



ING. AUTOMOTRIZ

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

AUTORES:

Anderson Patricio Manosalvas Quishpe

Juan Patricio Rodríguez López

TUTOR:

Ing. Juan Fernando Iñiguez

Análisis comparativo de la frecuencia de trabajo de
una suspensión McPherson mediante el uso de un
acelerómetro y un modelo matemático

CERTIFICACION DE AUTORIA

Nosotros, Anderson Patricio Manosalvas Quishpe y Juan Patricio Rodríguez López declaramos 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.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de propiedad Intelectual, reglamento y leyes.



NOMBRE 1



NOMBRE 2

APROBACION DEL TUTOR

Yo, Juan Fernando Iñiguez Izquierdo, certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Firma

DEDICATORIA

A Dios, por darme la vida, la fortaleza para seguir adelante y la oportunidad de alcanzar este logro. Su guía y presencia han sido mi mayor apoyo en cada paso de este camino, y por todo lo que me permite vivir, le agradezco de corazón.

Este trabajo está dedicado a las personas más importantes de mi vida. A mi mamá Isabel, por su amor y su constante presencia; a mi papá Oscar, por enseñarme el valor del esfuerzo y la perseverancia; a mis hermanos Bryan y Oscar, por ser mi apoyo incondicional y mi fuente de motivación; y a mi tío José, por su sabiduría, sus consejos y por estar siempre a mi lado. Ustedes han sido mi fuerza en los momentos difíciles y mi alegría en los momentos de éxito. Cada palabra de aliento, cada gesto de cariño, ha sido fundamental para llegar hasta aquí. No tengo forma de agradecerles lo suficiente, pero sé que este logro es tan suyo como mío.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, quiero agradecer a Dios, por ser mi guía y fuerza, y por brindarme la oportunidad de llegar hasta este momento. Sin su presencia constante, este logro no hubiera sido posible.

Mi más sincero agradecimiento a mi familia, cuya presencia y amor han sido el pilar de este camino. A mi mamá Isabel, por su paciencia y apoyo incondicional, a mi papá Oscar, por su confianza y ejemplo de trabajo y perseverancia, a mis hermanos Bryan y Oscar, por su aliento constante y por siempre estar allí, y a mi tío José, por sus sabias palabras y su apoyo incansable. No hay suficientes palabras para expresar cuánto les debo, y este logro es un reflejo de su amor y esfuerzo.

Agradezco profundamente a mi tutor/a [nombre del tutor/a], por su guía, paciencia y valiosas aportaciones a este trabajo. Su conocimiento y dedicación me han permitido aprender y crecer como profesional, y siempre estaré agradecido/a por su apoyo en cada etapa de este proceso.

A mis amigos y compañeros de la universidad, gracias por su compañía, por los momentos de esfuerzo compartido y por las palabras de ánimo. Ustedes hicieron que los desafíos se sintieran más livianos.

Por último, quiero agradecer a [nombre de alguna institución, beca o entidad] por el apoyo brindado a lo largo de este proceso. Sin su respaldo, este trabajo no hubiera sido posible.

A todos ustedes, que de una forma u otra me ayudaron a alcanzar este logro, les agradezco de todo corazón. Este trabajo es el resultado de sus esfuerzos, y siempre llevaré con orgullo su apoyo en cada paso que dé a partir de aquí.

DEDICATORIA

Con amor y gratitud dedico este trabajo a mi familia que me ha acompañado cada paso de mi camino:

A mis padres, Patricio y Cecilia, por su dedicación, sacrificio y amor inquebrantable.

A mi hermana, Mariagloria, por su amistad, apoyo y compañía.

A mis abuelos, Juan y Gloria, por su sabiduría, ejemplo y cariño.

Mi éxito es un reflejo de su influencia en mi vida.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Internacional del Ecuador y al equipo docente de la Facultad de Ing. Automotriz por brindarme la oportunidad de desarrollar mis habilidades y conocimientos durante toda mi formación académica y profesional.

Agradezco especialmente al Ing. Juan Fernando, por su valiosa orientación, apoyo y guía durante todo el proceso de investigación.

Pero sobre todo quiero agradecer a mi familia, mi padre, mi madre y mi hermana por su incondicional apoyo y amor. Sin su motivación y aliento constante, no hubiera podido superar los desafíos y lograr este importante objetivo.

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA FRECUENCIA DE TRABAJO DE UNA SUSPENSION MCPHERSON MEDIANTE EL USO DE UN ACELEROMETRO Y UN MODELO MATEMATICO

Ing. Juan F. Iñiguez I. PhD.¹ Anderson P. Manosalvas Q.² Juan P. Rodríguez L.³

¹ Docente Universidad Internacional del Ecuador, jiniguez@uide.edu.ec, Quito - Ecuador

² Ingeniería Automotriz - Universidad Internacional del Ecuador, anmanosalvasqu@uide.edu.ec, Quito - Ecuador

³ Ingeniería Automotriz - Universidad Internacional del Ecuador, jurodriguezlo@uide.edu.ec, Quito - Ecuador

RESUMEN

Introducción: Este estudio analiza el comportamiento de la suspensión McPherson en vehículos livianos mediante la comparación de un modelo matemático establecido y datos experimentales obtenidos con un sensor acelerómetro, la investigación se orienta a evaluar la precisión del modelo teórico dado y su aplicabilidad en condiciones reales de conducción, donde factores como el desgaste de los componentes y las irregularidades del camino pueden afectar el rendimiento de la suspensión. **Metodología:** Esta investigación adoptó un enfoque cuantitativo-experimental, donde se utilizó un modelo matemático de la suspensión McPherson para predecir la frecuencia de resonancia, que fue luego comparada con los datos obtenidos mediante un sensor acelerómetro en condiciones reales de conducción. **Resultados:** La diferencia de 0.47 Hz entre los datos teóricos y experimentales muestra una proximidad considerable entre ambos valores, lo que sugiere que el modelo matemático representa adecuadamente las dinámicas de la suspensión. **Conclusión:** La combinación de modelo matemático y datos experimentales permite una visión integral del comportamiento de la suspensión McPherson, facilitando un diseño optimizado que equilibra confort y estabilidad.

Palabras clave: Suspensión McPherson, modelo matemático, frecuencia de trabajo, sensor acelerómetro, análisis comparativo.

ABSTRACT

Introduction: This study analyzes the behavior of the McPherson suspension in light vehicles by comparing a mathematical model established with experimental data obtained using an accelerometer sensor. The research focuses on evaluating the accuracy of the theoretical model selected and its applicability under real-world driving conditions, where factors such as component wear and road irregularities can impact suspension performance. **Methodology:** This research adopted a quantitative – experimental approach, utilizing a mathematical model of the McPherson suspension to predict the resonant frequency, which was then compared with data collected from an accelerometer sensor under real driving conditions. **Results:** The 0.47 Hz difference between the theoretical and experimental data shows a considerable proximity between both values, suggesting that the mathematical model adequately represents the suspension dynamics. **Conclusion:** The combination of the mathematical model and experimental data provides a comprehensive understanding of the McPherson suspension behavior, enabling the design of an optimized system that balances comfort and stability. **Keywords:** McPherson suspension, mathematical model, operating frequency, accelerometer sensor, comparative analysis.

Keywords: McPherson suspension, mathematical model, operating frequency, accelerometer sensor, comparative analysis.

INTRODUCCIÓN

El autor (Gutiérrez, 2014) sostiene que la adquisición de vehículos de cuatro ruedas ha aumentado exponencialmente en los últimos 50 años, lo que ha contribuido al desarrollo de la sociedad. Por ello, es crucial el desarrollo de innovación de componentes que mejoren tanto el rendimiento como el confort de los vehículos.

Todo vehículo comercial cuenta con un sistema de suspensión, el cual varía según el modelo, la gama y el propósito para el que fue diseñado. En el caso de los vehículos de gama baja, siendo muy comunes, la mayoría utiliza un tipo de suspensión conocida como McPherson, su popularidad se debe a su simplicidad y bajo costo, lo que la convierte en la opción más utilizada.

La suspensión McPherson es un sistema utilizado en vehículos por su simplicidad, economía y eficiencia en la absorción de impactos. Sin embargo, su comportamiento está influenciado por factores, como la interacción entre los componentes mecánicos y las condiciones de la carretera.

Para analizar el comportamiento de una suspensión McPherson se requiere la aplicación de un modelo matemático establecido el cual represente las características dinámicas tales como: el resorte helicoidal y el amortiguador siendo importante al momento de la absorción de impactos; es decir, es el recurso el cual almacena energía al comprimirse, mientras que el amortiguador disipa dicha energía en forma de calor.

La mayoría de las investigaciones sobre sistemas de suspensión se basan en el modelo lineal de un cuarto de vehículo, que ofrece una representación adecuada de la dinámica del sistema para el diseño, según (Alexandru, C y P. Alexandru, 2011), dicho enfoque busca obtener mejores resultados en el desarrollo de suspensiones.

Desde mediados del siglo XX, los modelos matemáticos representan el comportamiento de las suspensiones con el objetivo de ofrecer información precisa de su dinámica. Inicialmente, los modelos se basaban en simplificaciones de sistemas mecánicos básicos, como el sistema masa-resorte-amortiguador, utilizando ecuaciones para representar el movimiento de las masas suspendidas y no suspendidas.

En ese entonces, los modelos no eran eficientes para describir la respuesta de la suspensión a excitaciones externas, como las irregularidades de la carretera, con el fin de

capturar comportamientos complejos asociados a las configuraciones geométricas avanzadas y elementos no lineales de la suspensión.

Con el tiempo, la introducción de herramientas de simulación numérica, como el análisis por elementos finitos (FEM) y el análisis multibody, permitió a los profesionales modelar sistemas de suspensión de manera más precisa, considerando aspectos como la fricción, el juego en las uniones y la deformación de los componentes; lo cual llevó a la creación de modelos más complejos, que pueden predecir con mayor precisión la dinámica de la suspensión bajo diferentes condiciones de carga y manejo.

La incorporación de sensores como los acelerómetros en el análisis de suspensiones ha revolucionado la capacidad para medir el rendimiento del sistema durante la operación del vehículo. Los acelerómetros comenzaron a ser utilizados en la industria automotriz en la década de 1980, principalmente en investigaciones sobre la dinámica del vehículo y el desarrollo de sistemas de control de activos, como los sistemas de control de estabilidad (ESC) y de suspensión activa o semi. -activa. (Ezeta, Hurel, Mandow y García Cerezo, 2013). Los acelerómetros son dispositivos los cuales miden la aceleración lineal en una o varias direcciones. En el caso de la suspensión McPherson, los sensores acelerómetros permiten registrar las aceleraciones verticales experimentadas. Dichos sensores favorecen la implementación de sistemas de monitorización ligeros a bajos costos de gestión, un bajo consumo de energía y un tamaño reducido, y que a pesar de su tamaño proporcionan datos fiables y significativos, su alta precisión en datos lo hace un sensor fiable y seguro. (Landi et., 2023). Tanto por la masa suspendida como por la masa no suspendida, lo que proporciona datos importantes para analizar, la respuesta del sistema de suspensión ante las irregularidades del terreno y las fuerzas inerciales generadas durante la conducción son monitoreadas constantemente en función de conocer su desempeño y rendimiento real. (Tecpoyotl Torres et al., 2023).

La combinación de una expresión matemática precisa con datos obtenidos de acelerómetros permite predecir el comportamiento de la suspensión, mejorar su diseño y ajustar sus parámetros para optimizar el confort y la estabilidad del vehículo. Las masas no suspendidas tales como: ruedas, frenos, etc.; y las masas suspendidas, lo que corresponde a la carrocería, deben ser modeladas como sistemas masa-resorte-amortiguador, donde la interacción entre la masa no suspendida y la masa suspendida se describen mediante ecuaciones, las cuales capturan el movimiento rebote y la respuesta a las irregularidades del terreno.

Los acelerómetros se colocan periódicamente en la masa no suspendida, específicamente cerca de la rueda para medir las aceleraciones inducidas por las irregularidades del terreno y en la masa suspendida correspondiente a la carrocería para captar cómo reacciona el vehículo. Al medir las aceleraciones, es posible calcular las fuerzas inerciales y las respuestas dinámicas del sistema, las cuales pueden ser comparadas con las predicciones del modelo matemático seleccionado.

El presente trabajo tiene como objetivo general comparar fórmulas que describen el comportamiento de la suspensión de una bibliografía determinada con el comportamiento real de la suspensión mediante el uso de acelerómetros. Estas fórmulas se fundamentan en ecuaciones que describen las fuerzas y componentes de la suspensión, considerando elementos como el resorte, el amortiguador y las masas suspendidas y no suspendidas del vehículo.

Sus objetivos específicos están enfocados en determinar la respuesta en frecuencia de la suspensión MacPherson a través de la aplicación de un acelerómetro, capturando datos en condiciones de operación reales y variadas; evaluar la precisión y validez del modelo matemático de la suspensión MacPherson, considerando parámetros como la geometría de la suspensión, las propiedades elásticas y amortiguadoras, mediante la simulación en un entorno computacional; y comparar los resultados experimentales del acelerómetro con las predicciones del modelo matemático, identificando posibles desviaciones y analizando las causas de las discrepancias, con el fin de evaluar el comportamiento y la eficiencia de la suspensión en diversas condiciones de operación.

La importancia de este artículo es demostrar cuan eficientes son las fórmulas encontradas en la bibliografía referente al comportamiento de la suspensión respecto a la realidad medida a través de los acelerómetros. El sensor, acelerómetro mide las aceleraciones reales que experimenta el sistema en condiciones de operación, donde los sensores se colocan en la masa suspendida (carrocería) y en la masa no suspendida (rueda) para captar datos precisos sobre el comportamiento de la suspensión.

MARCO TEÓRICO

La suspensión McPherson es uno de los sistemas de suspensión más utilizados en automóviles livianos, reconocido por su eficiencia y costo de fabricación económico, desarrollado por el Ing. Earle S. McPherson en el año 1940, dicha configuración es empleada en el eje delantero de vehículos debido a su diseño compacto que permite mayor espacio en el compartimento del motor y facilita la integración con la dirección del vehículo.

Este sistema se caracteriza por el uso de un amortiguador y un resorte montados en una única unidad vertical, como indica (Bustamante, 2020) lo que proporciona un control efectivo de las fuerzas de amortiguación y estabilidad del vehículo, lo que se traduce en confort, maniobrabilidad y durabilidad, convirtiéndolo en una opción ideal para vehículos de uso urbano.

El comportamiento dinámico del sistema mencionado está influenciado por su diseño, lo que impacta de forma directa en la estabilidad, el confort y agilidad del vehículo, es decir, la suspensión actúa para mantener el contacto constante de las ruedas con la carretera, absorbiendo irregularidades y mejorando la tracción, ya que está compuesta por un solo amortiguador telescópico y un resorte helicoidal, siendo capaz de controlar los movimientos verticales del vehículo, minimizando el balanceo y las oscilaciones indeseadas.

Durante las curvas, este tipo de suspensión (Cebolla, 2017) contribuye a mantener la estabilidad del vehículo, aunque su diseño tiende a generar cierto grado de inclinación lateral (body roll), fenómeno que ocurre debido a la reducción de ángulos de camber al comprimir la suspensión, lo que puede disminuir temporalmente la adherencia de las ruedas al pavimento. Sin embargo, los profesionales han implementado mejoras, como barras estabilizadoras, para mitigar el efecto de inclinación y mejorar el comportamiento en curvas.

En condiciones dinámicas tales como aceleraciones y frenadas, el sistema ayuda a reducir la transferencia de peso de un eje a otro, evitando que el vehículo se incline excesivamente hacia adelante o hacia atrás. Además, gracias a su simplicidad y ligereza, permite una conducción ágil y una respuesta rápida al volante, lo que la convierte en una elección adecuada para autos livianos que buscan un buen rendimiento dinámico sin sacrificar la comodidad del conductor.

La frecuencia de trabajo en el sistema de suspensión McPherson, hace referencia a la velocidad a la que el sistema responde a las irregularidades del terreno y los movimientos del

vehículo, expresada en hercios (Hz) es un factor clave para equilibrar el confort de marcha y la estabilidad dinámica. En términos prácticos, la frecuencia de trabajo en una suspensión influye en la sensación de suavidad o firmeza que experimenta el conductor. Van Casteren et al, (2013).

Además, en el diseño de la suspensión, es importante tomar en cuenta la relación de movimiento (motion ratio), que representa la proporción entre el desplazamiento de la rueda y el desplazamiento que experimenta el resorte en su punto de montaje. Este valor influye directamente en la rigidez que se transmite desde el resorte hacia la rueda y según esta relación se determina la rigidez efectiva en la rueda (wheel rate), que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$WR = MR^2 * K * AFC$$

donde k es la constante del resorte (expresada en N/mm o kg/cm, según la unidad utilizada), y el motion ratio es un valor adimensional. Estas magnitudes permiten un ajuste preciso de la frecuencia de trabajo, ya que modificando la geometría de montaje o la rigidez del resorte, se puede optimizar la respuesta dinámica de la suspensión (Race Software, s.f.; Kaz Technologies, s.f.).

De igual manera, el Angle Correction Factor (AFC) es para el cálculo del wheel rate, ya que toma en cuenta la inclinación con la que el resorte está instalado respecto al eje vertical, y por lo antes mencionado la inclinación influye en cómo se transfiere la rigidez hacia el movimiento vertical de la rueda.

El AFC se determina mediante el coseno del ángulo de inclinación del resorte:

$$AFC = \cos(\theta)$$

Lo que permite ajustar la rigidez efectiva cuando los elementos de la suspensión no están colocados completamente en posición vertical.

Gracias a este factor, el cálculo de rigidez refleja de forma más precisa el comportamiento real del sistema frente a cargas dinámicas.

En el sistema mencionado, la frecuencia de trabajo está determinada por la rigidez del resorte, donde la masa suspendida correspondiente a la carrocería y componentes por encima de la suspensión; y el amortiguador. Por ejemplo, en vehículos livianos la frecuencia de trabajo

oscila entre 1.0 y 1.5 Hz para las ruedas delanteras, buscando un equilibrio adecuado entre una conducción óptima y una respuesta dinámica.

Por otro lado, las frecuencias más bajas, el sistema favorecen el confort, ya que se minimizan las vibraciones y las oscilaciones de la carrocería, pero reducen la precisión en la conducción y el control. Sin embargo, las frecuencias más altas mejoran el control del vehículo y la capacidad de respuesta, pero genera una marcha más rígida, afectando el confort en carreteras irregulares.

El diseño de la suspensión al ser más simple que otros sistemas, tiende a priorizar un comportamiento dinámico equilibrado a través de ajustes en la dureza del resorte y la amortiguación, lo que permite a los profesionales ajusten la frecuencia de trabajo según el tipo de vehículo y su uso, optimizando la absorción de impactos en caminos como curvas o frenadas bruscas.

En otras palabras, la frecuencia de trabajo en el sistema es importante para definir el comportamiento del vehículo en términos de confort y rendimiento, un ajuste adecuado a la frecuencia garantiza que el sistema responda de manera eficiente a las fuerzas que actúan sobre el vehículo, mejorando la seguridad y el confort del vehículo.

