



ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo integración Curricular previa a la obtención
del título de Ingeniería en Mecánica Automotriz**

AUTORES:

Borys Alexander Tapia Analuisa

TUTOR:

Ing. Luis Homero Ibujés Villacís

Análisis de estabilidad de un sistema de suspensión
hidráulica en un Vehículo M1.

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA

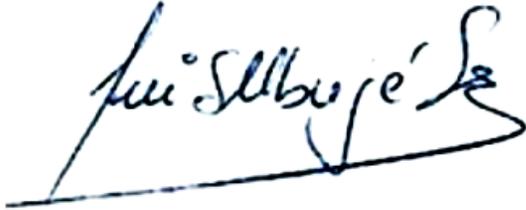
Yo, **Borys Alexander Tapia Analuisa**, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.



BORYS ALEXANDER TAPIA ANALUISA

APROBACIÓN DEL TUTOR

Yo, **Luis Ibujés**, certifico que conozco al autor del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Luis Ibujés', written over a horizontal line.

Firma profesor

Dedicatoria

Con inmenso amor y esfuerzo, dedico este trabajo a mis padres, que siempre ha sido mi mayor apoyo, brindándome fuerza y motivación para alcanzar mis sueños y metas. Ustedes me enseñaron a valorar el esfuerzo, a mantenerme firme ante los retos y a creer en mis capacidades. Todo lo que he logrado es un reflejo del amor, los principios y los valores que ustedes me han transmitido, y este logro no habría sido posible sin su guía constante y su fe en mí.

A mi hermana por ser mi compañera de vida, mi confidente y mejor amiga, gracias por tu apoyo constante, has sido fuente de inspiración y también mi motivación en este largo camino. Tu que me has enseñado a perseverar y nunca rendirme.

A mis abuelitos con profundo agradecimiento, su apoyo incondicional ha sido fundamental en mi vida y en mi carrera. Gracias por ser mi guía y mi inspiración, por creer en mí y apoyarme en cada paso.

A mi familia, gracias por estar siempre ahí para mí. Su apoyo y amor han sido fundamentales en mi vida y carrera. Me han enseñado a creer en mí mismo y a nunca rendirme. Les agradezco por su paciencia, comprensión y sacrificio. Esta tesis es un logro que compartimos juntos, y les dedico con todo mi amor y gratitud.

Agradecimiento

Quiero dedicar un especial agradecimiento a Dios, quien ha sido mi guía y fortaleza a lo largo de este camino. En los momentos de duda y cansancio, siempre encontré en él la paz y el ánimo para seguir adelante. Agradezco cada oportunidad, cada aprendizaje y cada bendición que me ha permitido llegar hasta aquí. Sin su apoyo, este logro no habría sido posible.

Quiero comenzar expresando mi más profundo agradecimiento a mis padres, quienes han sido mi mayor fuente de apoyo incondicional. Desde el primer día, me han brindado no solo su amor, sino también su confianza y paciencia. Su sacrificio y dedicación me han enseñado la importancia de la perseverancia y el esfuerzo. Gracias por estar siempre a mi lado, motivándome a dar lo mejor de mí. Esta tesis es también el resultado de todo lo que me han enseñado.

A mi hermana, gracias por ser mi compañera de vida, por tu apoyo constante y por ser mi refugio en los momentos más difíciles. No solo has sido una gran amiga, sino también una fuente de inspiración. Te estoy eternamente agradecido por estar conmigo en cada paso de este camino.

A toda mi familia, quiero darles las gracias por su constante apoyo y cada uno de ustedes ha aportado de alguna forma a mi crecimiento y al logro de este objetivo. Sus palabras, su cariño y su confianza han sido una motivación constante. Esta tesis es solo un reflejo del esfuerzo colectivo y el amor que recibo de todos ustedes. Les agradezco de corazón.

A mis mentores, quienes han sido una guía invaluable durante este proceso, quiero expresar mi más sincera gratitud. Su dedicación, paciencia y disposición para compartir sus conocimientos marcaron una gran diferencia en mi desarrollo laboral.

A mis profesores, quienes con su dedicación y compromiso sembraron en mí el conocimiento y las herramientas necesarias, les debo gran parte de este logro.

A mis amigos y compañeros, quienes compartieron conmigo las alegrías y grandes momentos de este camino, les agradezco profundamente.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA	2
APROBACIÓN DEL TUTOR.....	3
Dedicatoria.....	4
Agradecimiento.....	5
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	6
RESUMEN	8
ABSTRACT.....	9
Introducción.....	10
Marco Teórico.....	11
Materiales y Métodos.....	22
Resultados y Discusión	29
Conclusiones.....	45
Anexos Fotografías	50
Anexos Graficas.....	56

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Limitaciones en la Evaluación del Movimiento Vertical.....	23
Tabla 2. Limitaciones en la Evaluación del Movimiento Longitudinal, Aceleración y Frenado.....	24
Tabla 3. Especificaciones de Vehículo M1.....	24
Tabla 4. Condiciones de prueba.....	28
Tabla 5. Variables de evaluación.....	29
Tabla 6. ANOVA de movimiento vertical.....	40
Tabla 7. ANOVA de movimiento longitudinal.....	41

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ejemplos de gráficas de vibraciones mecánicas.....	12
Figura 2. Tipos de movimientos en el vehículo	12
Figura 3. Suspensión semirrígida tipo torsional.....	14
Figura 4. Partes del sistema de suspensión McPherson.....	14
Figura 5. Tipos de muelles	15
Figura 6. Amortiguador hidráulico	16
Figura 7. Amortiguador telescópico.....	16
Figura 8. Ubicación de la barra estabilizadora.....	17
Figura 9. Tipos de brazos de suspensión.....	17
Figura 10. Rotula	18
Figura 11. Ubicación de bujes y mangueta.....	18
Figura 12. Magnitudes de una gráfica.....	20
Figura 13. Análisis de gráficas de vibraciones mecánicas en dominio del tiempo vs frecuencia.....	20
Figura 14. Modelo de dos grados de libertad	21
Figura 15. Esquema de análisis de vibraciones	23
Figura 16. Sensor Acelerómetro WTVB01-485	25
Figura 17. Software Sensor Acelerómetro WTVB01-485	26
Figura 18. Ubicación de acelerómetro.....	27
Figura 19. Promedios de Movimiento Vertical.....	30
Figura 20. Curvas de frecuencia de vibración con 40km/h.....	31
Figura 21. Curvas de frecuencia de vibración con 60km/h.....	31
Figura 22. Curvas de frecuencia de vibración con 80km/h.....	31
Figura 23. Promedios de Movimiento Longitudinal.....	34
Figura 24. Curvas de frecuencia de vibración de aceleración y frenado a 40km/h.....	35
Figura 25. Curvas de frecuencia de vibración de aceleración y frenado a 60km/h.....	35
Figura 26. Curvas de frecuencia de vibración de aceleración y frenado a 80km/h.....	36

INDICE DE ANEXOS DE FOTOGRAFÍAS Y GRÀFICAS

Anexo 1. Colocaciòn de aceleròmetro en amortiguador delantero izquierdo.....	50
Anexo 2. Colocaciòn de aceleròmetro en amortiguador delantero derecho	50
Anexo 3. Colocaciòn de aceleròmetro en amortiguador trasero izquierdo.....	51
Anexo 4. Colocaciòn de aceleròmetro en amortiguador trasero derecho.....	51
Anexo 5. Conexiòn de cables hacia la cabina para amortiguadores delanteros.....	52
Anexo 6. Conexiòn de cables hacia la cabina para amortiguadores traseros	53
Anexo 7. Instalaciòn de software Witmotion	53
Anexo 8. Conexiòn múltiple de los 4 aceleròmetros.....	54
Anexo 9. Calibraciòn de los 4 aceleròmetros.....	54
Anexo 10. Mediciòn de temperatura de disco de freno	55
Anexo 11. Mediciòn de temperatura de tambor de freno	55
Anexo 12. Curvas de velocidad de vibraciòn con 40km/h.....	56
Anexo 13. Curvas de velocidad de vibraciòn con 60km/h.....	56
Anexo 14. Curvas de velocidad de vibraciòn con 80km/h.....	56
Anexo 15. Curvas de àngulo de vibraciòn con 40km/h	57
Anexo 16. Curvas de àngulo de vibraciòn con 60km/h	57
Anexo 17. Curvas de àngulo de vibraciòn con 80km/h	57
Anexo 18. Curvas de desplazamiento de vibraciòn con 40km/h.....	58
Anexo 19. Curvas de desplazamiento de vibraciòn con 60km/h.....	58
Anexo 20. Curvas de desplazamiento de vibraciòn con 80km/h.....	58
Anexo 21. Curvas de velocidad de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 40km/h	59
Anexo 22. Curvas de velocidad de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 60km/h	59
Anexo 23. Curvas de velocidad de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 80km/h	60
Anexo 24. Curvas de àngulo de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 40km/h.....	60
Anexo 25. Curvas de àngulo de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 60km/h.....	61
Anexo 26. Curvas de àngulo de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 80km/h.....	61
Anexo 27. Curvas de desplazamiento de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 40km/h	62
Anexo 28. Curvas de desplazamiento de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 60km/h	62
Anexo 29. Curvas de desplazamiento de vibraciòn de aceleraciòn y frenado a 80km/h	63

ANÁLISIS DE ESTABILIDAD DE UN SISTEMA DE SUSPENSIÓN HIDRÁULICA EN UN VEHÍCULO M1.

Ing. Luis Ibújes. MSc¹, Borys Tapia A.³

¹ *Maestría Especialidad - Universidad, Título Obtenido, email (institucional)*

@internacional.edu.ec, Quito – Ecuador

³ *Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, email*

botapiaan@uide.edu.ec, Quito - Ecuador

RESUMEN

Introducción: La presente tesis se enfoca en el análisis de estabilidad de un sistema de suspensión hidráulica en un vehículo M1 mediante el uso de acelerómetros y un software especializado de recolección de datos de vibraciones. La estabilidad y confort del vehículo son aspectos críticos que se ven afectados por las vibraciones inducidas por diferentes condiciones de superficie y velocidad. **Metodología:** Se investigaron las vibraciones en los movimientos verticales y longitudinales del auto en los amortiguadores mediante la colocación de acelerómetros y la recolección de datos de vibración. Las pruebas se realizaron en distintas superficies (asfalto, adoquín y empedrado) y a diversas velocidades (40 km/h, 60 km/h y 80 km/h). Los parámetros medidos incluyen velocidad, ángulo, desplazamiento y frecuencia de las vibraciones. Posteriormente, se analizó las gráficas sacando una discusión por cada variable bajo la norma Eusama y se realizó un análisis ANOVA para determinar las diferencias significativas en las distintas condiciones de prueba. **Resultados:** Las superficies irregulares y las altas velocidades aumentan significativamente las vibraciones, afectando negativamente la estabilidad y el confort del vehículo. Se observaron vibraciones máximas de hasta 50 Hz en empedrado, mientras que el asfalto ofreció mayor estabilidad con frecuencias inferiores a 35 Hz. **Conclusión:** Los amortiguadores delanteros McPherson son más efectivos en la absorción de vibraciones que los telescópicos traseros con eje torsion, mejorando la estabilidad y el confort del vehículo. Estos resultados destacan la necesidad de optimizar los sistemas de suspensión hidráulica para cumplir con normativas como EUSAMA. Estos resultados ofrecen una base sólida para impulsar avances tecnológicos y mejorar suspensiones en la industria automotriz.

Palabras clave: Suspensión hidráulica, vibraciones, acelerómetro, movimiento longitudinal y vertical, Eusama

ABSTRACT

Introduction: This thesis focuses on the stability analysis of a hydraulic suspension system on an M1 vehicle using accelerometers and specialized vibration data collection software. Vehicle stability and comfort are critical aspects affected by vibrations induced by different surface conditions and speeds. **Introduction:** The present thesis focuses on the stability analysis of a hydraulic suspension system on an M1 vehicle by using accelerometers and specialized vibration data collection software. Vehicle stability and comfort are critical aspects that are affected by vibrations induced by different surface and speed conditions. **Methodology:** Vibrations in vertical and longitudinal movements of the car on the shock absorbers were investigated by placing accelerometers and collecting vibration data. Tests were performed on different surfaces (asphalt, cobblestone and cobblestone) and at various speeds (40 km/h, 60 km/h and 80 km/h). The parameters measured included vibration velocity, angle, displacement and frequency. Subsequently, the graphs were analyzed by drawing a discussion for each variable under the Eusama standard and an ANOVA analysis was performed to determine the significant differences in the different test conditions. **Results:** Uneven surfaces and high speeds significantly increase vibrations, negatively affecting vehicle stability and comfort. Maximum vibrations of up to 50 Hz were observed on cobblestones, while asphalt offered greater stability at frequencies below 35 Hz. **Conclusion:** McPherson front shock absorbers are more effective at absorbing vibrations than telescopic rear torsion axle shock absorbers, improving vehicle stability and comfort. These results highlight the need to optimize hydraulic suspension systems to comply with regulations such as EUSAMA. These results provide a solid foundation to drive technological advances and improve suspensions in the automotive industry.

Keywords: Hydraulic suspension, vibrations, accelerometers, longitudinal and vertical movement, Eusama.

Introducción

La industria automotriz se encuentra en constante evolución, siempre en busca de mejorar la seguridad y el confort de los vehículos. Un aspecto crucial en este proceso es el sistema de suspensión, que juega un papel fundamental en la estabilidad de los automóviles, afectando directamente la comodidad de los ocupantes y su seguridad durante la conducción. Entre las diversas tecnologías de suspensión disponibles, los sistemas hidráulicos se destacan por ser los más utilizados en la industria, gracias a sus ventajas en términos de rendimiento y confiabilidad, lo que los posiciona como una solución clave para mejorar la experiencia de conducción. En este contexto de innovación constante, se ha puesto un gran énfasis en optimizar su capacidad para absorber y reducir vibraciones, contribuyendo así a un mayor confort y estabilidad del vehículo.

Para abordar esta problemática, el presente estudio tiene como objetivo general analizar el comportamiento del sistema de suspensión hidráulica, con un enfoque en la eficiencia de la absorción y generación de vibraciones mecánicas mediante el uso de un acelerómetro en diversas situaciones de prueba de conducción. Asimismo, se investiga los componentes del sistema, evaluando sus parámetros, ventajas y desventajas. Además, se cuantifican las vibraciones generadas y se analizan en distintas condiciones de prueba. Finalmente, se evalúa la respuesta del sistema de suspensión en términos de estabilidad y confort.

Con el fin de fundamentar esta investigación, se han considerado diversos estudios previos que analizan la relación entre las vibraciones y el desempeño de los sistemas de suspensión. (Martinez & Gomez, 2018) exploran cómo las vibraciones verticales, longitudinales y laterales impactan la estabilidad de los vehículos, concluyendo que reducir estas oscilaciones es crucial para mejorar el confort y la seguridad durante la conducción. Su investigación también evaluó modelos como el sistema masa-resorte-amortiguador, que permite comprender la interacción entre los componentes del sistema de suspensión y su efecto en la comodidad de los ocupantes. Estrategias como la optimización de la rigidez de

los resortes y el uso de amortiguadores adaptativos se identifican como elementos clave para alcanzar un equilibrio entre estabilidad y confort.

Por otro lado, (Sanchez & Torres, 2019) compararon sistemas de suspensión hidráulica y semiactivos, observando que los sistemas hidráulicos presentan ventajas significativas en la absorción de vibraciones. Sin embargo, señale que su desempeño puede verse limitado en terrenos irregulares. También exploraron el diseño de suspensiones activas, que ajustan dinámicamente sus características frente a fuerzas externas, optimizando la experiencia de conducción al reducir oscilaciones extremas y mejorando tanto la estabilidad como el confort de los ocupantes.

Además, (Hurel, Teran, Flores, & Peralta, 2017) destacaron la efectividad de las suspensiones semiactivas para mitigar las vibraciones al combinar elementos pasivos y activos, como actuadores electrohidráulicos y fluidos magnetorreológicos. Estas tecnologías permiten que el sistema de suspensión se adapte a diversas condiciones del terreno y estilos de conducción, incrementando así la estabilidad del vehículo.

Finalmente, (Pérez & Torres, 2019) emplearon acelerómetros para medir las vibraciones en diferentes ejes de vehículos y analizar su efecto en los movimientos dinámicos. Sus hallazgos subrayaron la influencia de las vibraciones en la estabilidad vehicular y su relevancia para evaluar el confort durante la conducción, destacando la importancia de los métodos experimentales en la evaluación de sistemas de suspensión.

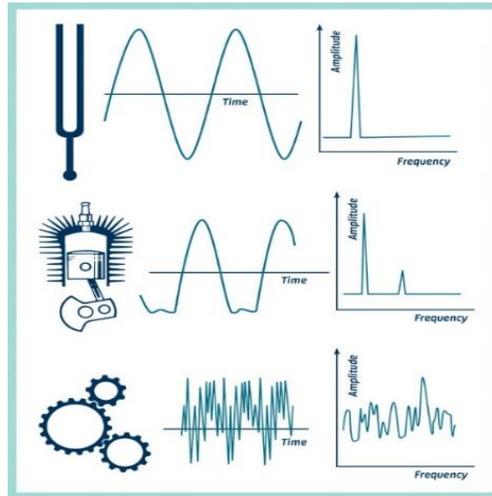
Marco Teórico

Se denomina vibración a cualquier movimiento que se repite periódicamente después de cierto intervalo de tiempo. Por lo general, un sistema vibratorio comprende un componente para retener energía potencial (como un resorte o elemento elástico), otro para mantener la energía cinética (tal como una masa o elemento inercial), y un mecanismo a través del cual la energía se disipa progresivamente (como un amortiguador); como la suspensión de un automóvil: la masa, el resorte y el amortiguador se pueden identificar

como componentes individuales (la masa en la forma del cuerpo, el resorte en la suspensión y el amortiguador en la forma de los amortiguadores) (Rao, 2012)

Figura 1

Ejemplos de graficas de vibraciones mecánicas

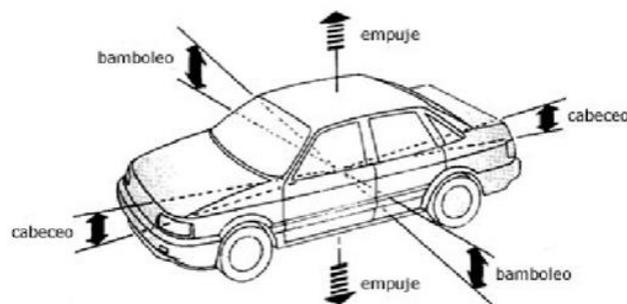


Fuente: (Brüel & Kjær, s.f.)

