



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Diseño de plataforma y programación para el cálculo de los ángulos de alineación de dirección y balanceo de neumáticos en vehículos

Joan Esteban Torres González



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Platform design and programming for the calculation of steering alignment and tire balancing angles in vehicles.

Joan Esteban Torres González

Universidad Nacional de Colombia
Faculty of Engineering and Architecture, Department of Electrical-Electronics and Computing
Manizales, Colombia
2023

Diseño de plataforma y programación para el cálculo de los ángulos de alineación de dirección y balanceo de neumáticos en vehículos

Joan Esteban Torres González

Tesis o trabajo de grado presentada(o) como requisito parcial para optar al título de:
Magíster en Ingeniería - Automatización Industrial

Director:
Ph.D Juan Bernardo Gómez Mendoza

Línea de Investigación:
Sistemas de control, robótica y automatización

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Eléctrica-Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
2023

Agradecimientos

Mi más sincero agradecimiento a mi asesor, el Dr. Juan Bernardo Gómez Mendoza, por su invaluable orientación y apoyo a lo largo de mi programa de maestría. Su experiencia y pedagogía me ayudaron a completar esta investigación y escribir esta tesis.

Agradezco a la Universidad Nacional de Colombia, la Universidad de Caldas y el Centro de Ciencias Francisco José de Caldas por brindarme la oportunidad de realizar mi investigación en sus instalaciones y por todos los recursos y el apoyo que brindaron. Me gustaría extender un agradecimiento especial a la empresa y taller mecánico Energiteca y a la Administradora Mónica Andrea Jurado, quien hizo todo lo posible para autorizar el uso del espacio.

Finalmente, me gustaría agradecer a mi familia y amigos por su amor y apoyo a lo largo de este viaje.

Lista de Figuras

1.1	<i>Dispositivo de alineación y balanceo de vehículos. [38]</i>	5
1.2	<i>Ejemplos de desgaste y ángulos de alineación de los neumáticos. [3]</i>	7
2.1	<i>Fuerzas actuantes de la llanta. [22]</i>	10
2.2	<i>Representación del ángulo de Camber de un neumático en vista frontal.</i>	10
2.3	<i>Representación del ángulo de Toe de un neumático en vista superior del vehículo.</i>	11
2.4	<i>Representación del ángulo de Caster de un neumático en vista lateral.</i>	12
2.5	<i>Integrado MPU6050, se integran Acelerómetro y Giroscopio con sus ejes de referencia. [37]</i>	14
2.6	<i>Módulo de Magnetómetro HMC5883L,</i>	15
2.7	<i>Vistas utilizadas usando el método de inspección del ángulo del Camber</i>	18
2.8	<i>Diagrama de flujo del filtro complementario usando acelerómetro y giroscopio.</i>	22
2.9	<i>Diagrama del cálculo del Camber en un neumático [14].</i>	23
2.10	<i>Calibración del eje Z con el sensor del giroscopio. [16]</i>	27
2.11	<i>Representación del ángulo de acimut. [29]</i>	29
3.1	<i>Representación de un dispositivo móvil para usar el acelerómetro y el giroscopio en las tres coordenadas. [24]</i>	32
3.2	<i>Acople de los engranajes de movimiento en el mecanismo principal del tornamesas.</i>	35
4.1	<i>Ejemplo de la aplicación móvil del acelerómetro con su telemetría.</i>	37
4.2	<i>Gráfica de la muestra de datos del acelerómetro en Colab.</i>	38
4.3	<i>Gráfica de las líneas esperadas, óptimas y promedio de los datos del acelerómetro.</i>	40
4.4	<i>Gráficas de los diferentes filtros complementarios aplicados al ángulo de Toe y su señal sin filtrar en escala logarítmica.</i>	41
4.5	<i>Representación de la medición del giroscopio en un neumático girando de manera constante en Python.</i>	42
4.6	<i>Gráfica de la Dirección parcial en el eje Z del giroscopio en Python</i>	42
4.7	<i>Gráficas de los ejes y el promedio del ángulo con respecto al tiempo del eje Z (guiñada) en Python.</i>	43

4.8	<i>Gráficas de los diferentes filtros aplicados al las primeras pruebas del ángulo de Caster y su señal sin filtrar.</i>	45
4.9	<i>Demostración de la deriva en el eje Z en Arduino usando el módulo MPU6050.</i>	46
4.10	<i>Gráficas de las primeras pruebas de la fusión sensorial entre los módulos de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro para el cálculo de los ángulos del Camber y Toe del neumático</i>	47
4.11	<i>Diseño de Tornamesas y prototipo acoplado</i>	48
4.12	<i>Montaje del prototipo de Prueba 1 (Kia Picanto (2015)).</i>	51
4.13	<i>Montaje del prototipo de Prueba 2 (Renault Sandero (2018)).</i>	52
4.14	<i>Montaje del prototipo de Prueba 3 (Volkswagen Gol (2017)).</i>	53
5.1	<i>Diagrama de cuerpo libre de la plataforma Stewart [17]</i>	55
5.2	<i>Diseño de la base superior</i>	57
5.3	<i>Diseño de la base inferior y distancia de servomotores</i>	57
5.4	<i>Diseño de la plataforma Stewart 6DOF con el neumático y el módulo en Fusión 360</i>	58

Contenido

Agradecimientos	5
Lista de símbolos	1
1 Introducción	5
1.1 Alineadores de dirección y balanceo	5
1.2 Efectos de cambios en las alineaciones de neumáticos	6
1.3 Desarrollo del Sistema	6
2 Marco Teórico	9
2.1 Mecánica de funcionamiento	9
2.2 Ángulo de Camber (Caída)	9
2.3 Ángulo de Toe (Convergencia)	11
2.4 Ángulo de Caster (Avance)	11
2.5 Alineación Clásica	12
2.6 IMU (Unidad de Medida Inercial)	13
2.7 Acelerómetro	13
2.8 Giroscopio	14
2.9 Magnetómetro	15
2.10 Fusión Sensorial (Sensor Fusion)	16
2.11 Modelos matemáticos de los ángulos	16
2.11.1 Coordenadas del Ángulo de Camber	16
2.11.2 Coordenadas del Ángulo de Toe	24
2.11.3 Coordenadas del Ángulo de Caster	28
3 Alineación de los neumáticos utilizando Mediciones Inerciales	31
3.1 Prueba de concepto utilizando dispositivos móviles	31
3.2 Verificación numérica de los ángulos de Camber, Toe y Caster	33
3.3 Validación de los resultados utilizando Arduino y un tornamesas	34
4 Resultados	37
4.1 Verificación del Ángulo de Camber	37
4.2 Verificación del Ángulo de Toe	41
4.3 Verificación del Ángulo de Caster	44
4.4 Corrección de las desviaciones del eje Z en cálculo del Toe	45
4.5 Corrección del Ángulo de Caster	47
4.6 Validaciones Finales	48
4.7 Comparación Alineador-Prototipo	49

5	Propuesta de diseño: Plataforma de Movimiento Stewart 6DOF	54
5.1	Diseño	56
6	Conclusiones y Recomendaciones	59
6.1	Conclusiones	59
6.2	Recomendaciones	60

Tabla de Simbolos

Índices

Símbolo	Término
X	Eje de dirección X
Y	Eje de dirección Y
Z	Eje de dirección Z
λ	Coefficiente de Lagrange
α	Ángulo de guiñada
β	Ángulo de balanceo
γ	Ángulo de cabeceo
R	Radio de la rueda
m	Masa del vehículo
g	Aceleración gravitacional
\vec{I}	Vector unitario X
\vec{J}	Vector unitario Y
\vec{K}	Vector unitario Z
A	Acelerómetro
D	Diámetro
J	Índice de rendimiento
G	Giroscopio
K	Filtro complementario
k	Índice de calibración
M	Magnetómetro
N	Número total de datos
C	Ángulo de Camber
S	Coordenada del sensor
V	Coordenada del vehículo
T	Ángulo de Toe

Resumen

Los alineadores de dirección y balanceo son uno de los dispositivos más usados en la industria automotriz para prevenir, corregir y mejorar la estabilidad del vehículo. Los automóviles modernos generalmente tienen alineaciones tanto para las ruedas delanteras como para las ruedas traseras y consisten en tres mediciones: Dedo del pie (Toe), Camber y Caster. Estas alineaciones de las ruedas cambiarán gradualmente durante el uso, por lo que podrían causar problemas si no se realiza una alineación adecuada y al momento justo. Entre los principales problemas se tienen la inconsistencia del balanceo en la rueda delantera durante la marcha, vibración del volante, disminución de la estabilidad direccional, desgaste rápido de los neumáticos, etc. El desgaste de los neumáticos es parte de los factores de costo de transporte global que deben tenerse en cuenta en los cálculos económicos, también tiene un impacto en el consumo de energía y el medio ambiente. Por lo tanto, debe llevarse a cabo un examen y ajuste de las alineaciones de las ruedas para restaurar la marcha del vehículo.

Se construye un mecanismo mecatrónico compacto con el fin de simplificar los procesos de alineación actuales utilizando métodos de mensuración recurrentes, comprendiendo los comportamientos físicos y matemáticos de dichas variables y la programación del software del instrumento para el desarrollo de la tarea. El proyecto relaciona el análisis y validación de dispositivos con tecnología de muestreo como las unidades de medición inercial o IMU, de las cuales se incorporan los acelerómetros, giroscopios y magnetómetros para capturar información suficiente y precisa para calcular los ángulos correspondientes y llevar a cabo el proceso de alineación y balanceo de los automóviles.

Se diseñó un prototipo con un tornamesas para las primeras pruebas de calibración con el IMU en uno de los ejes, luego se creó el algoritmo de programación en Arduino para capturar las medidas y realizar los cálculos requeridos de los ángulos correspondientes y por último, se hizo las pruebas de campo con un alineador de luz estructurada con el objetivo de comparar los resultados y demostrar la veracidad del dispositivo. En la parte final, se realiza un boceto de una plataforma Stewart de 6 grados de libertad para comprobaciones y pruebas futuras del proyecto

Palabras Clave

Acelerómetro, Alineación, Ángulo, Plataforma, Programación, Filtro, Fusión sensorial, Neumático, Fuerza, Medición inercial

Abstract

The vehicle wheel aligners are amongst the most used devices in the automotive industry to prevent, correct and improve vehicle stability. Modern cars generally have alignments for both the front and rear wheels and consist of three measurements: Toe, Camber, and Caster. These wheel alignments will gradually change during use and could cause problems if not properly timed and aligned, such as inconsistent front wheel rocking while driving, steering

wheel vibration, decreased directional stability, rapid tire wear, etc. Tire wear is part of the global transportation cost factors that must be taken into account in economic calculations, it also has an impact on energy consumption and the environment. Therefore, an examination and adjustment of the wheel alignments must be carried out to restore the vehicle's drive.

It is intended to build a compact device in order to simplify the current alignment process using recurrent measurement methods, understanding the physical and mathematical behaviors of those variables and the programming of the instrument software for the development of the task. The project relates to the analysis and validation of devices with sampling technology such as inertial measurement units or IMUs, of which accelerometers, gyroscopes and magnetometers are incorporated to capture sufficient and precise information to calculate the corresponding angles and carry out the process of alignment and balancing in the automobiles.

A prototype with a turntable was designed for the first calibration tests with the IMU in one of the axes, then the programming algorithm was created in Arduino to capture the measurements and perform the required calculations of the corresponding angles. Furthermore, field tests were conducted with a structured light aligner in order to compare the results and demonstrate the veracity of the device. In the final part, it is aspired to build a Stewart platform with 6 degrees of freedom for future checks and tests of the project.

Keywords

Accelerometer, Alignment, Angle, Platform, Programming, Filter, Sensory Fusion, Pneumatic, Force, Inertial Measurement

1 Introducción

1.1. Alineadores de dirección y balanceo

Actualmente, muchos de los talleres mecánicos cuentan con sistemas manuales de alineación que incorporan elevadores de vehículos y escaneo tridimensional. Sin embargo, el proceso manual de alineación, así como también otros procesos como pruebas de velocidad y cambio de componentes por medio de un software de bases de datos, toman tiempo y energía por parte de los mecánicos [35].

Uno de los principales problemas relacionados con la inspección es medir la posición de las ruedas con la mayor precisión y rapidez posible. En el pasado, era difícil lograr esto con sensores mecánicos o electrónicos, aun teniendo a la par nuevas tecnologías de medición



Figura 1.1: *Dispositivo de alineación y balanceo de vehículos.* [38]

La figura 1.1 indica un sistema de alineación y balanceo por medio de luz estructurada y adquisición de imagen 3D, lo que permite obtener la imagen deseada por medio de una o varias cámaras y un proyector. Las cámaras emiten señales infrarrojas a unas placas colocadas en las llantas del automóvil para realizar distintas funciones como el cálculo de los ángulos de Camber, Caster y Toe, además de leer por medio del escaneo 3D el posicionamiento del

vehículo en función de la geometría proyectada. [8]

Debido a esto, las cámaras de este tipo de funciones resultan ser muy dispendiosos porque son cámaras de gama alta fabricados con precisión (imágenes bidimensionales) para medir información de dimensiones superiores (orientación tridimensional) de la postura de la rueda.

Adicionalmente, se ha generado gastos excesivos para la adquisición completa de los alineadores, además de tener en cuenta posibles cuentas por reparación, reemplazo y mantenimiento de los elementos que no solamente incluyen las cámaras.

La falla en la alineación de las ruedas es uno de los problemas más comunes. Provoca abrasión en los neumáticos, balanceo de las ruedas delanteras y deslizamiento lateral, que influyen en el control de la estabilidad y la seguridad de conducción del automóvil. La detección es el elemento de prueba más importante de las pruebas de seguridad del automóvil, la alineación de ruedas integra todos los factores de geometría de la dirección y la suspensión para proporcionar un manejo seguro, buena calidad de conducción y una máxima vida útil de los neumáticos. Los Alineadores 3D detectan los parámetros de posicionamiento, incluidos la convergencia de las ruedas, la inclinación, el avance y el eje de dirección. inclinación basada en el establecimiento del modelo geométrico de la rueda y tecnologías de sensor, láser y procesamiento de imágenes [36].

1.2. Efectos de cambios en las alineaciones de neumáticos

El proceso de desgaste de los neumáticos es muy complejo. El desgaste de los neumáticos puede deberse a varios factores. Algunos de estos incluyen inflado incorrecto (el desgaste del borde exterior equivale a baja presión de los neumáticos), problemas de alineación, exceso de carga y amortiguadores o puntales desgastados. En la investigación convencional, el desgaste de los neumáticos se estima mediante experimentos. De lo contrario, el desgaste del neumático se predice mediante la vibración del neumático y el análisis modal. [4]

La figura 1.2 muestra la causa y efecto de la alineación manual de ruedas con la ayuda de un puntero mecánico, un manómetro mide la distancia entre las líneas centrales de los neumáticos delanteros o traseros. Del diagrama se puede llegar a la conclusión de que un ajuste incorrecto de la convergencia puede conducir a una alineación incorrecta de las ruedas y, por lo tanto, a un desgaste más rápido de los neumáticos.