El confort de un vehículo está relacionado con la capacidad de la suspensión para absorber las irregularidades del terreno, minimizando las vibraciones y los impactos que se transmiten, utilizando un resorte helicoidal y un amortiguador para absorber la energía generada por los baches. Debido a su disposición compacta, la suspensión reacciona de inmediato a los cambios en la superficie del camino, generando una mejor conducción especialmente en vehículos ligeros.

Por otro lado, la estabilidad se refiere a la capacidad del vehículo para mantener el control y la tracción en diversas condiciones de conducción; en este aspecto, la suspensión McPherson contribuye a mantener las ruedas en contacto con el suelo, lo que es esencial para la tracción y el control del vehículo.

Si bien el diseño de la configuración McPherson genera cierto balanceo (body roll) en las curvas debido a la inclinación de la carrocería lo cual puede ser mitigado, mediante barras estabilizadoras y un ajuste preciso de los amortiguadores. Por tal, las modificaciones mejoran la rigidez lateral del vehículo, permiten una mejor conducción especialmente en curvas y durante frenadas o aceleraciones bruscas.

El diseño ligero y compacto favorece la estabilidad al reducir el peso no suspendido, lo que mejora la capacidad de respuesta del vehículo al volante, siendo importante en autos livianos, donde la maniobrabilidad es un factor clave para la seguridad y el rendimiento.

El desafío en el diseño de la suspensión radica en el equilibrio entre confort y estabilidad, mediante un ajuste el cual mejorará la comodidad del viaje, pero compromete la estabilidad en situaciones de alta exigencia, como maniobras bruscas o curvas cerradas.

La rigidez del resorte y del amortiguador tiene un impacto en la capacidad de la suspensión para absorber las irregularidades del terreno. Si el sistema es demasiado rígido, se puede sentir cada bache y ondulación en la carretera. En contraste, un sistema más blando mejora el confort considerando la precisión en la conducción.

Los amortiguadores son esenciales para reducir las vibraciones y estabilizar el vehículo, en la suspensión McPherson, la calidad de los amortiguadores afecta a la comodidad como la estabilidad, ya que regulan la velocidad a la que el resorte se comprime y rebota. Un amortiguador desgastado puede provocar movimientos bruscos y disminuir la capacidad de absorción, afectando de forma negativa al vehículo. Luego de la parte de la suspensión iría la parte del sensor acelerómetro, como, por ejemplo.

La configuración de los puntos de articulación y la geometría de la suspensión influyen en la transferencia de la fuerza de las ruedas a la carrocería, es decir, el ángulo de inclinación del amortiguador como la ubicación de los puntos de pivote, afectan a la capacidad de la suspensión para adaptarse a las diferentes condiciones del camino.

Los componentes de la suspensión como bujes, soportes y cojinetes son parte el confort del vehículo, si los mismos son de mala calidad generan vibraciones y ruidos. Por tal, el uso de bujes de goma o materiales que amortigüen los movimientos ayuda a reducir las vibraciones y mejorar la experiencia de manejo.

La alineación correcta de las ruedas es importante para que la suspensión sea óptima, una alineación deficiente genera vibraciones y desgaste irregular en los neumáticos, afectando tanto el confort como la seguridad en carretera.

Finalmente, los neumáticos son importantes dentro del confort del vehículo, donde la suspensión trabaja en conjunto con los neumáticos, ya que son el primer punto de contacto con la superficie. Al contar con neumáticos de baja calidad pueden reducir la capacidad de absorción de impactos y aumentar la transmisión de vibraciones.

El sistema McPherson se compone de un amortiguador telescópico, un resorte helicoidal, una rótula de soporte inferior y un brazo de control, permitiendo que la suspensión funcione en un solo punto de pivote, logrando una estructura simple y ligera. El principio de funcionamiento se da cuando la rueda del vehículo pasa sobre una irregularidad en la carretera, el movimiento de la rueda hace que el resorte se comprima y el amortiguador absorba el impacto, evitando que este se transmita directamente a la cabina. Cuando los componentes de la suspensión están alineados verticalmente, la suspensión puede soportar tanto el peso del vehículo como las fuerzas generadas por las maniobras de giro y frenado, lo que contribuye a un diseño más compacto, que permite acomodar más espacio en el compartimiento del motor. (Domínguez, 2011)

La suspensión es popular en automóviles compactos y sedanes, que buscan una combinación de comodidad de conducción y bajo coste de producción. Gracias a su diseño vertical, integración del amortiguador y el resorte en una sola unidad, la suspensión ahorra espacio, permitiendo una mayor flexibilidad en la disposición del motor y otros componentes en el compartimiento delantero, siendo ideal en vehículos de tracción delantera, ya que optimiza el espacio en la cabina y contribuye a un peso total más ligero del vehículo.

MATERIALES Y METODOS

Este estudio se llevó a cabo utilizando un enfoque experimental, según Fidias Arias, (2015), en su libro El Proyecto de Investigación, define la investigación experimental como el someter a un objeto o grupo de individuos a determinadas condiciones, estímulos o tratamientos (variable independiente) para observar los efectos o reacciones que se producen (variable dependiente).

Por otro lado, Tamayo y Tamayo, (2014) la investigación experimental es un proceso que, mediante la aplicación del método científico, procura obtener información relevante y fidedigna para entender, verificar, corregir o aplicar el conocimiento.

Douglas Montgomery, (2012), define los procesos experimentales como un “ensayo en el que se manipula deliberadamente una o más variables.

La presente investigación utiliza una metodología experimental para comparar los resultados de las fórmulas seleccionadas con los datos obtenidos con un sensor acelerómetro, con el fin de determinar la frecuencia natural de trabajo en la suspensión McPherson con el comportamiento real mediante el uso del acelerómetro. Al emplear mediciones numéricas, detección de vibraciones y la caracterización de estudiar movimientos dinámicos, se pueden analizar las diferencias entre ambos métodos y validar la precisión de la fórmula frente a los datos experimentales. Este enfoque permite ajustar las predicciones de la fórmula, en función de los resultados obtenidos, proporcionando una visión más precisa del comportamiento dinámico de la suspensión en condiciones reales. (Micromachines, 2023).

Análisis matemático

Expresión matemática para el cálculo de la frecuencia de trabajo de la suspensión, utilizando datos experimentales obtenidos del vehículo Kia soluto 1.6.

Tabla 1

Parámetros utilizados

Parámetro	Símbolo	Valor	Descripción
Diámetro del alambre	d	12 mm – 1.2 cm	Diámetro del alambre que forma el resorte
Diámetro externo	dext	154 mm	Diámetro exterior del resorte
Diámetro interno	dint	130 mm	Diámetro interior del resorte
Diámetro promedio	D	142 mm – 14.2 cm	Promedio de los diámetros
Módulo de elasticidad	G	780000 kg/cm ²	Valor constante del material del resorte que define su rigidez
Numero de vueltas	n	3	Numero de espiras el resorte

Fuente. Autores

En donde K es el valor de la constante del resorte.

$$K = \frac{d^4 * G}{8 * n * D^3} \quad \text{Ec. [1.1]}$$

$$K = \frac{1.2^4 * 780000 \text{ Kg/cm}^2}{8 * 3 * 14.2 \text{ cm}^3} = 23.5365 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}}$$

Motion Rate

Es la relación de movimiento entre dos distancias; desplazamiento de la rueda (D1), y el desplazamiento en el punto de montaje de la suspensión (D2). Esta relación se calcula mediante a división de las distancias:

$$D1 = 23.5 \text{ cm}$$

$$D2 = 33.5 \text{ cm}$$

$$MR = \frac{D1}{D2} \quad \text{Ec. [1.2]}$$

$$MR = \frac{23.5 \text{ cm}}{33.5 \text{ cm}} = 0.70149$$

Wheel Rate

Es la rigidez efectiva de la suspensión en la zona de contacto del neumático. Y se calcula utilizando los siguientes valores:

$$MR = 0.70149$$

$$K = 23.53 \text{ kg/cm}$$

$$\text{Angle Correction Factor (AFC)} = \cos 8^\circ$$

$$WR = MR^2 * K * AFC \quad \text{Ec. [1.3]}$$

$$WR = 0.70149^2 * 23.53 \frac{kg}{cm} * \cos 8^\circ = 11.46 \frac{kg}{cm}$$

Frecuencia de trabajo

La frecuencia natural de oscilación del sistema de suspensión, en respuesta a las irregularidades de la carretera se calcula con la siguiente formula:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K * g}{P}} \quad \text{Ec. [1.4]}$$

En donde se utiliza los valores previamente hallados en las anteriores ecuaciones, únicamente transformando las unidades a mm, donde:

$$\text{Wheel Rate (WR)} = 11.46 \text{ kg/cm} = 1.146 \text{ kg/mm (K)}$$

$$\text{Gravedad (g)} = 9810 \text{ mm/s}^2$$

$$P = \text{Peso suspendido} = 55 \text{ kg}$$

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1.146 * 9810}{55}} = 2.275 \text{ Hz}$$

Prueba Experimental

Se realizó la prueba experimental en la suspensión del vehículo Kia soluto 1.6, mediante una prueba de ruta, con el uso de un sensor acelerómetro de grado industrial de tipo MEMS, modelo WTVB01-485, el cual permitirá registrar valores precisos en tiempo real mientras el vehículo se desplaza en una vía asfaltada con deterioro superficial con la finalidad de obtener datos en tiempo real sobre el desempeño y la frecuencia natural de trabajo del sistema de suspensión.(Wit Motion, 2023).

La prueba consiste en posicionar el sensor en la base del amortiguador, asegurándolo en un punto fijo y sólido. El sensor está equipado con un potente imán que permite obtener datos precisos. Como se muestra en la figura [1].

Figura 1.

Ubicación del sensor en el amortiguador del vehículo



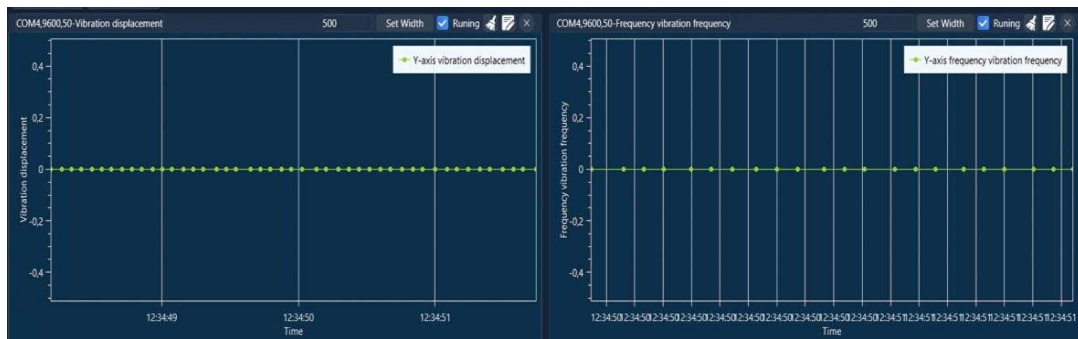
Fuente. Autores

Registro de datos en computador

Para dar inicio a la prueba el vehículo fue estacionado y el sensor fue calibrado mediante el software de tal forma que obtengan valores muy precisos. Especialmente en parámetros como el desplazamiento y la frecuencia de trabajo como indica la fig. 2

Figura 2.

Calibración del sensor en tiempo real

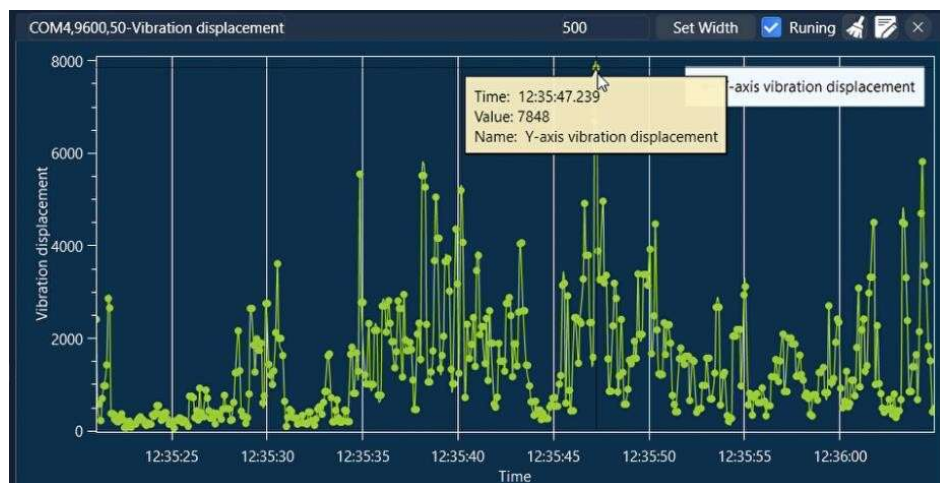


Fuente. Autores

Mediante el software y el vehículo en posición neutral inicio el monitoreo continuo durante 120 segundos, la posición de neutro es para evitar la aceleración y desaceleración del motor y capte valores más apropiados a la interacción del vehículo con la carretera. A continuación, se visualiza los valores más altos obtenidos durante la prueba de ruta en las gráficas [3 y 4].

Figura 3.

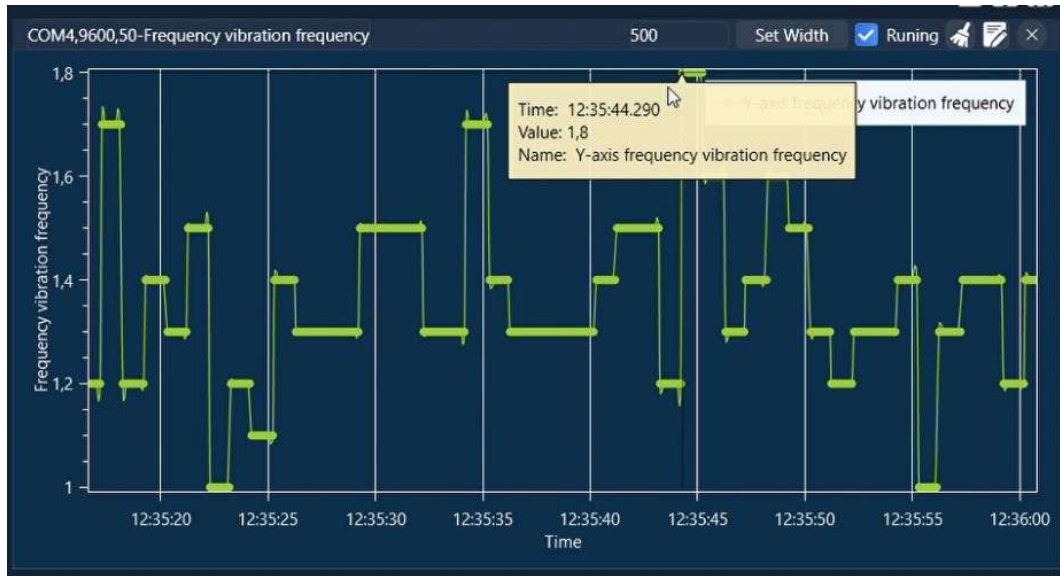
Representación gráfica del desplazamiento (um)



Fuente. Autores

Figura 4.

Representación gráfica de la frecuencia natural (Hz)



Fuente. Autores

Resultados y discusión

El software Witmotion gracias a su complejidad y configuración al cabo de 120 segundos de prueba, monitoreo 1492 puntos de referencia en tiempo real. Tanto para el desplazamiento de la suspensión y su frecuencia natural de resonancia. Con los datos obtenidos en cada una de las gráficas referenciales, la figura [3], denota un desplazamiento de 7848 μm , correspondiente a un recorrido del amortiguamiento de 7.8 milímetros, a su vez su frecuencia natural de trabajo de 1.8 Hz.

Estos valores monitoreados en tiempo real, están sujetos al amortiguamiento que está presentando la suspensión, sin embargo, es importante recalcar que la prueba de ruta se realizó en una vía asfaltada con irregularidades leves, logrando obtener datos muy cercanos al valor obtenido por el modelo matemático presentado. Tan solo la diferencia de 0.475 Hz, lo que conlleva a que el análisis matemático es muy similar a lo que se mide en tiempo real y condiciones de carretera de uso común.

Análisis

Experimentalmente los resultados son similares a los que otorga la fórmula seleccionada y los datos obtenidos en la prueba experimental permiten evaluar la precisión y aplicabilidad de las fórmulas planteadas para predecir el comportamiento de la suspensión McPherson. La frecuencia de trabajo calculada a partir de la fórmula utilizada es de 2.27 Hz, mientras que la frecuencia obtenida experimentalmente mediante el sensor acelerómetro es de 1.8 Hz. Esta diferencia de 0.47 Hz sugiere una proximidad considerable entre ambos valores, lo que indica que esta, es una representación razonablemente precisa del sistema de suspensión en condiciones ideales.

La similitud entre los resultados teóricos y experimentales demuestra que la fórmula logra capturar de forma adecuada las dinámicas fundamentales de la suspensión. Aunque existen factores externos que no se consideran, como las condiciones del camino y el desgaste de componentes, el pequeño margen de diferencia confirma que la fórmula utilizada es confiable para estimaciones iniciales y simulaciones. Este resultado refuerza la validez del modelo matemático para aplicaciones de diseño y optimización, donde una frecuencia cercana a 2.27 Hz refleja con precisión el comportamiento previsto.

CONCLUSIONES

La fórmula propuesta para la suspensión McPherson permite representar de manera efectiva las características dinámicas del sistema, como la interacción del resorte y el amortiguador en la absorción de impactos. La frecuencia de trabajo calculada a través del modelo (2.27 Hz) muestra que, en condiciones ideales, el modelo puede describir razonablemente el comportamiento teórico de la suspensión, facilitando su uso en el diseño y la simulación de sistemas de suspensión.

La prueba experimental con el sensor acelerómetro en una carretera con irregularidades permitió obtener un valor de frecuencia de trabajo de 1.8 Hz. Este resultado empírico refleja el comportamiento de la suspensión en un contexto práctico, donde factores adicionales, como el estado del terreno y el desgaste de los componentes, afectan su desempeño. La prueba demostró ser un método efectivo para capturar datos reales sobre el funcionamiento del sistema.

El estudio confirma que la fórmula es útil en la fase de diseño y simulación para prever el comportamiento de la suspensión, la combinación de ambos métodos permite una comprensión completa del comportamiento dinámico de la suspensión, equilibrando confort y estabilidad para el usuario final.