Estas vibraciones causan cambios en los movimientos u oscilaciones del vehículo que son causadas habitualmente por imperfecciones del terreno, aplicación de una carga lateral al vehículo y estilo de conducción inadecuado. Se permite distinguir tres tipos: la primera cuando se generan al atravesar un terreno con irregularidades o baches se conoce como movimiento de empuje se presenta en el movimiento vertical (eje Z); ocurren durante frenadas repentinas o bruscas conocido como movimiento de cabeceo o también movimiento longitudinal (eje X) y cada que al tomar curvas a alta velocidad es un movimiento bamboleo o movimiento lateral (eje Y). (Borja)

Figura 2

Tipos de movimientos en el vehículo



Fuente: (Borja)

“Dependiendo de la cantidad medida, un instrumento de medición de vibración se conoce como vibrómetro, medidor de velocidad, acelerómetro, medidor de fase o medidor de frecuencia”. (Rao, 2012)

Este dispositivo proporciona la habilidad de medir y analizar tanto la velocidad en línea recta como la rotación angular; también, resulta efectivo para llevar a cabo mediciones de incremento de velocidad en situaciones dinámicas, causadas por golpes, desplazamientos, choques o vibraciones, incluyendo vibraciones de baja amplitud y frecuencia que varían entre varias decenas de Hertzios (Transfer Multisort Elektronik, 2020), existen tres tipos MEMS, piezoeléctricos y piezorresistivo, como se menciona respectivamente a continuación:

Emplean una estructura microscópica que se encuentra suspendida dentro del dispositivo y que se desplaza en respuesta a la aceleración. Esta estructura suspendida puede consistir en un resorte o una membrana, cuyo movimiento es detectado a través de variaciones en la capacitancia, resistencia u otros principios microscópicos.

Estos acelerómetros detectan la aceleración mediante el principio de la piezoelectricidad, en el cual ciertos materiales producen una carga eléctrica en respuesta a una fuerza mecánica. Cuando el dispositivo experimenta una aceleración, esta fuerza mecánica se transforma en una señal eléctrica que puede ser cuantificada y evaluada.

Están equipados con material piezorresistivo, el cual se deforma bajo la influencia de la fuerza externa, ocasionando un cambio en la resistencia que luego se convierte en una señal eléctrica captada por el receptor integrado junto al acelerómetro.

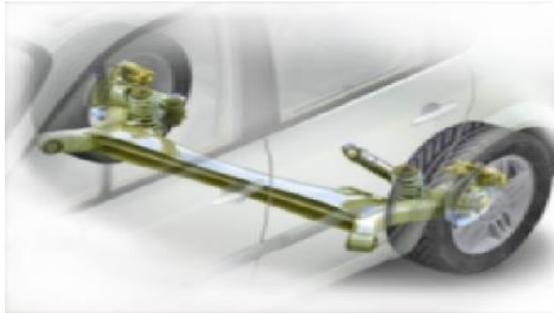
El sistema de suspensión comprende una serie de piezas mecánicas que conectan las ruedas con el bastidor o chasis del vehículo (Muzakkir & Natrayan, 2022), desempeña un doble papel: por un lado, mejora la seguridad activa al contribuir al manejo y frenado del vehículo, y por otro lado asegura una experiencia de conducción placentera al proporcionar comodidad a los ocupantes y aislarlos razonablemente de las vibraciones. Además, la suspensión también cumple la función de proteger tanto al vehículo como a su carga. (Automotriz, 2014).

Suspensión Semirrígida

Similar a la suspensión rígida, está unida por un eje que absorbe parcialmente vibraciones. Se divide en dos tipos: De Dion y torsional, siendo la torsional la más común. Tiene un eje en forma de U que se deforma para absorber vibraciones y se usa en la suspensión trasera del vehículo de prueba.

Figura 3

Suspensión semirrígida tipo torsional



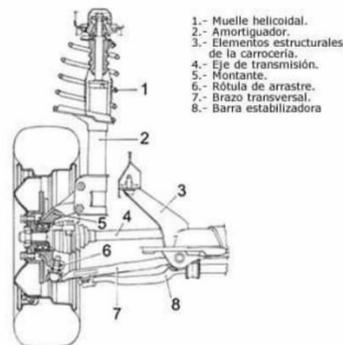
Fuente: (CDA LA 27, 2021)

Suspensión McPherson

Este diseño es el más usado actualmente gracias a su simplicidad, rendimiento, espacio y mantenimiento; suele ir en el tren delantero, en algunas ocasiones en el tren posterior. Consta de un amortiguador recubierto por el muelle helicoidal conectada la parte inferior a la mangueta y la parte superior al chasis. Como ventaja de este sistema es reducción de movimientos con el fin de controlar las vibraciones y mantener un confort más suave en el vehículo.

Figura 4

Partes del sistema de suspensión McPherson



Esquema de un sistema de suspensión McPherson

Fuente: (Sumerlabs, 2024)

Partes del sistema de suspensión de prueba

Muelle

Cumple la misma función que la ballesta al amortiguar las irregularidades de la carretera, pero su diseño es helicoidal de acero. Su principal función es que almacenan y liberan energía para mantener la estabilidad del vehículo. Su característica es la elasticidad suave, gracias al amplio recorrido del resorte sin ocupar mucho espacio ni añadir peso excesivo. La elasticidad depende de factores como el diámetro, calidad del acero, cantidad, grosor y separación de espiras. Es común en la mayoría de los vehículos livianos.

Figura 5

Tipos de muelles



Fuente: (IngeMecanica, s.f.)

Amortiguador

Los amortiguadores hidráulicos y neumáticos funcionan conjuntamente con cojines y resortes para disipar la energía generada por las vibraciones o impactos. Al diseñar o seleccionar un amortiguador, es crucial determinar cómo se gestionará dicha energía. En la mayoría de los casos, esto se transforma en calor dentro del fluido viscoso. En los cilindros hidráulicos, este calor es absorbido por el fluido, mientras que, en los cilindros de aire, el aire caliente generado suele ser liberado a la atmósfera. (A, 2023)

La función principal de un amortiguador es absorber las vibraciones causadas por la elasticidad de los componentes elásticos (muelles, ballestas, neumáticos, barra de torsión, entre otros) conectadas con el chasis; como resultado, convierte el movimiento, como la compresión o expansión de los muelles cuando la rueda encuentra un obstáculo, en calor, lo que permite disipar la energía mecánica. (Rodriguez)

Tipos de amortiguadores

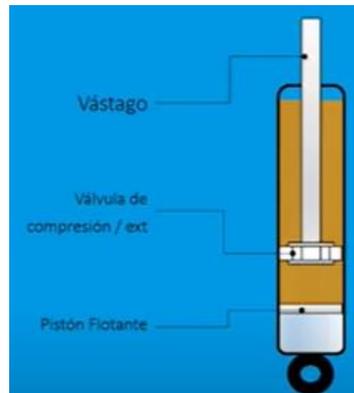
Amortiguador Hidráulico

Estos dispositivos tienen un pistón que está conectado a la parte inferior del vehículo y ejerce presión contra el interior del tubo. A medida que el vehículo se desplaza

hacia adelante y hacia atrás, el pistón se mueve dentro del tubo, creando un efecto de amortiguación que absorbe gran parte de las vibraciones y sacudidas, proporcionando una conducción más suave y comfortable. (Mitsubishi Motors , 2024)

Figura 6

Amortiguador hidráulico



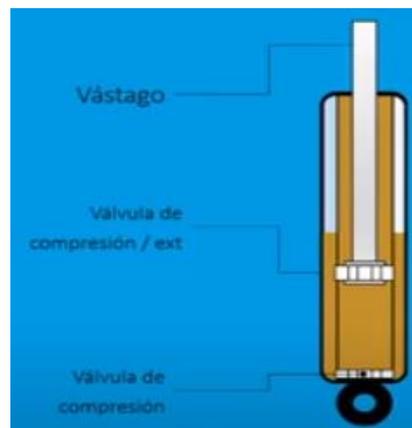
Fuente: (SYDSuspensiónyDirección, 2023)

Amortiguador Telescópico

Un amortiguador telescópico se compone de dos tubos que encajan uno dentro del otro, similar a un telescopio. El tubo interno contiene un pistón fijado a él. Cuando los neumáticos se desplazan, este pistón se mueve dentro del tubo interno. Además, el pistón está conectado a un eje que, a su vez, se enlaza con una válvula. Al abrirse esta válvula, permite que el líquido circule de un lado del pistón al otro, generando así un efecto de amortiguación para las llantas. (Mitsubishi Motors , 2024)

Figura 7

Amortiguador telescópico



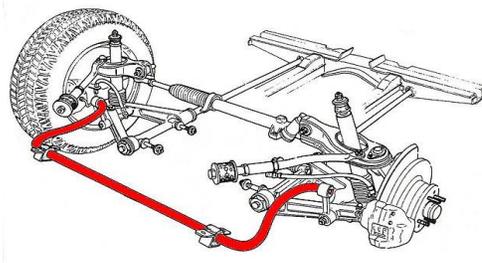
Fuente: (SYDSuspensiónyDirección, 2023)

Barra estabilizadora

Es una barra de acero que conecta las dos ruedas del mismo eje, especialmente en los brazos de suspensión, y controla el balanceo del vehículo en las curvas al contrarrestar los movimientos verticales de las ruedas. Se coloca en los ejes delantero y trasero. Cuando una rueda encuentra una irregularidad y la otra no, la barra se torsiona, conectando las ruedas para reducir el balanceo. Una barra más rígida proporciona una conexión sólida, mejorando la estabilidad y el confort en las curvas. (Ingeniería y Mecánica (I.Y.M) Automotriz, 2019)

Figura 8

Ubicación de la barra estabilizadora



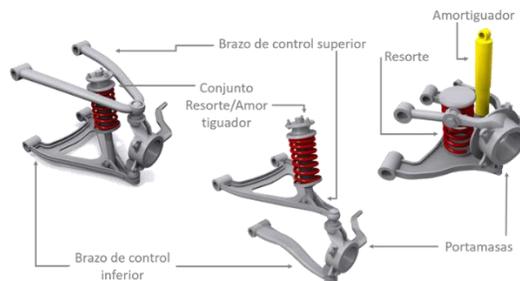
Fuente: (Ingeniería y Mecánica (I.Y.M) Automotriz, 2019)

Mesas o brazos de suspensión

Los brazos de suspensión, hechos de acero, aluminio o acero forjado, conectan las partes de la suspensión con el vehículo. Al ser articulados, soportan esfuerzos durante la extensión y compresión, adaptándose al uso del vehículo (Borja).

Figura 9

Tipos de brazos de suspensión



Fuente: (Diseño Automotriz UFT, s.f.)

Rotulas

Es una articulación esférica engrasada interiormente que permite que la rueda se desplace tanto vertical como lateralmente durante su rotación, absorbiendo los impactos del terreno y brindando estabilidad y control al vehículo. (Expertoautorecambios.es, 2017)

Figura 10

Rotula



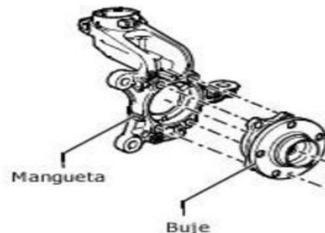
Fuente: (Expertoautorecambios.es, 2017)

Bujes y mangueta

La mangueta de suspensión, hecha de acero o hierro, conecta el buje de la rueda con elementos de la suspensión como mesas, tirantes y amortiguadores. El buje, de forma cónica y generalmente de caucho, sirve como medio de conexión entre varias piezas. (Blas, 2021)

Figura 11

Ubicación de bujes y mangueta



Fuente: (Blas, 2021)

Variables físicas

En el análisis se emplean diversas variables para describir y cuantificar las vibraciones. Las variables medidas por el acelerómetro para la investigación, presentadas a continuación:

Desplazamiento (μm)

Es la medida de la posición de un objeto en un momento específico en el ciclo de vibración, se mide en μm (micrómetro) perteneciente al SI. Representa la distancia vertical que se mueve el sistema de suspensión debido a golpes o cambios en el terreno. (Shabana)

Velocidad (mm/s)

Es la velocidad a la que un objeto se desplaza en un movimiento oscilatorio o de vibración. Se refiere al cambio de posición por unidad de tiempo y se expresa generalmente en in/s (pulgadas por segundo) o mm/s, esta variable mide la rapidez del vehículo en un momento dado. Es clave para evaluar cómo la suspensión responde a diferentes condiciones de manejo, ya que velocidades mayores pueden intensificar la respuesta del sistema ante las irregularidades del terreno. (Shabana)

Angulo (°)

Proporciona información sobre la dirección y la orientación de las fuerzas vibratorias, se puede expresar en grados (°) o radianes (rad). El ángulo mide la inclinación del vehículo durante giros o cambios bruscos de dirección y se expresa en grados. Este parámetro afecta la estabilidad y el comportamiento de la suspensión. (Ling Huang, Yi Lin, & Mo Hsiao, 2010)

Frecuencia (Hz)

Esta variable indica la cantidad de oscilaciones por segundo que experimenta el sistema de suspensión, expresada en Hz. Una frecuencia adecuada permite un equilibrio entre confort y estabilidad, minimizando la transmisión de vibraciones al interior del vehículo y reduciendo el desgaste de los componentes de la suspensión. (Weaver, Timoshenko, & Young, 1981)

Magnitudes de vibración**Amplitud**

Indica la máxima distancia a la que el objeto se aleja de su posición de equilibrio en cualquier dirección, en el tema de las vibraciones mecánicas consiste el tamaño de las oscilaciones o movimientos de un sistema.

Frecuencia

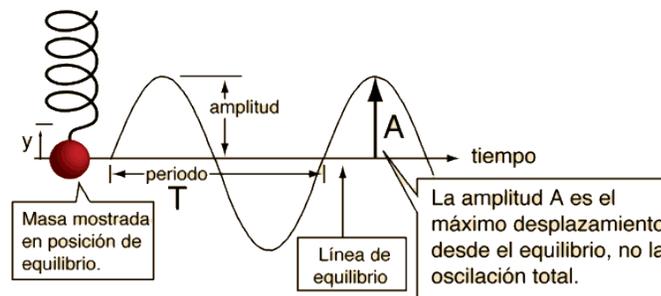
Es la cantidad de ciclos completos de oscilación o movimiento que ejecuta un objeto durante un intervalo de tiempo específico es decir ciclos sobre 1 segundo y se mide Hertz (Hz).

Período

El período se define como la cantidad de tiempo que un objeto tarda en completar un ciclo completo, se mide en segundos, además es lo inverso a la frecuencia.

Figura 12

Magnitudes de una grafica



Fuente: (Educación Continua, 2015)

Vibraciones en el dominio del tiempo vs dominio de la frecuencia

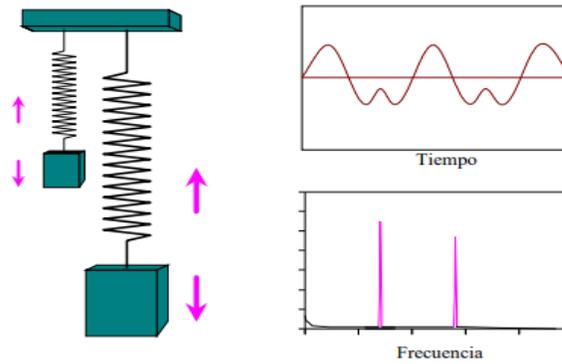
Conocida como forma de onda en el dominio del tiempo, muestra el patrón o la forma de la vibración en cualquier momento dado; analizar una forma de onda en el dominio del tiempo es fundamental para comprender el comportamiento general de la vibración, ya que proporciona información sobre eventos periódicos o transitorios en la señal de vibración. (Rosales, s.f.)

A diferencia del dominio del tiempo, que se centra en el comportamiento de la señal a lo largo del tiempo, el dominio de la frecuencia muestra la amplitud y la fase de la señal en diferentes frecuencias. Este análisis es útil para entender los componentes individuales que forman una señal de vibración compleja, identificando las frecuencias específicas en las que un sistema vibra y la contribución de cada frecuencia a la vibración general. (Rosales, s.f.)

En la Figura 13 en el dominio del tiempo se llama forma de onda, mientras que en el dominio de la frecuencia se denomina espectro. El análisis del espectro implica transformar la información de la señal del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia, lo que permite entender la composición frecuencial de la señal y las contribuciones de cada frecuencia a la misma.

Figura 13

Análisis de graficas de vibraciones mecánicas en dominio del tiempo vs frecuencia



Fuente: (White)

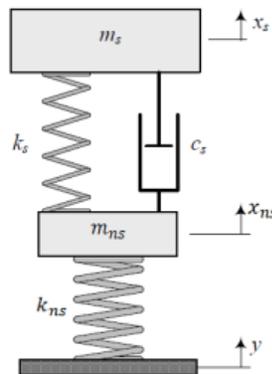
Modelo de dos grados de libertad

Uno de los modelos más ampliamente usados y referenciados en publicaciones sobre diseño automotriz es el de dos grados de libertad, como se muestra en la Figura 17, el cual distingue entre las masas suspendidas y no suspendidas e incluye la elasticidad de los neumáticos.