1.3. Desarrollo del Sistema

Se desarrolló un sistema de alineación y balanceo de neumáticos de vehículos utilizando Unidades de medición inercial (IMUs) como los acelerómetros, giroscopios y magnetómetros, así como el análisis numérico de estas unidades para comprender su funcionamiento y uso

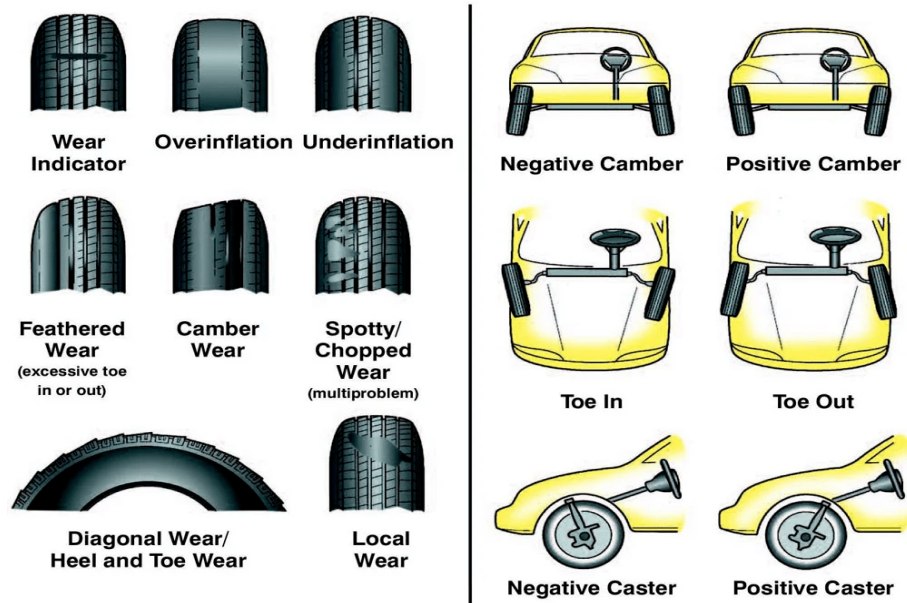


Figura 1.2: *Ejemplos de desgaste y ángulos de alineación de los neumáticos.* [3]

adecuado en el procedimiento. Entre ellas se encuentran el manejo de ecuaciones de optimización como el coeficiente de Lagrange, el filtro complementario para la disminución de alteraciones de muestras y el ángulo de Azimuth. Luego, se llevaron a cabo simulaciones en Python para cada uno de estos métodos, evaluándolos en diversos ángulos de alineación con el propósito de verificar los resultados. Posteriormente, se implementaron estas mismas técnicas en Arduino con el objetivo de realizar pruebas físicas utilizando los integrados de los IMUs y realizar las primeras pruebas de calibración de los instrumentos. Seguidamente, se creó un prototipo con la programación de Arduino y los IMUs incorporados para realizar ensayos en campo de forma paralela con un alineador de dirección 3D y hacer comparación de los resultados obtenidos. Finalmente, se diseñó una plataforma 6DOF para pruebas futuras del prototipo en caso de que no se tenga como opción los elevadores de vehículos para ejecutar las muestras de la alineación.

Para lograrlo, se realizó en las siguientes etapas:

1. **Modelo matemático de los ángulos:** El modelo matemático de los ángulos es el primer paso para desarrollar un sistema de alineación y balanceo de neumáticos utilizando las IMUs. Este modelo debe describir la relación entre las señales de los sensores IMU y los ángulos de las llantas. En cada ángulo se utiliza un modelo diferente debido a que se calcula el ángulo de dirección con respecto a su relación de los ejes como la vista lateral del Camber o la vista superior del Toe, además, se utilizan diferentes ecuaciones por los diferentes instrumentos: en el Camber se utiliza el acelerómetro y giroscopio, en el Toe se utiliza solo el magnetómetro y el Caster se usa la combinación del Camber y Toe.
2. **Verificación Numérica de los ángulos utilizando programación:** Una vez que

se ha formulado el modelo matemático, resulta imperativo someterlo a una verificación numérica. Este proceso se hace mediante programación, utilizando tanto Python como Arduino para la realización de las simulaciones. Dichas simulaciones sirven para generar conjuntos de datos que se emplean como entrada para el modelo matemático. Estos datos, a su vez, posibilitan el cálculo de los ángulos teóricos de las llantas, los cuales pueden ser contrastados con los ángulos reales medidos por las IMUs. La concordancia entre los ángulos teóricos y los reales determina la precisión del modelo matemático.

3. **Pruebas de concepto:** Son un paso importante en el desarrollo de cualquier sistema. Las pruebas de concepto permiten validar el funcionamiento del sistema a pequeña escala. Se usan IMUs simuladas como los dispositivos móviles para realizar las pruebas de concepto. Las IMUs simuladas pueden generar datos de entrada para el modelo matemático. Estos datos se pueden utilizar para calcular los ángulos de las llantas. Los ángulos calculados se pueden comparar con los ángulos reales medidos por las IMUs reales. Si los ángulos calculados y reales coinciden, entonces el sistema tiene un buen potencial para funcionar a escala real.
4. **Diseño de prototipo mecatrónico:** Una vez que se ha validado el funcionamiento del sistema, se puede proceder al diseño de un prototipo a escala pequeña. El prototipo se puede utilizar para realizar pruebas a escala real. Se establece un mecanismo de un tornamesas para simular uno de los ejes del neumático.
5. **Pruebas de campo:** Se utiliza el prototipo para realizar pruebas en vehículos reales y compararlos con un Alineador de dirección 3D. Los datos de las IMUs se pueden emplear para calcular los ángulos de las llantas. Estos ángulos se pueden comparar con los ángulos reales medidos por cualquier sistema de alineación y balanceo tradicional.

2 Marco Teórico

2.1. Mecánica de funcionamiento

El estudio comenzó con una revisión en profundidad de la literatura existente sobre técnicas de alineación, tecnologías de sensores y metodologías relacionadas. La revisión de la literatura sirvió como base para determinar la brecha de investigación y formular los objetivos, identificando la necesidad de una solución portátil y rentable que pudiera proporcionar ángulos de alineación precisos sin necesidad de equipos especializados o máquinas de alineación costosas.

Hay varias fuerzas, momentos y ángulos que resultan muy importantes en el comportamiento de los neumáticos, y que reflejan la forma como estos interactúan con la superficie de la carretera. Primero, existen los tres ángulos principales: Camber, Toe y Caster. El ángulo de Camber es el ángulo de inclinación desde su posición vertical, el ángulo Toe es la diferencia en el rumbo y la dirección de las ruedas y el ángulo de Caster es el eje de dirección conectado al volante del vehículo.

Las fuerzas incluyen la fuerza longitudinal en la dirección X, la fuerza lateral en la dirección Y y la fuerza normal en la dirección Z observadas en la figura 2.1. La fuerza longitudinal (F_X) es el resultado de la fuerza ejercida por el neumático sobre la carretera y pasa a ser negativo durante el frenado. La fuerza lateral (F_Y) es la resultante de las fuerzas producidas por un ángulo de inclinación y por un ángulo de deslizamiento distinto de cero durante las curvas. La fuerza normal (F_Z) también puede verse como el negativo de la fuerza vertical hacia arriba. Los momentos incluyen el momento de vuelco, el momento de resistencia a la rodadura, el par de rueda y el momento de alineación. El momento de vuelco (M_X) es causado por un desplazamiento lateral de la carga vertical durante las curvas [5] [33].

La resistencia a la rodadura (M_Y) es creada por varios factores que conducen a una pérdida de energía. El momento de alineación (M_Z), también conocido como par de autoalineación, produce un momento de restauración en el neumático para realinear la dirección de viaje con la dirección de rumbo cuando el ángulo de deslizamiento no es cero.

2.2. Ángulo de Camber (Caída)

El Camber (también como ángulo de caída) es el ángulo de la rueda en relación con el eje vertical visto desde la parte delantera o trasera del vehículo. La inclinación positiva es la rueda inclinada lejos del vehículo, y la dirección opuesta es una inclinación negativa. Los

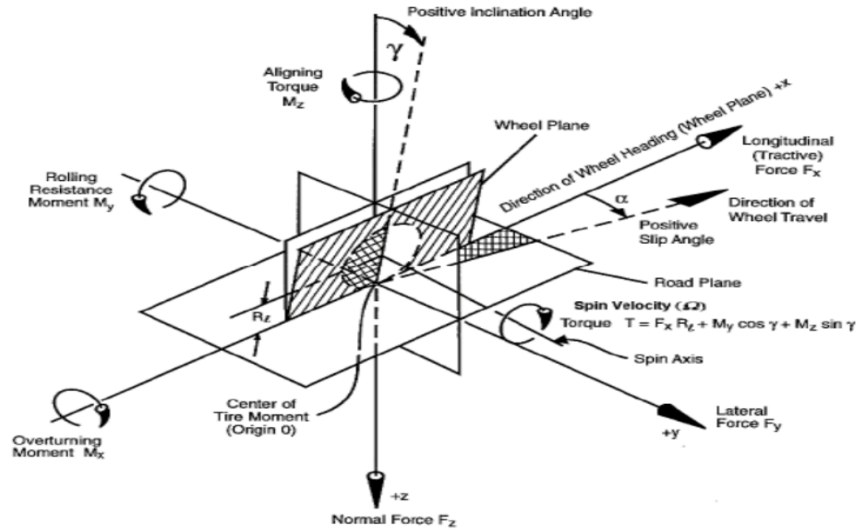


Figura 2.1: *Fuerzas actuantes de la llanta.* [22]

ángulos de Camber son asimétricos y se observan de vista frontal como se muestra en la figura 2.2. Pueden provocar un desgaste excesivo del neumático. En general, el neumático produce una fuerza lateral hacia la inclinación. Esta fuerza es función del tipo de neumático, construcción, forma, carril, presión, carga, tracción, esfuerzo de frenado y ángulos de deslizamiento [36].

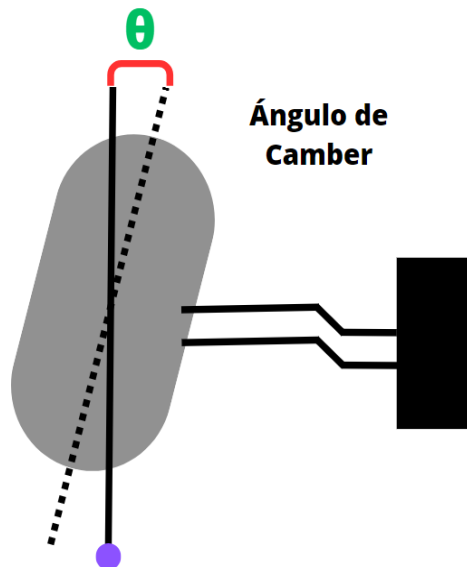


Figura 2.2: *Representación del ángulo de Camber de un neumático en vista frontal.*

2.3. Ángulo de Toe (Convergencia)

El Toe o también conocido como ángulo de convergencia, identifica la dirección exacta hacia la cual las ruedas apuntan comparándolas con una línea vertical en el vehículo, al ver las ruedas desde la vista superior del elemento mostrado en la figura 2.3. El ángulo de punta puede ser Toe-in (Convergencia) y Toe-out (Divergencia) definido como que el ángulo de avance se contrae y se expande respectivamente. Las desalineaciones de estos ángulos causarían problemas en la vida útil de los neumáticos y la suavidad de conducción. El Toe también ayuda alterar las características de la dirección. Un Toe de forma positiva usualmente reduce la pérdida de tracción de las llantas traseras antes que las delanteras al tomar curvas y el Toe de forma negativa disminuye el subviraje, ayudando a liberar el auto, especialmente al girar entrando en una curva [36].

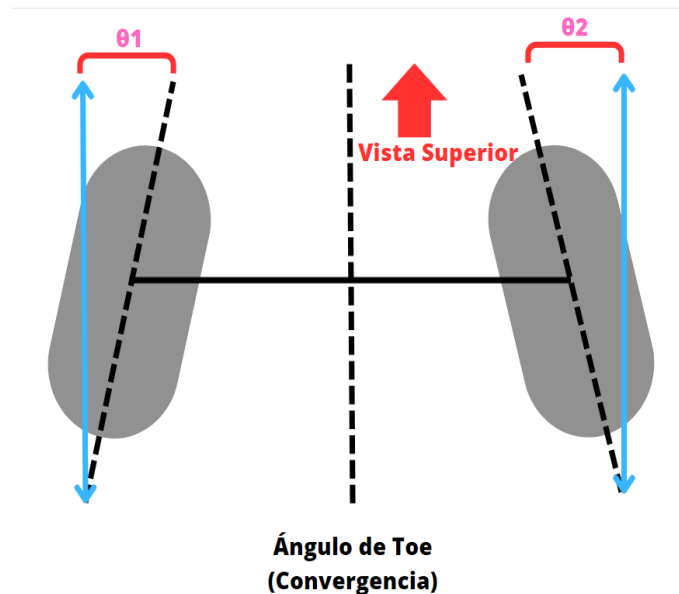


Figura 2.3: *Representación del ángulo de Toe de un neumático en vista superior del vehículo.*

2.4. Ángulo de Caster (Avance)

El ángulo de Caster o Avance es el parámetro geométrico que describe el ángulo entre el eje de dirección y el eje vertical de un vehículo, que funciona cuando este realiza movimientos de curvas y rendimiento en las líneas rectas. Comúnmente, la mayoría de vehículos tiene Caster positivo debido a que crea un par de autoalineación. Esto aumenta la estabilidad del vehículo en situaciones de línea recta, cada vez más importante a altas velocidades. La dirección firme y estable brinda confianza al conductor y le permite conducir a velocidades más altas, ya que no está luchando contra el volante. Esta alineación también hace que las ruedas regresen a su posición inicial al salir de una curva, lo que permite que el conductor sea

mucho más suave al salir de esta, controlando la velocidad a la que los neumáticos regresan al centro. También existen Caster negativo y Caster nulo, pero traen más desventajas que beneficios comparado con el positivo [36].