REFERENCIAS

- Alexandru, C y P. Alexandru. (2011). Comparative Analysis between the vehicles passive and active suspensions. *Int Mech*, 378.
- Arias, F. G. (2012). El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica (6ª ed.). Editorial Episteme.
- Bustamante, B. (2020). *Estudio del comportamiento de un correcto de camber y caster usando elementos finitos para la alineación en un vehículo con suspensión MCPHERSON*. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10222K>. Elissa, "Title of
- Cebolla, B. (2017). *Modelado y caracterización de sistemas de suspensión para un vehículo tipo fórmula*. Universidad Politecnica de Chimborazo .
- Gutiérrez, C. A. (2014). Diseño y simulación de control predictivo para suspensión McPherson activa . *Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña*.
- Vahedi, A., & Jamali, A. (2022). Constraint optimization of nonlinear McPherson suspension system using genetic algorithm and ADAMS software. *Journal of Vibration and Control*, 28(21-22), 3140-3151.
- Bucchi, F., & Lenzo, B. (2022, August). Analytical derivation and analysis of vertical and lateral installation ratios for swing axle, McPherson and double wishbone suspension architectures. *In Actuators* (Vol. 11, No. 8, p. 229). MDPI.
- Tamayo, M. (2007). *El proceso de la investigación científica*. 4ta. Edición, México. Ed. Limusa.
- Rodríguez Peñuelas, M. A. (2010). *Métodos de investigación*. 1ra. Edición, México. Ed. Universidad Autónoma de Sinaloa.
- Hurel Ezeta, J., Mandow, A., & García Cerezo, A. (2013). Los Sistemas de Suspensión Activa y Semiactiva: Una Revisión. *Revista Iberoamericana De Automática E Informática Industrial*, 10(2), 121–132. <https://doi.org/10.1016/j.riai.2013.03.002>
- Tecpoyotl Torres, M. et al. (2023). *Introducción al análisis y diseño de MEMS*. Comunicación Científica. México. <https://doi.org/10.52501/cc.104>
- Landi, E., Prato, A., Fort, A., Mugnaini, M., Vignoli, V., Facello, A., Mazzoleni, F., Murgia, M., & Schiavi, A. (2023). Sensor MEMS multicomponente altamente confiable para la gestión del mantenimiento predictivo de rodamientos. *Micromachines*, 14(2), 376. <https://doi.org/10.3390/mi14020376>
- Micromachines. (2023). MEMS accelerometers: Design, applications and characterization. *Micromachines Special Issue*. Recuperado de

https://www.mdpi.com/journal/micromachines/special_issues/MEMS_accelerometers_design

Montgomery, D. C. (2012). (Diseño y análisis de experimentos (8va ed.). Editorial Limusa.

Wit Motion. (2023). *Industrial grade MEMS vibration sensor WTVB01-485*. Recuperado de <https://www.wit-motion.com/proztsz/28.html>

Van Casteren, D., Gysen, B., Kessels, J., Paulides, J., van den Bosch, P., & Lomonova, E. (2013). Non-linear full-car modeling and sky-hook control for a direct-drive active suspension system. *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, 6(1), 252-268. <https://doi.org/10.4271/2013-01-0713>

Domínguez, E. J. (2011). *Circuitos de fluidos, suspensión y dirección: electromecánica de vehículos*: (ed.). Macmillan Iberia, S.A. <https://0310s0v2g-y-https-elibro-net.proxy.uide.edu.ec/es/lc/uide/titulos/52816>

Kaz Technologies. (s.f.). What is motion ratio? Recuperado de <https://www.kaztechnologies.com/formula-sae/faq>

Race Software. (s.f.). Wheel rate – Suspension KPI. Recuperado de <https://race.software/academy/suspension-designer-library/wheel-rate/>

González-Viñas, W., & Mancini, H. L. (2003). Ciencia de los materiales. Editorial Ariel.

ANEXOS

Anexo 1

Ficha técnica de sensor acelerómetro

WTVB01-485 Vibration Sensor User Manual

Product Specifications:

Model: WT-VB01-485

Description: Vibration Sensor

1. [Product Overview](#)

1. The module has its own voltage stabilization circuit, the working voltage is 5V~36V, and the connection is convenient.
2. The use of advanced digital filtering technology can effectively reduce measurement noise and improve measurement accuracy.
3. At the same time, we provide users with various PC Software's, instructions for use, and development manuals, so as to minimize the R&D time for various needs.
4. Support 485 interface. It is convenient for users to choose the best connection method. The serial port rate is adjustable from 4800bps to 230400bps, the default is 230400bps in high-speed mode, the cut-off frequency is adjustable from 0 to 100Hz, and the detection period is adjustable from 1 to 100Hz.

5. Application areas: It can be widely used in bearing vibration measurement and real-time monitoring of rotating machinery such as submersible pumps, fans, steam turbines, coal mills, oxygen generators, generators, centrifuges, compressors, water pumps, motors, etc.

6. The three-axis displacement, three-axis acceleration, three-axis angular velocity, three-axis speed, three-axis angle, and three-axis frequency outputs can meet the user's all-round measurement of vibration and impact, and determine whether the measured object (motor water pump) is damaged. If there is a machine failure caused by bearing wear, bearing cracking, poor dynamic balance, and misalignment, the vibration sensor can detect the failure in advance and issue an early warning to prevent the machine from continuing to work under bad conditions and causing damage, thereby causing economic losses.

7. Multiple installation methods: magnetic connection, threaded connection. Firm and stable, easy to install and disassemble.

8. Stud bolts with positive and negative threads: stainless steel hexagonal stud bolts with positive and negative threads, stud screws, left-handed and right-handed bidirectional screws

2. [Parameter indicators](#)

2.1 [Basic parameters](#)

parameter	condition	Minimum	default	Maximum
Communication interface	485 interface	4800bps	9600bps	230400bps

Output	On-chip time, 3-axis acceleration, 3-axis angular velocity, 3-axis vibration velocity, 3-axis vibration angle 3-axis vibration displacement, 3-axis vibration frequency, chip temperature			
Range	Vibration speed: 0~50mm/s, vibration angle: 0~180°, vibration displacement: 0~30000um, vibration frequency: 1-100hz			
Accuracy	<FS±5%			
Detection cycle		1Hz	10Hz	100Hz
Cut-off frequency		1Hz	10Hz	100Hz
Operating temperature		-40℃		85℃
Storage temperature		-40℃		85℃
Impact resistance	20000g			

Protection level	IP67
------------------	------

Vibration angle: The angle at which an object shakes when it vibrates

Vibration velocity: the speed at which the vibration point of an object moves when it vibrates

Amplitude: The amplitude of the vibration point when the object vibrates (vibration displacement)

Vibration frequency: The number of times an object shakes per unit time when it vibrates. The vibration frequency measurement range is 1Hz~100Hz

2.2 Electrical parameters

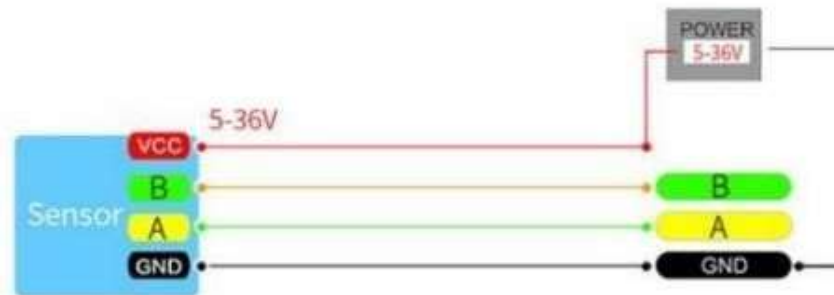
parameter	condition	Minimum	default	Maximum
Supply voltage		5V	12V	36V
Working current	Working (12V)		12mA	

3. Hardware connection method

3.1. Wiring method

RS485 PIN DEFINITION

RED	YELLOW	GREEN	BLACK
VCC 5-36V	A	B	GND



3.2. Installation

Two installation methods, magnetic connection,
screw connection, firm and stable,
Simple and convenient installation and disassembly



Magnetic connection



threaded connection

The sensor is screwed to the magnetic base, and the magnetic base uses strong The large suction is adsorbed on the equipment for vibration detection, which is also very convenient for installation. with disassembly. The suction force of the magnetic seat is 70kg.

The default thread size of the sensor is M8*1.25mm is required and The device under test is threaded



Thread size



4. How to use the software

4.1. CH340 driver installation

Connect the computer via the USB to 485 module, turn on the PC Software, install the CH340 driver corresponding to the serial port module ([CH340 driver download](#)), and then you can query the corresponding port number in the device manager, as shown in the figure

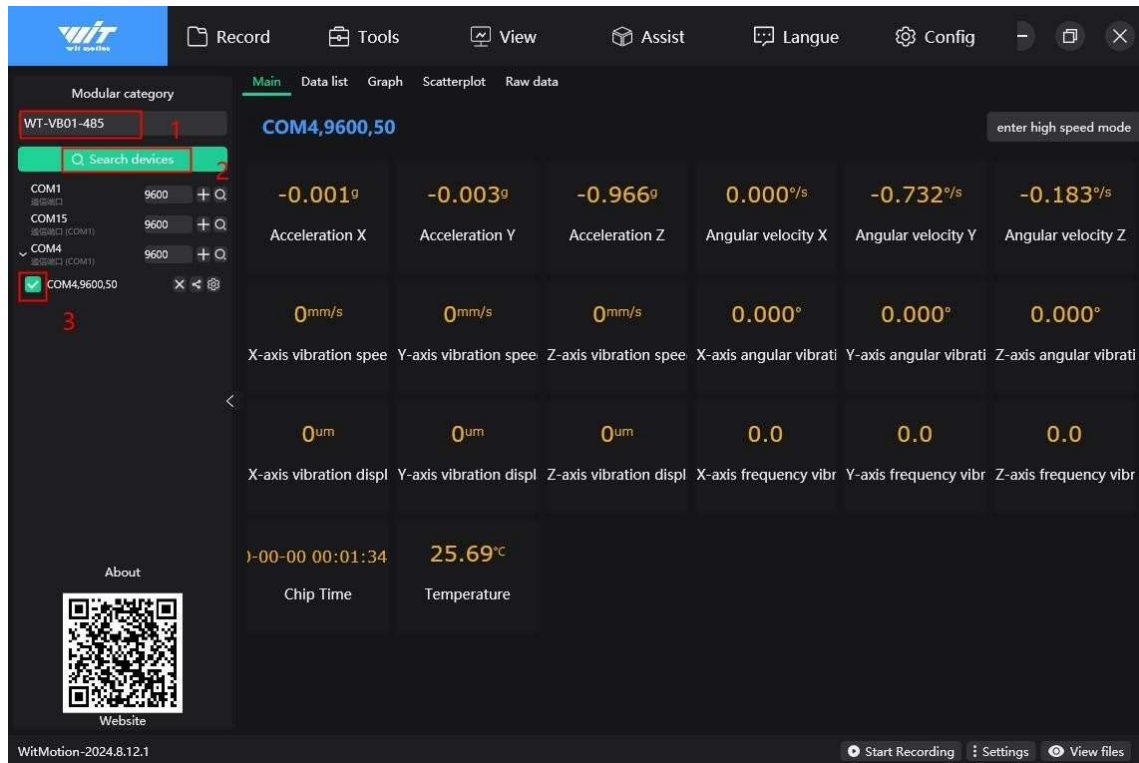


4.2. Connect to the PC Software

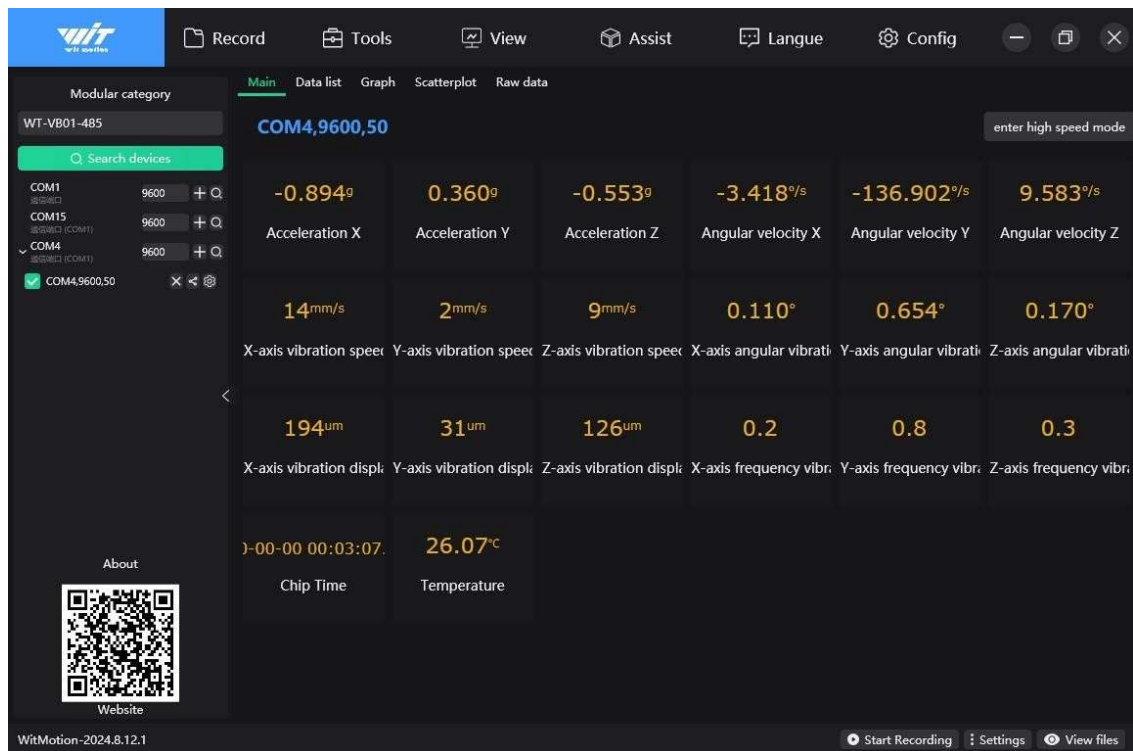
After the device is connected, open the Witt [intelligent PC Software](#)

4.2.1. Automatic search

1. Select the model number of WT-VB01-485.
2. Click Search device.
3. Check the serial port number.



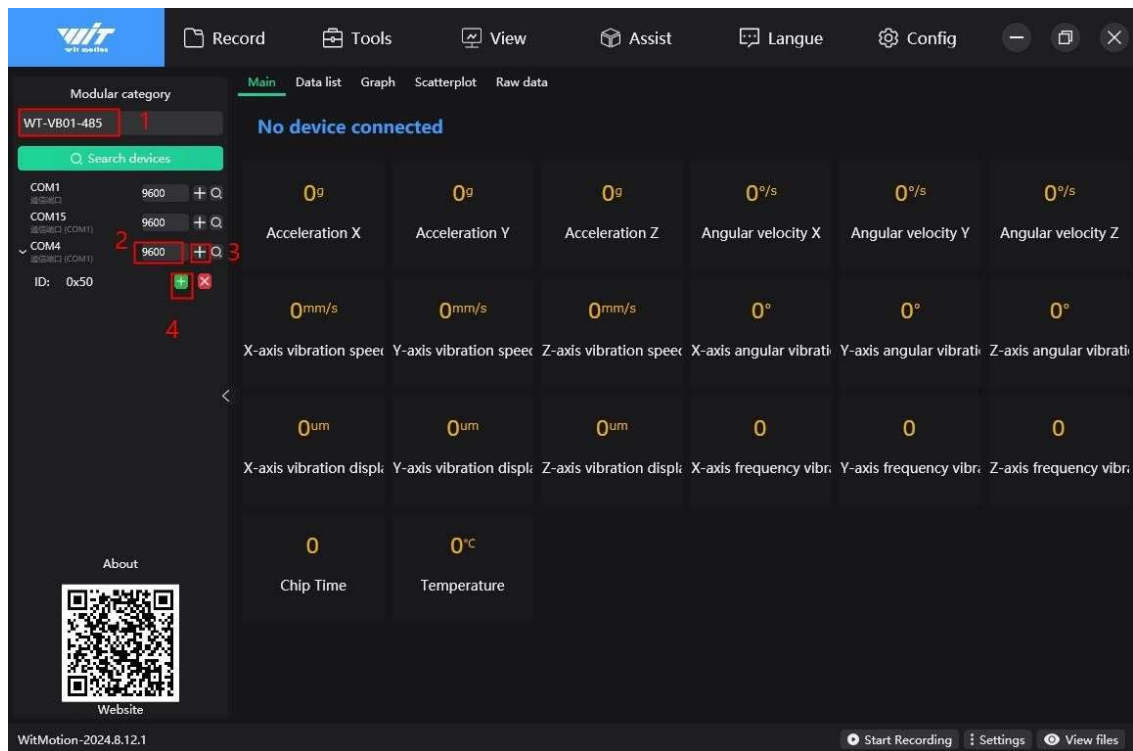
After the connection is successful, the data can be displayed on the software, as shown below:



4.2.2. Manual Addition

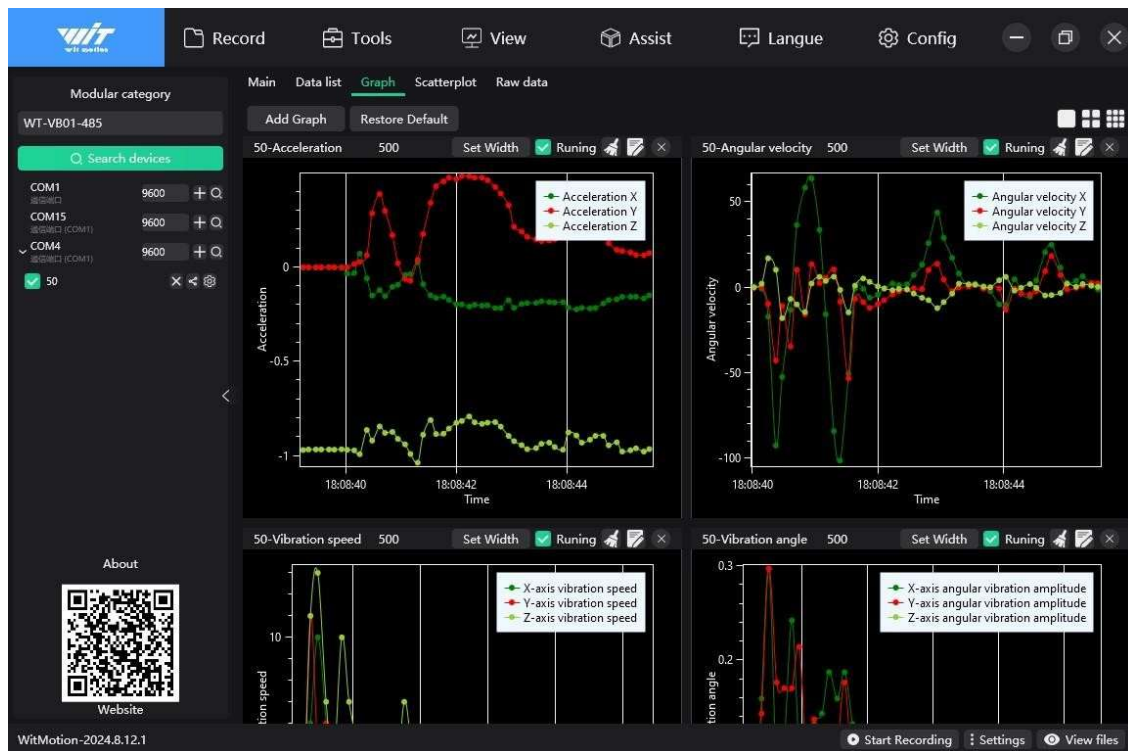
1. Select the model number of WT-VB01-485.
2. Select the baud rate of the corresponding port. The default baud rate is 9600
3. Enter the corresponding ID (the default is 0x50) and click the + sign to add the device.