El modelo está formado por dos masas. La masa m_s refiere a la masa suspendida, equivalente a 1/4 de vehículo; mientras m_{ns} es la masa no suspendida y representa un neumático. Un resorte de constante k y un amortiguador de coeficiente c_s soportan a m_s . La masa m_{ns} está conectado al terreno mediante un elemento elástico de constante k_{ns} que simula la rigidez del neumático. El movimiento vertical se describe mediante dos coordenadas x_s y x_{ns} en respecto a las posiciones de equilibrio de la masa suspendida y no suspendida, respectivamente. (Alvarez, Castañón, Contreras, & Raynal, 2016)

Figura 14

Modelo de dos grados de libertad



Fuente: (Alvarez, Castañón, Contreras, & Raynal, 2016)

Materiales y Métodos

La metodología para desarrollar el presente proyecto, abarca con dos tipos de métodos: experimental y analítico sintético.

Para lograr el objetivo general con el fin de analizar el comportamiento del sistema de suspensión hidráulica de acuerdo a la absorción y generación de vibraciones mecánicas, se empleará un **método experimental**. Este método permite desarrollar pruebas en condiciones controladas de conducción y sobre superficies variadas como se muestra en la **Tabla 1** y **Tabla 2**, aplicando tipos de superficie inducen movimientos verticales (eje Z) y longitudinales (eje X). Durante estas pruebas, se utilizarán acelerómetros para capturar datos cuantitativos en tiempo real de las vibraciones producidas por la suspensión hidráulica. Las variables clave a medir serán la velocidad (mm/s), el desplazamiento (μm), el ángulo de inclinación ($^{\circ}$) y la frecuencia (Hz), ya que estas influyen directamente en la estabilidad y confort del vehículo.

Para cumplir los objetivos específicos, se empleará un método analítico-sintético que permitirá analizar los datos obtenidos de manera detallada. El análisis se realizará a través del estudio de las gráficas de vibración en el dominio del tiempo, examinando las siguientes variables bajo diversas condiciones de prueba:

Velocidad (mm/s): Magnitud que describe la rapidez con la que una parte del sistema de suspensión se desliza en un intervalo de tiempo.

Desplazamiento (μm): Distancia recorrida por el sistema de suspensión desde su posición de equilibrio.

Ángulo ($^{\circ}$): Inclinación del sistema de suspensión durante las pruebas.

Frecuencia (Hz): Cantidad de oscilaciones por segundo de las vibraciones.

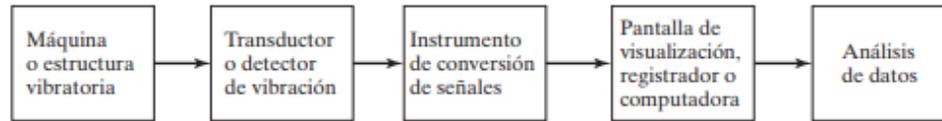
Este análisis permitirá identificar patrones y relaciones entre los datos recopilados, facilitando la evaluación de los componentes de la suspensión en términos de sus parámetros, ventajas y desventajas, así como la cuantificación de las vibraciones generadas. Posteriormente, los resultados se sintetizarán mediante la comparación con la norma EUSAMA, lo que permitirá valorar el desempeño del sistema de suspensión en términos de estabilidad y confort.

Esquema de Metodología

A continuación, se presenta de forma resumida y clara la metodología:

Figura 15

Esquema de análisis de vibraciones



Fuente: Autor

Condiciones de ruta

Para evaluar el rendimiento del sistema de suspensión, se seleccionan distintas condiciones de ruta que permiten variar parámetros como la velocidad y el tipo de superficie. Estas pruebas se realizaron en tramos específicos con características controladas, con el fin de garantizar que los datos obtenidos sean válidos y comparables. Se analizaron dos tipos de movimientos clave: el movimiento longitudinal (eje X) y el movimiento vertical (eje Z). Para el eje X, se eligieron tramos rectos y sin irregularidades, permitiendo una evaluación precisa de las oscilaciones durante el avance y frenado. En cuanto al eje Z, las pruebas se realizaron a velocidades constantes sobre distintos tipos de terreno, de manera que se pudiera medir la capacidad de absorción de vibraciones del sistema de suspensión en condiciones controladas.

Tabla 1.

Limitaciones en la Evaluación del Movimiento Vertical

Superficie	Condición	Velocidad (km/h)	Distancia (m)
Asfalto	Trayecto plano, largo y recto	80	800
		60	600
		40	500
Adoquín	Trayecto plano, largo y recto	80	800
		60	600
		40	500
Empedrado	Trayecto plano, largo y recto	80	800
		60	600
		40	500

Fuente: Autor

En cuanto al movimiento longitudinal (eje X), se evaluarán los datos solo durante el tiempo de aceleración y frenado hasta detenerse por completo (0 km/h).

Tabla 2.

Limitaciones en la Evaluación del Movimiento Longitudinal Aceleración y Frenado

Superficie	Condición	Velocidad (km/h)
Asfalto	recto	Trayecto plano, largo y
		80
		60
Adoquín	recto	Trayecto plano, largo y
		80
		60
Tierra	recto	Trayecto plano, largo y
		80
		60
		40

Fuente: Autor

Vehículo de prueba

Para las pruebas de estabilidad se utilizó un vehículo de categoría M1 tipo sedán, elegido debido a su representatividad en la industria automotriz como automóvil de uso urbano y traslados cotidianos. Este tipo de vehículo, equipado con un sistema de suspensión hidráulica, permite evaluar la eficiencia en la absorción de vibraciones y su efecto en la estabilidad y el confort. Las características clave del vehículo, detalladas en la Tabla 3, lo convierten en una plataforma adecuada para obtener datos aplicables en condiciones reales de conducción.

Tabla 3.

Especificaciones de Vehículo M1

Datos	Especificaciones
Longitud total (mm)	4290
Distancia entre ejes (mm)	1462
Ancho total (mm)	1690
Altura (mm)	1500
Peso Vacío (kg)	1012
Peso bruto vehicular (kg)	1470

Capacidad de carga (kg)	458
Suspensión Delantera	McPherson
Suspensión Trasera	Eje de torsión
Amortiguador Delantero	Hidráulicos
Amortiguador Trasero	Telescópicos

Fuente: (Chevrolet, 2019)

Acelerómetro Witmotion WTVB01-485

Para medir las vibraciones del sistema de suspensión, se empleó el acelerómetro Witmotion WTVB01-485, un dispositivo especializado que utiliza tecnología MEMS (sistemas microelectromecánicos) para convertir las vibraciones mecánicas en señales eléctricas procesables. Este equipo fue elegido debido a su diseño robusto y precisión, que lo hacen adecuado para aplicaciones automotrices y entornos industriales, donde las condiciones pueden ser adversas. El acelerómetro permite medir variables críticas como la velocidad, ángulo, desplazamiento y frecuencia de vibración en los tres ejes, proporcionando datos detallados necesarios para analizar la estabilidad y el confort del vehículo en diversas condiciones de prueba. El WTVB01-485 es un dispositivo robusto, con una capacidad de resistencia de hasta 20,000 g y un nivel de protección IP67, diseñado para soportar condiciones extremas sin afectar su funcionamiento. Además, el imán utilizado también provino del fabricante Witmotion, siendo parte del equipo original y no colocado de forma externa. (WITMOTION, 2022)

Figura 16

Sensor Acelerómetro WTVB01-485



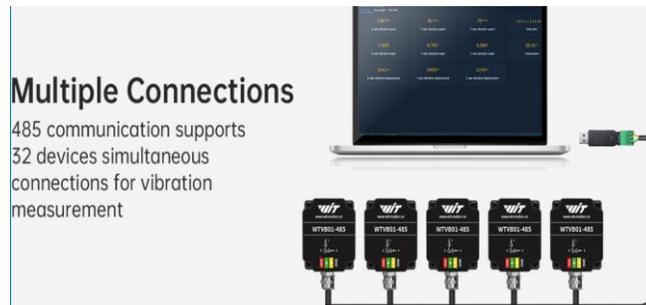
Fuente: (WITMOTION, 2022)

Software WitMotion

El software permite la visualización, recopilación y guardar los datos de velocidad, desplazamiento y ángulo productos de la vibración en los tres ejes XYZ, proporcionando datos cuantitativos, graficas de lineales y graficas de dispersión. Además, permite la múltiple conexión con más de 32 acelerómetros al mismo tiempo como se muestra en la Figura 17; pero este caso solamente será la visualización de 4 acelerómetros.

Figura 17

Software Sensor Acelerómetro WTVB01-485



Fuente: (WITMOTION, 2022)

Ubicación del acelerómetro

Para obtener mediciones precisas de las vibraciones transmitidas, se ubicaron los acelerómetros directamente en los amortiguadores del sistema de suspensión. Dado que los amortiguadores son componentes clave en el control de vibraciones y en la absorción de impactos, su instrumentación permite capturar datos específicos y relevantes para el análisis de la estabilidad y confort. Los amortiguadores controlan el movimiento de las llantas y la carrocería, reduciendo el rebote (movimiento vertical), la cabeceo (movimiento longitudinal) y el balanceo (movimiento lateral) del vehículo. La posición exacta del acelerómetro en el amortiguador es fundamental para garantizar la representatividad de las mediciones. Por ello, se optó por fijarlo en el cuerpo del amortiguador utilizando un imán potente mismo del acelerómetro, reforzado con abrazaderas que aseguran la estabilidad del sensor durante las pruebas. Además, el acelerómetro fue instalado cerca de los extremos superior e inferior del amortiguador, lo que facilita la captura de datos precisos sobre las vibraciones en ambas fases de compresión y expansión, optimizando así la calidad de la información obtenida para el análisis de desempeño del sistema de suspensión.

Figura 18

Ubicación de acelerómetro



Fuente: Autor

Normativa Eusama

La norma EUSAMA, desarrollada por la European Shock Absorber Manufacturers Association, es un protocolo ampliamente reconocido en la industria automotriz para evaluar el desempeño de los sistemas de suspensión. Su principal objetivo es garantizar la adherencia óptima de las ruedas al terreno, reduciendo las oscilaciones verticales y longitudinales, y optimizando así la estabilidad y el confort durante la conducción. Este estándar mide específicamente la capacidad de la suspensión para reducir las vibraciones a través del análisis de frecuencias, asegurando un contacto continuo entre las ruedas y la superficie, un elemento clave para la seguridad del vehículo y la experiencia de conducción.

Si bien la norma no considera directamente variables como la velocidad, el desplazamiento o el ángulo, estas tienen una relación indirecta con el comportamiento vibratorio y pueden enriquecer el análisis. Por ejemplo, la velocidad afecta la magnitud de las vibraciones, el desplazamiento representa la amplitud de las oscilaciones y el ángulo influye en la estabilidad durante las maniobras. Sin embargo, el enfoque en las frecuencias de vibración permite evaluar de manera precisa el desempeño dinámico del sistema de suspensión en términos de estabilidad y confort. Este enfoque especializado vincula los resultados del análisis experimental con un marco técnico internacionalmente aceptado,

proporcionando un estándar de referencia confiable para la industria automotriz.
(Georythmics, 2019)

La norma EUSAMA no define un rango fijo de frecuencias en sus procedimientos, pero, según investigaciones y aplicaciones prácticas, los ensayos relacionados con esta norma suelen involucrar frecuencias de vibración que oscilan entre 0 Hz y 25 Hz. Este intervalo permite analizar el desempeño del sistema de suspensión en términos de confort y estabilidad del vehículo, aunque el rango exacto puede variar dependiendo del diseño del banco de pruebas y el propósito del estudio. (Henaó & Zapata, 2017)

Condiciones previas

A continuación, se proporciona una lista detallada de las condiciones previas de prueba para evaluar el sistema de suspensión.

Tabla 4.

Condiciones de prueba

Superficie	Condición	Velocidad (km/h)
Asfalto	Trayecto plano, largo y recto	80
		60
		40
Adoquín	Trayecto plano, largo y recto	80
		60
		40
Tierra	Trayecto plano, largo y recto	80
		60
		40

Fuente: Autor

Se realizaron mediciones de la temperatura del sistema de frenos utilizando una pistola de medición infrarroja, cuyos resultados se presentan en los Anexos 9 y 10. Estas mediciones son fundamentales, ya que el sistema de frenos debe operar dentro de un rango óptimo de temperatura para asegurar un rendimiento eficiente y prevenir la generación de vibraciones que puedan afectar la estabilidad y el confort del vehículo.

Resultados y Discusión

Se centra en la evaluación de la estabilidad y el confort de un vehículo de categoría M1 equipado con un sistema de suspensión hidráulica. Para ello, se han diseñado pruebas específicas que examinan los movimientos verticales y longitudinales del vehículo, ya que ambos son factores clave para el desempeño del sistema de suspensión. Aunque el movimiento lateral también influye en la estabilidad, este queda fuera del alcance del presente estudio debido a la complejidad y los recursos necesarios para incluirlo.

El análisis del movimiento vertical se realizará bajo condiciones de velocidad constante, lo cual permite eliminar variables externas como aceleraciones o frenadas que podrían alterar la respuesta natural del sistema de suspensión. Esta configuración facilita el enfoque en las oscilaciones generadas exclusivamente por las irregularidades del terreno, permitiendo evaluar cómo las frecuencias y amplitudes afectan tanto el confort como la estabilidad del vehículo. Además, esta condición simula situaciones comunes de conducción sobre diferentes superficies, proporcionando datos consistentes para medir la eficiencia del sistema en la absorción de vibraciones verticales.

Por otro lado, el movimiento longitudinal será analizado durante las maniobras de frenado, ya que este escenario genera una transferencia de carga hacia el eje delantero, lo que puede comprometer la estabilidad y adherencia de las ruedas. Las gráficas obtenidas, que combinan aceleración y frenado, ofrecen una visión detallada del cabeceo del vehículo, un factor clave para la estabilidad y la experiencia de conducción. Este enfoque permite evaluar cómo el sistema hidráulico de suspensión gestiona las oscilaciones longitudinales bajo condiciones críticas, asegurando un control efectivo y el confort de los ocupantes.

Esta tabla sintetiza las variables esenciales para evaluar el comportamiento del sistema de suspensión bajo distintas condiciones para ambos movimientos.

Tabla 5.

Variables de evaluación

Variable	Descripción
Superficie	Asfalto, adoquín, empedrado.
Velocidad (km/h)	40, 60, 80.
Frecuencia de vibración (Hz)	Oscilaciones por segundo de las vibraciones.

Velocidad de vibración (mm/s)	Velocidad a la que un objeto se desplaza en un movimiento oscilatorio.
Ángulo de vibración (°)	Inclinación del sistema de suspensión.
Desplazamiento de vibración (um)	Distancia recorrida desde su posición de equilibrio por el sistema de suspensión.

Fuente: Autor

MOVIMIENTO VERTICAL (Z)

La tabla de promedios presenta los datos calculados a partir de las mediciones realizadas en los movimientos verticales del vehículo, se calculó gracias a la media de los datos recopilados.

Figura 19

Promedios de Movimiento Vertical

SUPERFICIE	VELOCIDAD (KM/H)	EJE	VELOCIDAD DE VIBRACION (mm/s)	ANGULO DE VIBRACION (°)	DESPLAZAMIENTO DE VIBRACION (um)	FRECUENCIA DE VIBRACION (Hz)
ASFALTO	40	DELANTERO	8	0,009	34	31
		TRASERO	8	0,010	41	27
	60	DELANTERO	10	0,012	42	30
		TRASERO	10	0,013	48	28
	80	DELANTERO	15	0,019	57	27
		TRASERO	20	0,022	66	28
ADOQUIN	40	DELANTERO	19	0,024	82	31
		TRASERO	22	0,028	113	27
	60	DELANTERO	22	0,031	92	32
		TRASERO	32	0,042	131	28
	80	DELANTERO	29	0,032	110	35
		TRASERO	32	0,044	135	33
EMPEDRADO	40	DELANTERO	75	0,116	292	34
		TRASERO	95	0,102	418	32
	60	DELANTERO	100	0,124	341	41
		TRASERO	111	0,118	427	37
	80	DELANTERO	105	0,128	354	42
		TRASERO	115	0,127	431	37

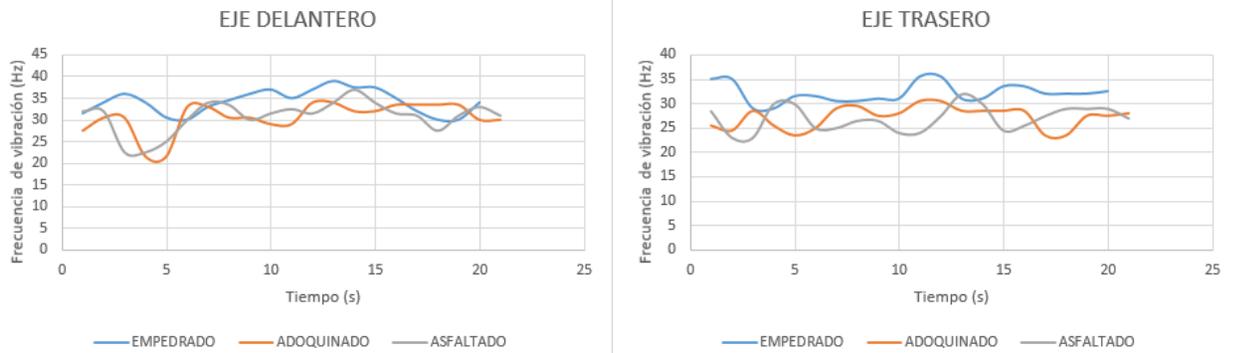
Fuente: Autor

A continuación, se detalla los análisis de vibración que incluyen la frecuencia, la velocidad, el ángulo y el desplazamiento de acuerdo a las gráficas combinadas para el eje delantero y trasero a partir de los cuatro amortiguadores del vehículo. Debido a la cantidad de gráficas generadas, los resultados detallados de las variaciones en velocidad, ángulo de vibración y frecuencia se incluyen en los Anexos.