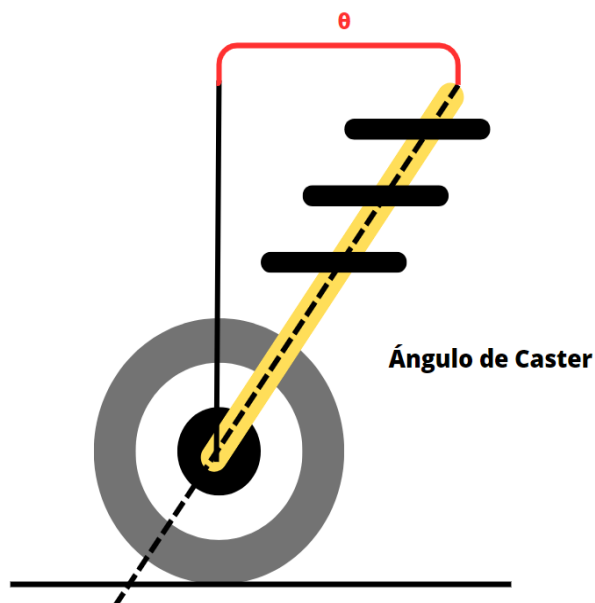


Figura 2.4: *Representación del ángulo de Caster de un neumático en vista lateral.*

2.5. Alineación Clásica

El proceso clásico de alineación de neumáticos de un vehículo consta de los siguientes pasos:

- **Inspección preliminar:** Antes de iniciar la alineación, se realiza una inspección visual de los neumáticos y componentes relacionados, como las rótulas y los brazos de suspensión, para verificar su estado general. Se busca desgaste irregular de los neumáticos, daños visibles en las partes de la suspensión y cualquier otro problema que pueda afectar la alineación.
- **Alineación inicial:** El vehículo se coloca en un equipo especializado que permite medir la alineación de las ruedas. Se ajustan los espejos de referencia y se establecen las dimensiones de referencia para el vehículo en cuestión.
- **Medición de la alineación:** Se utilizan sensores y/o cámaras para medir la posición de las ruedas en relación con las dimensiones de referencia establecidas. Estos sensores se colocan en diferentes partes del vehículo, como las ruedas delanteras y traseras, y se capturan las lecturas.

- **Ajuste de la alineación:** Una vez que se han obtenido las mediciones, se procede a realizar los ajustes necesarios para corregir cualquier desalineación. Esto implica modificar los ángulos de la suspensión como el Camber, Toe y Caster. Los ajustes se realizan mediante la manipulación de los componentes como el eje de dirección y los brazos de control.
- **Verificación final:** Después de realizar los ajustes, se vuelven a medir los ángulos de las ruedas para asegurarse de que estén dentro de las tolerancias especificadas por el fabricante del vehículo. Esto garantiza que la alineación se haya realizado correctamente.

Es importante destacar que el proceso puede variar dependiendo del tipo de vehículo y del equipo utilizado. Además, existen diferentes métodos de alineación, como la alineación de dos ruedas (frontal) o la alineación de las cuatro ruedas, que incluye también la alineación de las ruedas traseras [18].

2.6. IMU (Unidad de Medida Inercial)

Una IMU, abreviatura de Unidad de medición inercial, es un dispositivo electrónico que mide e informa la velocidad angular, la orientación y la aceleración de un vehículo, aeronave u otro objeto. Por lo general, consiste en una combinación de acelerómetros, giroscopios y, a veces, magnetómetros para medir el movimiento del elemento. [15].

Las IMU se usan comúnmente en robótica, drones, dispositivos de realidad virtual y otras aplicaciones donde se requiere una detección de movimiento precisa. También se pueden utilizar con fines de navegación y seguimiento en combinación con otros sensores y GPS. [23].

2.7. Acelerómetro

Un acelerómetro es un instrumento destinado a medir aceleraciones que no es necesariamente la misma que la aceleración de coordenadas (cambio de la velocidad del dispositivo en el espacio), sino que es el tipo de aceleración asociada con el fenómeno de peso experimentado por una masa de prueba que se encuentra en el marco de referencia del dispositivo. [2] Además de medir la aceleración lineal, algunos acelerómetros también pueden detectar la gravedad y la inclinación. Esto se logra mediante el uso de un acelerómetro de tres ejes, que consta de tres conjuntos de masas y placas fijas dispuestas en diferentes orientaciones presentados en la figura 2.5. Al combinar las mediciones de los tres ejes, es posible determinar la aceleración en cualquier dirección y también la orientación del dispositivo.

La mayoría de modelos actuales de acelerómetros poseen comunicación I2C, esto le permite trabajar con la mayoría de microcontroladores. Los pines SCL y SDA tienen una resistencia pull-up en placa para una conexión directa al microcontrolador. La salida del acelerómetro

es una señal eléctrica que se puede convertir en valores numéricos para representar la aceleración en unidades de gravedad (g) o en metros por segundo al cuadrado (m/s^2), dependiendo de la configuración. Estos valores se pueden utilizar en una variedad de aplicaciones, como dispositivos móviles para detección de movimiento, navegación inercial, monitoreo de vibraciones, control de juegos y muchas otras aplicaciones donde se requiere la medición precisa de la aceleración.

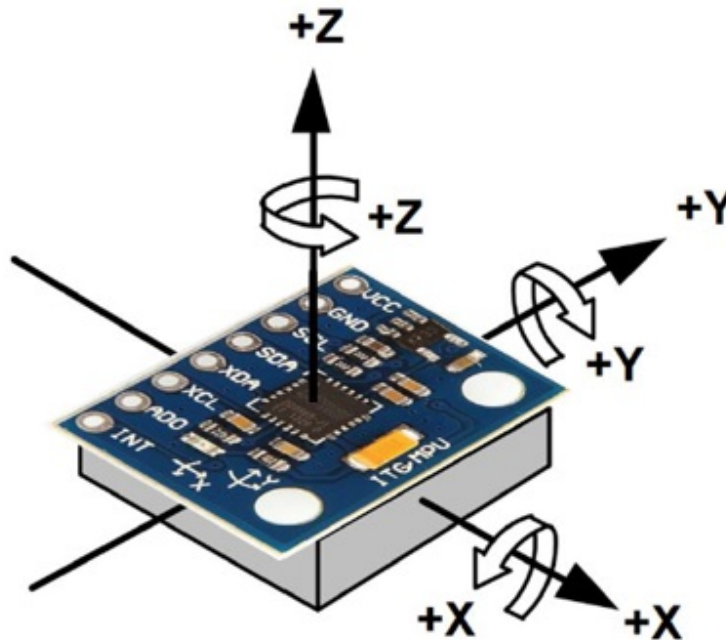


Figura 2.5: *Integrado MPU6050, se integran Acelerómetro y Giroscopio con sus ejes de referencia. [37]*

2.8. Giroscopio

Es un dispositivo mecánico que sirve para medir, mantener o cambiar la orientación en el espacio de algún dispositivo o vehículo. El giroscopio consta de un cuerpo con simetría de rotación y para que se produzca el efecto el cuerpo debe estar en rotación sobre el eje de simetría. Cuando se produce una fuerza que tiende a mover este eje de rotación, la fuerza aplicada cambia de orientación a un eje perpendicular tanto al eje de rotación como a la orientación en un principio de la fuerza, generando fuerzas contrapuestas que se anulan, haciendo que el eje mantenga el equilibrio.

A diferencia del acelerómetro, este es capaz de medir la orientación de un cuerpo con respecto a la superficie de la Tierra (el ángulo) pero de forma estacionaria; lo que NO puede medir es la velocidad y el tiempo de permanencia en que se aplica el acelerómetro, mientras que el giroscopio sí puede realizar estas funciones. Dispositivos como las cámaras

y los celulares inteligentes de nuevas generaciones tienen incorporado el giroscopio para el manejo de sensibilidad y estabilidad.

2.9. Magnetómetro

Un magnetómetro es un instrumento utilizado para medir campos magnéticos. Puede detectar y medir la fuerza, la dirección y la variación de los campos magnéticos en un área determinada. Los magnetómetros se utilizan en una amplia gama de aplicaciones como la brújula, la geofísica, la exploración de minerales, la arqueología, la navegación y las operaciones militares. Hay varios tipos de magnetómetros como el HMC5883L en la figura 2.6, incluidos los magnetómetros de puerta de flujo, los magnetómetros de precisión de protones, entre otros. A menudo se utilizan junto con otros instrumentos, como receptores GPS y acelerómetros, para proporcionar una comprensión más completa de un fenómeno o entorno en particular [32].

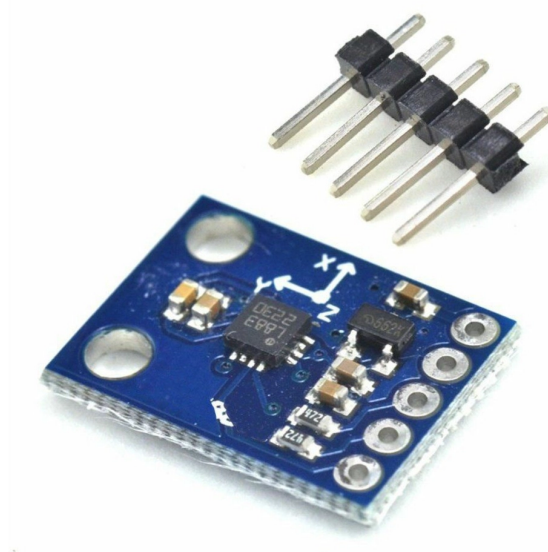


Figura 2.6: *Módulo de Magnetómetro HMC5883L,*

El principio de una brújula magnética es medir el campo magnético de la Tierra, que tiene un componente paralelo a la superficie de la misma. y esta siempre apunta hacia el norte magnético. Debido a que los magnetómetros conectados a un vehículo en movimiento a menudo no están confinados a la superficie de la Tierra, es esencial utilizar tres magnetómetros de eje montados ortogonalmente para que el campo magnético de la Tierra pueda girarse completamente de nuevo a una orientación horizontal como un integrado electrónico. En pocas palabras, volver a su estado inicial.

2.10. Fusión Sensorial (Sensor Fusion)

La fusión sensorial es el proceso de combinar datos de múltiples sensores para proporcionar una medición o estimación más precisa y confiable de una cantidad o estado físico. Esto generalmente se hace combinando las salidas de diferentes sensores en un algoritmo o modelo matemático.

El objetivo de la fusión de sensores es mejorar la precisión, la confiabilidad y la solidez de la medición o estimación mediante la explotación de las fortalezas complementarias de diferentes sensores y la compensación de sus debilidades como combinar datos de acelerómetros y giroscopios en una IMU, donde puede mejorar la estimación de la posición y orientación de un vehículo o robot. La fusión de sensores se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, concluyendo como un componente crítico de muchas tecnologías modernas [20] [21].

2.11. Modelos matemáticos de los ángulos

En el trabajo reportado por *Çamber Angle Inspection for Vehicle Wheel Alignments*” de los autores Jieh-Shian Young, Hong-Yi Hsu y Chih-Yuan Chuang [12], los autores nos demuestran que se pueden realizar los cálculos del Camber y del Toe utilizando mediciones realizadas a través de un acelerómetro y un giroscopio [12]. En dicho trabajo se encontraron limitaciones en el cálculo del ángulo del Toe; en este trabajo usamos una estructura de filtros complementarios, así como la información proveniente de un magnetómetro, para mejorar la estimación de ese ángulo.

En las siguientes subsecciones se muestra la forma en la cual realizamos el cálculo de los ángulos.

2.11.1. Coordenadas del Ángulo de Camber

De acuerdo con el trabajo de *Çamber Angle Inspection for Vehicle Wheel Alignments*”, para la estimación del ángulo del Camber, se realiza un estudio de las coordenadas tridimensionales que representan las matrices de rotación de los elementos a inspeccionar. La coordenada C es un sistema de coordenadas general que puede representar cualquier objeto, como un vehículo, un neumático, un acelerómetro o un sistema en general. Este se define mediante tres vectores unitarios \vec{I}_c , \vec{J}_c y \vec{K}_c que representan los ejes X, Y y Z, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}_C = \begin{bmatrix} \vec{I}_c & \vec{J}_c & \vec{K}_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \end{bmatrix}$$

La coordenada S es el sistema de coordenadas del sistema de inspección de inclinación. Este sistema se define de forma que los ejes X, Y y Z estén alineados con los ejes principales

del sistema. Este puede detectar la gravedad local (no siempre igual a $(g = 9,8 \text{ m/s}^2)$) en la coordenada S, mientras que la gravedad de la coordenada del vehículo (coordenada V) está solo hacia abajo. La transformación de coordenadas entre la coordenada V y la coordenada S es una operación lineal que permite pasar de un sistema a otro, dando como resultado otra matriz de rotación. Esta transformación es necesaria para calcular la inclinación del vehículo, ya que la gravedad local se representa de forma diferente en cada sistema. [12].

Se emplean los ángulos de Euler del giroscopio, que consisten en tres parámetros que describen la orientación de un sistema de coordenadas respecto a otro. Los ángulos de Euler describen la orientación de la coordenada V respecto a la coordenada S, al igual que la coordenada W la cual es la coordenada de la rueda, la cual se puede representar en el plano cartesiano de la siguiente forma:

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix}_V = \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}_W$$

$$[I_v \quad J_v \quad K_v] \begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = [I_w \quad J_w \quad K_w] \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix}$$

El ángulo de Camber se puede deducir como el ángulo de cabeceo θ y es el ángulo que forma la superficie lateral de un neumático con el plano vertical. Se mide en grados y puede ser positivo o negativo. Un ángulo de Camber positivo significa que la superficie lateral del neumático está inclinada hacia afuera, mientras que un ángulo de Camber negativo significa que la superficie lateral del neumático está inclinada hacia adentro. Además, el ángulo de guiñada ψ es el ángulo entre el eje X de la coordenada S y la coordenada de la rueda (coordenada W).

El ángulo de cabeceo y el ángulo de guiñada son rotados por los ejes Y y Z de las coordenadas V y W; y por los ejes X y Z de las coordenadas W y S respectivamente, esto significa que los ángulos de cabeceo y guiñada se pueden calcular a partir de las coordenadas de un objeto en la coordenada V o la coordenada W. Intuitivamente, los orígenes de las coordenadas V, W y S son los mismos. por lo que los tres sistemas de coordenadas tienen el mismo origen, que suele ser el centro de masa del vehículo [28].

Por lo tanto, las transformadas de cada una de las coordenadas son:

Transformada de las coordenadas del vehículo (V) y la rueda (W)

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

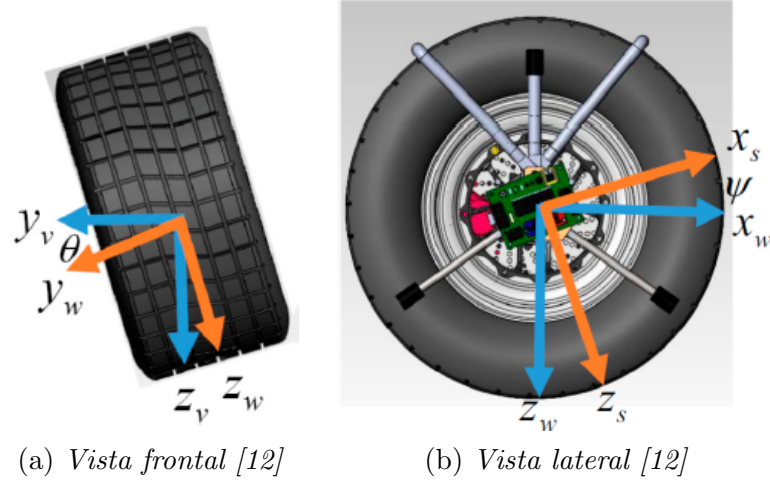


Figura 2.7: Vistas utilizadas usando el método de inspección del ángulo del Camber

Transformada de las coordenadas del sistema (S) y la rueda (W)

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \psi & 0 & \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

$$\begin{bmatrix} X_v \\ Y_v \\ Z_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & 0 & \sin \psi \\ \sin \theta \sin \psi & \cos \theta & -\sin \theta \cos \psi \\ -\cos \theta \sin \psi & \sin \theta & \cos \theta \cos \psi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ Y_s \\ Z_s \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

La figura 2.7a muestra la coordenada V y la coordenada W con el ángulo de cabeceo, donde los ejes Y y Z definen la posición la cual se encuentra el neumático y el desplazamiento interno o externo, hacia la derecha y hacia abajo, respectivamente. La figura 2.7b muestra la coordenada S y W, donde los ejes X y Z están alineados con los ejes principales del sistema al ángulo de guiñada.