As shown in the following figure:



4.3. Graph

Click on the graph to see the graphs of vibration speed, vibration angle, vibration displacement and temperature (normal mode); in high-speed mode, only the vibration displacement graph has data, as shown below:



Scatter plot

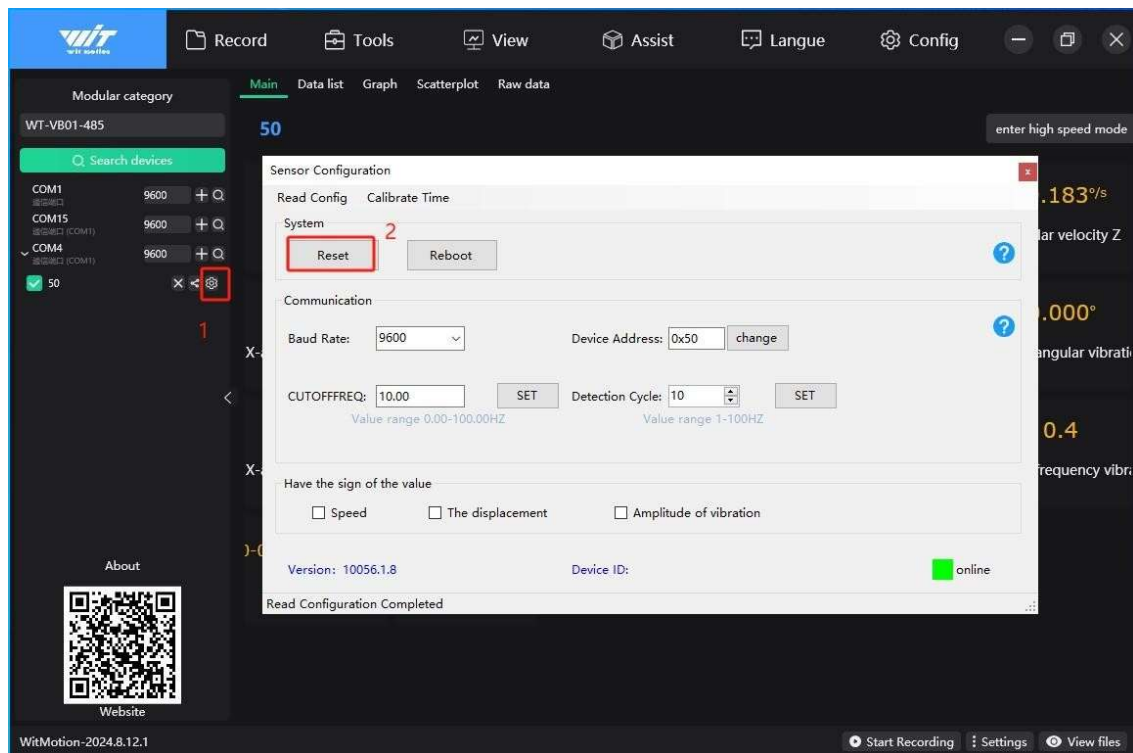
If you need to obtain a complete vibration displacement scatter plot, it is recommended to use high-speed mode to view it.



5. Software Configuration

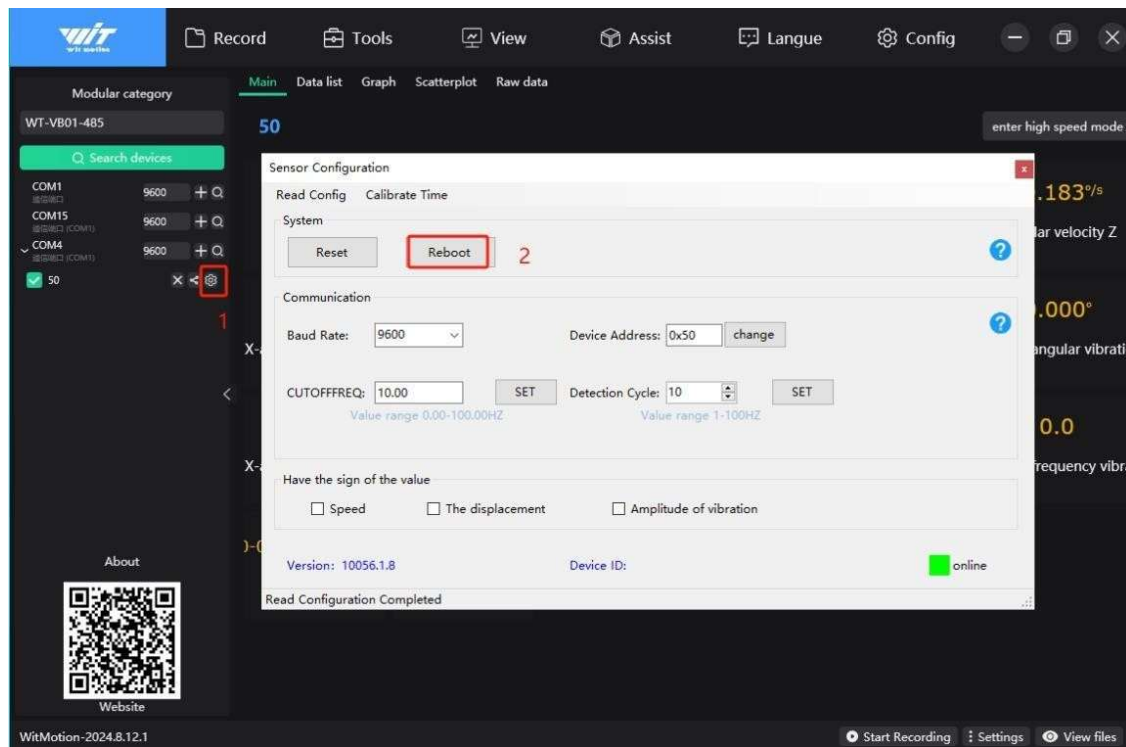
5.1. Restore settings

Click "Configuration" of the corresponding serial port, and then click "Restore Settings" in the sensor configuration interface to restore the factory settings, as shown in the figure below.



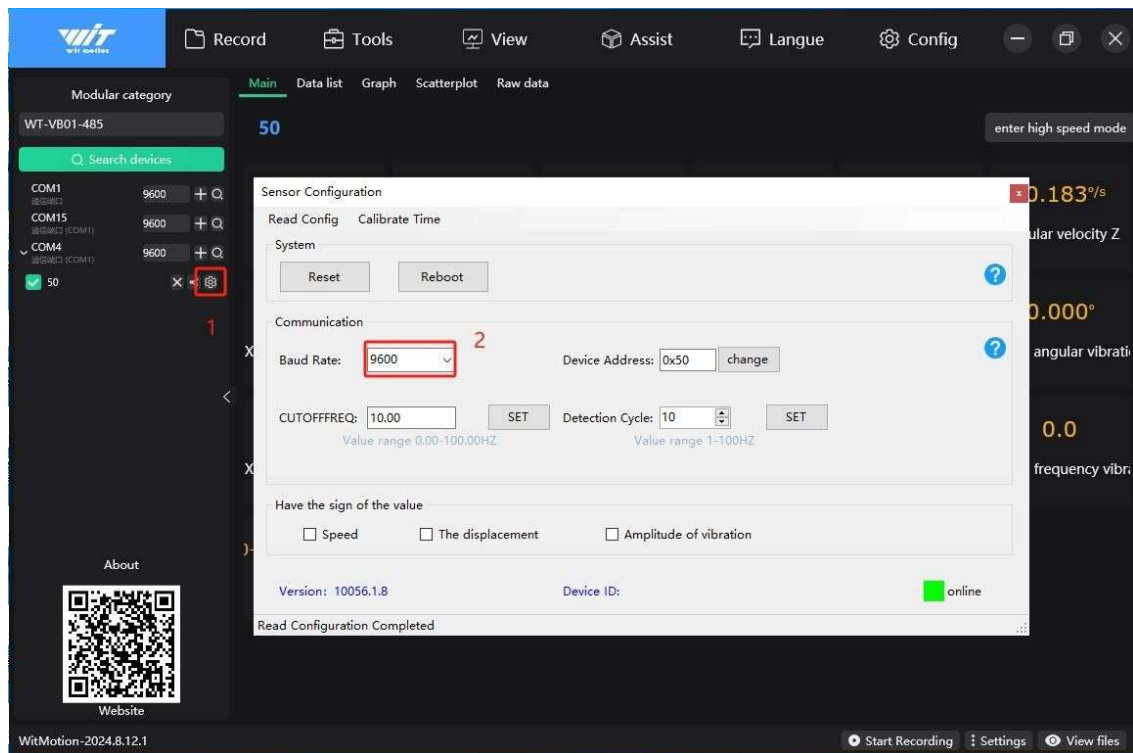
5.2. Restart

Click "Configure" and then click "Restart" in the sensor configuration interface to restart the sensor, as shown in the following figure:



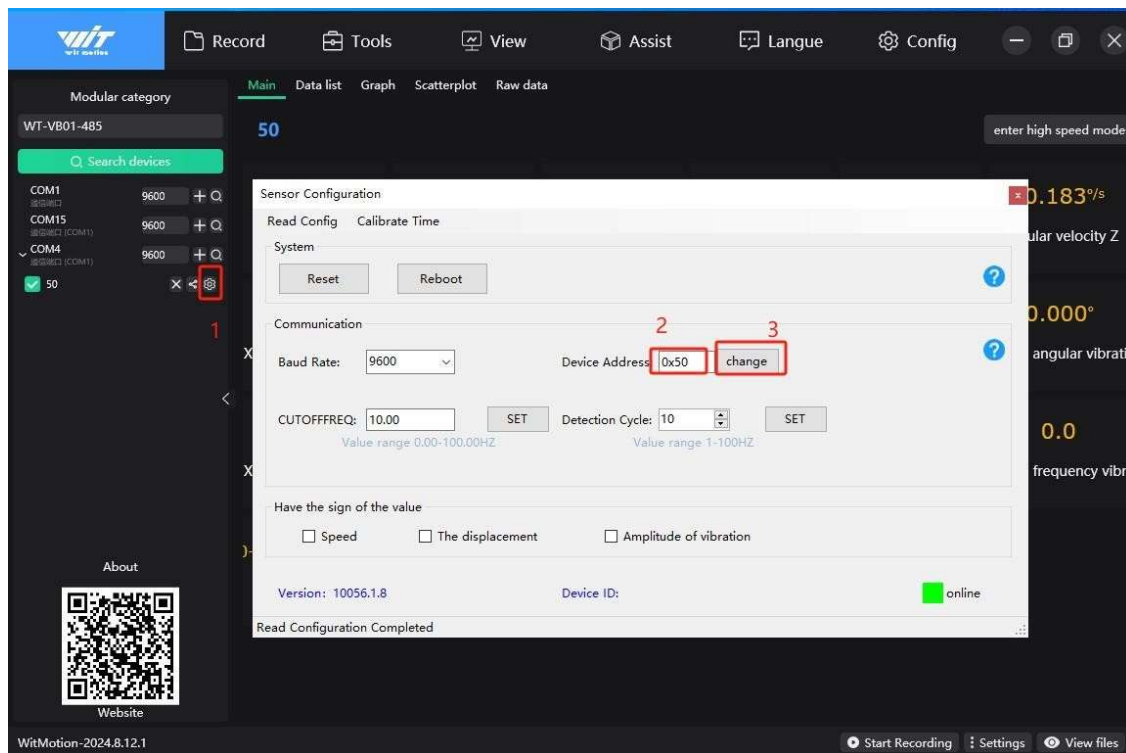
5.3. Communication rate

Open "Configuration", click the drop-down menu of "Communication Rate" in the sensor configuration interface, select the serial port baud rate to be modified, and you can change the current serial port baud rate (the default serial port baud rate is 9600). The serial port baud rate can be 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200, 230400. In high-speed mode, the baud rate is fixed to 230400 and cannot be modified, as shown in the following figure:



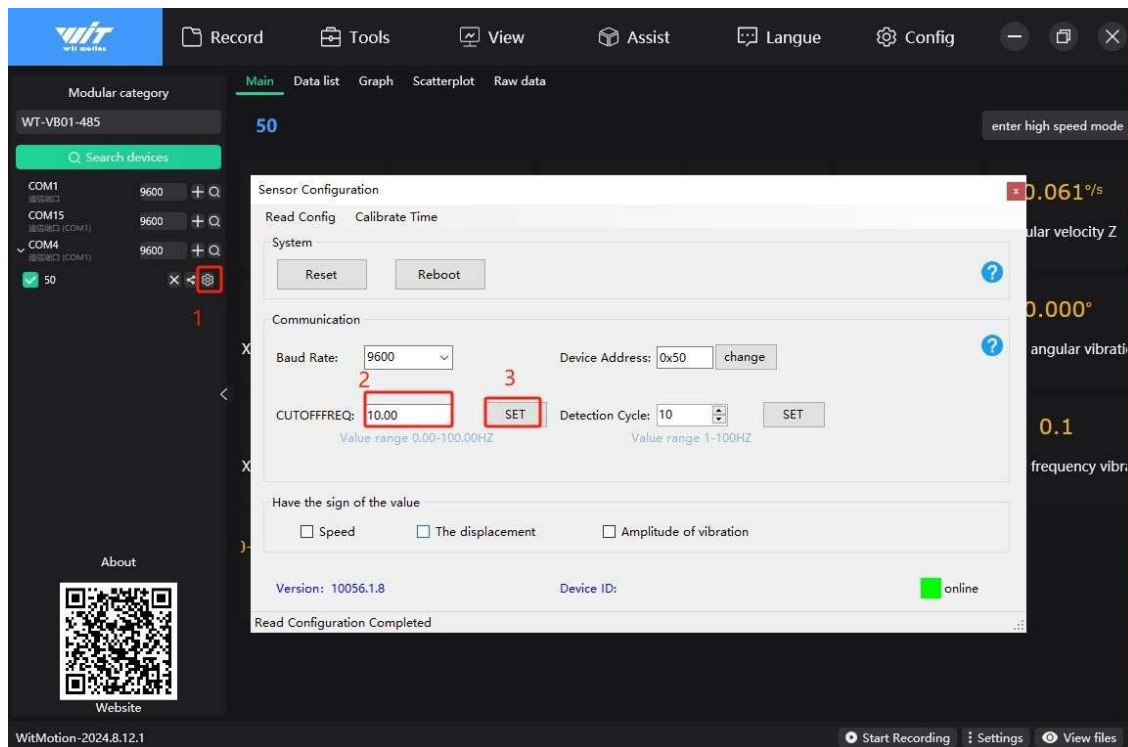
5.4. Device Address

Open "Configuration", click the "Modbus Address" input box in the sensor configuration interface, enter the Modbus address and then click Set to change the Modbus address (the default Modbus address is 0x50). The Modbus address ranges from 0x00 to 0x7F, as shown in the figure:



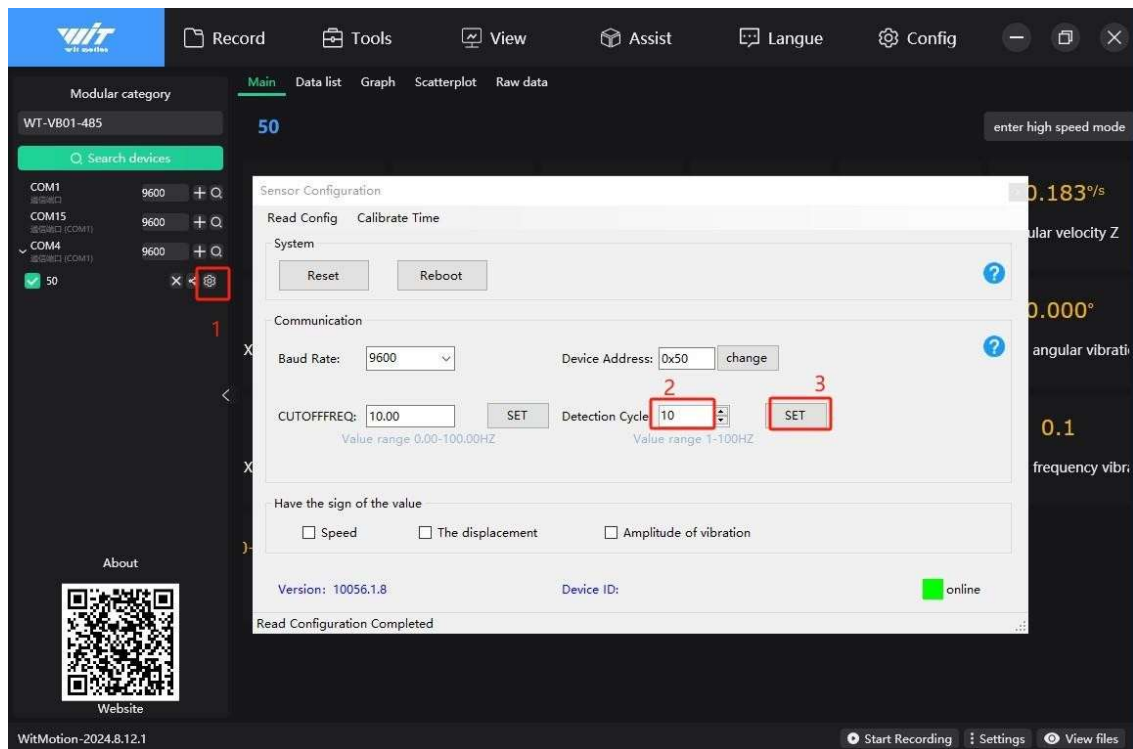
5.5. Cutoff frequency

Open "Configuration", click the drop-down menu of "Cutoff Frequency" in the sensor configuration interface, select the corresponding cutoff frequency, and you can set the cutoff frequency (the default cutoff frequency is 10.0Hz). Our cutoff frequency is used like this (using a sinusoidal signal to excite, constantly changing the frequency, and the frequency corresponding to the output amplitude dropping to 0.707 times the input amplitude is the cutoff frequency. The frequency range where the output amplitude is greater than or equal to 0.707 times the input amplitude is the operating frequency range. We change the cutoff frequency to filter out clutter of other frequencies. For example, if the frequency of other clutter is 30Hz and the sensor works at 50Hz, you may wish to set the cutoff frequency to 40.0, 50.0Hz). The PC Software modification is shown in the figure:



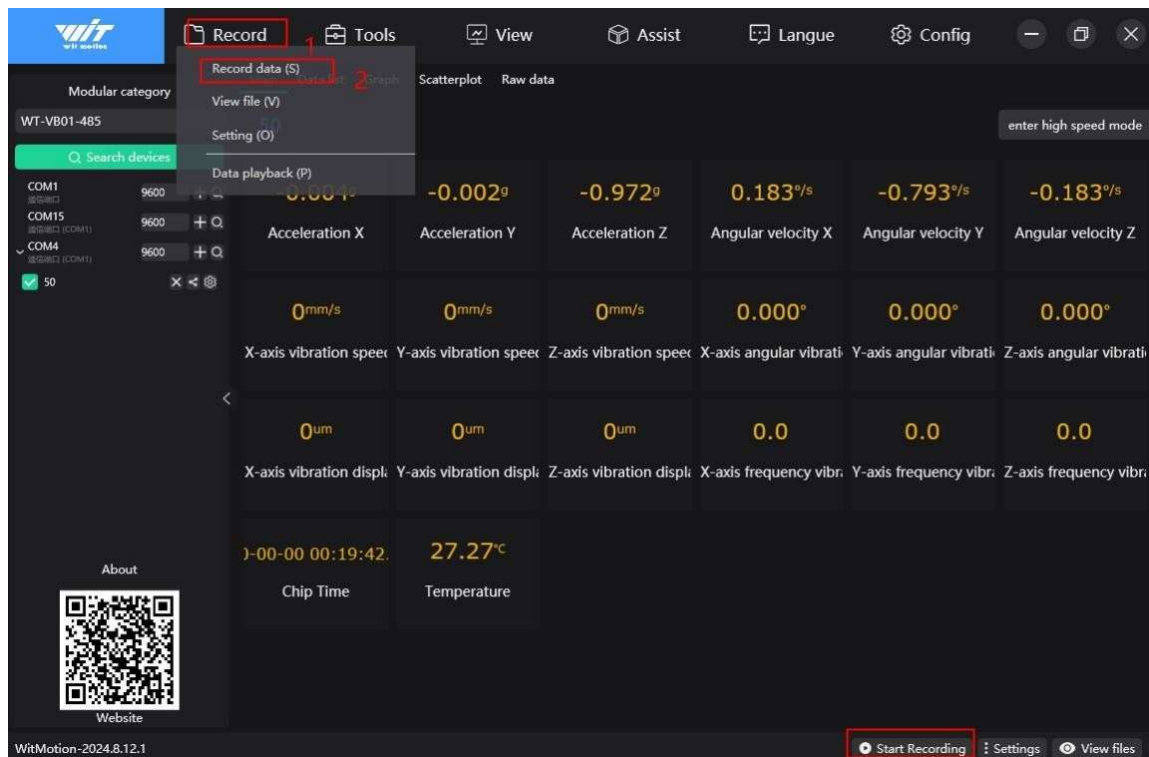
5.6. Detection cycle

Open "Configuration", click the drop-down menu of "Detection Cycle" in the sensor configuration interface, select the corresponding detection cycle, and then set the detection cycle (the detection cycle is equivalent to the sampling rate of the product), as shown in the figure:



5.7. Recording Data

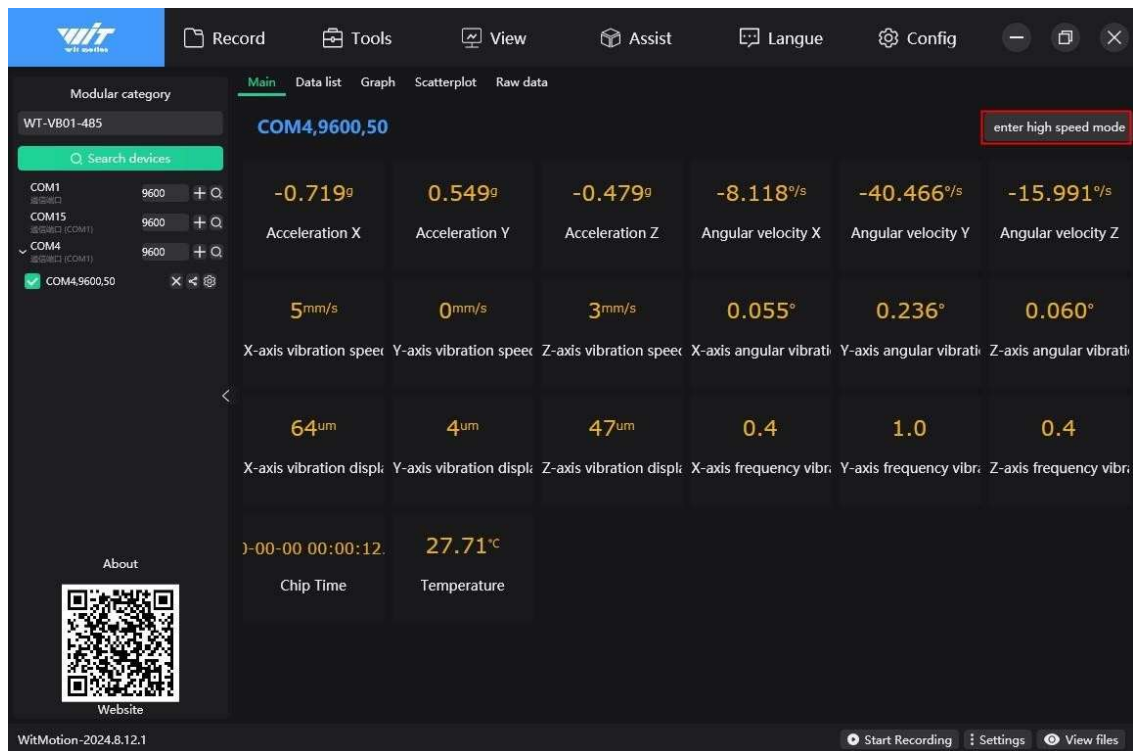
Open "Record" and click "Start Recording" to record the output data of the sensor, or directly click "Start Recording" in the lower right corner.



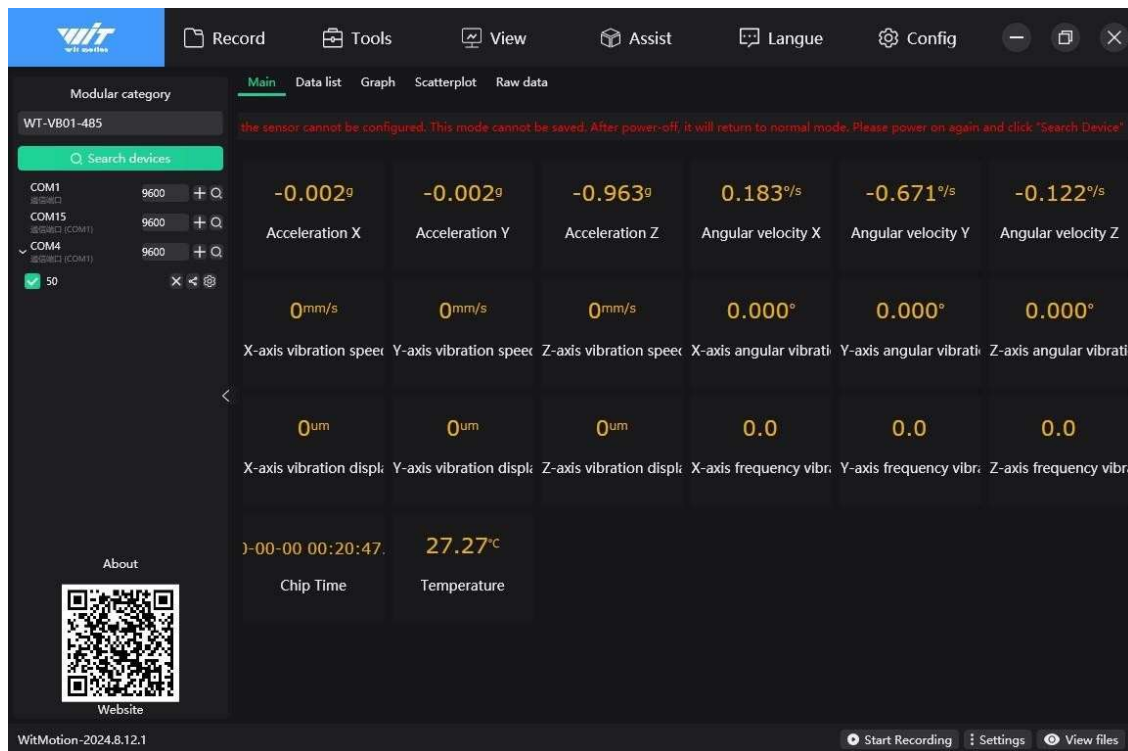
5.8. High-speed mode

Note: High-speed mode actively outputs vibration displacement data at high speed, which can be used to analyze complex motion trajectories.

Operation: Click the high-speed mode button, the sensor will enter the high-speed active output mode (1000Hz), only output the three-axis high-frequency vibration displacement, and the baud rate of the sensor will automatically switch to 230400.



After switching to high-speed mode, click "Search Device" to re-identify the device, and the baud rate will automatically switch to 230400. No parameter configuration can be performed in high-speed mode. If you want to restore to normal mode, you can power on the sensor again and then search or add the device again.



6. Communication Protocol

Protocol: MODBUS protocol

Level: 485 level (default baud rate: 9600)

6.1. Read register format

- The data is sent in hexadecimal format, not ASCII.
- Each register address, register number, and data are represented by two bytes. The high and low bits of the register address are represented by ADDR_H and ADDR_L, the high and low bits of the register number are represented by LEN_H and LEN_L, and the high and low bits of the data are represented by DATA_{1H} and DATA_{1L}.

Send command

Modbus Address	Function code	Register high 8 bits	Register lower 8 bits	Read length high 8 bits	Read length lower 8 bits	Check digit high 8 bits	Check digit lower 8 bits
ID	0x03 (Read)	ADDRH[15:8]	ADDRL[7:0]	LENH[15:8]	LENL[7:0]	CRCH[15:8]	CRCL[7:0]

Data return

Modbus Address	Function code	Read length	Data high 8 bits	Data lower 8 bits	Data high 8 bits	Data lower 8 bits	Data high 8 bits	Data lower 8 bits	Check digit high 8 bits	Check digit lower 8 bits
ID	0x03 (Read)	LEN[7:0]	DATA1H[15:8]	DATA1L[7:0]	...	...	DATA nH	DATA nL	CRCH[15:8]	CRCL[7:0]

6.2. Write register format

- The data is sent in hexadecimal format, not ASCII.
- Each register address and write data are represented by two bytes. The high and low bits of the register address are represented by ADDR_H and ADDR_L, and the high and low bits of the write data are represented by DATA_H and DATA_L.

Send command

Modbus	Function	Register high 8 bits	Register lower 8 bits	Data high 8 bits	Data lower 8 bits	Check digit high 8 bits	Check digit lower 8 bits
Address	code		bits		bits	8 bits	lower 8 bits
ID	0x06 (Write)	ADDRH[15:8]	ADDRL[7:0]	DATAH[15:8]	DATAL[7:0]	CRCH[15:8]	CRCL[7:0]

Data return

Modbus Address	Function code	Register high 8 bits	Register lower 8 bits	Data high 8 bits	Data lower 8 bits	Check digit high 8 bits	Check digit lower 8 bits
ID	0x06 (Write)	ADDRH[15:8]	ADDRL[7:0]	DATAH[15:8]	DATAL[7:0]	CRCH[15:8]	CRCL[7:0]

Note:

The instruction writing operation needs to be performed in three steps.

The first step is to unlock 0x50 0x06 0x00 0x69 0xB5 0x88 0x22 0xA1. The unlocking will take effect within ten seconds.

The second step is to send the instructions that need to be modified.

The third step is to save the instruction 0x50 0X06 0X00 0X00 0X00 0X84 0X4B.

6.3. Register address table

address	symbol	meaning
---------	--------	---------

0x00	SAVE	Save/Restart/Restore to Factory
0x04	BAUD	Serial port baud rate
0x1A	IICADDR	Device Address

0x30	YYMM	Month Year
0x31	DDH	Date
0x32	MMSS	Seconds and minutes
0x33	MS	millisecond
0x34	AX	X-axis acceleration
0x35	AY	Y-axis acceleration
0x36	AZ	Z- axis acceleration
0x37	GX	X-axis angular velocity
0x38	GY	Y-axis angular velocity

0x39	GZ	Z- axis angular velocity
0x3A	VX	X-axis vibration speed
0x3B	VY	Y-axis vibration speed
0x3C	VZ	Z-axis vibration speed
0x3D	ADX	X-axis angle vibration angle
0x3E	ADY	Y-axis angle vibration angle
0x3F	ADZ	Z-axis angle vibration angle
0x40	TEMP	Product temperature

0x41	DX	X-axis vibration displacement
0x42	DY	Y-axis vibration displacement
0x43	DZ	Z-axis vibration displacement
0x44	HX	X-axis vibration frequency
0x45	HkDJ	Y-axis vibration frequency

0x46	HZZ	Z-axis vibration frequency
0x47	FDNFX	X-axis vibration displacement (high speed mode)
0x48	FDN	Y-axis vibration displacement (high speed mode)
0x49	FZD	Z-axis vibration displacement (high speed mode)
0x62	MODBUSMODEL	High-speed mode
0x63	CUTOFFFREQUI	Cutoff frequency integer
0x64	CUTOFFFREQF	Cutoff frequency fraction
0x65	SAMPLEFREQ	Detection cycle

6.4. [Register Description](#)

All the following examples are instructions when the Modbus address is 0x50 (default). If you change the Modbus address, you need to change the address and CRC check bit in the instruction accordingly.

SAVE (Save/Restart/Restore to Factory)

Register Name: SAVE

Register address: 0 (0x00)

Read/write direction: R/W

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	SAVE[15:0]	Save: 0x0000
		Restart: 0x00FF
		Factory Reset: 0x0001

Example:

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 00 00 FF C4 0B (restart)

Return: 50 06 00 00 00 FF C4 0B

BAUD (serial port baud rate)

Register name: BAUD		
Register address: 4 (0x04)		
Read/write direction: R/W		
Default value: 0x0002		
Bit	NAME	FUNCTION
15:4		
3:0	BAUD[3:0]	Set the serial port baud rate: 0001(0x01) 4800bps 0010(0x02): 9600bps 0011(0x03): 19200bps 0100(0x04): 38400bps 0101(0x05): 57600bps 0110(0x06): 115200bps 0111 (0x07): 230400bps

Example:

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 04 00 06 45 88 (set the serial port baud rate to 115200)

Send: 50 06 00 00 00 00 84 4B (saved at 115200baud)

Return: 50 06 00 00 00 00 84 4B

IICADDR (device address)

Register Name: IICADDR

Register address: 26 (0x1A)

Read/write direction: R/W

Default value: 0x0050

Bit	NAME	FUNCTION
15:8		
7:0	IICADDR[7:0]	Set the device address, used for I2C and Modbus communication, use 0x01~0x7F

Example:

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 1A 00 02 24 4D (set the device address to 0x02)

Return: 50 06 00 1A 00 02 24 4D

Send: 02 06 00 00 00 00 89 F9 (save)

Return: 02 06 00 00 00 00 89 F9

YYMM~MS (on-chip time)

Register name: YYMM~MS

Register address: 48~51 (0x30~0x33)

Read/write direction: R/W

Default time: (2015, 1, 1, 00, 00, 59, 00)

Bit	NAME	FUNCTION
15:8	YYMM[15:8]	moon
7:0	YYMM[7:0]	Year
15:8	DDHH[15:8]	hour

7:0	DDHH[7:0]	day
15:8	MMSS[15:8]	Second
7:0	MMSS[7:0]	point
15:0	MS[15:0]	millisecond

Example:

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 30 03 16 05 7A (set year and month 22-03)

Return: 50 06 00 30 03 16 05 7A

Send: 50 06 00 31 09 0C D3 D1 (set date and time 12-09)

Return: 50 06 00 31 09 0C D3 D1

Send: 50 06 00 32 3A 1E B7 2C (set minutes and seconds to 30:58)

Return: 50 06 00 32 3A 1E B7 2C

Send: 50 06 00 33 01 F4 74 53 (set milliseconds to 500)

Return: 50 06 00 33 01 F4 74 53

Send: 50 06 00 00 00 00 84 4B (save)

Return: 50 06 00 00 00 00 84 4B

AX~AZ (acceleration)

Register name: AX~AZ

Register address: 52~54 (0x34~0x36)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	AX[15:0]	Acceleration X = $AX[15:0]/32768*16g$ (g is the acceleration due to gravity, which can be 9.8m/s ²)
15:0	AY[15:0]	Acceleration Y = $AY[15:0]/32768*16g$ (g is the acceleration due to gravity, which can be 9.8m/s ²)
15:0	AZ[15:0]	Acceleration Z = $AZ[15:0]/32768*16g$ (g is the acceleration due to gravity, which can be 9.8m/s ²)

Example:

Send: 50 03 00 34 00 03 49 84 (read three-axis acceleration)

Return: 50 03 06 AXH AXL AYH AYL AZH AZL CRCH CRCL

$AX[15:0] = ((\text{short})AXH \ll 8) | AXL;$

$AY[15:0] = ((\text{short})AYH \ll 8) | AYL;$

$AZ[15:0] = ((\text{short})AZH \ll 8) | AZL;$

GX~GZ (angular velocity)

Register name: GX~GZ

Register address: 55~57 (0x37~0x39)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	GX[15:0]	Angular velocity X = GX[15:0]/32768*2000°/s
15:0	GY[15:0]	Angular velocity Y = GY[15:0]/32768*2000°/s
15:0	GZ[15:0]	Angular velocity Z = GZ[15:0]/32768*2000°/s

Example:

Send: 50 03 00 37 00 03 B9 84 (read the three-axis angular velocity)

Return: 50 03 06 GXH GXL GYH GYL GZH GZL CRCH CRCL

GX[15:0]=((short)GXH <<8)|GXL;

GY[15:0]=((short)GYH <<8)|GYL;

GZ[15:0]=((short)GZH <<8)|GZL;

VX~VZ (vibration speed)

Register name: VX~VZ

Register address: 58~60 (0x3A~0x3C)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	VX[15:0]	Vibration speed VX (mm/S) = ((VXH << 8) VXL)
15:0	VY[15:0]	Vibration velocity VY (mm/S) = ((VYH << 8) VYL)
15:0	VZ[15:0]	Vibration velocity VZ (mm/S) = ((VZH << 8) VZL)

Example:

Send: 50 03 00 3A 00 03 28 47 (read the three-axis vibration speed)

Return: 50 03 06 VXH VXL VYH VYL VZH VZL CRCH CRCL

VX[15:0]=(((short)VXH <<8)|VXL);

VY[15:0]=(((short)VYH <<8)|VYL);

VZ[15:0]=(((short)VZH <<8)|VZL);

ADX~ADZ (vibration angle)

Register name: ADX~ADZ

Register address: 61~63 (0x3D~0x3F)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	ADX[15:0]	Vibration angle ADX($^{\circ}$)=((ADXH << 8) ADXL)/32768*180
15:0	ADY[15:0]	Vibration angle ADY($^{\circ}$)=((ADYH << 8) ADYL)/32768*180
15:0	ADZ[15:0]	Vibration angle ADZ($^{\circ}$)=((ADZH << 8) ADZL)/32768*180

Example:

Send: 50 03 00 3D 00 03 99 86 (read the three-axis vibration angle)