Este análisis aborda la frecuencia de vibración en el eje Z del vehículo, medida en Hertz (Hz), en diferentes superficies (asfalto, adoquín y empedrado) y velocidades (40 km/h, 60 km/h y 80 km/h), como se detalla en las Figuras 20, 21 y 22.

Figura 20

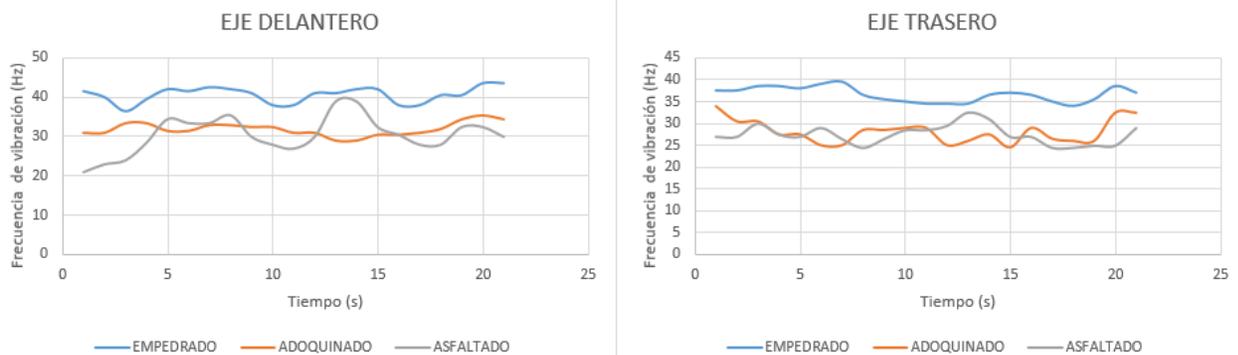
Curvas de frecuencia de vibración con 40km/h.



Fuente: Autor

Figura 21

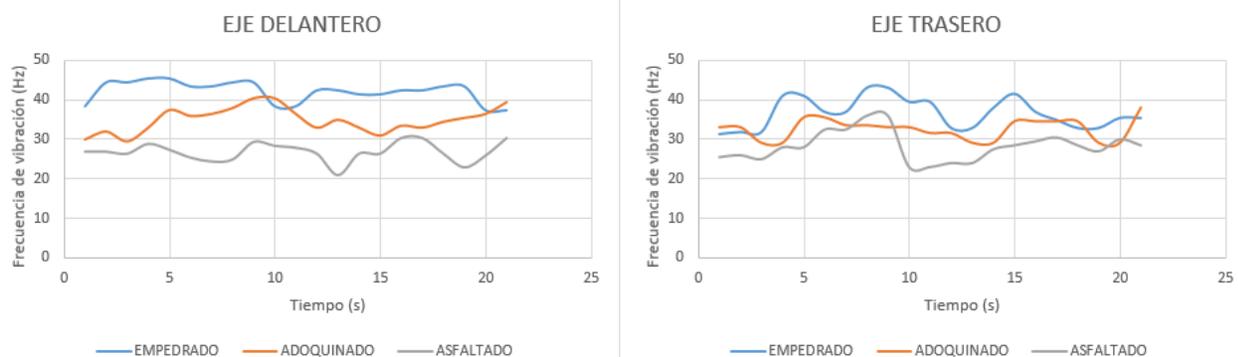
Curvas de frecuencia de vibración con 60km/h.



Fuente: Autor

Figura 22

Curvas de frecuencia de vibración con 80km/h.



Fuente: Autor

El análisis de frecuencias según el tipo de terreno muestra que el empedrado genera valores significativamente más altos y fluctuantes, alcanzando hasta 45 Hz en algunos casos. Este comportamiento se debe a las irregularidades propias del terreno, lo que provoca un mayor estrés en el sistema de suspensión y un incremento en las oscilaciones transmitidas al chasis. Al superar los 25 Hz, rango ideal definido por la norma EUSAMA, estas frecuencias es un indicador de ineficiencia en la absorción de vibraciones. Además, este fenómeno causa una pérdida temporal de adherencia de las ruedas, afectando la estabilidad del vehículo y el confort del conductor.

Las gráficas evidencian diferencias entre los comportamientos de los ejes delantero y trasero, especialmente en terrenos irregulares. El eje delantero, configurado con suspensión tipo McPherson, tiende a transmitir más vibraciones hacia el chasis, lo que explica las frecuencias ligeramente más altas en comparación con el eje trasero.

La superficie empedrada genera las frecuencias más altas y fluctuantes, lo cual es esperado debido a las irregularidades del terreno. Sin embargo, si estas frecuencias superan los límites razonables (como los 25 Hz que considera EUSAMA como rango ideal), es un indicador de que el sistema de suspensión no está absorbiendo correctamente las vibraciones. Este comportamiento provoca una pérdida de adherencia temporal de las ruedas, especialmente si los picos son elevados.

A medida que la velocidad aumenta (40, 60, 80 km/h), las frecuencias también tienden a elevarse, particularmente en el empedrado. Esto indica que el sistema de suspensión está trabajando más intensamente, pero si las frecuencias son demasiado altas o inconsistentes, es un signo de ineficiencia en la absorción de vibraciones.

Análisis de velocidad de vibración

Se evaluó la velocidad de vibración en el eje Z a 40 km/h, 60 km/h y 80 km/h sobre asfalto, adoquín y empedrado (ver Anexos 12, 13 y 14). Los resultados indican que las vibraciones más altas se producen en el empedrado, llegando a 180 mm/s, lo que representa un mayor desafío para la suspensión y estabilidad del vehículo.

La suspensión McPherson delantera mostró mayor eficacia en la absorción de vibraciones, manteniendo amplitudes más bajas en todos los terrenos y velocidades, en comparación con la suspensión trasera. En superficies adoquinadas, la vibración es moderada, aunque aún presenta desafíos para el confort, especialmente en el eje trasero.

El asfalto registró las menores velocidades de vibración (picos inferiores a 20 mm/s), demostrando el óptimo desempeño de la suspensión en superficies lisas. Se recomienda enfocarse en mejorar la absorción en terrenos irregulares.

Análisis de ángulo de vibración

Este análisis, cuyas gráficas se encuentran en los Anexos 15,16 y 17, proporciona una visión integral sobre cómo las diferentes condiciones de conducción afectan la estabilidad angular del vehículo, permitiendo una evaluación detallada de la eficacia de los sistemas de suspensión en mantener la alineación y el balance del chasis. Además, se destaca la relevancia del ángulo de vibración en términos de confort y seguridad del conductor y los pasajeros, así como su impacto en la longevidad de los componentes del sistema de suspensión.

Las gráficas muestran que los picos del ángulo de vibración son más altos en superficies de empedrado en comparación con asfalto y adoquín. Estos picos indican momentos de alta inestabilidad angular, sugiriendo que la superficie de empedrado genera mayores desafíos para mantener la alineación del vehículo. El asfalto presenta los picos más bajos, indicando mejor estabilidad.

El sistema de suspensión delantera McPherson demostró mayor eficacia al absorber las oscilaciones, manteniendo ángulos de vibración más bajos en comparación con la suspensión trasera telescópica. Esto sugiere que la suspensión delantera proporciona un mayor confort y estabilidad, mientras que la trasera requiere mejoras para reducir las oscilaciones en terrenos irregulares.

Análisis de desplazamiento de vibración

El desplazamiento fue mayor en terrenos empedrados, alcanzando hasta 700 μm en el eje trasero, lo que indica un alto nivel de estrés en la suspensión y un impacto negativo en el confort.

Las superficies asfaltadas muestran los menores desplazamientos de vibración, con valores que no superan los 100 μm . Esto resalta la capacidad del sistema de suspensión para proporcionar una conducción más suave y estable en condiciones óptimas.

El eje delantero tiende a tener un desplazamiento de vibración ligeramente menor que el trasero en todas las superficies, lo que sugiere que la suspensión delantera McPherson es más eficiente en la absorción de vibraciones comparada con la suspensión

trasera. Amortiguadores menos eficientes resultan en mayores desplazamientos de vibración. Esto es evidente en el eje trasero, donde los desplazamientos son mayores en comparación con el eje delantero. Esto sugiere que los amortiguadores traseros son menos efectivos en absorber las vibraciones.

El análisis muestra que los amortiguadores son clave para reducir las oscilaciones del vehículo. Un mayor desplazamiento de vibración implica menor absorción de impactos, afectando el confort y la estabilidad. Las gráficas indican que el terreno empedrado genera los mayores desplazamientos, destacando la necesidad de mejorar los amortiguadores para una conducción más suave.

MOVIMIENTO LONGITUDINAL (X)

La tabla de promedios presenta los datos calculados a partir de las mediciones realizadas en los movimientos longitudinales del vehículo en el momento de frenado, se calculó gracias a la media de los datos recopilados.

Figura 23

Promedios de Movimiento Longitudinal

SUPERFICIE	VELOCIDAD (KM/H)	EJE	VELOCIDAD DE VIBRACION (mm/s)	ANGULO DE VIBRACION (°)	DESPLAZAMIENTO DE VIBRACION (um)	FRECUENCIA DE VIBRACION (Hz)
ASFALTO	40	DELANTERO	8	0,002	36	33
		TRASERO	8	0,003	44	27
	60	DELANTERO	12	0,003	48	34
		TRASERO	12	0,006	61	28
	80	DELANTERO	15	0,004	51	34
		TRASERO	14	0,008	72	28
ADOQUIN	40	DELANTERO	24	0,008	95	34
		TRASERO	22	0,009	102	27
	60	DELANTERO	28	0,009	107	35
		TRASERO	24	0,012	122	29
	80	DELANTERO	30	0,010	113	35
		TRASERO	28	0,014	130	29
EMPEDRADO	40	DELANTERO	93	0,026	350	35
		TRASERO	123	0,057	529	30
	60	DELANTERO	120	0,037	418	37
		TRASERO	130	0,074	544	32
	80	DELANTERO	137	0,041	470	38
		TRASERO	146	0,077	601	33

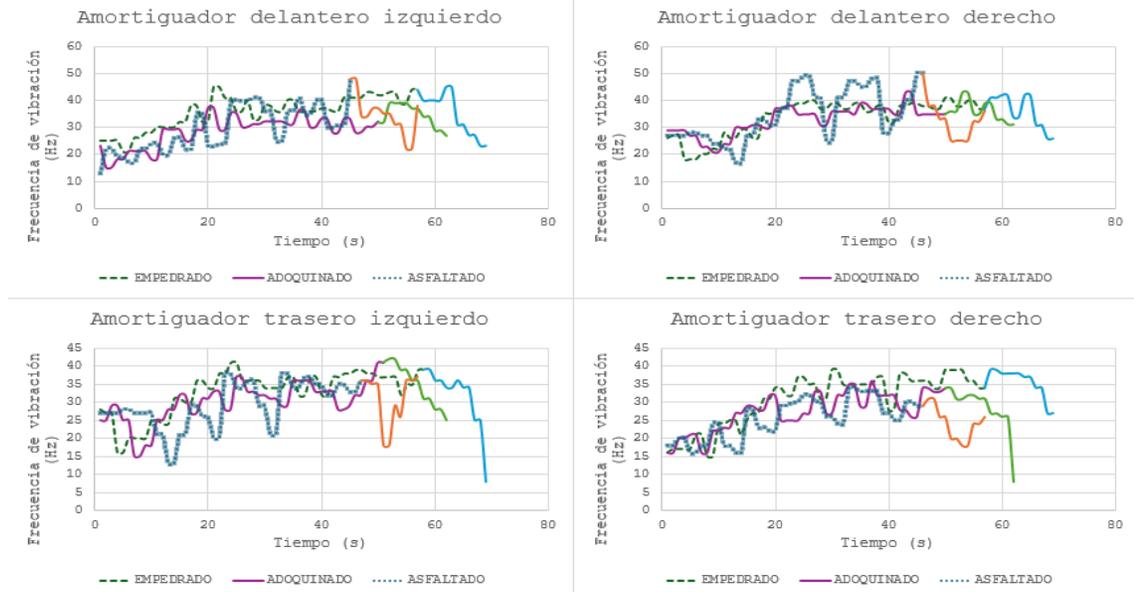
Fuente: Autor

Los parámetros analizados incluyen la velocidad de vibración, el ángulo de vibración, el desplazamiento de vibración y la frecuencia de vibración. Estas mediciones permiten evaluar cómo el sistema de suspensión responde a las oscilaciones longitudinales generadas durante las aceleraciones y desaceleraciones del vehículo. A continuación, se

presentan las gráficas correspondientes a los ciclos de aceleración y frenado diferenciadas por colores respectivamente (ver Anexos Gráficas).

Figura 24

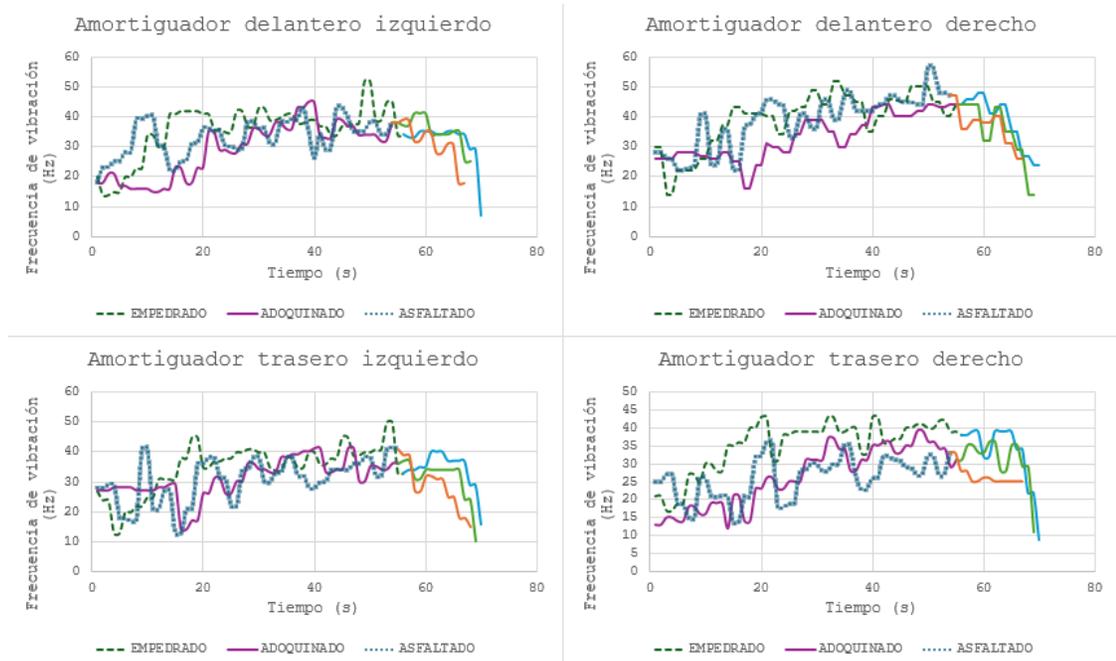
Curvas de frecuencia de vibración de aceleración y frenado a 40km/h



Fuente: Autor

Figura 25

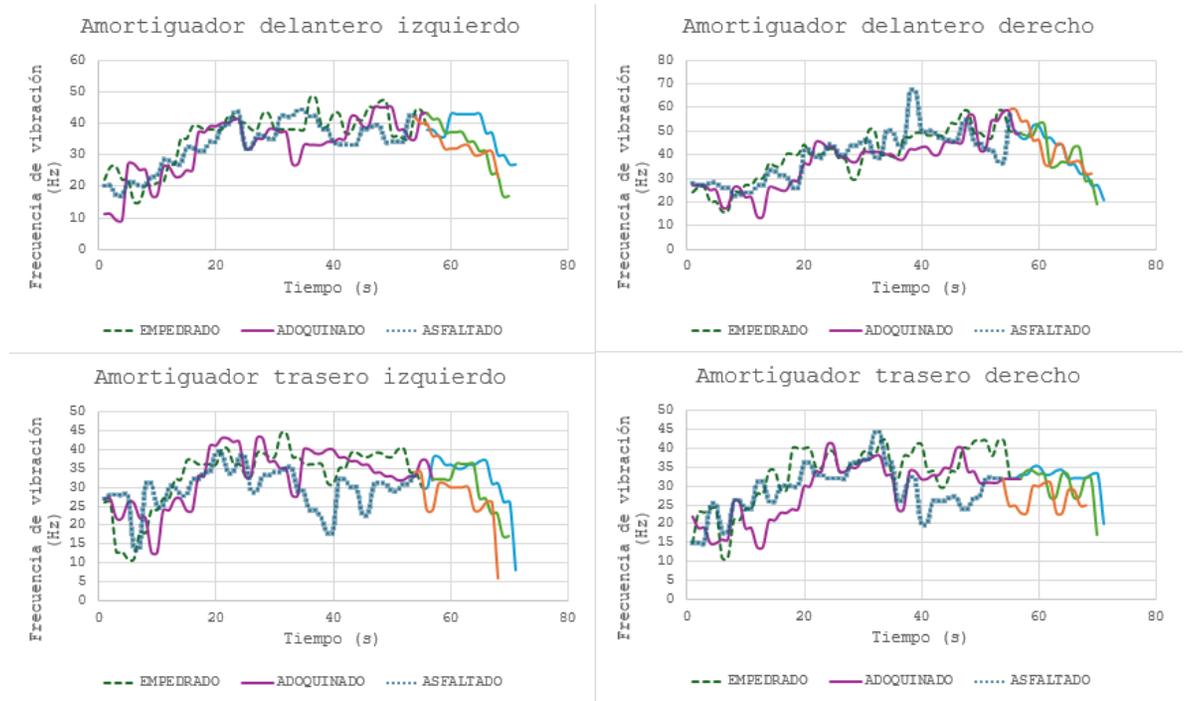
Curvas de frecuencia de vibración de aceleración y frenado a 60km/h



Fuente: Autor

Figura 26

Curvas de frecuencia de vibración de aceleración y frenado a 80km/h



Fuente: Autor

El empedrado genera las mayores frecuencias de vibración, alcanzando picos de hasta 50 Hz, lo que afecta negativamente la estabilidad y el confort del vehículo. El adoquinado presenta frecuencias moderadas, con picos alrededor de 40 Hz, siendo las vibraciones menos intensas, pero aún significativas. El asfalto proporciona la conducción más estable, con frecuencias de vibración más bajas, generalmente por debajo de 35 Hz, confirmando que es la superficie más favorable para una conducción suave.