La gravedad solo es censada por el acelerómetro, está a lo largo del eje Z de la coordenada V cuando el vehículo está fijo en la plataforma horizontal durante las mediciones del ángulo de cabeceo. Esta actúa en la dirección vertical. El acelerómetro, que mide la aceleración del vehículo, detectará una aceleración de $9,8\text{m/s}^2$ en la dirección del eje Z de la coordenada V. El acelerómetro puede adquirir la aceleración: $\vec{a} = A_x \vec{I}_s + A_y \vec{J}_s + A_z \vec{K}_s$ donde A_x , A_y , A_z son las aceleraciones de los componentes X, Y, Z en la coordenada S, respectivamente. En este caso, la ecuación de los tres ejes de acuerdo a esta información quedaría:

$$\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ g \end{bmatrix}_V = \begin{bmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{bmatrix}_S \quad (2.4)$$

Esta ecuación nos dice que la aceleración del vehículo en la coordenada V es la misma que la aceleración del acelerómetro en la coordenada S.

De la Ecuación 2.3, la transformada del sistema y del vehículo se resumen de acuerdo a la información mencionada de la matriz de la Ecuación (2.4): el ángulo de guiñada y de Camber quedaría:

$$\psi = -\tan^{-1} \frac{A_x}{A_z} \quad (2.5)$$

$$\theta_C = \tan^{-1} \frac{-A_x}{A_y \cos \psi - A_z \sin \psi}$$

$$\theta_C = \tan^{-1} \frac{-A_x}{\sqrt{A_y^2 + A_z^2}} \quad (2.6)$$

Estas ecuaciones posibilitan calcular los ángulos de guiñada y de cabeceo a partir de las lecturas del acelerómetro. En pocas palabras, el enfoque de medición del ángulo de Camber permite a los técnicos operar fácilmente las mediciones del ángulo mediante el sistema.

Esta perspectiva es simple y fácil de implementar. Los técnicos pueden utilizar un acelerómetro para medir los ángulos de guiñada y de cabeceo del vehículo. Para efectos prácticos, se sugiere que el eje X de la coordenada S puede estar cerca del de la coordenada W debido a la precisión computacional del integrado, aunque la alineación perfecta no es necesaria en la ecuación (2.6), es decir, sin ninguna perturbación. En la práctica, el eje X de la coordenada S no tiene que estar perfectamente alineado con el eje Y de la coordenada W. La precisión del controlador es suficiente para compensar cualquier pequeña desalineación.

Calibración del acelerómetro

En la fabricación de sistemas de inspección de inclinación basados en acelerómetros, pueden ocurrir desalineaciones entre el sistema de inspección y el acelerómetro. Estas desalineaciones pueden deteriorar la precisión de las inspecciones del ángulo de inclinación. Para compensar las desalineaciones, se puede utilizar un índice de rendimiento, basado en el algoritmo de calibración basado en el método de mínimos cuadrados como el método de Lagrange, limitado por la gravedad promedio. Este algoritmo utiliza la siguiente ecuación para calcular el índice de rendimiento:

$$J = \sum_{i=1}^N (x_k - x_{k,i})^2 + \sum_{i=1}^N (y_k - y_{k,i})^2 + \sum_{i=1}^N (z_k - z_{k,i})^2 \quad (2.7)$$

Donde:

- x_k , y_k y z_k son los valores óptimos de los ejes X, Y y Z, respectivamente.
- $x_{k,i}$, $y_{k,i}$ y $z_{k,i}$ son los valores medidos de los ejes X, Y y Z, respectivamente.
- N es el número de datos medidos.

Limitador de gravedad

El limitador de gravedad asegura que la gravedad promedio sea igual a $9,8 \text{ m/s}^2$, como se muestra en la ecuación 2.8:

$$g(x_k, y_k, z_k) = x_k^2 + y_k^2 + z_k^2 - \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{x_{k,i}^2 + y_{k,i}^2 + z_{k,i}^2}}{N^2} = 0 \quad (2.8)$$

Solución del problema de optimización

El problema de optimización se puede resolver por el método de Lagrange. Las condiciones de optimización se cumplen cuando las derivadas de las variables x_k , y_k , z_k y λ_k sean 0. Estas ecuaciones se pueden resolver para obtener los valores óptimos de las variables:

$$L(x_k, y_k, z_k, \lambda_k) = \sum_{i=1}^N (x_k - x_{k,i})^2 + \sum_{i=1}^N (y_k - y_{k,i})^2 + \sum_{i=1}^N (z_k - z_{k,i})^2 + \lambda_k * ((x_k)^2 + (y_k)^2 + (z_k)^2 - \frac{\sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{k,i})^2 + (y_{k,i})^2 + (z_{k,i})^2}}{N^2}) \quad (2.9)$$

De la ecuación 2.9 las condiciones de optimización se hallan por separado las variables:

$$x_k = \frac{\sum_{i=1}^N x_k N}{N + \lambda_k} \quad (2.10)$$

$$y_k = \frac{\sum_{i=1}^N y_k N}{N + \lambda_k} \quad (2.11)$$

$$z_k = \frac{\sum_{i=1}^N z_k N}{N + \lambda_k} \quad (2.12)$$

Y sustituyendo las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12 en la ecuación 2.8, obtenemos:

$$\lambda_k = N \left(\frac{\sqrt{(\sum_{i=1}^N x_k)^2 + (\sum_{i=1}^N y_k)^2 + (\sum_{i=1}^N z_k)^2}}{\sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{k,i})^2 + (y_{k,i})^2 + (z_{k,i})^2}} - 1 \right) \quad (2.13)$$

La calibración de los sistemas de inspección de inclinación basados en acelerómetros es una tarea importante para garantizar la precisión de las mediciones. El algoritmo de calibración basado en el método de mínimos cuadrados por Lagrange limitado por la gravedad promedio es una técnica eficaz para compensar las desalineaciones de los ejes.

Los instrumentos de medición de aceleración o giro pueden presentar desviaciones o derivas (drift). Estas desviaciones pueden ser causadas por factores como la temperatura, la humedad o el envejecimiento de los componentes. Para superar los errores y aprovechar la complementariedad de las características de movimiento, se pueden utilizar técnicas de fusión de sensores. Estas técnicas combinan las lecturas de varios sensores para estimar con precisión las dimensiones correctas.

Filtros complementarios

Un filtro complementario es un tipo de filtro de control que combina dos señales de entrada para generar una salida. Se utiliza a menudo en aplicaciones de control de movimiento para estimar la posición o la orientación de un sistema. Este filtro también usa una ponderación entre dos filtros que son complementarios entre sí (acelerómetro y giroscopio), por eso se le dice filtro complementario.

[26].

Adicionalmente, ayudan a mitigar los errores de medición tanto del giroscopio como del acelerómetro utilizando la ponderación. Se pueden utilizar otros filtros, paso-bajo, un paso-alto o una fusión sensorial. En este caso se utiliza un filtro paso-bajo para el acelerómetro a fin de corregir las perturbaciones de alta frecuencia, como se indica en la figura 2.8. [31].

La ecuación del filtro complementario se denota como:

$$K = \alpha(\theta_{G0} + \theta_G) + (1 - \alpha)\theta_A \quad (2.14)$$

Donde:

- K es la salida del filtro en un tiempo t .
- α es la constante de filtro que determina el peso relativo de sus salidas anteriores y el dato actual.
- θ_G son los datos integrados del giroscopio.

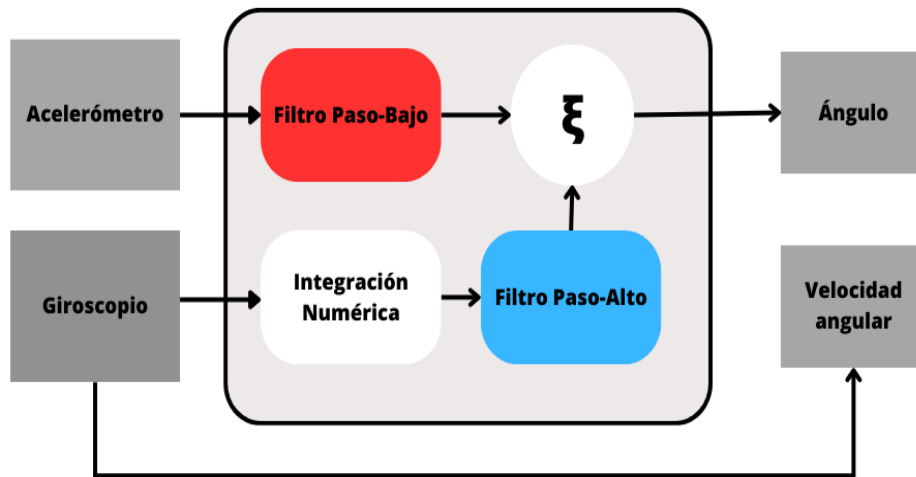


Figura 2.8: *Diagrama de flujo del filtro complementario usando acelerómetro y giroscopio.*

- θ_A son los datos de los ejes longitudinales del acelerómetro (realizados en las ecuaciones 2.5 y 2.6).

La elección de la constante como factor de ponderación es una opción de diseño común, pero no es una regla estricta. La elección del factor depende de la aplicación específica y los requisitos de rendimiento.

Tomando en cuenta que no se trata de casos graves de imprecisión en los muestreos, durante la investigación se opta por utilizar una constante de 0,95 (en un rango de 0.85 a 0.95, a veces se utiliza 0,98) representando el 95 % peso corresponde a la salida del sensor de alta frecuencia, mientras que el 5 % del peso corresponde a la salida del sensor de baja frecuencia [9]. La utilización de constantes entre 0.85 y 0.98 en un filtro complementario se basa en la necesidad de equilibrar la respuesta del filtro y lograr un buen rendimiento en la combinación de señales.

Al emplear el filtro complementario, se logra calcular el ángulo del Camber con mayor precisión al reducir el nivel de interferencias, gracias a la integración adecuada de los datos

provenientes del giroscopio y las aceleraciones de los ejes longitudinales para comprender el giro que se efectúa o su respectivo ángulo. Bien que se puede visualizar las muestras de Camber con el acelerómetro y giroscopio, no se sabe el ángulo de Camber definitivo, ya que el proceso del acelerómetro y giroscopio solo se muestra la distancia recorrida en forma de ángulo; es decir, que para hallar el Camber, necesitamos tener en cuenta otra referencia de alineación.

Afortunadamente, es posible utilizar el diámetro del neumático del vehículo, algunos casos se toma el rin. Estas medidas varían de acuerdo al tipo de auto (SUV, Compactos, Sedan, Hatchback, Camionetas) y ayudan a conocer dos de las distancias necesarias para lograr conseguir el Camber. Los modos más sencillos de calcularlo sin tener un alineador dedicado lo hacen utilizando herramientas como una regla y medidores de burbuja, se ponen de forma perpendicular al suelo y alineado de forma vertical, creando un triángulo rectángulo y se puede lograr el ángulo con trigonometría básica como se observa en la figura 2.9. Sí se tienen la distancia convertida en milímetros por el módulo del acelerómetro y giroscopio, además del diámetro del rin o neumático. La ecuación y la gráfica del Camber quedaría de la siguiente forma:

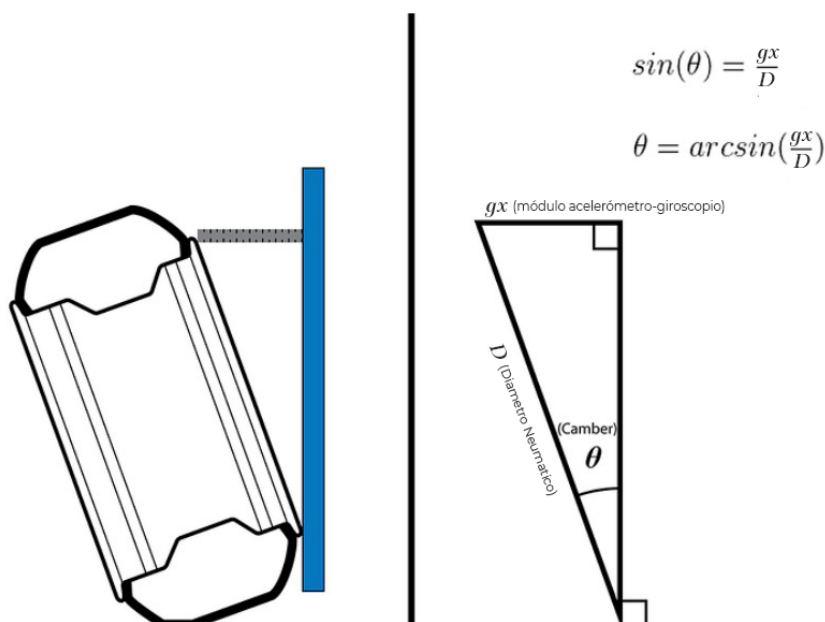


Figura 2.9: Diagrama del cálculo del Camber en un neumático [14].

$$\sin \theta = \frac{gx}{D}$$

$$\theta = \sin^{-1} \frac{gx}{D} \tag{2.15}$$

Donde:

- gx son los datos obtenidos del módulo del acelerómetro-giroscopio.
- D es el diámetro del neumático o rin.

En los mejores casos, el Camber tiene que ser negativo, los resultados se pueden comparar con otros instrumentos de alineación como los inclinómetros o los alineadores de visión 3D y revisar si se cumplen con los estándares de fabricante del vehículo. El método anterior sirve para hallar el ángulo Toe.

2.11.2. Coordenadas del Ángulo de Toe

Como se muestra en la figura 2.3 y explicado en el capítulo 2.11.1, los ángulos de Toe se observan desde la vista superior del vehículo, por lo que una mala calibración de los ángulos de toe-in y toe-out pueden llevar a serios problemas. En primer lugar, para hallar este ángulo se puede usar la herramienta del giroscopio. Sin embargo, es imposible determinar el ángulo Toe utilizando solamente un giroscopio, porque esta solo mide velocidad angular. Por lo que se requiere otros sensores adicionales como el acelerómetro o en algunos casos un magnetómetro para facilitar la medida y el cálculo. Además, en todas las ocasiones, la medición del giroscopio presenta errores que afectan su precisión, como desviaciones y las características del integrado del que se usa. Por eso se necesita realizar calibraciones en cuanto a su eje de muestreo usando filtros complementarios.