Return: 50 03 06 ADXH ADXL ADYH ADYL ADZH ADZL CRCH CRCL

$ADX[15:0]=(((\text{short})ADXH \ll 8)|ADXL)/32768*180;$

$ADY[15:0]=(((\text{short})ADYH \ll 8)|ADYL)/32768*180;$

$ADZ[15:0]=(((\text{short})ADZH \ll 8)|ADZL)/32768*180;$

TEMP(Temperature)

Register Name: TEMP

Register address: 64 (0x40)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	TEMP[15:0]	Temperature = TEMP[15:0]/100°C

Example:

Send: 50 03 00 40 00 01 88 5F (read chip temperature)

Return: 50 03 02 TEMPH TEMPL CRCH CRCL

TEMP[15:0]=(((short)TEMPH <<8)|TEMPL);

DX~DZ (vibration displacement)

Register name: DX~DZ

Register address: 65~67 (0x41~0x43)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
-----	------	----------

15:0	DX[15:0]	Vibration displacement DX(um)=((DXH << 8) DXL)
15:0	DY[15:0]	Vibration displacement DY(um)=((DYH << 8) DYL)
15:0	DZ[15:0]	Vibration displacement DZ(um)=((DZH << 8) DZL)

Example:

Send: 50 03 00 41 00 03 58 5E (read triaxial vibration displacement)

Return: 50 03 06 DXH DXL DYH DYL DZH DZL CRCH CRCL

$DX[15:0] = (((\text{short})DXH \ll 8) | DXL);$

$DY[15:0] = (((\text{short})DYH \ll 8) | DYL);$

$DZ[15:0] = (((\text{short})DZH \ll 8) | DZL);$

HZX ~ HZZ (vibration frequency)

Register name: HZX~HZZ

Register address: 68~70 (0x44~0x46)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
-----	------	----------

15:0	HZX[15:0]	Vibration frequency HZX(Hz)=((HZXH << 8) HZXL)
15:0	HZY[15:0]	Vibration frequency HZY(Hz)=((HZYH << 8) HZYL)
15:0	HZZ[15:0]	Vibration frequency HZZ(Hz)=((HZZH << 8) HZZL)

Example:

Send: 50 03 00 44 00 03 48 5F (read the three-axis vibration frequency)

Return: 50 03 06 HZXH HZXL HZYH HZYL HZZH HZZL CRCH CRCL

$HZX[15:0] = (((\text{short})HZXH \ll 8) | HZXL);$

$HZY[15:0] = (((\text{short})HZYH \ll 8) | HZYL);$

$HZZ[15:0] = (((\text{short})HZZH \ll 8) | HZZL);$

FDNFX ~ FDNFZ (High-speed mode vibration displacement)

Register name: FDNFX~FDNFZ

Register address: 71~73 (0x47~0x49)

Read/write direction: R

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	FDNFX[15:0]	High frequency vibration displacement FDNFX(um)=((FDNFXH << 8) FDNFXL)
15:0	FDNFY[15:0]	High frequency vibration displacement FDNFY(um)=((FDNFYH << 8) FDNFYL)
15:0	FDNFZ[15:0]	High frequency vibration displacement FDNFZ(um)=((FDNFZH << 8 FDNFZL)
Example: Send: 50 03 00 47 00 03 B8 5F (read three-axis high-frequency vibration displacement) Return: 50 03 06 FDNFXH FDNFXL FDNFYH FDNFYL FDNFZH FDNFZL CRCH CRCL FDNFX[15:0]=(((short)FDNFXH <<8) FDNFXL); FDNFY[15:0]=(((short)FDNFYH <<8) FDNFYL); FDNFZ[15:0]=(((short)FDNFZH <<8) FDNFZL);		

MODBOUSMODEL (High-speed mode)

Register Name: MODBOUSMODEL **Register**

address: 98 (0x62)

Read/write direction: R/W

Default value: 0x0000

Bit	NAME	FUNCTION
15:0	SAVE[15:0]	High-speed mode is 0x0001

Example:

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 62 00 01 E4 55 (high speed mode) Return (230400 Baud)

Note: After the transmission is completed, the high-speed mode is entered. This mode actively returns high-frequency dynamic displacement data. At this time, no instructions can be sent. The normal mode can be restored after power is cut off.

In high-speed mode, do not send setup and save commands to avoid incorrectly modifying the sensor configuration. If you want to exit high-speed mode, power on the sensor again.

CUTOFFFREQI, CUTOFFFREQF (cutoff frequency)

Register name: CUTOFFFREQI (integer 0~100)		
Register address: 99(0x63)		
Read/write direction: R/W		
Default value: 0x000A		
Bit	NAME	FUNCTION
15:2		
1:0	CUTOFFFREQI[1:0]	Cut-off frequency is used to filter out the interference of other clutter on the sensor, which can be set between 0.00~100.00Hz

Example: Set the cutoff frequency to 10.99 Hz

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 63 00 0A F4 52 (set the integer part of the cutoff frequency to 10)

Return: 50 06 00 63 00 0A F4 52

Send: 50 06 00 64 00 63 85 BD (set the decimal part of the cutoff frequency to 99)

Return: 50 06 00 64 00 63 85 BD

Send: 50 06 00 00 00 00 84 4B (save)

Return: 50 06 00 00 00 00 84 4B

The cutoff frequency setting requires the use of two registers, CUTOFFFREQI and CUTOFFFREQF.

Description of the decimal part of the cutoff frequency: set the decimal value x100 (set .99, the actual decimal part needs to be set to 99)

Register Name: CUTOFFFREQF (setting a decimal point of 0 to 99 is equivalent to setting it to 0.00 to 0.99)

Register address: 100(0x64)

Read/write direction: R/W

Default value: 0x000A

Bit	NAME	FUNCTION
-----	------	----------

15:2		
1:0	CUTOFFREQF[1:0]	Cut-off frequency is used to filter out the interference of other clutter on the sensor, which can be set between 0.00~100.00Hz

Example:

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 63 00 0A F4 52 (set the integer part of the cutoff frequency to 10)

Return: 50 06 00 63 00 0A F4 52

Send: 50 06 00 64 00 63 85 BD (set the decimal part of the cutoff frequency to 99)

Return: 50 06 00 64 00 63 85 BD

Send: 50 06 00 00 00 00 84 4B (save)

Return: 50 06 00 00 00 00 84 4B

The cutoff frequency setting requires the use of two registers, CUTOFFFREQI and CUTOFFFREQF.

Explanation of the decimal part of the cutoff frequency: multiply the set decimal value by 100 (set .99, the actual decimal part needs to be set to 99)

SAMPLEFREQ (*detection period*)

Register Name: SAMPLEFREQ

Register address: 101 (0x65)

Read/write direction: R/W

Default value: 0x0064

Bit	NAME	FUNCTION
15:2		
1:0	SAMPLEFREQ [1:0]	The detection cycle, its reciprocal is the amount of data output per second, can be set between 1~100Hz

Example:

Send: 50 06 00 69 B5 88 22 A1 (valid within 10 seconds after unlocking)

Return: 50 06 00 69 B5 88 22 A1

Send: 50 06 00 65 00 64 14 53 (set the detection cycle to 100Hz)

Return: 50 06 00 65 00 64 14 53

Send: 50 06 00 00 00 00 84 4B (save)

Return: 50 06 00 00 00 00 84 4B

7. FAQ

7.1. The return frequency is too low in normal mode

Cause: The baud rate is set too low

7.2. Too few data frames recorded in normal mode

Reason: In normal mode, the modbus communication protocol is a question-and-answer protocol. The higher the baud rate is, the higher the frequency of data reading.

7.3. Unable to exit in high-speed mode

Cause: The sensor is not powered off. Power off the sensor, then power it back on, and the sensor will automatically return to normal mode. At this time, you can use the PC Software to search for devices, or add devices yourself.

7.4. No data after power cycle

Reason 1: The baud rate of the PC Software is set incorrectly. Click Search Device

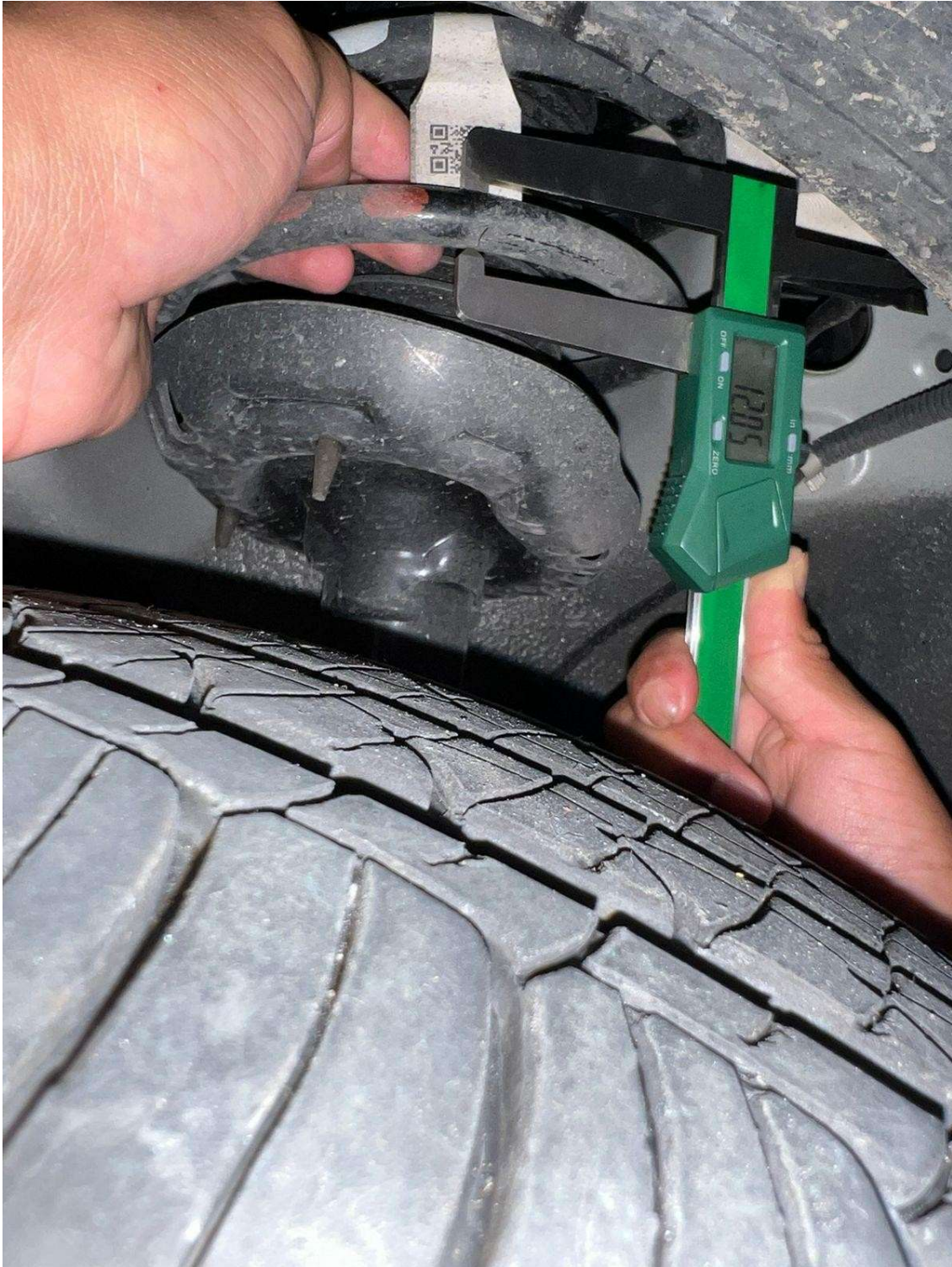
Reason 2: The serial port is lost. You can check whether the serial port exists. If the device cannot be found, you can re-plug the 3-in-1 or 6-in-1, refresh the computer, find the recognized COM port and reconnect it.

7.5. The PC Software cannot search for the device

Cause: The sensor address or baud rate may have been modified. Please be patient and the search process may take several minutes.

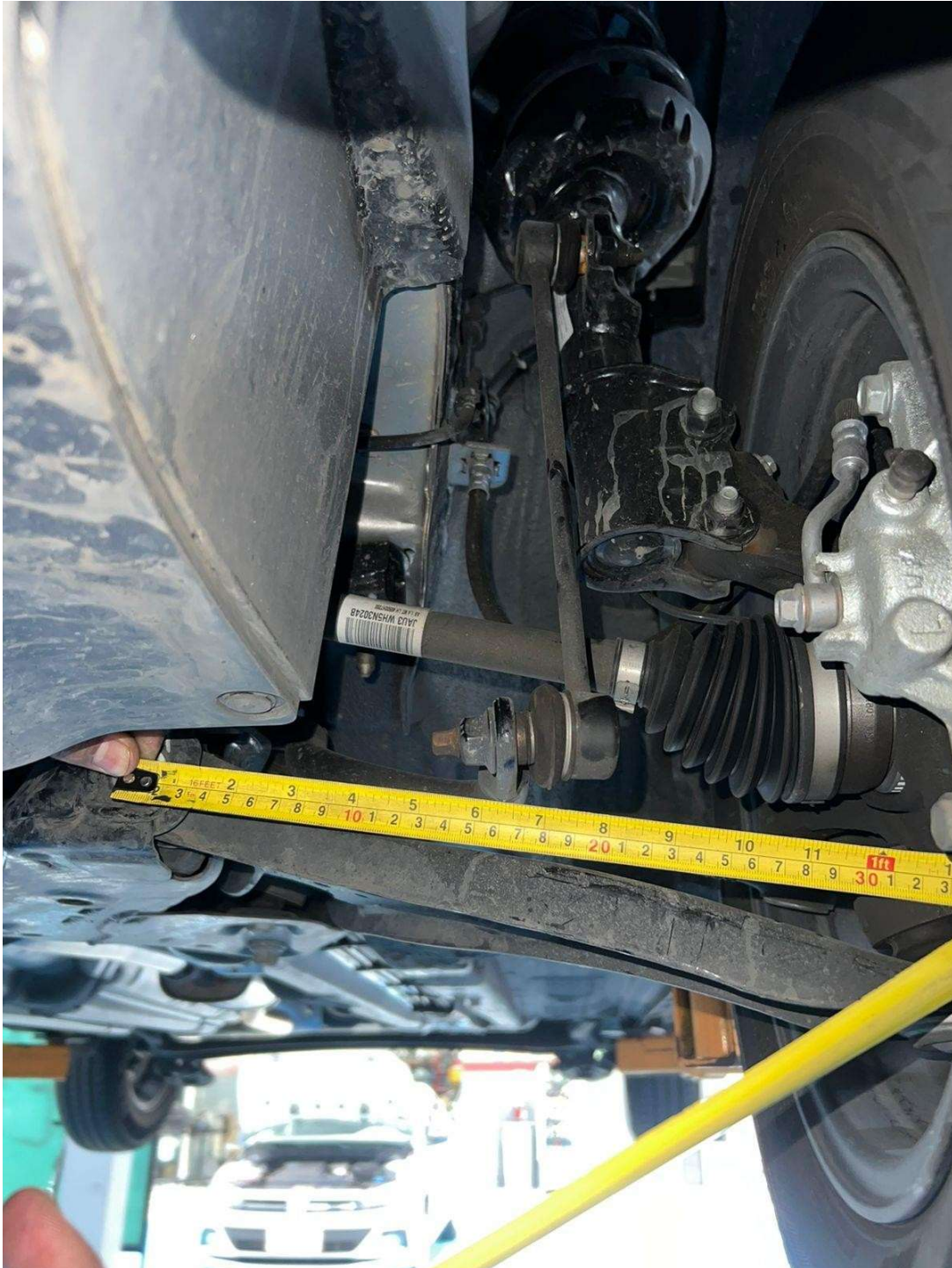
Anexo 2

Toma de medidas de la suspensión del vehículo Kia soluto mediante el uso de un calibrador pie de rey.



Anexo 3

Medición de distancias D1 y D2 para el cálculo del Motion Ratio, mediante el uso de un flexómetro.



Medición de las distancias de la mesa de suspensión del vehículo.

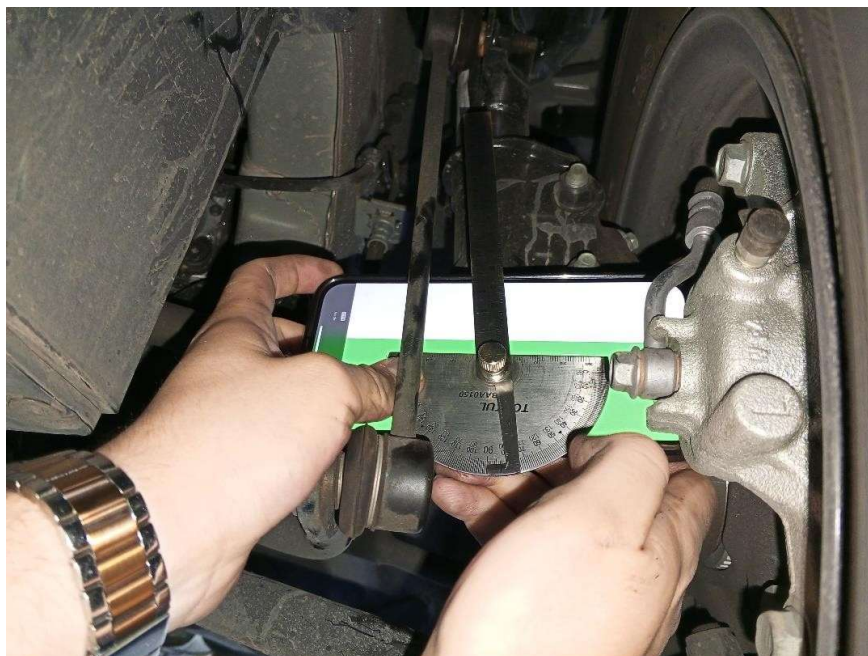


Anexo 4

Toma de medida de ángulo de inclinación del amortiguador utilizando un medidor transportador de ángulos TOPTUL.



Angulo de inclinación con un valor de 8 grados para el amortiguador.



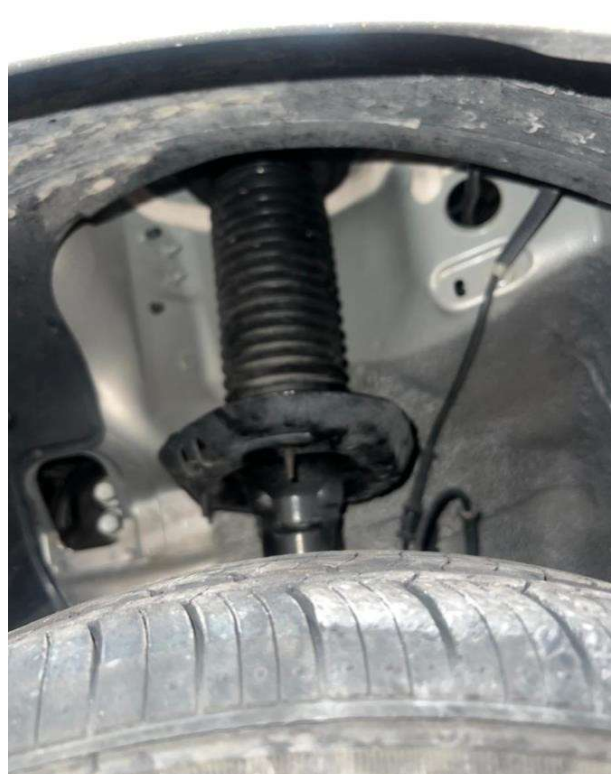
Anexo 5

Medición del peso suspendido del conjunto de suspensión delantero del vehículo con su proceso respectivo.