El terreno empedrado genera las mayores frecuencias de vibración, alcanzando picos de hasta 50 Hz, superando significativamente el rango ideal establecido por la norma EUSAMA (0-25 Hz). Esto sugiere que el sistema de suspensión presenta dificultades para absorber las oscilaciones generadas en este tipo de terreno, lo cual compromete la adherencia de las ruedas al suelo y afecta tanto la estabilidad del vehículo como el confort de los pasajeros. Esta situación puede resultar en pérdida de tracción y mayor desgaste del sistema de suspensión.

Durante la aceleración, la transferencia de peso hacia la parte trasera provoca mayores frecuencias de vibración en los amortiguadores traseros debido al aumento de

carga dinámica. Este fenómeno está directamente relacionado con la capacidad del sistema de suspensión para absorber y disipar la energía generada, un aspecto que la norma EUSAMA evalúa mediante el índice de eficiencia de los amortiguadores. En el caso del frenado, la transferencia de peso hacia el eje delantero resulta en picos de frecuencia más elevados en los amortiguadores delanteros, amplificando las oscilaciones en esa zona. Estas respuestas dinámicas son clave para determinar el estado de los componentes del sistema de suspensión, ya que la norma considera estos eventos para identificar posibles desbalances o desgastes en los amortiguadores.

La respuesta del motor y la transmisión durante la aceleración puede introducir vibraciones adicionales. Un motor que genera altas vibraciones puede transmitir estas vibraciones a través del chasis y la suspensión, amplificando los picos de frecuencia.

Es importante considerar la influencia de otros sistemas automotrices, como el sistema de frenos y la dirección, introducen vibraciones adicionales. Los frenos, en particular, pueden causar picos de vibración al aplicarse o liberarse rápidamente.

Análisis de velocidad de vibración

Las pruebas se realizaron en distintas superficies (asfalto, adoquín y empedrado) como se muestra en los Anexos 21, 22 y 23 y se incluyeron fases de aceleración y frenado.

Durante la aceleración, la transferencia de peso del vehículo hacia la parte trasera aumenta la carga en los amortiguadores traseros, provocando picos de vibración más altos en este eje. La distribución del peso y el balance del vehículo también influyen en la dinámica de la suspensión y en los picos de vibración observados.

La respuesta del motor y la transmisión durante la aceleración influye significativamente en las vibraciones transmitidas al chasis. Un motor que genera altas vibraciones durante la aceleración puede transferir estas vibraciones a través del sistema de suspensión, afectando la comodidad y estabilidad del vehículo.

Las gráficas muestran claramente que las velocidades de vibración son significativamente más altas cuando el vehículo frena desde velocidades mayores. Por ejemplo, a 80 km/h, las vibraciones alcanzan picos mucho más altos en comparación con los frenados desde 40 km/h o 60 km/h. Esto se debe a la mayor energía cinética del vehículo a velocidades más altas, que se traduce en mayores fuerzas de desaceleración y, por ende, mayores vibraciones.

En todas las gráficas, se observa que las velocidades de vibración disminuyen considerablemente hacia el final del frenado. Esta disminución indica que, a medida que el vehículo reduce su velocidad, la suspensión tiene menos energía vibracional que absorber, lo que resulta en una conducción más suave y controlada. Este comportamiento es crucial para la seguridad, ya que una reducción gradual de las vibraciones ayuda a mantener el control del vehículo y reduce el riesgo de deslizamientos o pérdida de tracción.

Adicionalmente, la interacción entre los sistemas de suspensión delantera y trasera juega un papel importante. La suspensión delantera McPherson, aunque efectiva en absorber vibraciones, puede transmitir más frecuencia al chasis comparado con la suspensión trasera de eje de torsión. Esta diferencia puede influir en la percepción de confort y estabilidad durante la conducción.

Finalmente, es importante considerar que las variaciones en los picos de vibración durante la aceleración y el frenado pueden ser afectadas por otros movimientos del vehículo, como el balanceo lateral y el cabeceo. Estos movimientos adicionales pueden amplificar las vibraciones y contribuir a la complejidad del comportamiento dinámico del vehículo.

A medida que el tiempo de frenado aumenta con la velocidad, se observa que las vibraciones también tienden a ser más pronunciadas. Esto se debe a la mayor energía cinética que debe ser disipada por los sistemas de suspensión y frenado del vehículo. La energía cinética, que es proporcional al cuadrado de la velocidad, explica por qué los picos de vibración son significativamente mayores a 80 km/h en comparación con 40 km/h.

Las gráficas indican que en periodos de frenado prolongados (7 y 8 segundos), las vibraciones son más intensas y se distribuyen de manera uniforme en el tiempo. Esto sugiere un esfuerzo sostenido del sistema de suspensión para manejar las fuerzas de desaceleración.

Análisis de ángulo de vibración

El ángulo de vibración mide la desviación angular que ocurre debido a las oscilaciones del vehículo durante la aceleración y el frenado. Los gráficos correspondientes se encuentran en los Anexos 24, 25 y 26. Este análisis proporciona una visión detallada de cómo las diferentes condiciones de conducción afectan la estabilidad angular del vehículo,

permitiendo evaluar la eficacia de los sistemas de suspensión en mantener el control y la alineación del chasis durante las variaciones de velocidad.

El terreno empedrado genera los ángulos de vibración más altos en ambos ejes y a todas las velocidades, indicando un alto nivel de estrés angular en la suspensión. Esto refleja la dificultad de la suspensión para absorber las irregularidades del terreno, lo que puede afectar la estabilidad y el confort del vehículo.

Las gráficas indican que las mayores oscilaciones angulares ocurren durante los primeros segundos del frenado, especialmente en superficies de empedrado. Este comportamiento puede afectar negativamente la eficiencia del frenado, ya que las oscilaciones angulares pueden causar una distribución desigual de la carga sobre los neumáticos, afectando la tracción y el control del vehículo.

Los amortiguadores traseros presentan mayores ángulos de vibración en comparación con los delanteros, especialmente en superficies empedradas. Por ejemplo, el amortiguador trasero derecho a 80 km/h muestra picos de hasta 0,14 grados. Esta diferencia puede deberse a la transferencia de peso hacia adelante durante el frenado, causando mayores perturbaciones en la parte trasera del vehículo.

A medida que el vehículo se desacelera, los ángulos de vibración disminuyen rápidamente, mostrando una mayor estabilidad hacia el final del frenado. Esta tendencia es más evidente en superficies de asfalto, donde los ángulos de vibración se reducen de manera más uniforme. La estabilidad en los ángulos de vibración es crucial para mantener la alineación y el control del vehículo durante el frenado.

Análisis de desplazamiento de vibración

Las gráficas correspondientes se encuentran en los Anexos 27, 28 y 29, indican que, los picos de desplazamiento de vibración son más altos en superficies de empedrado, alcanzando hasta 1200 μm a 80 km/h, lo que sugiere que el empedrado presenta mayores desafíos para la suspensión durante el frenado. En contraste, el asfalto muestra los picos más bajos, indicando un desplazamiento más controlado y estable.

Durante el frenado, se observa una disminución del desplazamiento de vibración, especialmente en superficies asfaltadas. Esta reducción es crucial para la seguridad, ya que un menor desplazamiento indica una mejor capacidad del sistema de suspensión para absorber las oscilaciones y mantener la estabilidad del vehículo.

Las oscilaciones longitudinales pueden afectar significativamente el comportamiento del chasis durante el frenado. Desplazamientos elevados pueden causar tensiones adicionales en el chasis, aumentando el riesgo de daños estructurales a largo plazo. Evaluar y mejorar la rigidez del chasis puede ayudar a mitigar los efectos negativos de las vibraciones, mejorando la durabilidad y el rendimiento general del vehículo.

Los picos de desplazamiento de vibración disminuyen notablemente durante el frenado, reflejando la capacidad de la suspensión para estabilizar el vehículo. Sin embargo, los picos son más pronunciados en terrenos irregulares, lo que destaca la necesidad de una suspensión más robusta en estas condiciones.

Durante la aceleración, el peso del vehículo se transfiere hacia la parte trasera. Esta transferencia de peso aumenta la carga sobre los amortiguadores traseros, provocando mayores desplazamientos y, por consiguiente, picos de vibración más altos en el eje trasero.

Es importante considerar que el sistema de frenos también puede influir en las vibraciones cuando se suelta el pedal de freno rápidamente, creando un efecto de rebote en la suspensión.

Interpretación ANOVA

En este análisis, se realizó un Análisis de Varianza (ANOVA) utilizando individualmente los datos de la tabla de promedios del movimiento vertical (eje Z) y movimiento longitudinal (eje X) del vehículo. Esta herramienta estadística permite evaluar si existen diferencias significativas entre las medias de diferentes grupos, identificando variaciones atribuibles a las condiciones específicas de la superficie del terreno y la velocidad del vehículo.

La explicación para cada interpretación ANOVA es de la siguiente manera:

Significativo (<0.05): Indica que el p-valor es menor que 0.05, por lo que hay diferencias significativas.

No significativo (>0.05): Indica que el p-valor es mayor que 0.05, por lo que no hay diferencias significativas.

Tabla 6.

ANOVA de movimiento vertical

Tipo de Vibración	Superficie (p-valor)	Significancia (Superficie)	Velocidad (p-valor)	Significancia (Velocidad)
Velocidades de Vibración	1,82E-11	Significativo (<0.05)	0,00791	Significativo (<0.05)
Ángulos de Vibración	4,22E-14	Significativo (<0.05)	0,00135	Significativo (<0.05)
Desplazamientos de Vibración	1,32E-09	Significativo (<0.05)	0,39727	No significativo (>0.05)
Frecuencias de Vibración	0,000347	Significativo (<0.05)	0,139561	No significativo (>0.05)

Fuente: Autor

Tabla 7

ANOVA de movimiento longitudinal

Tipo de Vibración	Superficie (p-valor)	Significancia (Superficie)	Velocidad (p-valor)	Significancia (Velocidad)
Velocidades de Vibración	1,92E-11	Significativo (<0.05)	0,035	Significativo (<0.05)
Ángulos de Vibración	0,000026	Significativo (<0.05)	0,513966	No significativo (>0.05)
Desplazamientos de Vibración	4,96E-09	Significativo (<0.05)	0,344	No significativo (>0.05)
Frecuencias de Vibración	0,222535	No significativo (>0.05)	0,627953	No significativo (>0.05)

Fuente: Autor

Discusión

La falta de antecedentes en el análisis de vibraciones en suspensiones McPherson y de eje de torsión resalta la relevancia de este estudio, que contribuye a comprender cómo las irregularidades de la carretera y la velocidad afectan el comportamiento dinámico del vehículo. Los resultados obtenidos caracterizan las vibraciones causadas por estas irregularidades, así como por factores como el motor, la transmisión y la velocidad. Esta información es clave para optimizar el diseño de suspensiones, mejorando el confort, la estabilidad y el desempeño dinámico del vehículo.

Movimiento Vertical

El análisis ANOVA confirma que las irregularidades del terreno influyen más que la velocidad en la dinámica vertical del vehículo.

El análisis de frecuencias muestra que el terreno empedrado genera los valores más altos, alcanzando hasta 45 Hz, debido a las pronunciadas irregularidades del terreno. Estas frecuencias exceden el rango ideal de 25 Hz establecido por la norma EUSAMA, lo que evidencia ineficiencia en la absorción de vibraciones por parte del sistema de suspensión. Esto ocasiona la pérdida temporal de adherencia de las ruedas, comprometiendo la estabilidad del vehículo y el confort del conductor. En superficies asfaltadas, las frecuencias en el eje delantero disminuyen con el incremento de la velocidad (31 Hz a 40 km/h, 30 Hz a 60 km/h, 27 Hz a 80 km/h), reflejando una mejor distribución de las oscilaciones por parte de la suspensión McPherson, lo que mejora la estabilidad. Por el contrario, el eje trasero muestra frecuencias casi constantes (27-28 Hz) debido a la rigidez de la suspensión de eje de torsión, menos adaptable a cambios de velocidad. En general, el eje delantero presenta frecuencias más altas que el trasero, independientemente de la superficie o velocidad. Esto se debe a la mayor sensibilidad de la suspensión McPherson, que responde de forma más marcada a las irregularidades y soporta mayores cargas dinámicas por su proximidad al motor y al sistema de dirección. En cambio, la suspensión rígida del eje trasero absorbe menos irregularidades, mostrando frecuencias más bajas, pero con limitada capacidad de adaptación a variaciones dinámicas. Este comportamiento diferencia claramente el desempeño de ambos sistemas y su influencia en la estabilidad y confort del vehículo.

El análisis de las vibraciones revela que el eje trasero, presenta velocidades de vibración consistentemente más altas que el eje delantero, especialmente en terrenos irregulares como el empedrado, donde las velocidades superan las del delantero en un rango de 20 a 30 mm/s. Este comportamiento se debe a la menor capacidad de absorción de vibraciones del sistema trasero, que transmite más oscilaciones al chasis. A medida que la velocidad del vehículo aumenta, las vibraciones crecen, particularmente en el empedrado, donde las velocidades aumentan de 75 mm/s a 40 km/h a 115 mm/s a 80 km/h en el eje trasero. Esto refleja que el sistema de suspensión trabaja con mayor intensidad, pero su capacidad de amortiguación disminuye en terrenos complicados.

El análisis de las gráficas de ángulo de vibración resalta la influencia de las diferentes superficies sobre la estabilidad angular del vehículo. Las superficies de empedrado generan picos de ángulo de vibración significativamente más altos en comparación con asfalto y adoquín, lo que indica una mayor inestabilidad angular en terrenos irregulares. Esto sugiere que el empedrado plantea mayores desafíos para mantener la alineación del vehículo, afectando tanto la estabilidad como el confort del conductor y los pasajeros. El análisis muestra que, en empedrado, el eje delantero presenta mayores ángulos de vibración que el eje trasero, lo que indica que la suspensión McPherson delantera es más sensible a las irregularidades de este terreno. Este tipo de suspensión, al ser más reactiva, amplifica las vibraciones en terrenos irregulares como el empedrado, resultando en un mayor ángulo de vibración.

El análisis del desplazamiento de vibración muestra que, en terrenos irregulares como el empedrado, el eje trasero presenta mayores desplazamientos, lo que indica una menor capacidad de absorción de las vibraciones. Esto refleja la limitada eficiencia de los amortiguadores traseros, que no gestionan adecuadamente las oscilaciones, afectando la estabilidad y confort del vehículo. En contraste, la suspensión McPherson delantera muestra desplazamientos menores, lo que evidencia su mayor capacidad para amortiguar vibraciones y proporcionar una conducción más suave. Mejorar los amortiguadores traseros en terrenos difíciles podría optimizar el comportamiento dinámico y la comodidad del vehículo.

Movimiento Longitudinal

El análisis ANOVA confirma que las irregularidades del terreno influyen más que la velocidad en la dinámica longitudinal del vehículo.

Las frecuencias de vibración varían según la superficie: en asfalto, se mantienen entre 27 Hz y 34 Hz, garantizando estabilidad y confort, mientras que en adoquín y empedrado alcanzan valores más altos, con picos de 38 Hz en el eje delantero y 33 Hz en el trasero, excediendo los límites de la norma EUSAMA. El eje trasero, con suspensión de eje de torsión, registra frecuencias menores debido a su menor exposición a cargas dinámicas, a diferencia del eje delantero con suspensión McPherson.

La velocidad de vibración aumenta con la irregularidad del terreno y la velocidad del vehículo. En superficies asfaltadas, las vibraciones son bajas (8 mm/s a 15 mm/s), lo

que garantiza estabilidad y confort. En adoquines y empedrados, las velocidades de vibración alcanzan niveles más altos, especialmente en empedrado (hasta 146 mm/s en el eje trasero a 80 km/h), lo que refleja las limitaciones del sistema de suspensión para amortiguar eficientemente las oscilaciones en terrenos irregulares. En frenado, el eje trasero, siendo más rígido debido a su diseño de eje de torsión, tiene una capacidad limitada de amortiguación. Esto provoca que las vibraciones generadas en terrenos irregulares, como el empedrado, se transmitan más intensamente al vehículo, evidenciado en los picos de 123 mm/s en el eje trasero frente a 93 mm/s en el delantero a 40 km/h.

Los resultados muestran que el terreno empedrado genera los mayores ángulos de vibración en ambos ejes, indicando un alto nivel de estrés angular debido a las irregularidades del terreno. Esto afecta negativamente la estabilidad y el confort del vehículo, ya que dificulta la absorción de vibraciones por la suspensión, transmitiendo las oscilaciones al chasis. Una diferencia notable entre los ejes es que el trasero presenta ángulos de vibración más altos, especialmente a mayores velocidades. Esto se debe a la rigidez de la suspensión del eje de torsión trasero, que es menos eficiente en amortiguar vibraciones comparada con la suspensión delantera. La rigidez del sistema trasero contribuye a una mayor transferencia de vibraciones al vehículo, afectando la estabilidad, especialmente durante maniobras de frenado intenso en terrenos irregulares. Estos altos ángulos de vibración en el eje trasero pueden generar una distribución desequilibrada de la carga en los neumáticos, afectando la tracción y el control del vehículo en situaciones de alta demanda dinámica, como frenadas de emergencia.