Considerando un vector $(x_G, y_G, z_G)_G^T$, se utiliza para determinar los movimientos del giroscopio y establecer una orientación mediante los ángulos conocidos como Ángulos de Euler. Estos son: guiñada(ψ), cabeceo(θ) y balanceo(ϕ). Estos ángulos son los que corresponden a las orientaciones del giroscopio en los 3 ejes. Teniendo en cuenta lo mencionado, el vector se convierte en: $(x_{G0}, y_{G0}, z_{G0})_{G0}^T$ Donde G y G0 son las coordenadas del giroscopio y sus coordenadas originales respectivos en cuanto a su origen [16].

$$\begin{bmatrix} X_{G0} \\ Y_{G0} \\ Z_{G0} \end{bmatrix}_{G0} = \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}_G$$

$$\begin{bmatrix} X_{G0} \\ Y_{G0} \\ Z_{G0} \end{bmatrix} = T_\psi T_\theta T_\phi \begin{bmatrix} X_G \\ Y_G \\ Z_G \end{bmatrix}$$

La ecuación anterior relaciona las coordenadas del giroscopio con las nuevas coordenadas y los ángulos de Euler, se pueden desglosar de manera explicada cada ángulo de Euler en esta forma:

$$T_\psi = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{\theta} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$T_{\phi} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix}$$

La coordenada del giroscopio inicializado como encendido y puesto en el eje z es llamada la coordenada original (coordenada G_0), y es cuando los ángulos de Euler del giroscopio son todos iguales a 0, es decir: $\theta = 0$, $\psi = 0$ y $\phi = 0$. De esta forma, La orientación del marco original varía a medida que se mueve el giroscopio y un conjunto de ángulos de Euler aunque es fijo en relación con la coordenada giroscópica (coordenada G). Un ejemplo bastante claro sería un avión al despegar de la zona de aterrizaje, donde sus coordenadas y ángulos de Euler varían de acuerdo a su inclinación y en el plano en el que se encuentra [16].

Asumiendo que si se pone un integrado con un giróscopo incorporado en la plataforma de manera horizontal, las coordenadas de X, Y y Z se vuelven nulas ($\theta = 0$, $\psi = 0$ y $\phi = 0$), el eje Z se vuelve perpendicular hacia arriba de la plataforma. El eje X de la coordenada del sensor (coordenada S) aún no se puede calcular debido a que el eje Z del mismo no se ha resuelto, ese mismo eje es cuando asumimos que la rueda o el neumático del vehículo gire a una velocidad angular constante para hallar su calibración. Para esto, realizamos dos movimientos en ambos lados del integrado en la plataforma pero en el eje Y del giroscopio [16].

Moviendo en dos sentidos diferentes se obtiene los datos de los ángulos de Euler correspondientes, no obstante, al girar se obtiene un pulso de datos por un determinado tiempo debido a que el eje Y no gira constantemente en comparación con el eje Z, por lo que vuelve a ser nulo. Mientras que el eje X del giroscopio se vuelve como vector $(1, 0, 0)_G^T$ o (\vec{V}_0) , aunque también con el mismo giróscopo, se logre calibrar de cualquier manera como un vector inicial (\vec{V}_x) , pero es recomendable el vector X mencionado [16].

La muestra de datos obtenidos se les realiza un promedio del valor total de números de pruebas realizadas en cada uno de los ángulos de Euler para obtener los vectores de izquierda y derecha (\vec{V}_1) y (\vec{V}_2) .

$$\vec{V}_1 = I_{g1} \theta_1 \tag{2.16}$$

$$\vec{V}_2 = I_{g2} \theta_2 \tag{2.17}$$

Donde:

- \vec{I}_{g1} y \vec{I}_{g2} es el promedio de los datos de los ángulos de Euler del giroscopio.
- θ es el ángulo de muestra del integrado en la plataforma

Con los vectores obtenidos, se procede a calcular la calibración perpendicular hacia arriba que tiene el eje Z en la Coordenada del sensor.

Se realiza un producto vectorial (producto cruz) en cada uno de los vectores \vec{V}_1 y \vec{V}_2 para generar un paralelogramo como se muestra en la figura 2.10. Este paralelogramo tiene dos muestras o ecuaciones que son la diferencia de los vectores \vec{V}_1 y \vec{V}_2 con el vector principal \vec{V}_x . Estas diferencias se hallan de la siguiente forma:

$$\Delta\vec{V}_1 = \vec{V}_1 - \vec{V}_x \quad (2.18)$$

$$\Delta\vec{V}_2 = \vec{V}_2 - \vec{V}_x \quad (2.19)$$

Las variables $\Delta\vec{V}_1$ y $\Delta\vec{V}_2$ se encuentran en la plataforma o en los planos X-Y del sensor. Para hallar el eje Z, se propone un teorema teniendo en cuenta que Z es un vector unitario de $[0 \ 0 \ 1]$. Se encuentra de la siguiente manera:

$$Z = \frac{\Delta\vec{V}_1 \times \Delta\vec{V}_2}{|\Delta\vec{V}_1 \times \Delta\vec{V}_2|} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} S \quad (2.20)$$

El resultado de la ecuación 2.20 muestra la calibración completa del eje Z con respecto al sensor del giroscopio en la figura 2.10, esto de la cual el ángulo de Toe se puede hallar fácilmente si todos los ejes se encuentran calibrados.

Aunque se haya logrado la calibración del eje Z para hallar el ángulo de Toe correspondiente, se necesita realizar algunos cambios importantes. Mencionado al principio del capítulo, no se puede encontrar el ángulo Toe solamente con un giroscopio debido a que su medida es velocidad angular (en grados/segundo o radianes/segundo). A pesar de ello, existe actualmente la forma de resolver el problema si se tiene en cuenta los conceptos del movimiento circular uniforme (MCU). La velocidad angular es una cantidad vectorial y es igual al desplazamiento angular $\Delta\theta$ dividido entre el cambio en el tiempo Δt o dt . si tenemos la coordenada de la velocidad angular [11], la ecuación para hallar el ángulo es la siguiente:

$$\psi = W_0 + \int \alpha(t) dt \quad (2.21)$$

Donde:

- ψ es el ángulo de rotación.

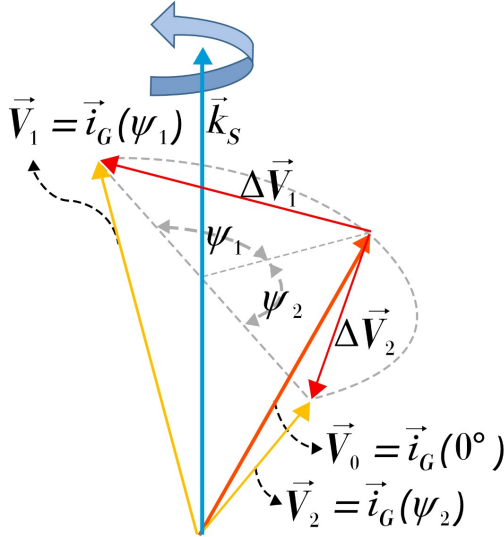


Figura 2.10: *Calibración del eje Z con el sensor del giroscopio. [16]*

- W_0 es la velocidad angular inicial.
- $\alpha(t)$ son los datos del giroscopio en velocidades angulares.

La ecuación 2.21 muestra que es posible determinar el ángulo o desplazamiento angular al integrar los cambios de orientación del vehículo proporcionados por el giroscopio a lo largo del tiempo. Esto nos proporciona la posición en la cual el neumático está alineado. Sin embargo, medir con precisión el ángulo de guiñada, que toma como referencia el eje Z y representa la rotación de un objeto alrededor de su eje gravitacional, puede ser un desafío debido a diversos factores, como la deriva y la influencia de la gravedad.

La deriva (drift) es un problema común con los giroscopios, que se utilizan para medir el movimiento de rotación [25]. Los giroscopios miden dicha velocidad, pero pueden desviarse con el tiempo por diferentes razones, como cambios de temperatura, imperfecciones de fabricación y sesgo del sensor, como la integración de la ecuación 20. Esto puede provocar errores en el ángulo de guiñada medido, incluso si el sensor está calibrado.

Además de la deriva, el eje gravitacional G también puede afectar la precisión de la medición del ángulo de guiñada ψ . El sensor MPU6050 incluye un acelerómetro, que mide la aceleración debida a la gravedad. Sin embargo, la orientación del acelerómetro en relación con el eje gravitacional puede afectar la precisión de la medición. Si el acelerómetro no está perfectamente alineado con el eje vertical, puede introducir errores en el ángulo de guiñada medido.

Para resolver este problema, se pueden usar otros sensores y algoritmos en combinación, como un magnetómetro para medir el campo magnético y proporcionar una referencia para

la orientación del sensor en relación con el campo magnético de la Tierra, aunque también se demuestra que solo el sensor del magnetómetro puede calcular el ángulo de rotación [19].

No obstante, El uso de un magnetómetro para estimar con precisión el ángulo puede resultar complicado. El campo magnético de la Tierra es débil, lo que hace que los magnetómetros sean muy susceptibles a las perturbaciones magnéticas, que son causadas por materiales ferrosos o corrientes eléctricas cerca del magnetómetro. Estas perturbaciones distorsionan el campo magnético de fondo, lo que aumentará los errores su estimación. El campo magnético también puede cambiar hasta 2° de un día para otro. Debido a esto, incluso en los entornos magnéticos ideales, un magnetómetro solo puede proporcionar una precisión de rumbo de 1° a 2° durante un período prolongado de tiempo. Sin embargo, aun con su precisión, resulta ser una opción más viable y no costosa de realizar el cálculo del ángulo de guiñada.

Debido a esto, lo primero que se tiene que hacer antes de realizar las operaciones es calibrar de forma adecuada el magnetómetro. El proceso siempre se realiza antes de las muestras para evitar los errores aleatorios que provoca el campo magnético. Cuando el sensor está apropiadamente calibrado [7], en la siguiente ecuación:

$$\psi = \tan^{-1} \frac{M_y}{M_x} \quad (2.22)$$

Donde:

- M_y son las lecturas del magnetómetro en el eje Y.
- M_x son las lecturas del magnetómetro en el eje X.

La ecuación 2.22 se puede relacionar dentro el contexto con el denominado ángulo de azimut mostrado en la figura 13, es un ángulo entre el norte magnético y una línea que conecta la posición del observador con una ubicación objetivo (Usualmente se toma el sol o una coordenada espacial como referencia). Esta ecuación calcula el rumbo o la dirección del vector en el espacio con los datos del magnetómetro. Mencionado en la figura 2.11, el eje gravitacional Z es la que se mueve en ese sentido, por ende, los datos de salida o los resultados se compilan en las muestras del sensor en los ejes X y Y, se realiza triangulación de las direcciones, y por razones trigonométricas (Tangente = Opuesto / Adyacente) se obtiene la rotación. Adicionalmente, se practica la ecuación 15 del Camber para hallar el ángulo teniendo en cuenta el diámetro del neumático.

2.11.3. Coordenadas del Ángulo de Caster

El ángulo de Caster es la diferencia del ángulo de giro del vehículo que como se muestra en la figura 2.4 se visualiza de forma lateral; mientras más positivo es el Caster, más adelante estará la rueda de la otra, y si es negativo, estará más atrás [30]. Los neumáticos de la mayoría de los vehículos no son perfectamente paralelas, esto se debe a que se cumple un factor de tolerancia universal para garantizar el direccionamiento adecuado del auto y

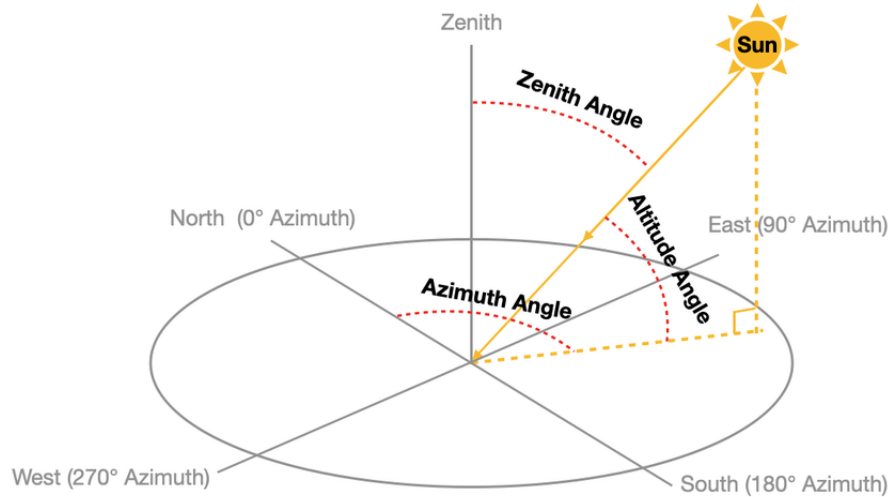


Figura 2.11: Representación del ángulo de acimut. [29]

también depende de los parámetros predeterminados de los fabricantes. Si no se realiza una calibración de este factor universal, la rueda tendrá problemas de dirección como la colisión con el guardabarros o la inestabilidad al realizar un giro [34].

Se puede utilizar los mismos datos del acelerómetro y el giroscopio en los cálculos realizados anteriormente con los ángulos del Camber y Toe respectivamente, debido a que afectan igualmente el Caster si se modifica cualquiera de estos ángulos y viceversa. Sin embargo, el Caster no se puede calcular por métodos imaginarios ni asumir su posición, aun con la distancia de los pivotes del vehículo [1].

Asimismo, a diferencia de las operaciones anteriores, para el Caster, se debe tener en cuenta las dimensiones del vehículo en sí, así como los cambios de los ángulos anteriores, Uno de los principales efectos del Caster es que cambia la inclinación de la rueda a medida que gira, es decir, el Camber. Además, se mueve el eje Z del ángulo del Toe porque está conectado al volante del vehículo, de modo que proporciona el giro de los neumáticos y depende de su ángulo, realizar la estabilización de la dirección si se deja en reposo el volante. Al definir la relación entre el cambio de Camber y del Toe con el Caster, Se puede resolver el ángulo de tomando medidas de Camber y Toe en múltiples posiciones de rueda [14]. La ecuación para el cálculo es:

$$K = \tan^{-1} \left(\frac{\sin C_1 - \sin C_2}{\cos C_2 \sin T_2 - \cos C_1 \sin T_1} - \frac{\cos C_2 \cos T_2 - \cos C_1 \cos T_1}{\cos C_2 \sin T_2 - \cos C_1 \sin T_1} \tan S \right)$$

Donde:

- K Es el ángulo de Caster.
- T_1 Es el ángulo en grados del Toe en dirección 1.

- T_2 Es el ángulo en grados del Toe en dirección 2.
- C_1 Es el ángulo en grados del Camber en dirección 1.
- C_2 Es el ángulo en grados del Camber en dirección 2.
- S Es la inclinación de giro de los neumáticos.

Para hallar el Caster, se necesita saber el ángulo de la inclinación de los neumáticos, de la cual es complicado debido a que no existen referencias de su respectiva operación. Lo que se puede hacer, en este caso, es asumir algunas variables para poder simplificar el problema.

