
12. The Institut fur Kraftfahrzeuge. Stiffness relevance and strength relevance in crash of car body components. University of Aachen in Germany. Aachen (AL): European Aluminum Association. 2013.
13. Cardinale M, Pope M H. The effects of whole body vibration on humans: Dangerous or advantageous? *Acta Physiol Hung*. 2003 Sept;90(3):195–206. doi: 10.1556/aphysiol.90.2003.3.2.
14. Park S J, Subramaniyam M. Evaluating Methods of Vibration Exposure and Ride Comfort in Car. *Journal of the Ergonomics Society of Korea*. 2013 Aug;32(4):381–387. doi: 10.5143/jesk.2013.32.4.381.
15. Federación Española Empresarial de Transportes de Viajeros. Exposición a vibraciones en el sector del transporte de viajeros por carretera. Madrid (ES): ASINTRA. 2012.
16. Pujol Senovilla L. Exposición a vibraciones mecánicas: evaluación de riesgo (nota técnica de prevención). Madrid (ES): Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo; 2009.
17. Wang X. Rationale and history of vehicle noise and vibration refinement. *Vehicle Noise and Vibration Refinement*. Elsevier; 2010. pp. 3–17. doi: 10.1533/9781845698041.1.3.
18. Kumar A, Varghese M, Mohan D, Mahajan P, Gulati P, Kale S. Effect of Whole-Body Vibration on the Low Back. *Spine (Phila Pa 1976)*. 1999 Dec; 24(23): 2506. doi: 10.1097/00007632-199912010-00013.
19. Carratù M, Pietrosanto A, Sommella P, Paciello V. Smart wearable devices for human exposure vibration measurements on two-wheel vehicles. *ACTA IMEKO*. 2020 Dec; 9(4): p. 121. doi: 10.21014/acta_imeko.v9i4.727.
20. Linan X, Zhang E, Mingli L, Xiaochun S, Fan Z. Human vibration characteristic and experiment research on man-machine system in dynamic environment. En: 9th International Conference on Computer-Aided Industrial Design and Conceptual Design, IEEE; 2008. doi: 10.1109/caidcd.2008.4730545.
21. Yanxi R, Qingxia L. Implementation of human vibration test and evaluation system based on virtual instrument. En: International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering, IEEE; 2010. doi: 10.1109/mace.2010.5535864.
22. Feng Y, Jun X. Analysis of motorcycle vibration comfort based on rigid-flexible coupling model. *Noise and Vibration Worldwide*. 2020 Jun; 51(6):110–115. doi: 10.1177/0957456520923121.
23. Vallim M B, Dos Santos J M C, Costa A L A. Motorcycle Analytical Modeling Including Tire Wheel Nonuniformities for Ride Comfort Analysis. *Tire Sci Technol*. 2017 Apr; 45(2):101–120. doi: 10.2346/tire.17.450202.



24. Yuan D M, Zheng X M, Yang Y. Modeling and Simulation of Motorcycle Ride Comfort Based on Bump Road. *Adv Mat Res*. 2010 Oct;139–141:2643–2647. doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.139-141.2643.
25. Chen H C, Chen W C, Liu Y P, Chen C Y, Pan Y T. Whole-body vibration exposure experienced by motorcycle riders - An evaluation according to ISO 2631-1 and ISO 2631-5 standards. *Int J Ind Ergon*. 2009 Sept;39(5):708–718. doi: 10.1016/j.ergon.2009.05.002.
26. Dalawai P, Vyas N. Vibrational discomfort and motorcycle health assessment under engine excitation. *International Journal of Vehicle Noise and Vibration*. 2015;11(3/4):255. doi: 10.1504/ijvnr.2015.075168.
27. Figlus T, Szafraniec P, Skrúcaný T. Methods of Measuring and Processing Signals during Tests of the Exposure of a Motorcycle Driver to Vibration and Noise. *Int J Environ Res Public Health*. 2019 Aug; 16(17):3145. doi: 10.3390/ijerph16173145.
28. Liguori C, Paciello V, Paolillo A, Pietrosanto A, Sommella P. Characterization of motorcycle suspension systems: Comfort and handling performance evaluation. En: 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), IEEE; 2013. doi: 10.1109/i2mtc.2013.6555457.
29. International Organization for Standardization. ISO 2631-1:2008 Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - part 1: general requirements. 2011.
30. Latin NCAP, Resultados evaluación vehículo JAC e10X. 2022. [Internet]. Disponible en: <https://www.latinncap.com/en/result/173/jac-e-js1--e10x--e-s1--s1-+-2-airbags>.
31. Hoefl F. Internal combustion engine to electric vehicle retrofitting: Potential customer's needs, public perception and business model implications. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*. 2021; 9:100330. doi: 10.1016/j.trip.2021.100330
32. Auteco Mobility, "Automóvil JAC E10X." 2022. [Internet]. Disponible en: <https://www.autecomobility.com/automovil-hatchback-jac-e10x/p>
33. K. Tse, "Trends in Vehicle CG Height and SSF." 2022. [Internet]. Disponible en: <https://kktse.github.io/jekyll/update/2022/07/28/trends-in-vehicle-cg-height-and-ssf.html>
34. Milliken W F, Milliken D L. *Race Car Vehicle Dynamics*. Society of Automotive Engineers; 1995.
35. Danielsson O, González-Cocaña A, Ekström K, Bayani Khaknejad M, Klomp M, Dekker R. Influence of body stiffness on vehicle dynamics characteristics. En: *The Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, CRC Press; 2016. p. 61–71. doi: 10.1201/b21185-6.