Los resultados indican que el empedrado genera altos desplazamientos de vibración, alcanzando hasta 1200 μm a 80 km/h, lo que refleja los desafíos que este terreno impone a la suspensión, ya que las irregularidades no son absorbidas eficientemente. En contraste, el asfalto presenta picos de desplazamiento bajos, lo que sugiere una mayor capacidad de la suspensión para manejar vibraciones en superficies estables. El aumento del desplazamiento de vibración en el eje trasero puede generar una transferencia de vibraciones más intensas al chasis, afectando la estabilidad, a lo largo del frenado. Estos desplazamientos mayores también pueden provocar una distribución desequilibrada de la carga en los neumáticos, lo que afecta negativamente la tracción y el control, particularmente en terrenos irregulares o durante frenadas de alta demanda dinámica.

Conclusiones

El estudio demuestra que las irregularidades del terreno y las características del sistema de suspensión influyen directamente en la estabilidad y el confort del vehículo. La falta de antecedentes específicos sobre la suspensión McPherson y el eje de torsión resalta la relevancia de este análisis, al evidenciar diferencias significativas en su desempeño dinámico frente a distintos terrenos y velocidades. La comparación entre ambos sistemas muestra un desempeño complementario, aunque en terrenos irregulares persisten limitaciones en la absorción de vibraciones que requieren optimización continua. La suspensión hidráulica, reconocida por su confiabilidad, es esencial para mitigar las vibraciones y mejorar la seguridad y la experiencia de conducción, incluso en condiciones variables. Además, este estudio refuerza la importancia de cumplir con normativas como la EUSAMA, que garantizan el confort del usuario y la integridad del vehículo, destacando las oportunidades de innovación tecnológica para adaptar las suspensiones a distintos escenarios.

El análisis del movimiento vertical del vehículo evidenció que las frecuencias de vibración son significativamente afectadas por las condiciones del terreno, con el empedrado alcanzando picos máximos de 45 Hz. Estas vibraciones intensas comprometen tanto el confort como la estabilidad del vehículo, especialmente en condiciones de conducción prolongada. Por el contrario, el asfaltado mostró frecuencias inferiores a 35 Hz, asociándose con una conducción más suave y estable. Además, las pruebas ANOVA confirmaron que las condiciones del terreno tienen un impacto más significativo que la velocidad en los parámetros de vibración vertical, resaltando que el tipo de superficie es un factor crítico para el desempeño del sistema de suspensión.

El movimiento longitudinal presenta un comportamiento altamente dependiente del tipo de superficie y las dinámicas de aceleración y frenado. Las superficies de empedrado generan las mayores frecuencias de vibración, alcanzando hasta 50 Hz, superando el rango ideal según la norma EUSAMA (0-25 Hz), mientras que el asfaltado mostró ser la más favorable, con frecuencias por debajo de 35 Hz. Los resultados evidencian que la dinámica

de transferencia de peso durante la aceleración y el frenado tiene un impacto significativo en las vibraciones del sistema de suspensión, especialmente en función de la velocidad y las condiciones del terreno. Estos hallazgos destacan la importancia de optimizar los sistemas de suspensión hidráulica para garantizar una absorción eficiente de oscilaciones longitudinales, contribuyendo así a una mayor estabilidad y confort del vehículo en diversas condiciones de conducción.

Referencias

- A, A. (1 de Marzo de 2023). Obtenido de MundoMotor: MundoMotor
- Alvarez, J., Castañón, F., Contreras, M., & Raynal, L. (2016). *VIBRACIONES MECÁNICAS: Introducción al sistema de suspensión de un vehículo*. Buenos Aires: UTN.
- Automotriz, M. M. (2014). *Sistema de suspension*.
- Blas, N. (2021). *SlidePlayer*. Obtenido de <https://slideplayer.es/slide/17985645/>
- Borja, F. (s.f.). MODELO DIRECTO NO PARAMÉTRICO DE AMORTIGUADOR MAGNETO-REOLÓGICO BASADO EN REDES NEURONALES. (*Tesis de ingeniería*). UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID, Madrid.
- Brüel & Kjør. (s.f.). *Brüel & Kjør | B&K | Sound and Vibration*. Obtenido de <https://www.bksv.com/es/knowledge/blog/vibration/measuring-vibration>
- CDA LA 27. (05 de Noviembre de 2021). *CDA LA 27 REVISIÓN TÉCNICO MÉCANICA*. Obtenido de <https://www.cdala27.com/sabes-que-es-el-sistema-de-suspension-en-un-automovil/>
- Chevrolet. (2019). *Chevrolet*. Obtenido de <https://www.chevrolet.com.co/content/dam/chevrolet/south-america/colombia/espanol/index/cars/2019-sail/mov/02-pdfs/sail-ficha-tecnica.pdf>
- Diseño Automotriz UFT. (s.f.). Obtenido de DautomotrizUFT: <https://dautomotrizuft.weebly.com/suspensioacuten.html>
- Educación Continua. (18 de Mayo de 2015). *Blogutp*. Obtenido de <https://blog.utp.edu.co/comunidadutp/conceptos-de-amplitud-periodo-y-frecuencia-en-fisica/>
- Expertoautorecambios.es. (2017). *Expertoautorecambios.es*. Obtenido de <https://www.expertoautorecambios.es/magazine/cambiar-rotula-de-direccion-2502>
- Georhythmics. (2019). *EUSAMA Suspension Testing*.

- Henao, N., & Zapata, J. (2017). *DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UNA PLANTA VIRTUAL QUE INTERACCIONA CON UN PLC, PARA SIMULAR Y CONTROLAR CONDICIONES DE ADHERENCIA DE UN CUARTO DE VEHICULO LIVIANO EN PRUEBAS DE RUTA*. INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO.
- Hurel, J., Teran, E., Flores, F., & Peralta, J. (2017). *Modelado Físico y Matemático del Sistema de Suspensión de un Cuarto de Vehículo*. Guayaquil: Escuela Superior Politecnica Litoral.
- IngeMecanica. (s.f.). *IngeMecanica*. Obtenido de <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn73.html>
- Ingenieria y Mecanica (I.Y.M) Automotriz. (21 de Agosto de 2019). *INGENIERÍA Y MECÁNICA AUTOMOTRIZ*. Obtenido de <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com/barra-estabilizadora-funcionamiento-en-la-suspension-automotriz/>
- Ling Huang, C., Yi Lin, W., & Mo Hsiao, K. (2010). *Free vibration analysis of rotating Euler beams at high angular velocity*. ScienceDirect.
- Martinez, J., & Gomez, R. (2018). *Análisis de la transmisión de vibraciones en vehículos y su efecto en la comodidad del ocupante*. . Revista de Ingeniería Automotriz.
- Mitsubishi Motors . (31 de Enero de 2024). *Mitsubishi Motors Blog | Venta de Camionetas SUV & MPV*. Obtenido de <https://www.mitsubishi-motors.com.pe/blog/tipos-amortiguadores-vehiculo/>
- Muzakkir, A., & Natrayan, L. (2022). Structural and dynamic analysis of automotive quarter car model suspension system for different materials,. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221478532202171X>).
- Pérez, L., & Torres, E. (2019). *Evaluacion del conforten suspensiones mediante analisis de vibraciones con acelerometros*. Automotive Engineering.
- Rao, S. (2012). *Vibraciones Mecanicas*. Mexico: Pearson Education.

- Rodriguez, R. (s.f.). Sistemas de suspensión, dirección y frenos. (*Artículo de ingeniería*). ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA., Ciudad de Mexico.
- Rosales, J. (s.f.). *Fractal.com*. Obtenido de <https://www.fractal.com/es/mantenipedia/que-es-el-analisis-de-vibraciones>
- Sanchez, P., & Torres, M. (2019). *Comparativa de rendimiento entre sistema de suspensión hidráulica y semiactiva en Automoviles*. . Journal Automotive Technology.
- Shabana, A. (s.f.). *Theory of Vibration*. Chicago: Springer.
- Sumerlabs. (3 de Marzo de 2024). *Sumerlabs.com*. Obtenido de <https://sumerlabs.com/catalogo/vickycar-pyugsih/producto/amortiguadores-macpherson-cambio-desde-smr-e6e3c71eaa3bde1a8c9d881d3d1016da04aaef87>
- SYDSuspensiónyDirección. (7 de Febrero de 2023). *Youtube (Video)*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=YBwTh3IDw6c&t=1984s>
- Transfer Multisort Elektronik. (9 de Octubre de 2020). *ransfer Multisort Elektronik*. Obtenido de [ransfer Multisort Elektronik](https://www.transfer-multisort.com/)
- Weaver, W., Timoshenko, S., & Young, D. (1981). *Vibration Problems in Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- White, G. (s.f.). *Introducción al Análisis de Vibraciones*.
- WITMOTION. (2022). *Wit-motion.com*. Obtenido de <https://www.wit-motion.com/proztsz/28.html>

Anexos Fotografías

Anexo 1: Colocación de acelerómetro en amortiguador delantero izquierdo



Fuente: Autor

Anexo 2: Colocación de acelerómetro en amortiguador delantero derecho



Fuente: Autor

Anexo 3: Colocación de acelerómetro en amortiguador trasero izquierdo



Fuente: Autor

Anexo 4: Colocación de acelerómetro en amortiguador trasero derecho



Fuente: Autor

Anexo 5: Conexión de cables hacia la cabina para amortiguadores delanteros



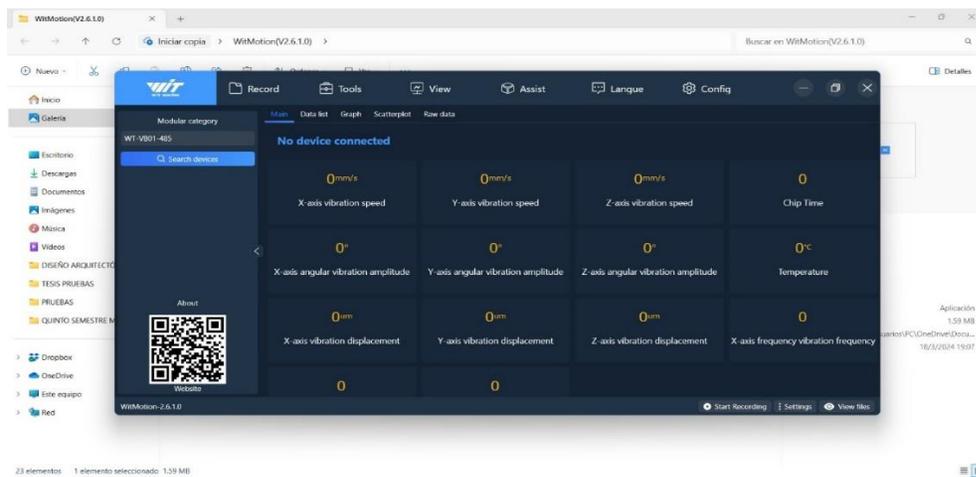
Fuente: Autor

Anexo 6: Conexión de cables hacia la cabina para amortiguadores traseros



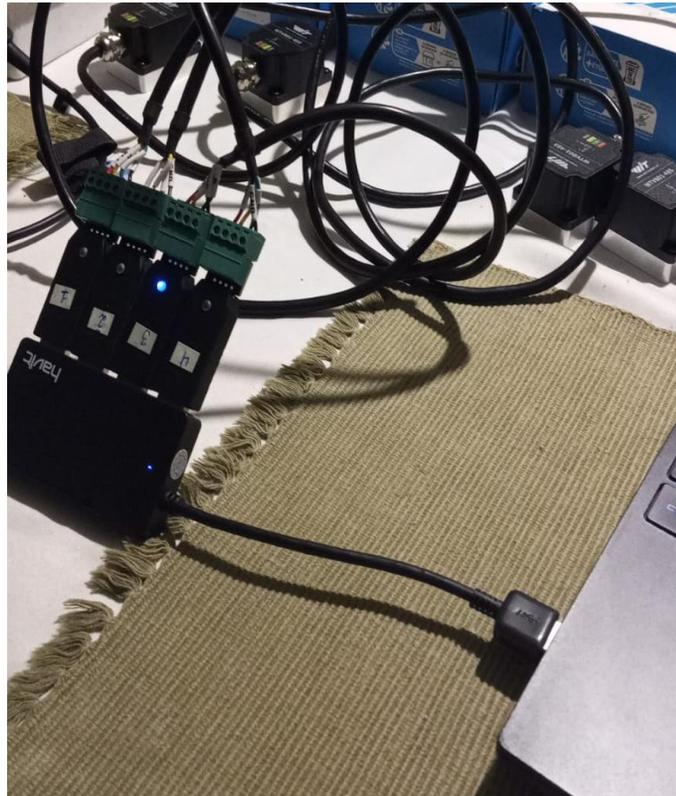
Fuente: Autor

Anexo 7: Instalación de software Witmotion



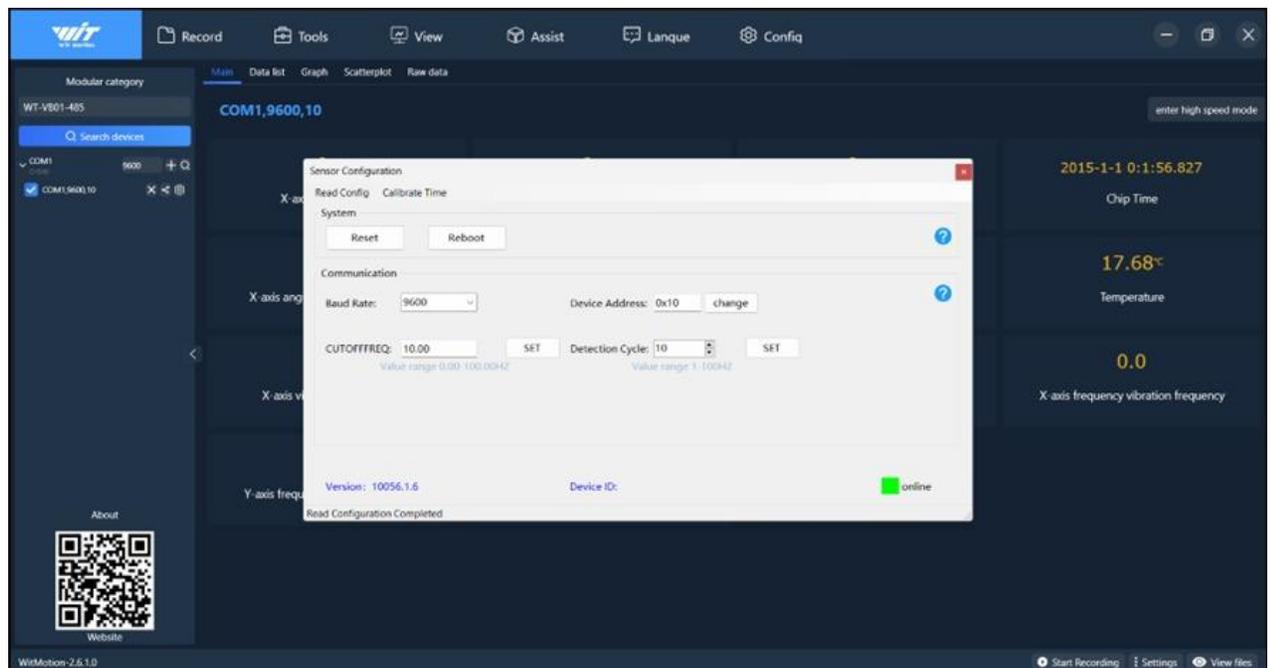
Fuente: Autor

Anexo 8: Conexión múltiple de los 4 acelerómetros



Fuente: Autor

Anexo 9: Calibración de los 4 acelerómetros



Fuente: Autor

Anexo 10: Medición de temperatura de disco de freno



Fuente: Autor

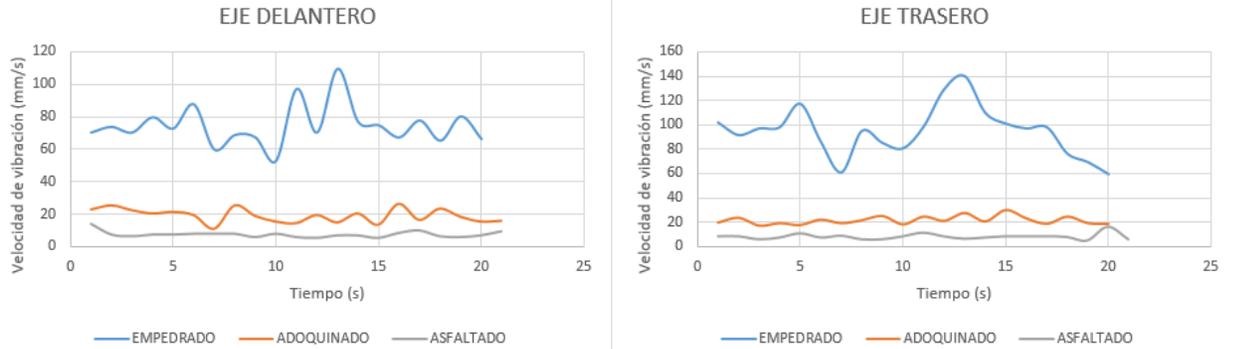
Anexo 11: Medición de temperatura de tambor de freno