En primer lugar, los ángulos de Caster son también de valores pequeños, se tienen valores universales de los vehículos de hasta 6° en positivo. Por ende, asumiremos que el Camber, variable que determina el Caster es de 6° como máximo. entonces si asumimos que el Camber $C \approx 6^\circ$ Entonces $\cos C \approx 1$. Esto con el fin de reducir a una forma más sencilla la ecuación K en el peor de los casos cuando el Camber es de 6° y no el Caster, por lo que tenemos un margen de error menor al 0.55 % porque es un factor crítico en la estabilidad y el manejo de un vehículo. Igualmente, hacemos las siguientes hipótesis:

$$T_2 = -T_1$$

$$\cos(x) = \cos(-x)$$

$$\sin(-x) = -\sin(x)$$

$$K = \tan^{-1} \left(\frac{\sin C_1 - \sin C_2}{2 \sin T} \right) \quad (2.23)$$

La ecuación 2.23 representa el método simplificado para hallar el Caster si aplicamos todas las identidades, de igual manera, se asume que el Toe será igual en ambas direcciones. Eso significa que cuando se realice las mediciones de la inclinación, comenzará con la punta cero y se asegurará de girarla exactamente en el mismo ángulo en ambas direcciones, razón de que el Toe no afecta mucho el Caster. Gracias a las identidades trigonométricas de ángulos opuestos, hacer esta suposición anula todo el lado derecho de la ecuación que contiene la inclinación, no obstante, el cálculo es proporcional al Camber, por lo que entre más ángulo de Camber tiene, más impreciso será el cálculo del Caster.

Por eso se debe compararlo con el factor de tolerancia, si no está entre el rango, es deber del mecánico realizar los ajustes correspondientes para corregir y establecerlo a los parámetros ideales.

3 Alineación de los neumáticos utilizando Mediciones Inerciales

En los últimos años, los avances en la tecnología de sensores han permitido el desarrollo de sistemas de alineación de neumáticos avanzados. En particular, las IMUs han surgido como una solución prometedora para medir y evaluar la alineación de los neumáticos de manera precisa y eficiente. En el proyecto, se realizan estos experimentos clave:

- **Prueba de concepto utilizando dispositivos móviles:** Se examina cómo los dispositivos móviles, como teléfonos inteligentes o tabletas, equipados con sensores de IMU incorporados, pueden utilizarse para realizar mediciones preliminares de algunos datos para la alineación de neumáticos. Se explora las posibilidades y limitaciones de esta técnica, así como las herramientas y aplicaciones disponibles para realizar dichas mediciones.
- **Verificación numérica de los ángulos de Camber, Toe y Caster:** Se utiliza el entorno de programación Python, específicamente en Google Colab, para calcular y verificar los ángulos de Camber, Toe y Caster con los datos suministrados del dispositivo móvil. Estos ángulos son fundamentales para evaluar la alineación de los neumáticos y su desviación de los valores recomendados puede afectar el rendimiento y la seguridad del vehículo.
- **Validación de los resultados numéricos utilizando el tornamesas:** Se combina la precisión de los sensores de IMU con la capacidad de ejecución en tiempo real de los microcontroladores Arduino. Utilizando los códigos diseñados en Python para los tres ángulos y hacer la conversión en Arduino, se podrá validar los resultados obtenidos en el experimento anterior, asegurando así la confiabilidad y precisión de los ángulos de Camber, Toe y Caster medidos.

También se destaca los desafíos asociados con la medición precisa de la alineación de los neumáticos utilizando IMUs, como la corrección de errores de los sensores y la mitigación de la influencia de factores externos mencionados en los capítulos anteriores.

3.1. Prueba de concepto utilizando dispositivos móviles

En el primer experimento, se utiliza un dispositivo móvil con IMUs incorporados para realizar mediciones preliminares del acelerómetro y giroscopio. Se busca obtener información útil sobre el comportamiento de las medidas si se mueve el dispositivo en los tres ejes X,

Y y Z para luego realizar la conexión que tiene en los métodos que usan los alineadores de vehículos. Para lograrlo, se procede a ejecutar el siguiente procedimiento:

- Se prepara un dispositivo móvil con los IMUs incorporados, preferiblemente con acelerómetros y giroscopios.
- Se descarga e instala una aplicación móvil de medición de alineación que utilice los IMUs del dispositivo.
- Se coloca el dispositivo móvil en una posición fija.
- Se ejecuta la aplicación de medición de alineación en el dispositivo móvil, se mueve el dispositivo en los diferentes ejes y se registran las mediciones proporcionadas.
- Se analizan los resultados obtenidos y se evalúa la relación que presenta con la alineación de los neumáticos del vehículo.

Dependiendo del sistema operativo del móvil, se descarga la aplicación del acelerómetro con mejor reseña para que pueda utilizar su función y poder observar su comportamiento en la pantalla, cabe resaltar que las aplicaciones varían el sistema de medida, al igual que su telemetría y su visualización.

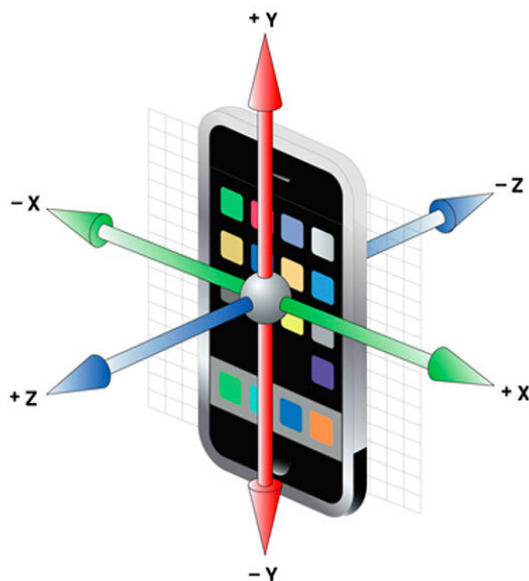


Figura 3.1: *Representación de un dispositivo móvil para usar el acelerómetro y el giroscopio en las tres coordenadas. [24]*

Después, se procede a inclinar el dispositivo móvil en ambos lados de izquierda y derecha entre un rango de 1 y 179° en posición horizontal. Los datos obtenidos son para el acelerómetro, la aceleración gravitacional (en m/s^2 o en g) y el giroscopio en velocidad angular o los

ángulos de Euler (o/s). Con estos datos se pueden realizar las operaciones correspondientes mencionadas en el marco teórico para obtener el ángulo aproximado de la alineación. Sin embargo, es importante tener en cuenta que debido a las limitaciones de precisión de los dispositivos móviles, estas mediciones preliminares pueden requerir una validación adicional mediante técnicas de medición más precisas, como el uso de equipos de alineación profesionales o integrados.

3.2. Verificación numérica de los ángulos de Camber, Toe y Caster

El segundo experimento consiste en utilizar el entorno de programación Python, específicamente en Google Colab, para realizar las modificaciones y cálculos requeridos de los datos suministrados por el dispositivo móvil, con el fin de realizar la verificación de los ángulos de Camber, Toe y Caster, al igual que la ejecución de los filtros complementarios como se evidencia en el marco teórico. Se realizan el siguiente proceso:

- Se implementan varios códigos que utilice las fórmulas y cálculos necesarios para calcular los filtros complementarios y los ángulos de Camber, Toe y Caster.
- Se introducen los datos del dispositivo móvil necesarios para los cálculos.
- Se ejecuta el código y se obtienen los valores obtenidos de los ángulos de Camber, Toe y Caster, igualmente con sus filtros complementarios.

Para el Camber, se implementa la función simple del muestreo del acelerómetro adquirido por un medidor como el dispositivo móvil o un integrado. Por medio de las transformadas de las coordenadas tanto del vehículo como del neumático se aplica la ecuación 2.6 para lograr el cálculo de uno de los ángulos de Camber. Posteriormente, se lleva a cabo el experimento de la calibración de los datos del acelerómetro con el fin de corregir los desalineamientos de los ejes. Se lleva a cabo las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12 de los multiplicadores de Lagrange para resolver el problema de optimización y mitigar los errores de desalineación mencionadas. Posteriormente, se utiliza el filtro complementario para eliminar el ruido o las gamas de frecuencias que genera las medidas finales, se usa junto con las medidas del giroscopio y la ecuación 2.14 donde la constante α está entre 0.95 y 0.98 dependiendo de su elección y finalmente se obtiene el ángulo definitivo de Camber en la ecuación 2.15 si tenemos el diámetro del neumático y la distancia calculada por el módulo.

Para el Toe ahora se utiliza los datos del giroscopio por medio de los ángulos de Euler del dispositivo y un magnetómetro como elemento aparte. Para empezar, se comprueba que el eje a desarrollar es el eje Z con los productos vectoriales de sus ejes X y Y, así como realizar la inversa de la matriz. Se realiza una prueba con los mismos pasos para el Camber que incluye el filtro complementario y luego se realiza la prueba del magnetómetro con los datos del campo magnético.

Y por último, para el Caster, se procede primero a calcular el Camber en dos direcciones con referencia a los ángulos del Toe a 10° y -10° para luego hallar su valor demostrado en la ecuación 2.23

Los datos adquiridos son los valores calculados aproximados de los ángulos de Camber, Toe y Caster. Al comparar los valores calculados con las especificaciones recomendadas, se puede determinar si la alineación de los neumáticos está dentro de los rangos aceptables. Si los valores están fuera de los rangos recomendados, es posible que se requieran ajustes adicionales para corregir la alineación de los neumáticos, como la adición de un magnetómetro para conseguir uno de los ejes restantes en la adquisición de los datos. Esto nos permiten realizar análisis más profundos para lograr la solución real del problema.

3.3. Validación de los resultados utilizando Arduino y un tornamesas

El último experimento se conforma en la combinación de los sensores de Unidades de Medición Inercial (IMUs) con la capacidad de ejecución en tiempo real de los microcontroladores Arduino. validaremos los resultados obtenidos en el experimento anterior construyendo un prototipo con un módulo de acelerómetro y giroscopio MPU6050 y el módulo del magnetómetro HMC5883L, asegurando así la confiabilidad y precisión de los ángulos de Camber, Toe y Caster medidos. Se busca asegurar la precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas, utilizando tanto el poder de cálculo de Python como la capacidad de ejecución en tiempo real de Arduino.

- Se construye un prototipo mecatrónico que consiste en una placa de Arduino y las conexiones a los módulos MPU6050 y HMC5883L
- Se desarrolla el código en base de los realizados en Colab, se transcribe a Arduino debido al lenguaje de programación diferente.
- Establecer los módulos para la transferencia de las muestras al Serial Monitor, lo que permite validar los resultados obtenidos en el experimento de verificación anterior.
- Se diseña un mecanismo como un tornamesas para la simulación de uno de los ejes del neumático y calcular los ángulos basado en los movimientos proporcionados.

Se empieza construyendo un prototipo con el Arduino y los integrados MPU6050 Y HMC5883L, ambos se conectan por medio del protocolo de comunicación serial I2C. Al tener dos integrados que cumplen funciones diferentes de adquisición de datos, se requieren dos conexiones I2C distintos, no obstante, todos los Arduinos comunes, como el Uno, el Mega o el Nano, solo tienen un puerto serial con dos pines SCL y SDA, es decir, que si se necesita comunicar con varios sensores o integrados utilizando este protocolo es necesario emplear una placa que posea un puerto Serial por cada dispositivo o en otros casos utilizar un multiplexor de hasta 8 canales para evitar interferencias en la comunicación.

Teniendo las conexiones del Arduino y los sensores, se procede a programar los temporizadores del Arduino para mejorar la precisión de las medidas y las funciones de los integrados del acelerómetro-giroscopio y magnetómetro respectivos.

Después, se emplea un mecanismo giratorio como un tornamesas para empezar a simular los movimientos de un neumático en uno de los ejes, el tornamesas debe constar del prototipo construido y programado para adquirir los datos de los sensores. El tornamesas puede accionarse de forma manual o automática por medio de otro microcontrolador, un acople hacia la base giratoria y una conexión de engranajes básico o impresos en PLA de las impresoras 3D como se muestra en la figura 3-2. En este caso, se usó el acople y los engranajes impresos en 3D y un motor paso a paso para que por medio de programación introduzco el número de grados a girar el tornamesas con el prototipo ensamblado.

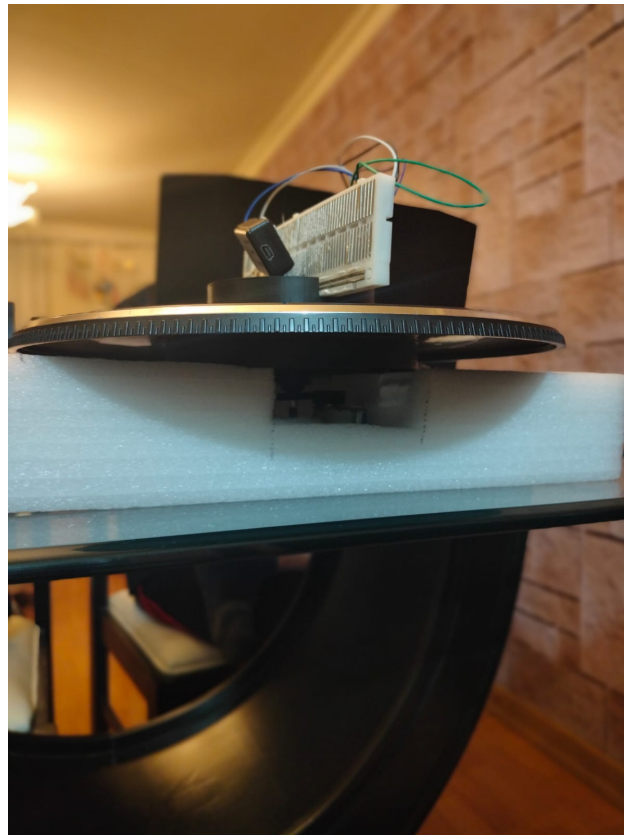


Figura 3.2: *Acople de los engranajes de movimiento en el mecanismo principal del tornamesas.*

Los datos de los ángulos de Camber, Toe y Caster obtenidos en tiempo real a través de Arduino permiten validar la precisión y confiabilidad de las mediciones realizadas. Al comparar los valores obtenidos con los calculados previamente en Python, podemos determinar la consistencia de los resultados. Si los valores medidos son consistentes y cercanos a los valores calculados, podemos tener mayor confianza en la precisión de las mediciones de alineación de

neumáticos. Esta validación brinda información crucial para evaluar y corregir la alineación de los neumáticos, asegurando un rendimiento óptimo y una conducción segura.

4 Resultados

4.1. Verificación del Ángulo de Camber

Para desarrollar la solución de esta problemática, lo primero que se planteó fue conseguir un acelerómetro, aunque también existen dispositivos móviles como los smartphones que tienen incorporado en su estructura tanto un acelerómetro como un giroscopio para medir las coordenadas de la gravedad y la posición de los tres ejes respectivamente como se mostró en la Figura 3.1.