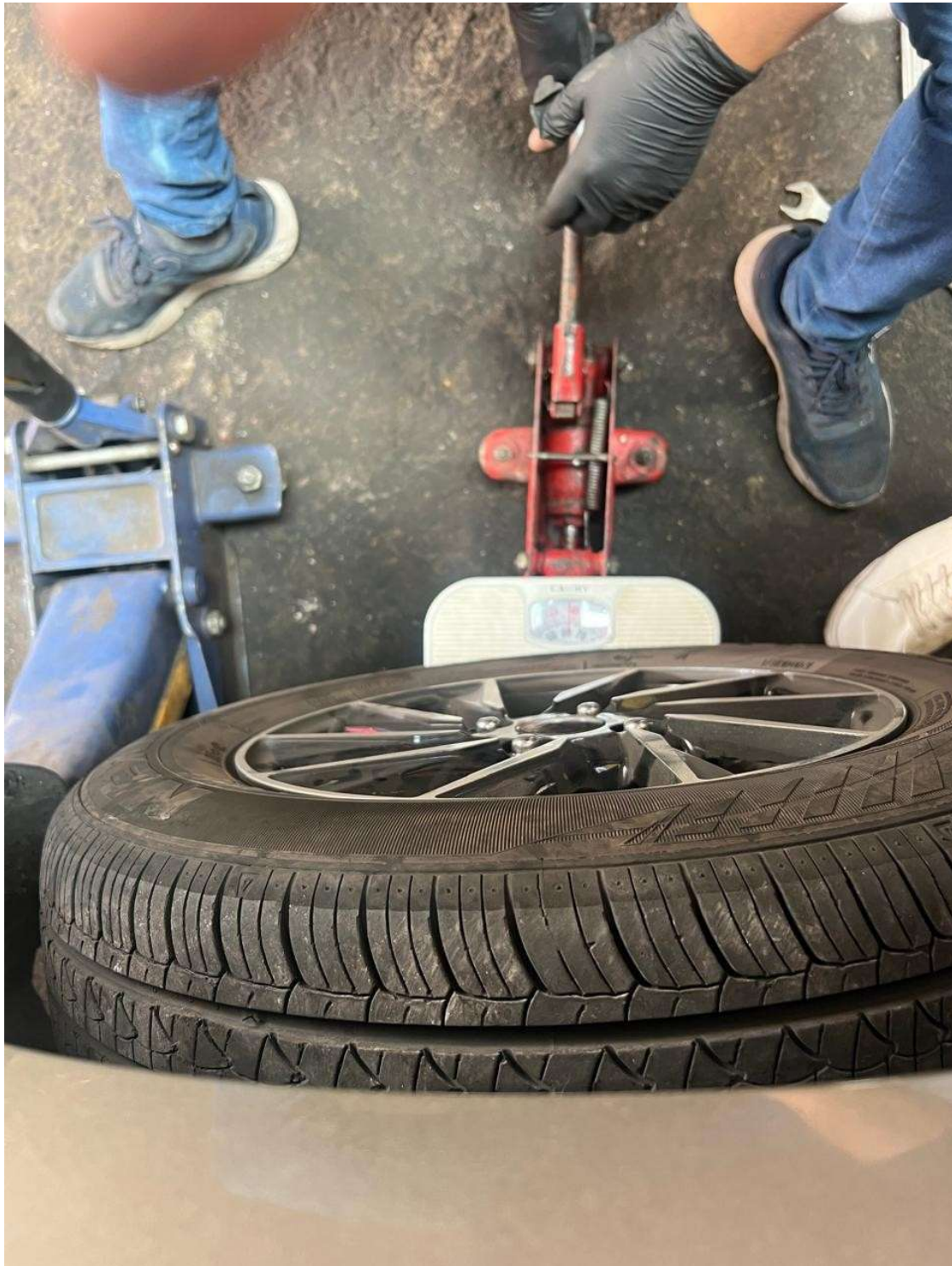
Desmontaje del muelle de suspensión



Montaje del amortiguador de suspensión y todos los componentes a excepción del resorte para conocer el peso suspendido.



Con una balanza debajo de la rueda se coloca una balanza y levemente se asienta el peso de los componentes que están bajo el amortiguador, teniendo en cuenta que la carrocería se asienta en un apoyo para evitar el peso de la carrocería y demás elementos que no se involucran para el cálculo.



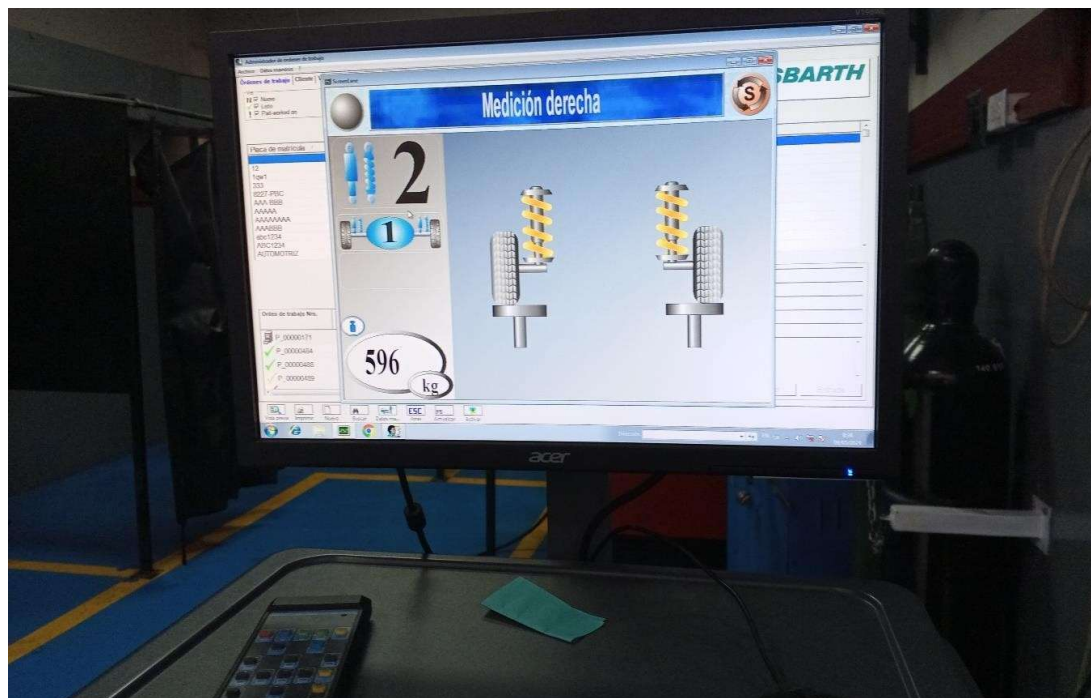
La balanza muestra un valor de 55 kg para el cálculo matemático como el peso suspendido.



Anexo 6

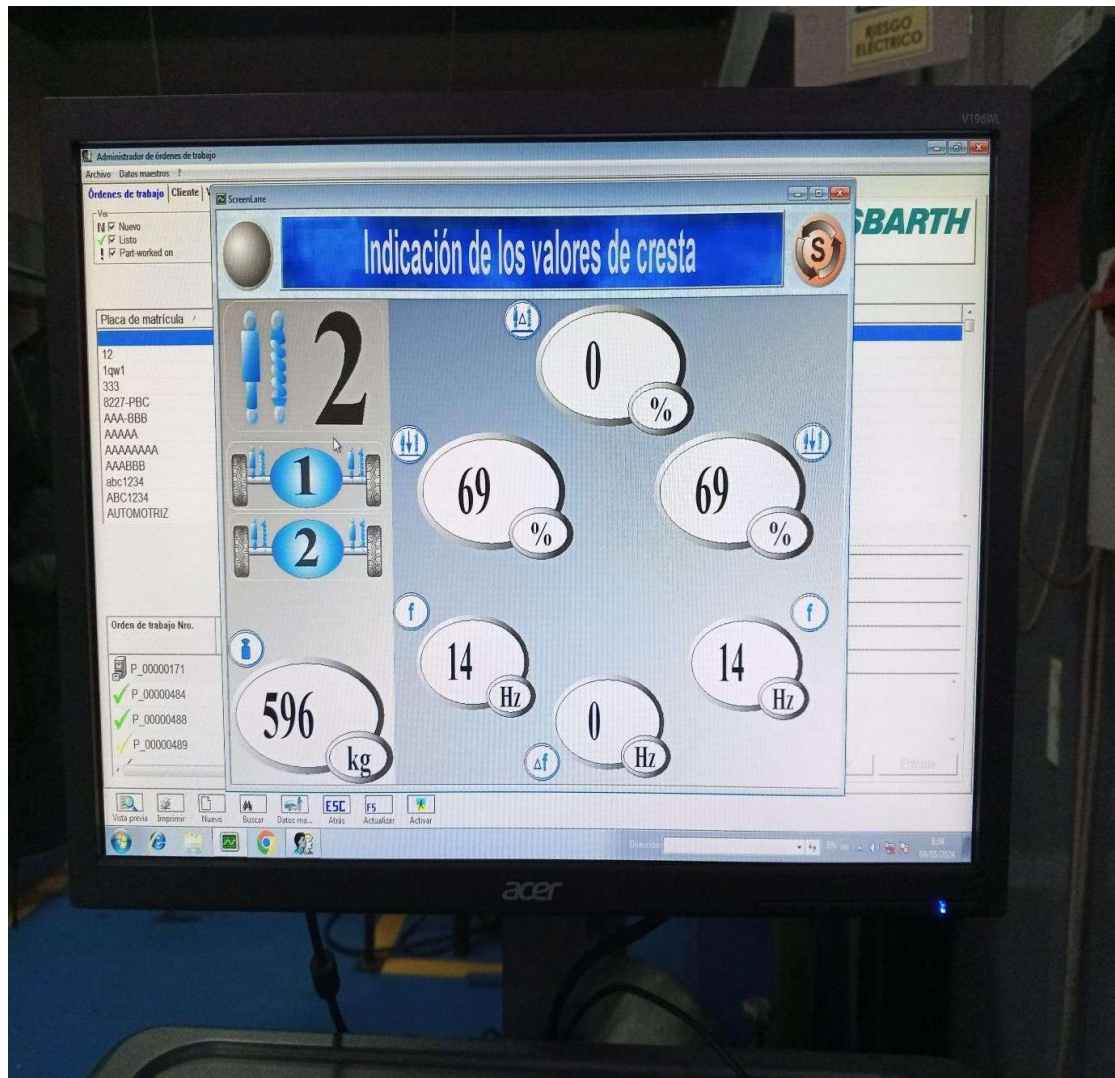
Medición de los pesos generales del vehículo mediante el probador de suspensión

BEISSBARTH MESSBAR BESSER



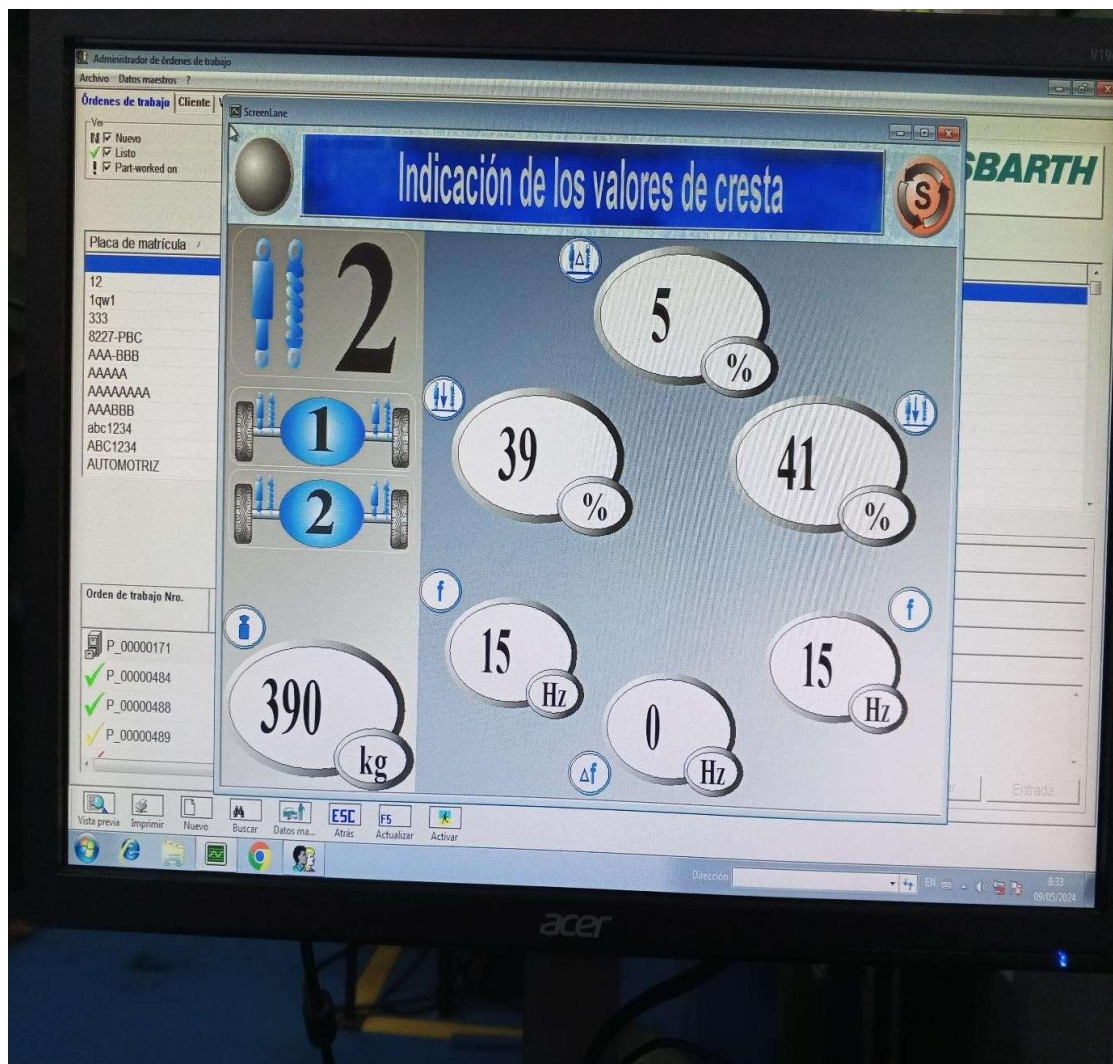
Anexo 7

Peso total del eje delantero del vehículo con un valor de 596 kg.



Anexo 8

Medición de peso del eje posterior del vehículo con un valor de 390 kg.

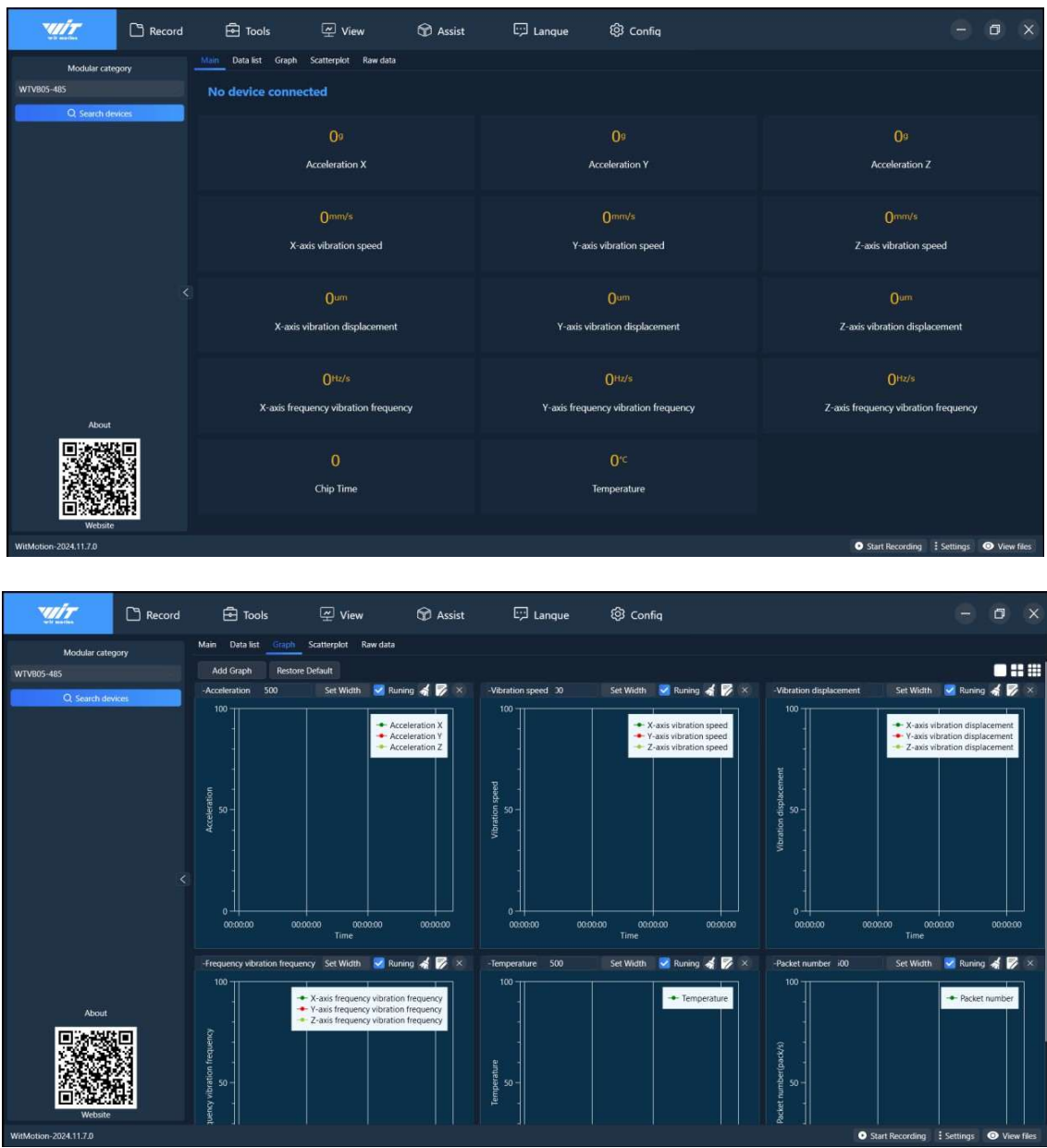


Anexo 9

Sensor acelerómetro WIT MOTION de grado industrial modelo WTVB01-485.