Fuente: Autor

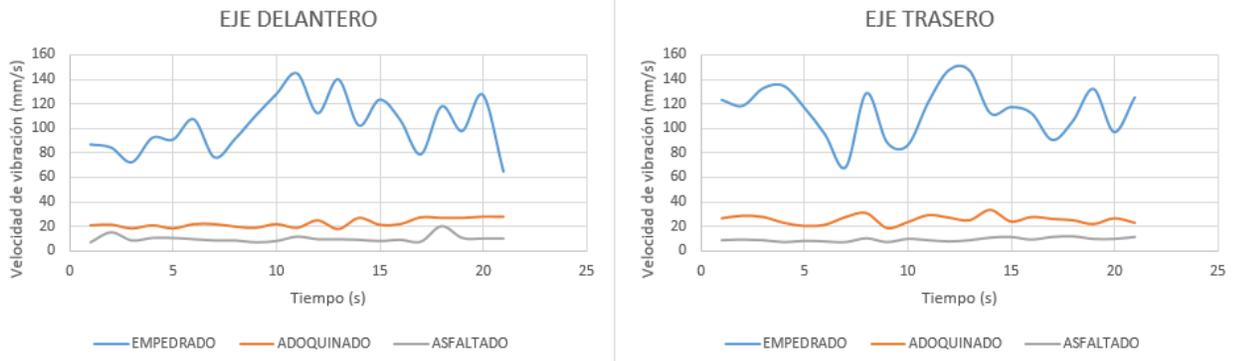
Anexos Graficas

Anexo 12: Curvas de velocidad de vibración con 40km/h



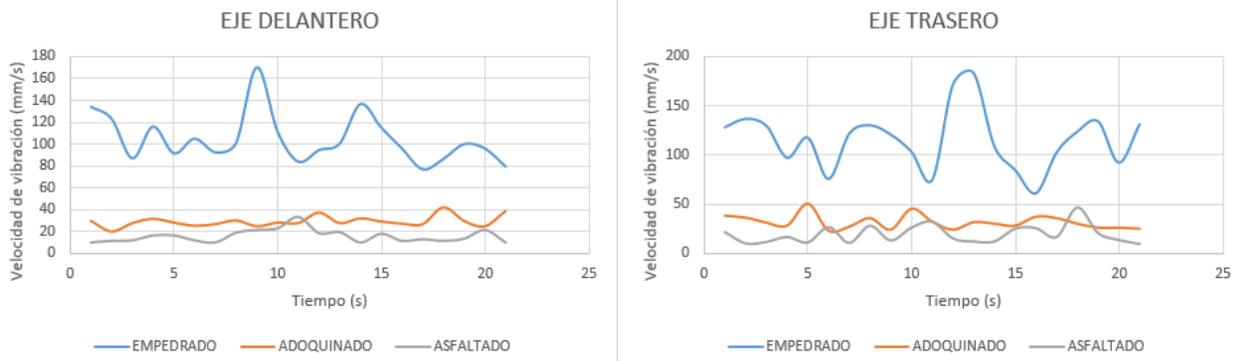
Fuente: Autor

Anexo 13: Curvas de velocidad de vibración con 60km/h



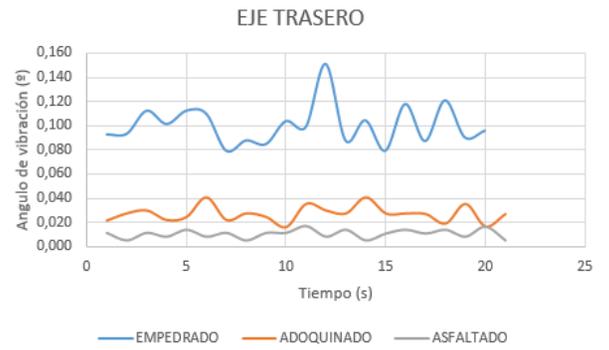
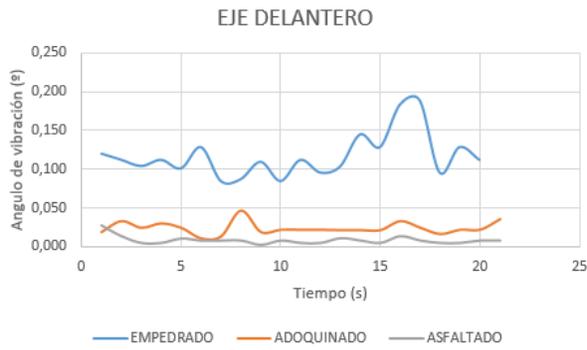
Fuente: Autor

Anexo 14: Curvas de velocidad de vibración con 80km/h



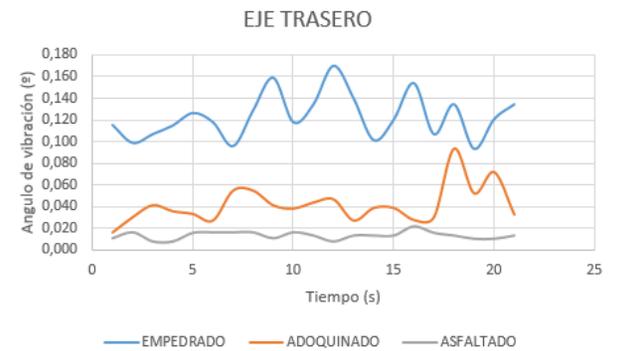
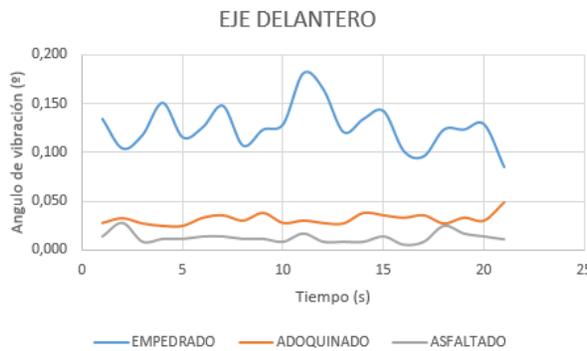
Fuente: Autor

Anexo 15: Curvas de ángulo de vibración con 40km/h



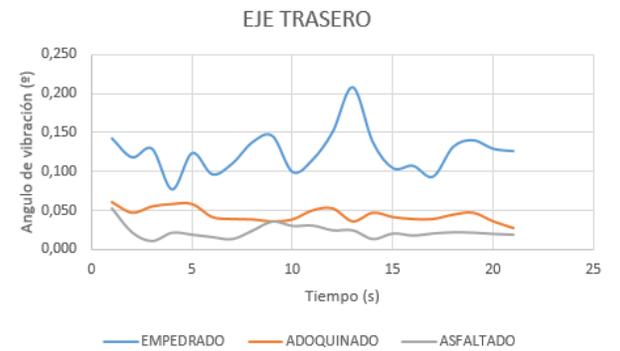
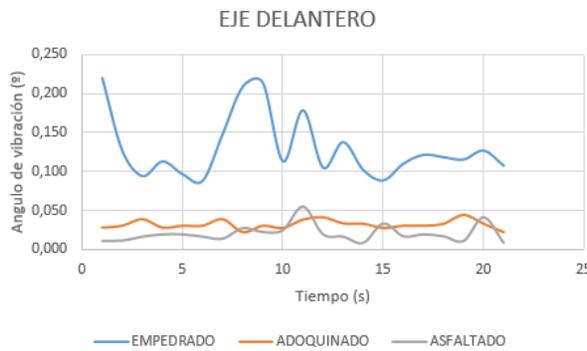
Fuente: Autor

Anexo 16: Curvas de ángulo de vibración con 60km/h



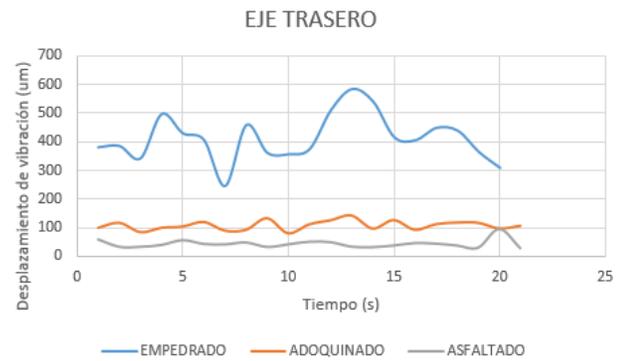
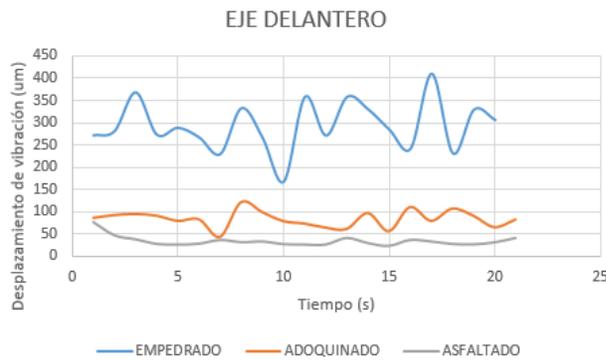
Fuente: Autor

Anexo 17: Curvas de ángulo de vibración con 80km/h



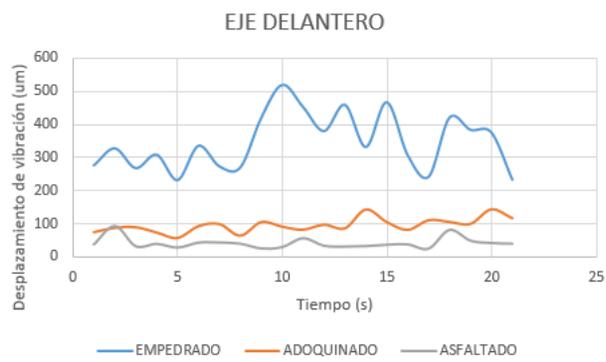
Fuente: Autor

Anexo 18: Curvas de desplazamiento de vibración con 40km/h



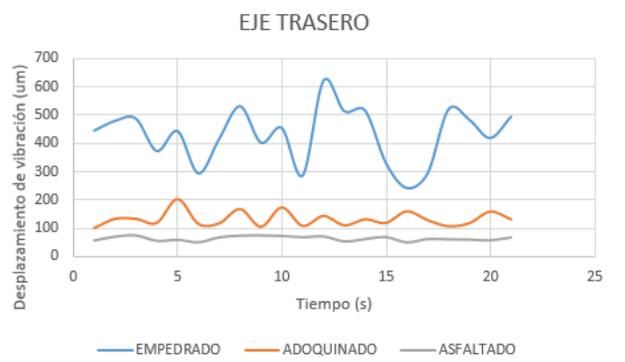
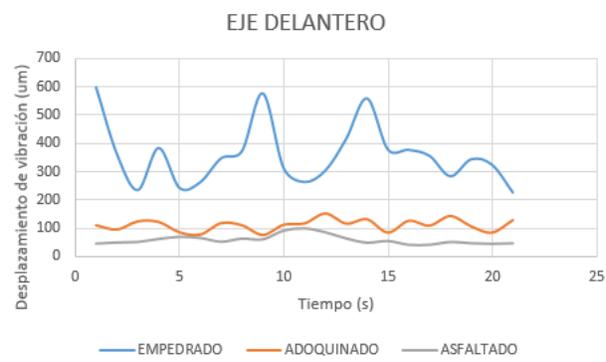
Fuente: Autor