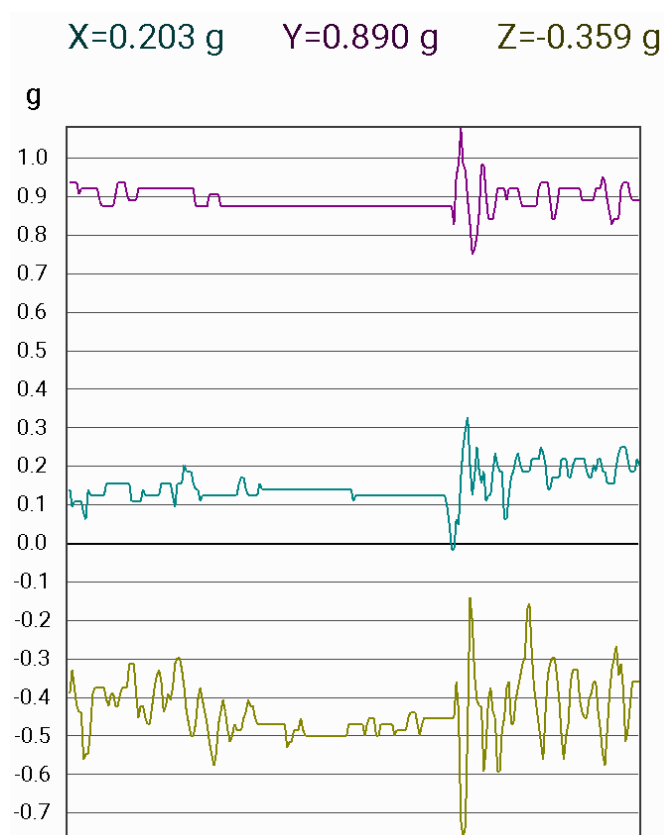


Figura 4.1: *Ejemplo de la aplicación móvil del acelerómetro con su telemetría.*

En la figura 4.1 se observa esa telemetría que mide el acelerómetro cuando inclinamos a una posición y ángulo determinado el celular. Como se había mencionado, incluso los dispositivos móviles presentan desalineaciones y/o perturbaciones cuando se hace la medición, por lo que para resolver el problema que se ha planteado [6], cogemos durante un periodo de tiempo unas 101 muestras de los datos de X, Y, Z para poder convertirlas en un archivo

.csv e implementarlas en un código de programación.

Para la programación utilizamos Google Colab con lenguaje Python, la ventaja de Colab es que se pueden ejecutar tanto algunas partes del código como la ejecución completa de la misma.

En la primera parte, se procede primero a escoger un dato fijo de las coordenadas de X, Y y Z del acelerómetro e implementar las ecuaciones 2.5 y 2.6 del capítulo 2, donde se calcula el ángulo ψ y el ángulo θ o Camber en caso de que el dato sea sin perturbaciones.

Al hacer el cálculo obtendremos el valor del ángulo de guiñada y del Camber, siendo así, que para la segunda parte se toma el archivo .csv de los datos medidos del acelerómetro por el celular para realizar la calibración nombrado en el capítulo 4.5. En primer lugar, graficamos con el graficador de Colab los datos de X, Y y Z introducidos en el archivo .csv como se evidencia en la figura 4.2.

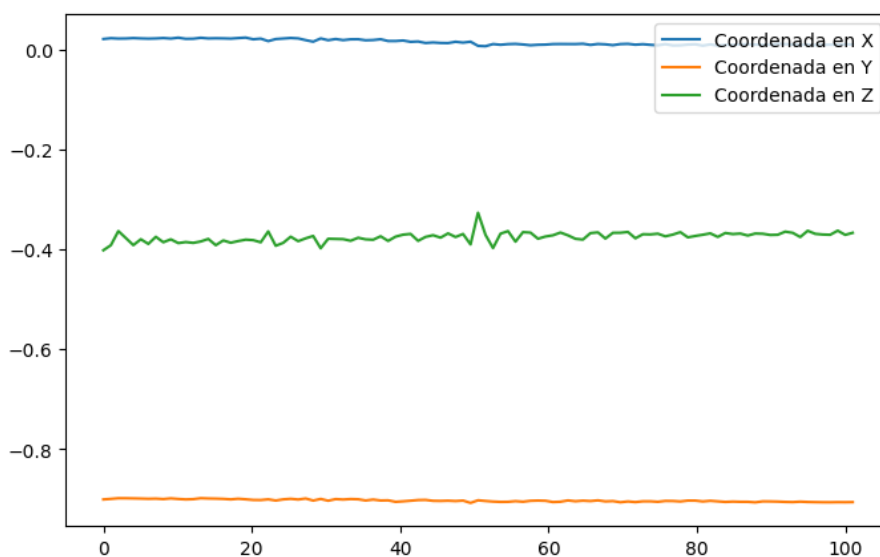


Figura 4.2: *Gráfica de la muestra de datos del acelerómetro en Colab.*

Utilizando las muestras del archivo, separamos las tres coordenadas en una lista y procedemos a calcular las ecuaciones de calibración del acelerómetro. Estas ecuaciones se obtienen a partir de las muestras de la 2.10 hasta la 2.13, donde se implementa el parámetro λ_k de la función de Lagrange.

Antes de realizar la operación de optimización, lo que se hace es un pequeño análisis de los datos actuales antes de Lagrange, lo que se observa es que si aplicamos el método de mínimos cuadrados al promedio de cada una de las coordenadas, obtendremos una línea donde más adelante se explica por qué tiene una relación con el promedio utilizado de los

datos al aplicar Lagrange, al igual que su línea promedio de los datos si aplicamos la ecuación 2.13 de λ_k . La ecuación de los valores promedios quedaría:

$$E[x] \approx \frac{\sum_{i=1}^N \vec{x}_k}{N} \quad (4.1)$$

$$E[y] \approx \frac{\sum_{i=1}^N \vec{y}_k}{N} \quad (4.2)$$

$$E[z] \approx \frac{\sum_{i=1}^N \vec{z}_k}{N} \quad (4.3)$$

A diferencia de las ecuaciones 2.10, 2.11 y 2.12, aquí no se toma en cuenta el multiplicador de Lagrange, por lo que dado el número λ_k no afectaría mucho el valor promedio esperado de las coordenadas en comparación con el valor optimizado. Posteriormente, se aplica el método de mínimos cuadrados de la siguiente manera:

$$E = \sqrt{(E[x])^2 + (E[y])^2 + (E[z])^2} \quad (4.4)$$

Donde E es la línea esperada de los datos del acelerómetro donde se grafica después de obtener la línea optimizada O y la línea promedio de los datos P [12]

Esperamos que este valor sea menor, probablemente entre 0 y 2. Una vez encontrado, aplicamos λ_k a las ecuaciones mencionadas del 10 al 12 para obtener los valores óptimos de las tres coordenadas. Si realizamos un análisis similar utilizando estos valores óptimos, podemos concluir que:

$$O = \sqrt{(x_k)^2 + (y_k)^2 + (z_k)^2} \quad (4.5)$$

Y por último, se obtiene la línea del promedio de los datos. Se utiliza el denominador de la ecuación 2.13.

$$P = \sum_{i=1}^N \sqrt{(x_{k,i})^2 + (y_{k,i})^2 + (z_{k,i})^2} \quad (4.6)$$

Ya al obtener las tres líneas, se hace una gráfica diferente junto con las 101 muestras promediadas del acelerómetro como resultado del problema de optimización de Lagrange revelado en la figura 4.3.

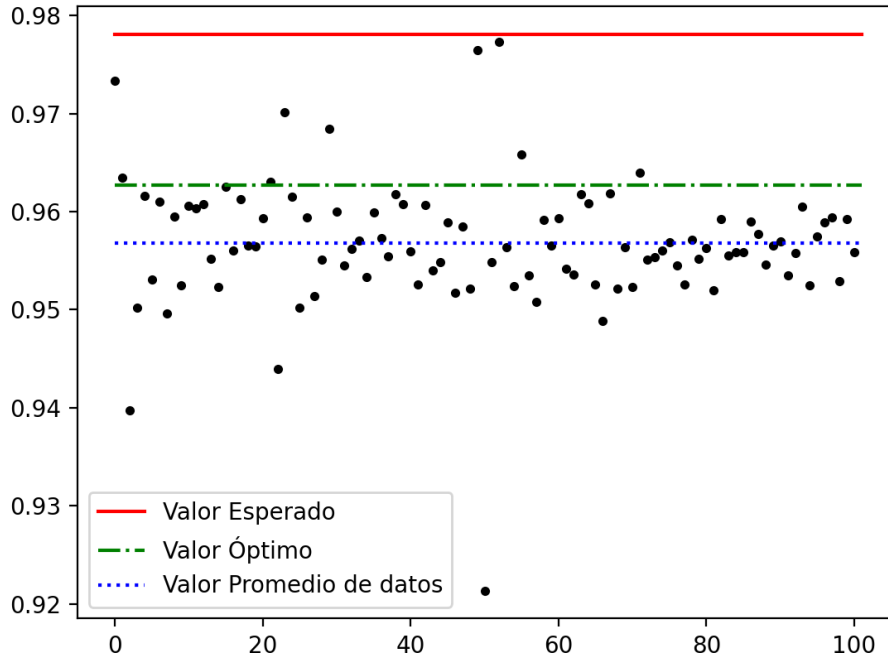


Figura 4.3: *Gráfica de las líneas esperadas, óptimas y promedio de los datos del acelerometro.*

Al final, se cumple que este método demuestra que tan cerca están los datos de la línea óptima que en este caso son las limitantes de Lagrange; por lo tanto, los valores óptimos de las coordenadas se pueden reemplazar en la ecuación 2.6 para así tener el nuevo valor.

Ese nuevo valor se utiliza para hallar el ángulo θ del Camber. Para ello, se debe tener en cuenta que el valor anterior no se encuentra en terminación de ángulo, el valor representa la distancia recorrida entre el valor inicial 0 hasta el valor dado. Para convertirlo en ángulo, se revisa la dimensión del neumático en pulgadas, y por conversión, el valor se obtiene en términos de grados o radianes dependiendo del uso.

Se puede también realizar las pruebas de los coeficientes del filtro complementario para comparar los diferentes resultados que se obtienen al realizar la mitigación del ruido, entre más preciso sean los coeficientes, más conciso será la gráfica y menores perturbaciones presentará el valor final como se demuestra en la figura 4.4 en escala logarítmica.

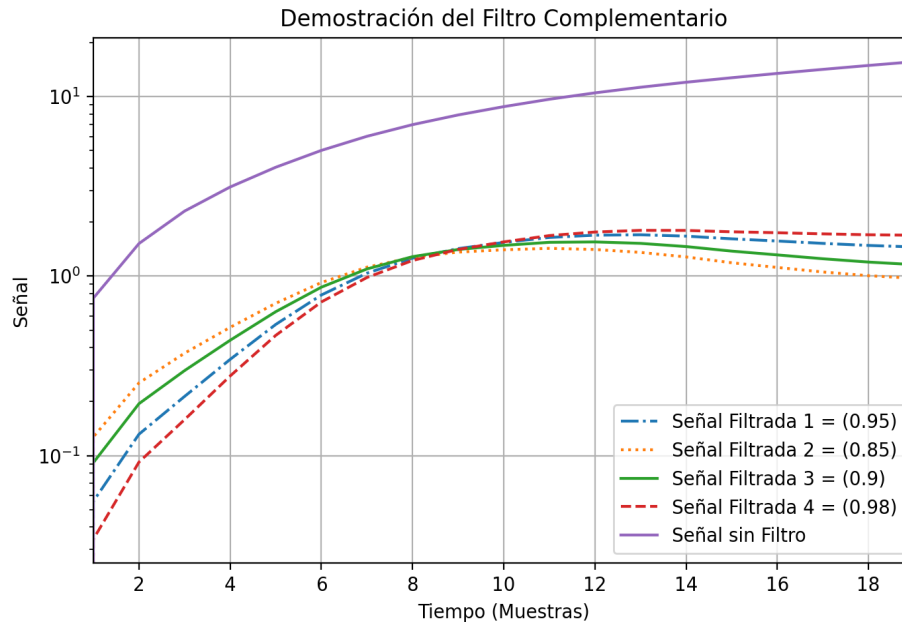


Figura 4.4: *Gráficas de los diferentes filtros complementarios aplicados al ángulo de Toe y su señal sin filtrar en escala logarítmica.*

4.2. Verificación del Ángulo de Toe

Usando el mismo dispositivo móvil o el integrado del acelerómetro y giroscopio como el MPU6050, se realiza la visualización de las muestras de los ángulos de Euler como vectores de guiñada, balanceo y cabeceo del giroscopio. En el capítulo 2.11.2, la calibración para el ángulo Toe es en el eje Z denotado $(0, 0, 1)$, mientras que el eje X se denota por el vector $(1, 0, 0)$, y el eje Y como $(0, 1, 0)$. Usando las ecuaciones de la 2.15, 2.16, 2.17, 2.18 y 2.19, en el lenguaje Python, se comprueba que da como resultado el vector Z unitario. Se puede también obtener el vector normalizado en Z $(0, 0, 1)$ realizando un producto cruz entre los vectores de la calibración del eje X y el eje Y.

Con el giroscopio incorporado en el módulo, se efectúa el movimiento en el eje Z para realizar el cálculo del Toe, al ser medido como velocidad angular. En la figura 4.6, se denota parcialmente como la representación de un pulso positivo o negativo dependiendo de la dirección que se lleve a cabo. Este pulso representa que al mover el giroscopio se visualiza las ondas y vuelven a su estado inicial 0, esto es debido a que el giroscopio no está detectando un giro completo, cuando la rueda gira en un sentido a una velocidad constante, la grafica y sus datos se vuelve también constante en el eje en que se mide demostrado en la figura 4.5.