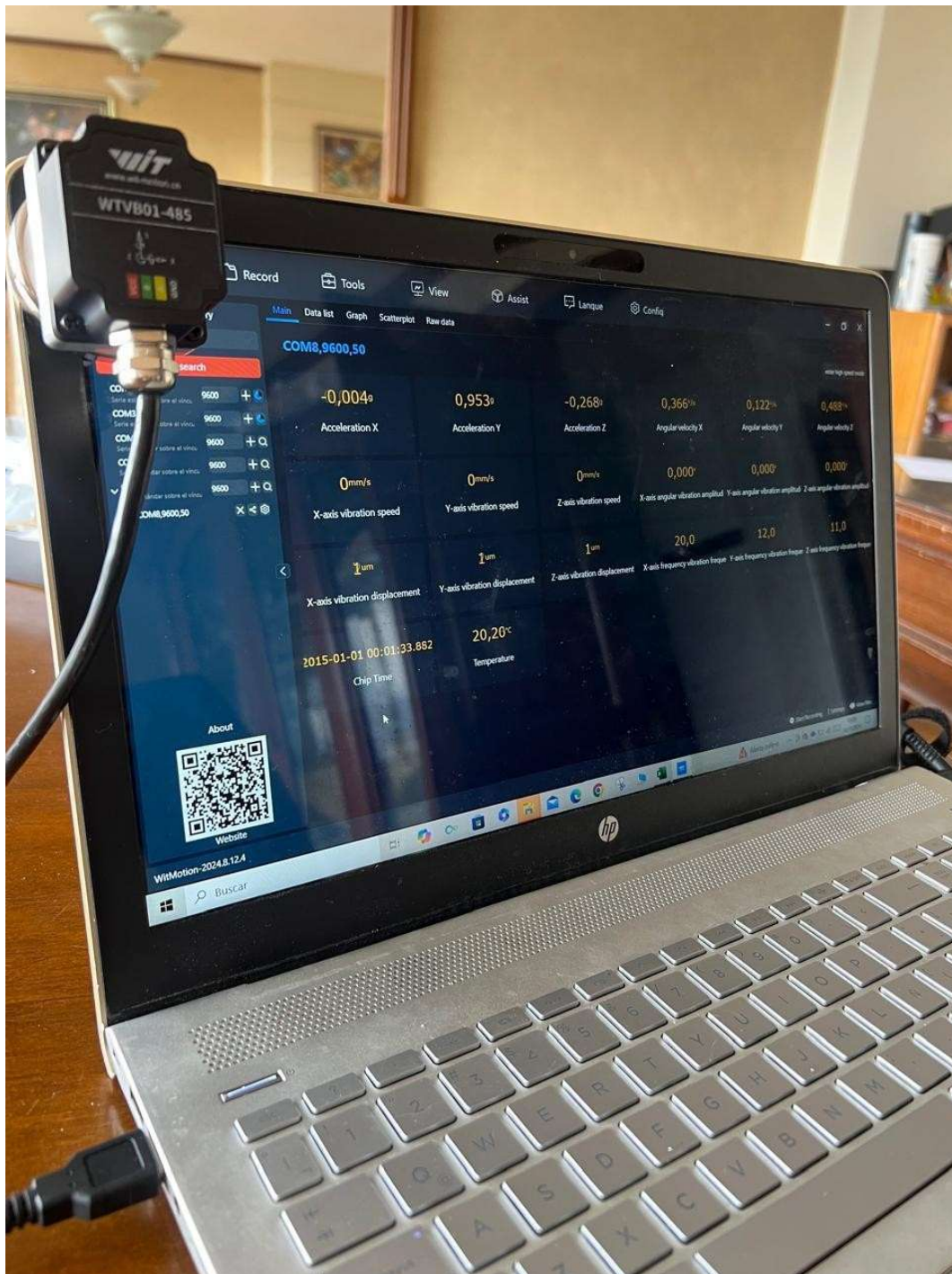


Software para PC Wit Motion 2024.

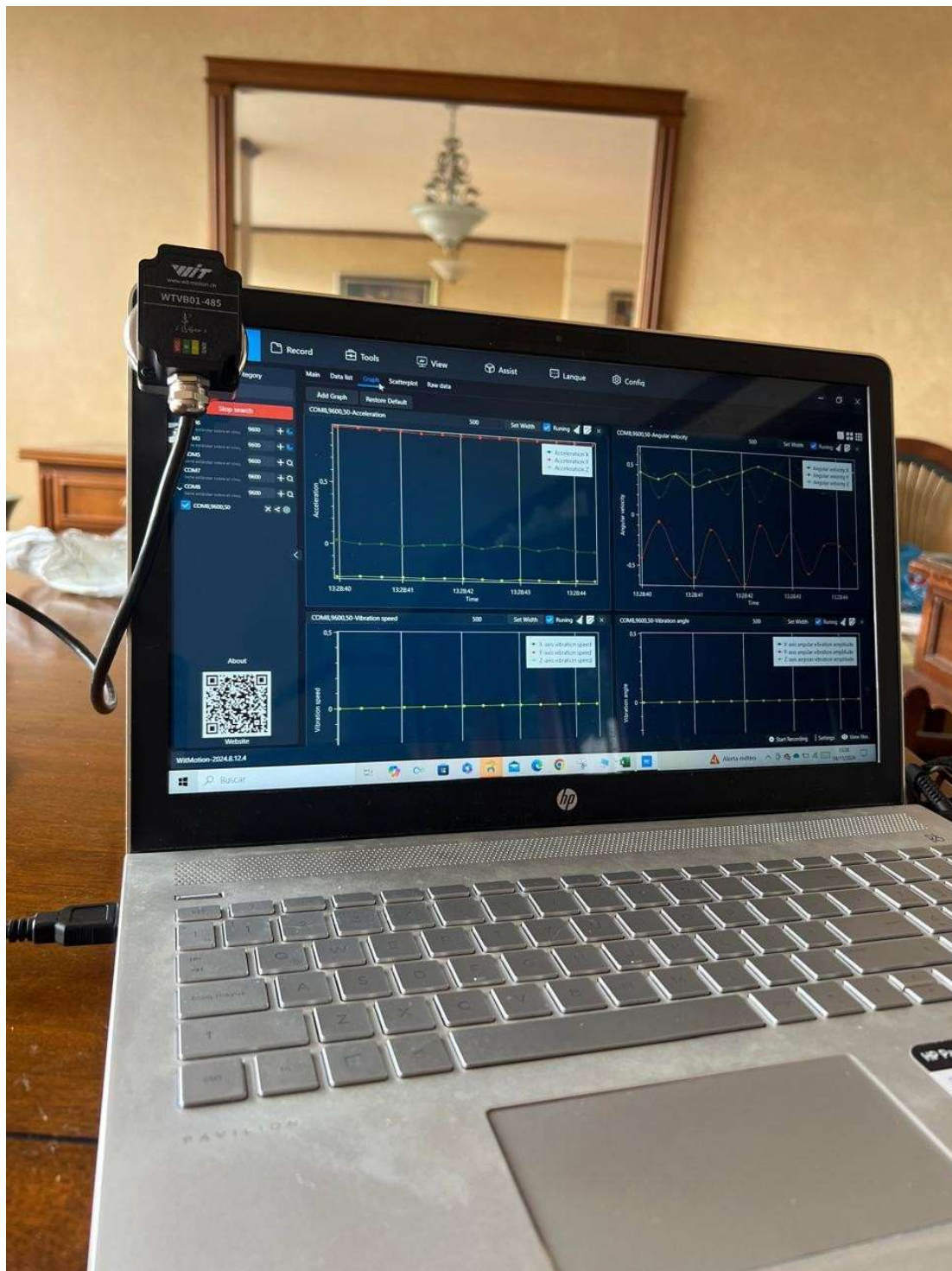


Anexo 10

Emparejamiento del sensor con el software en el computador

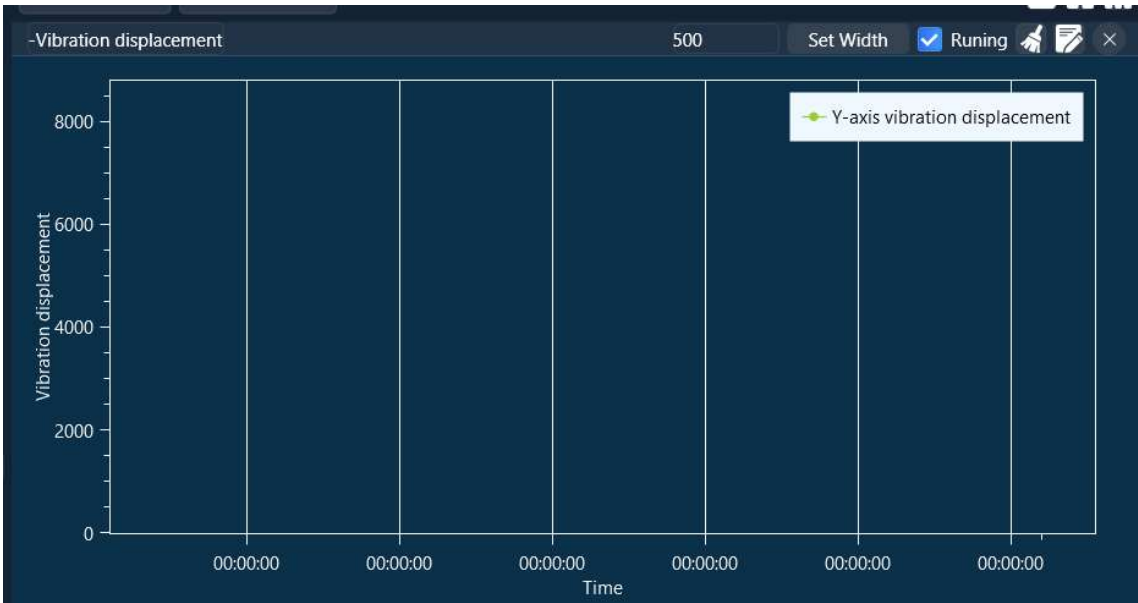


Pruebas del sensor para establecer parámetros necesarios durante la práctica de prueba de ruta.

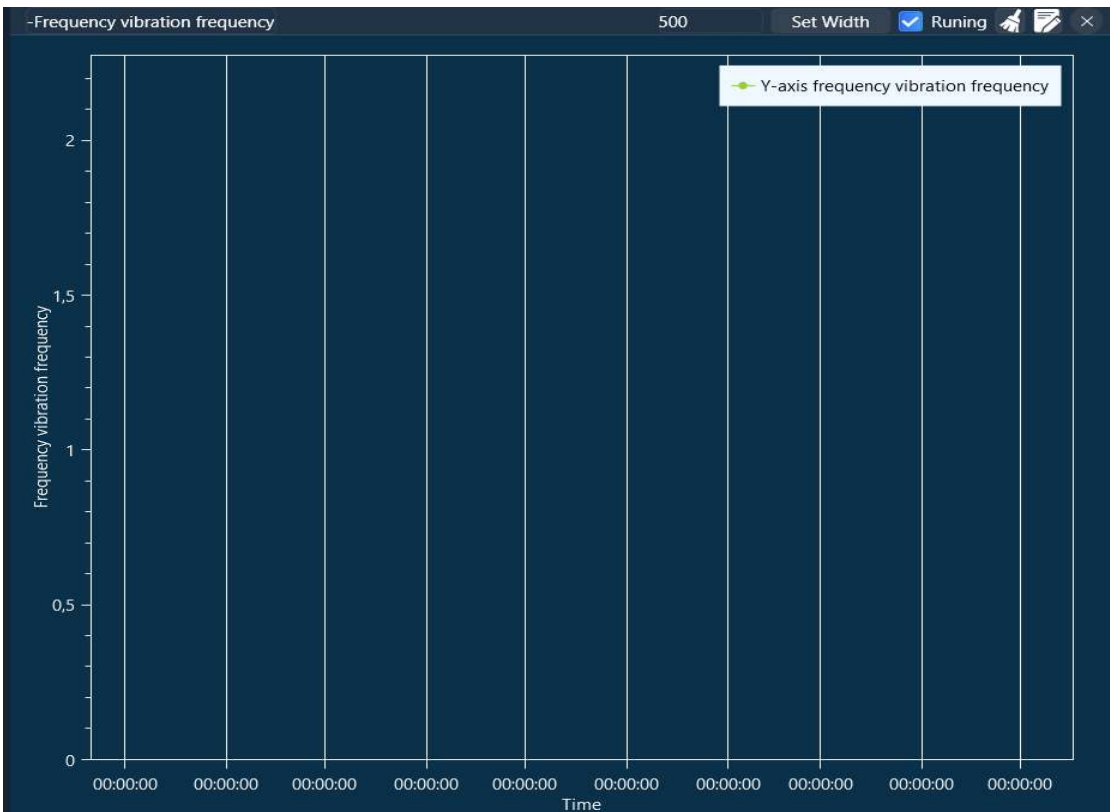


Anexo 11

Parámetros establecidos en el software para medición de datos en tiempo real con graficas del desplazamiento en el eje “Y”



Frecuencia natural de trabajo en el eje “Y”

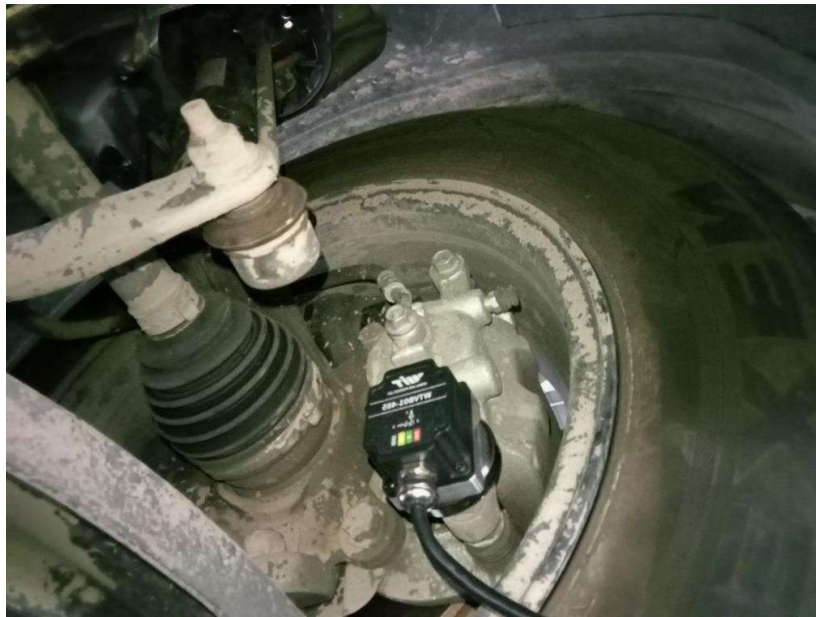


Anexo 12

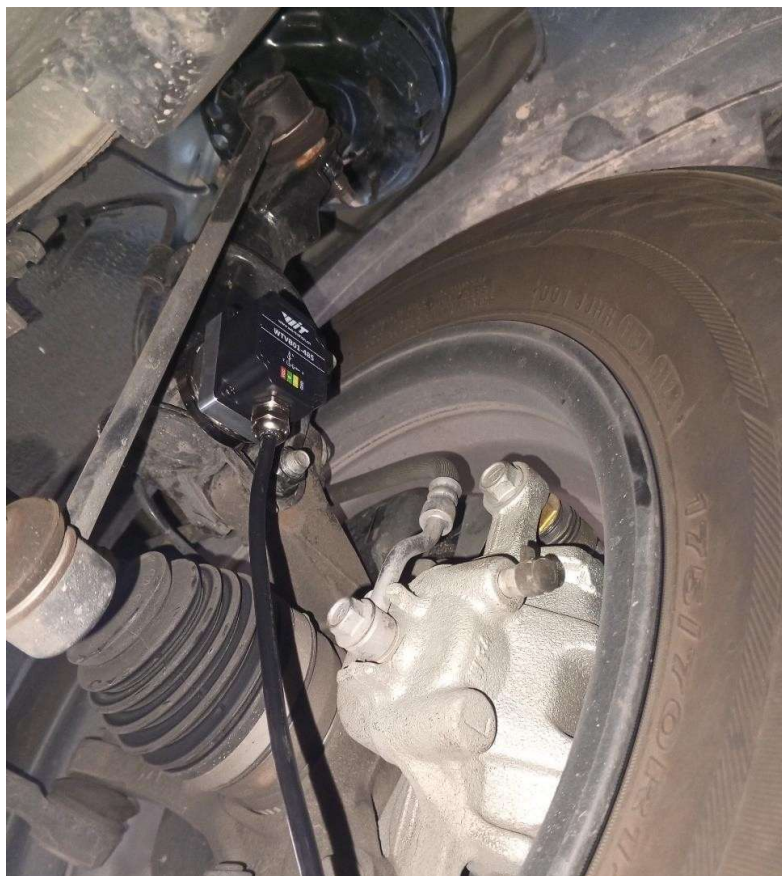
Calibración del sensor montado en el vehículo, para referenciar los puntos y valores necesarios en el monitoreo de datos en tiempo real.



Posicionamiento del sensor en el conjunto de mordaza.



Posicionamiento del sensor en la base del amortiguador.



Anexo 13

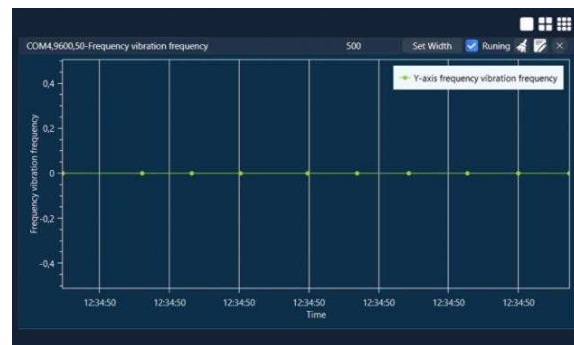
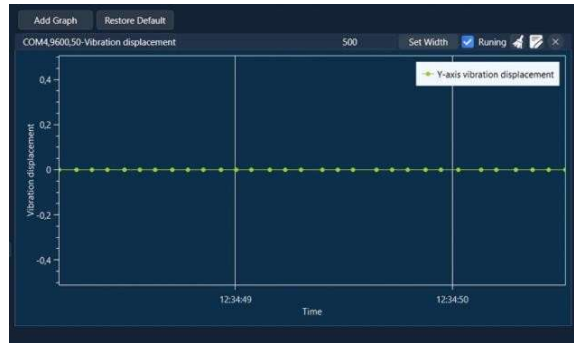
Ubicación del sensor acelerómetro para la toma de medidas en la base del amortiguador.



Anexo 14

Calibración del sensor en el software WIT MOTION. Previo a dar comienzo a la prueba de ruta.

Las gráficas apropiadas son las que muestran datos en el desplazamiento de la suspensión y la frecuencia de resonancia natural de la suspensión calibradas a 0 en cada una



Primeros datos en tiempo real obtenidos en respuesta de la suspensión durante los primeros segundos de prueba estipulada.



Datos intermedios obtenidos en tiempo real, mostrando los puntos más altos de referencia correspondientes a 7.8 mm y 1.8 Hz en desplazamiento y frecuencia de trabajo, consecuente de las irregularidades de la carretera



Tiempo final de prueba considerando que al detener el vehículo los valores tanto para el desplazamiento y la frecuencia descienden con certeza.