Anexo 19: Curvas de desplazamiento de vibración con 60km/h



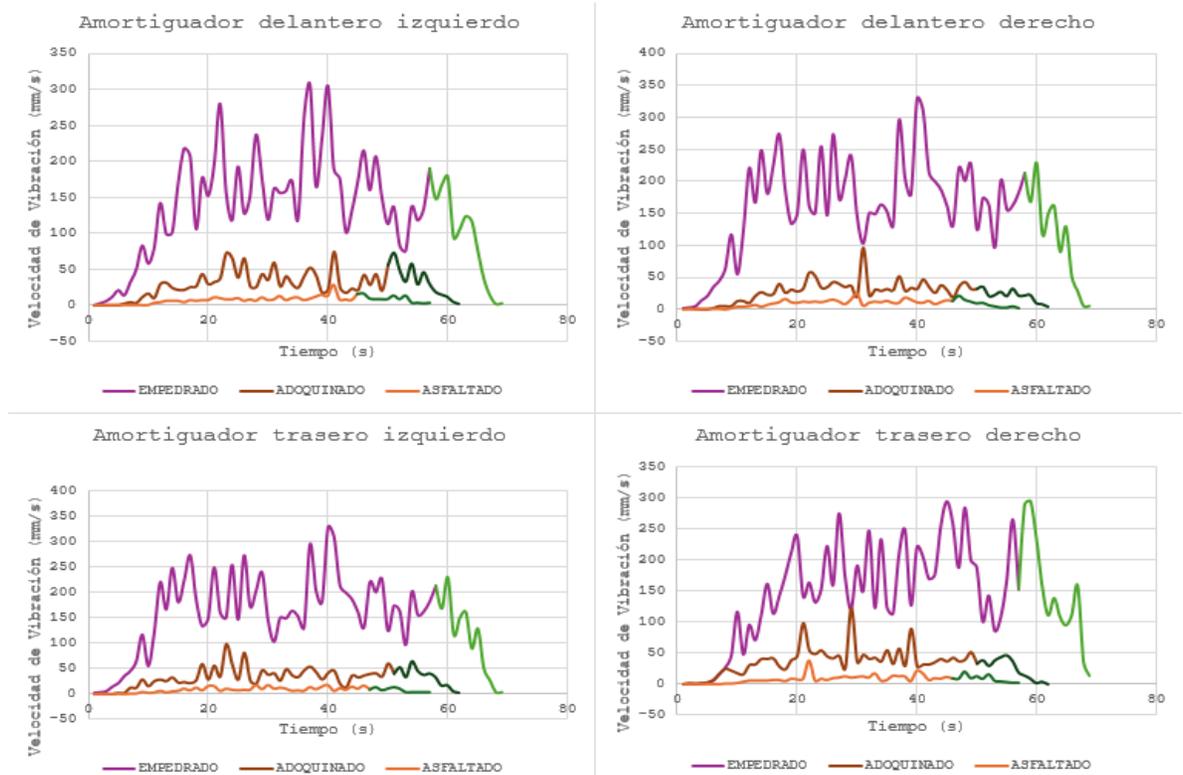
Fuente: Autor

Anexo 20: Curvas de desplazamiento de vibración con 80km/h



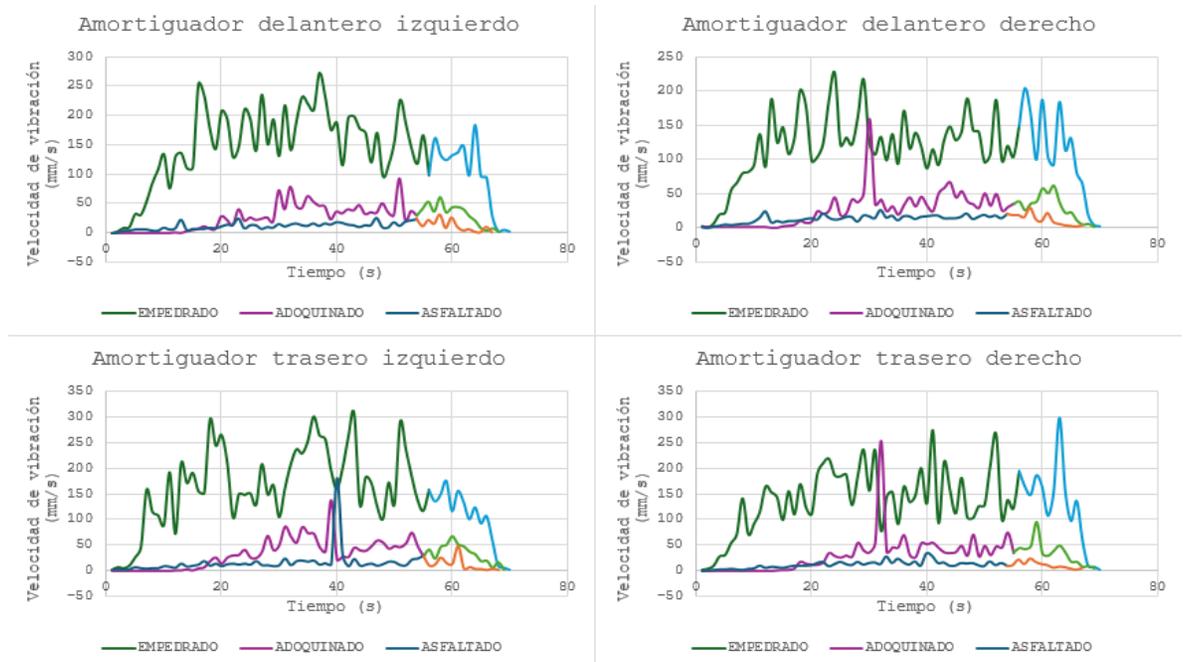
Fuente: Autor

Anexo 21: Curvas de velocidad de vibración de aceleración y frenado a 40km/h



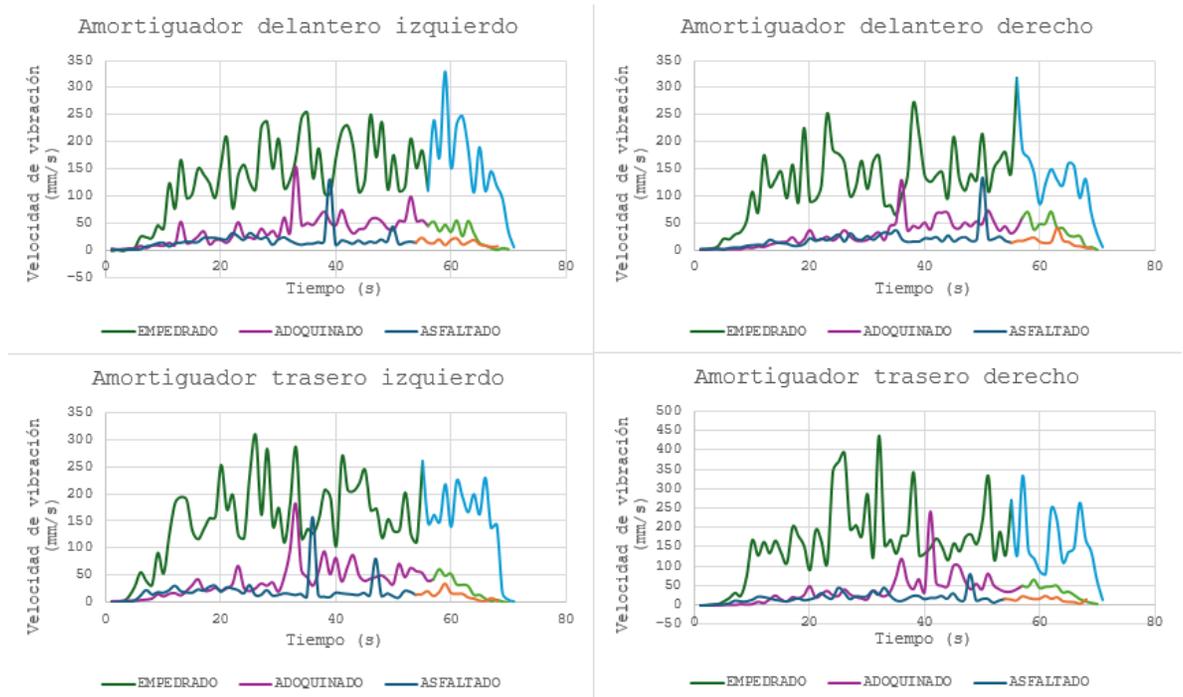
Fuente: Autor

Anexo 22: Curvas de velocidad de vibración de aceleración y frenado a 60km/h



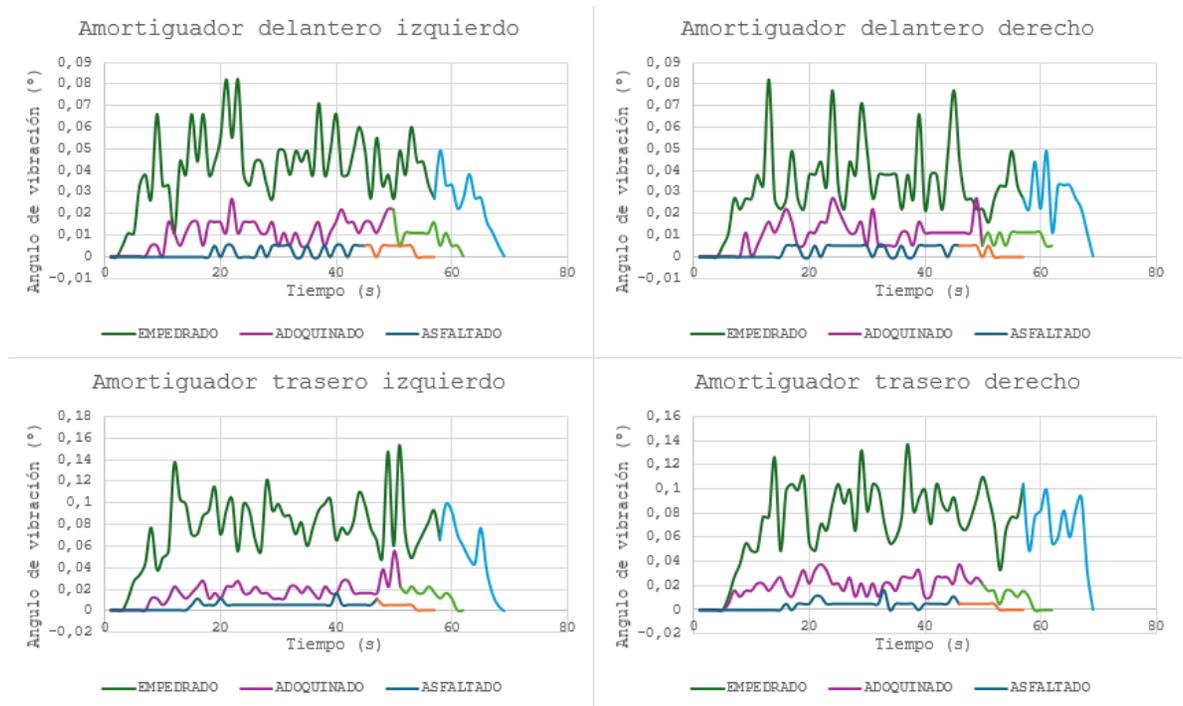
Fuente: Autor

Anexo 23: Curvas de velocidad de vibración de aceleración y frenado a 80km/h



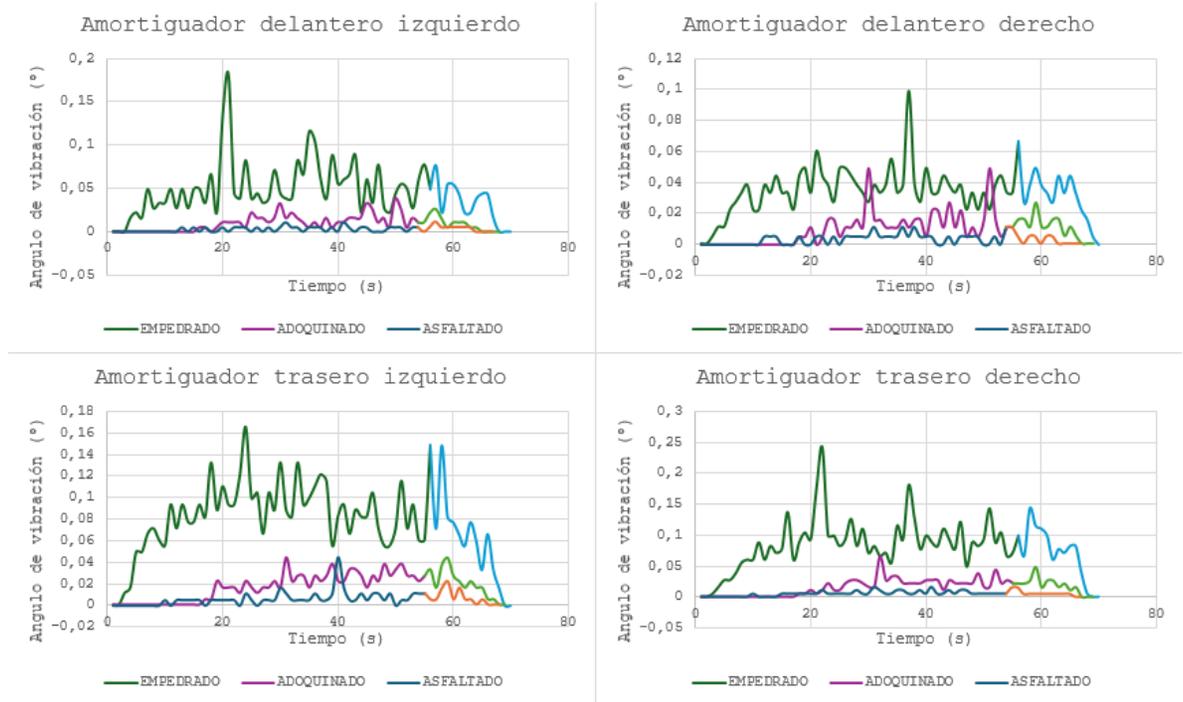
Fuente: Autor

Anexo 24: Curvas de ángulo de vibración de aceleración y frenado a 40km/h



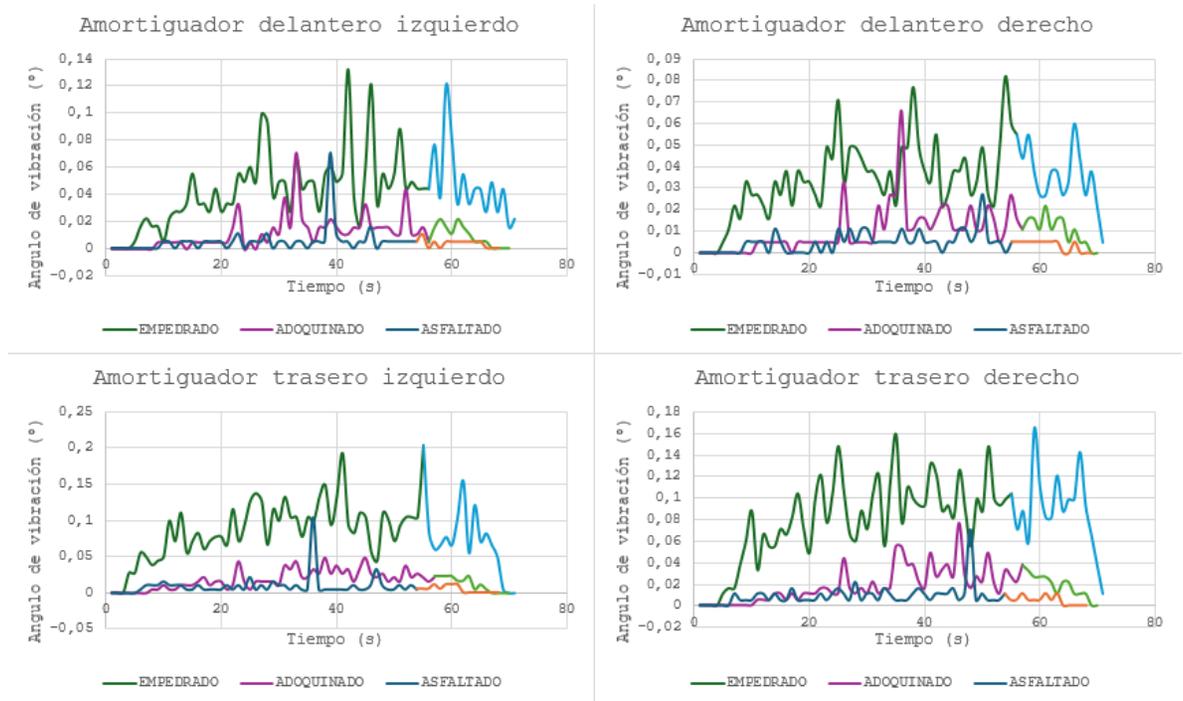
Fuente: Autor

Anexo 25: Curvas de ángulo de vibración de aceleración y frenado a 60km/h



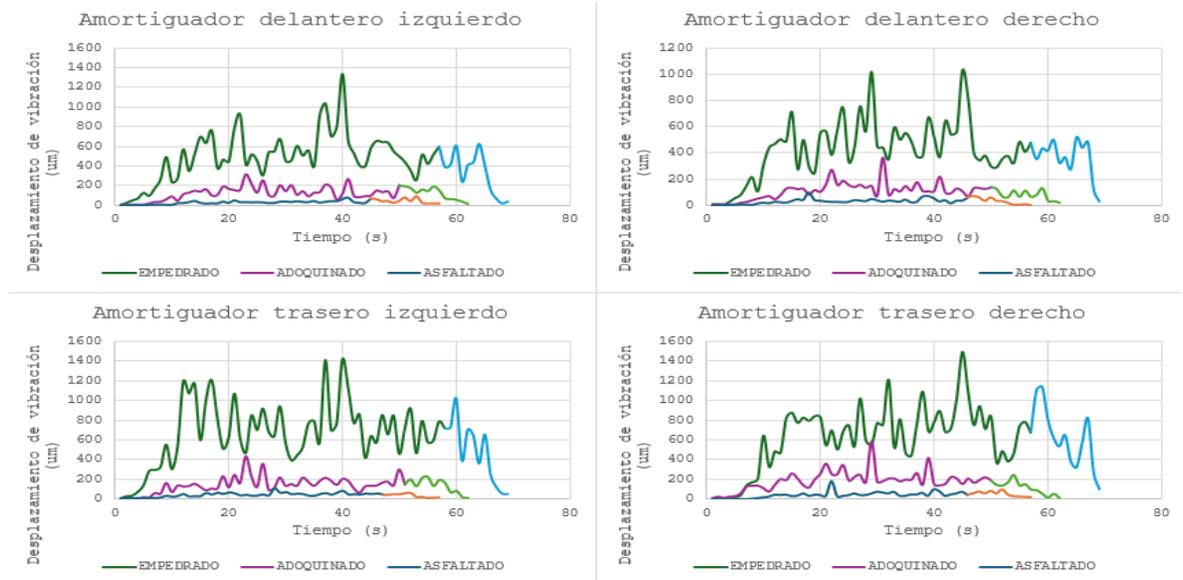
Fuente: Autor

Anexo 26: Curvas de ángulo de vibración de aceleración y frenado a 80km/h



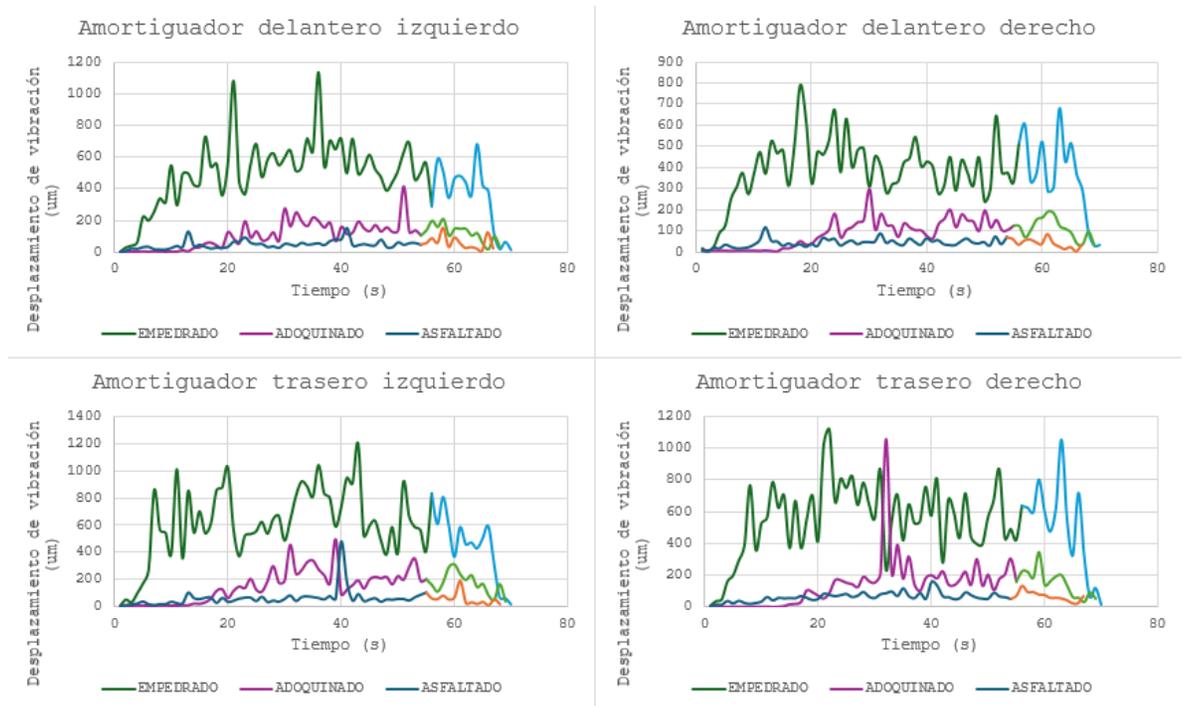
Fuente: Autor

Anexo 27: Curvas de desplazamiento de vibración de aceleración y frenado a 40km/h



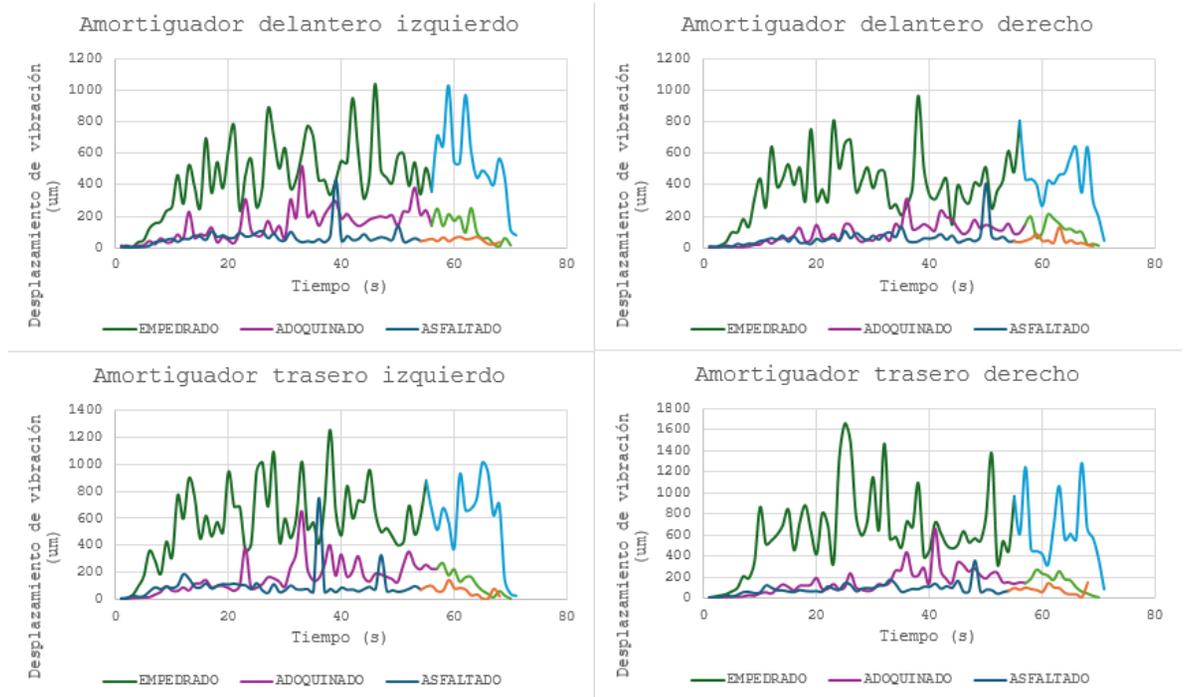
Fuente: Autor

Anexo 28: Curvas de desplazamiento de vibración de aceleración y frenado a 60km/h



Fuente: Autor

Anexo 29: Curvas de desplazamiento de vibración de aceleración y frenado a 80km/h



Fuente: Autor