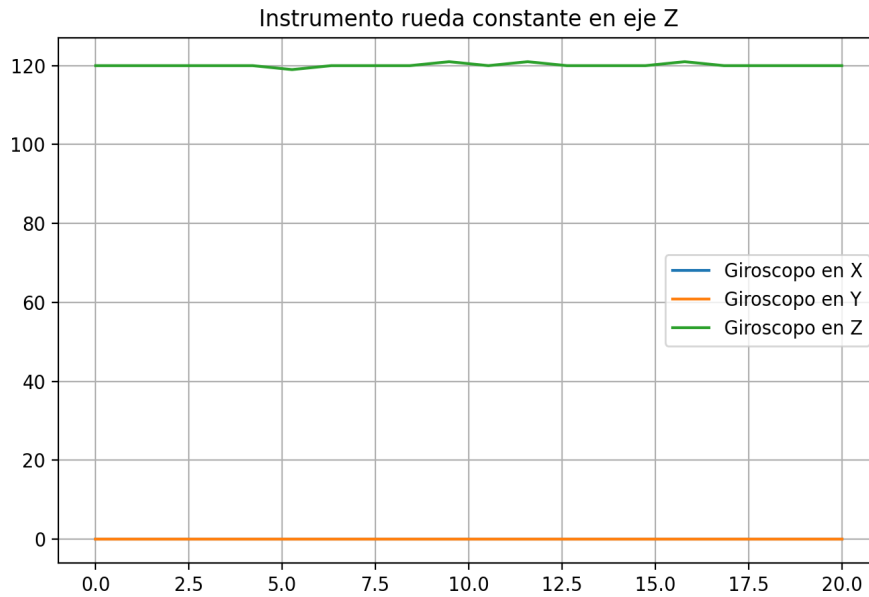


Figura 4.5: *Representación de la medición del giroscopio en un neumático girando de manera constante en Python.*

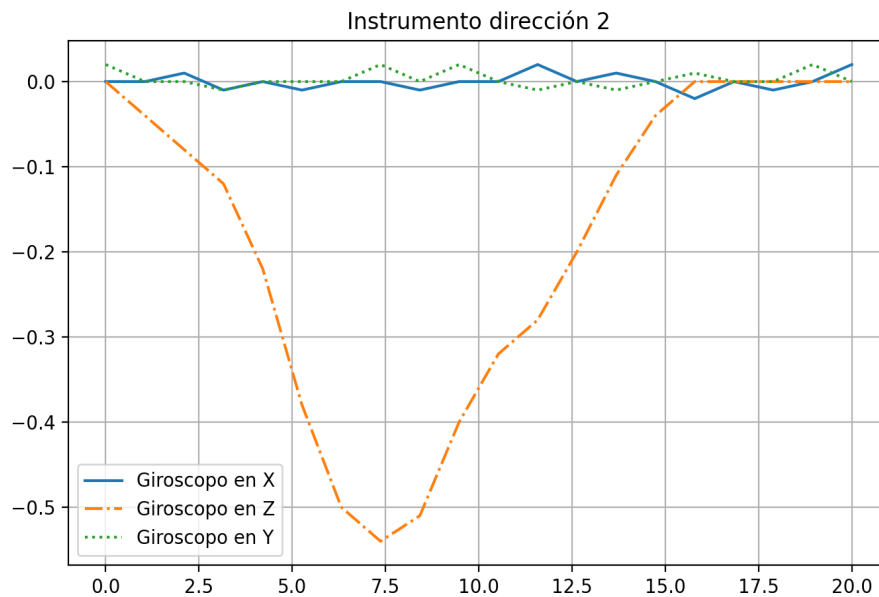


Figura 4.6: *Gráfica de la Dirección parcial en el eje Z del giroscopio en Python*

Con los datos obtenidos de los ángulos de Euler, se inicia la integración de cada uno de

los vectores por la ecuación 2.20, para obtener los nuevos datos en términos de medición angular.

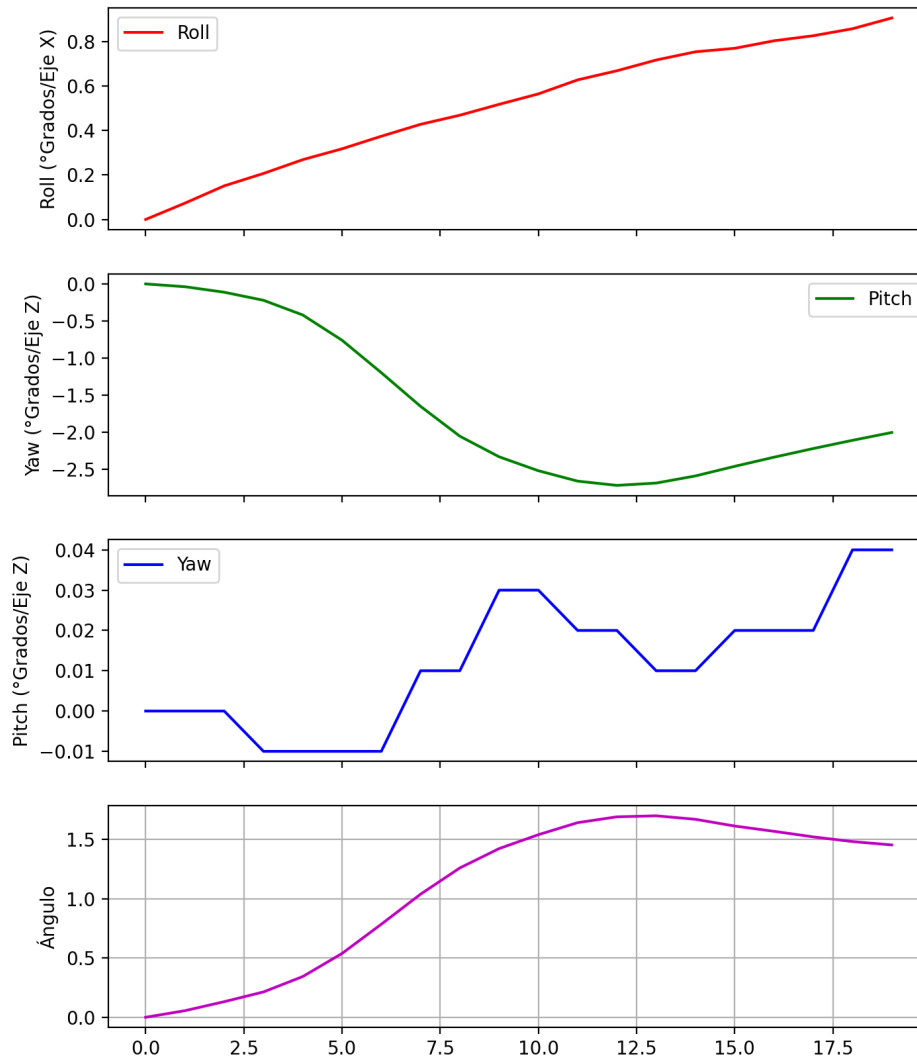


Figura 4.7: *Gráficas de los ejes y el promedio del ángulo con respecto al tiempo del eje Z (guiñada) en Python.*

En el programa de Python utilizado, el eje Z de la medición del ángulo de guiñada no muestra deriva o error acumulativo en la medición. Esto se debe a que las pruebas de software utilizadas para el cálculo del ángulo no involucran directamente los componentes físicos

del acelerómetro y giroscopio. Sin embargo, si se utilizan los componentes físicos del acelerómetro y giroscopio, se puede presentar el problema de la deriva. La deriva se refiere al error acumulativo que se produce debido a factores como el ruido de medición, la precisión limitada de los sensores y los errores en los algoritmos de procesamiento de datos.

En este caso, se menciona que el eje Z, que corresponde a la aceleración gravitatoria, tiende a presentar una deriva menor en comparación con los otros ejes. Esto se debe a que la aceleración gravitatoria a lo largo del eje Z es constante y relativamente grande en comparación con las aceleraciones en los otros ejes. Esto hace que sea más fácil distinguir la deriva de las mediciones reales. Es importante tener en cuenta estas consideraciones al utilizar los sensores físicos y algoritmos de procesamiento de datos, ya que la deriva puede afectar la precisión de las mediciones de los ángulos y requerir técnicas adicionales para mitigar o corregir este error.

4.3. Verificación del Ángulo de Caster

Para el ángulo de Caster tenemos que mover el neumático en dirección del eje Z (Ángulo del Toe) a cierto punto, las opciones recomendadas están entre 10° y 20° para poder realizar nuevamente las muestras del Camber en ambas direcciones, esto con el fin de realizar la ecuación 2.23, y poder hallar el Caster. En las primeras pruebas se realizó una simulación en Python con movimientos del eje Z explicado en las coordenadas del Toe para hallar los diferentes ángulos de Camber. En la figura 4.8 se muestran los datos en diferentes coeficientes del filtro complementario. Cabe aclarar que estas primeras pruebas no son el cálculo del ángulo de Caster porque no se utiliza su concepto teórico, en vez se utiliza el mismo procedimiento del Camber.

Al tener un integrado como el MPU6050, este es programable por medio del IDE de Arduino, la cual permite capturar los datos de aceleración (Acelerómetro) y dirección (Giroscopio) en los tres ejes. Primero se tiene que calibrar el integrado por medio de un código predeterminado que proporcionan las librerías para evadir cualquier error de medición y realizar un setpoint que declara el valor nulo (0 en todos los ejes).

El siguiente paso es el más sencillo, tomar las validaciones obtenidas de los anteriores capítulos en Colab y simplemente realizar los mismos cálculos y las rutinas en Arduino, esto teniendo en cuenta la declaración de las variables en 0 en la función void(setup) antes de realizar las ecuaciones en la función void(loop).

En el diseño del código, se usó primero la función convencional de cualquier programa de Arduino, la función delay(), esta función indica el tiempo de muestreo de los datos. Sin embargo, existe un problema con esta variable de demostración, y es que no utiliza todo su potencial de muestra y se pierde información de la misma al momento de captura, se vuelve más complicado si los mensajes de salida son más largos. La razón es porque el Arduino, al enlazar con el MPU6050 se comunica a través de UART(Transmisor-Receptor Asíncrono Universal) ya que el integrado incorpora más de un sensor (Acelerómetro y Giroscopio).

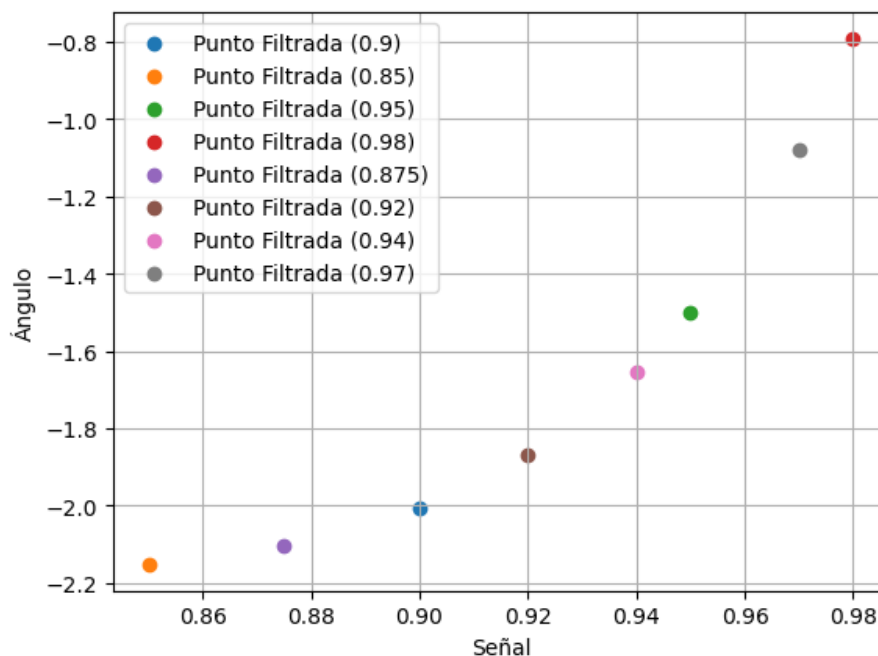


Figura 4.8: Gráficas de los diferentes filtros aplicados al las primeras pruebas del ángulo de Caster y su señal sin filtrar.

El verdadero problema es que la función `delay()` es una función de bloqueo, lo que significa que detiene la ejecución del programa hasta que haya transcurrido el tiempo especificado. Esto puede causar problemas si el programa necesita realizar otras tareas. También afecta la velocidad de comunicación (baudios) del Arduino, debido a que igualmente se pierde referencias.

La solución se da en usar el temporizador del mismo Arduino para trabajar con interrupciones. Una interrupción es un evento que puede ocurrir en cualquier momento y, cuando lo hace, detiene el flujo normal del programa para manejar el evento. Las interrupciones se utilizan para manejar eventos externos, como presionar un botón o actividades internos, como un desbordamiento. En el código, La interrupción se emplea para actualizar las lecturas del sensor MPU6050 y realizar cálculos, permitiendo que el programa haga otras tareas durante ese tiempo, como manejar entradas y salidas del usuario o actualizar una pantalla como un analizador lógico.

4.4. Corrección de las desviaciones del eje Z en cálculo del Toe

Indicado anteriormente, las derivas del eje Z en el ángulo de guiñada se relacionan no solo con su eje gravitacional, sino por lo común que son estos problemas en cualquier módulo de

giroscopio. Por lo que se necesitan usar otros sensores para establecer un nuevo parámetro y de acuerdo al mismo, realizar los cálculos necesarios para estabilizar el ángulo y eliminar la deriva. En la Figura 4.9, por medio del Serial Plotter del Arduino, se muestra la gráfica donde se denota la deriva del eje Z con un MPU6050 calibrado y estático [19].

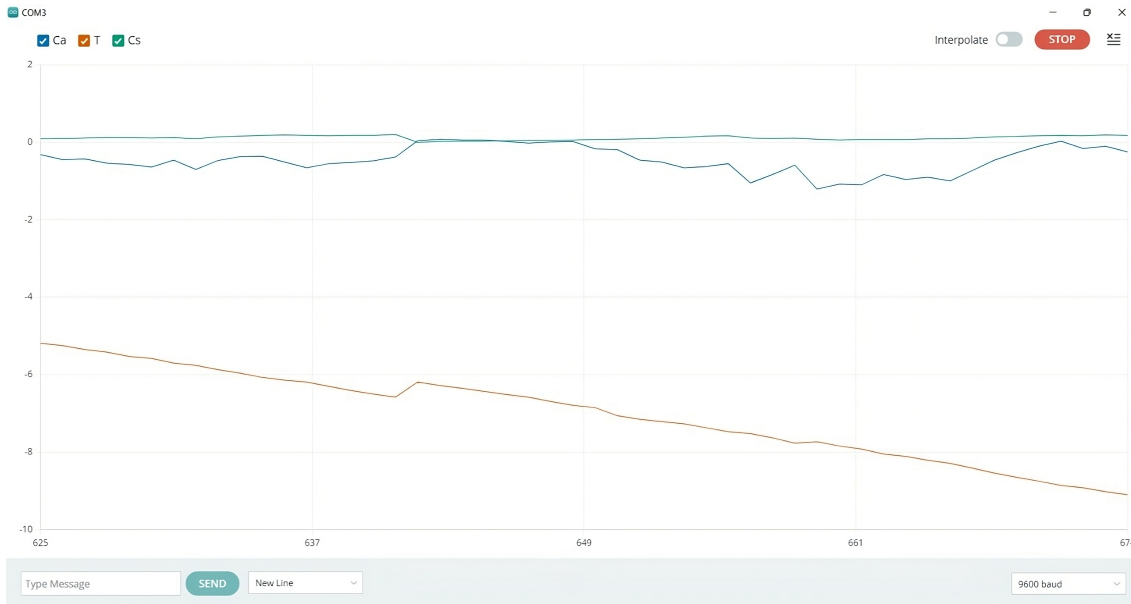


Figura 4.9: *Demostración de la deriva en el eje Z en Arduino usando el módulo MPU6050.*

Y es que el MPU6050, al ser un módulo de 6DOF (3 ejes de acelerómetro y 3 ejes de giroscopio) no es capaz de eliminar la deriva si solo se tienen los dos sensores, mucho menos si se aplican los filtros mencionados como el filtro complementario o el filtro Kalman [27], porque para el caso del ángulo de guiñada no estamos utilizando el acelerómetro para el cambio de gravedad y así mitigar los errores, haciendo que el ángulo presente desviación acumulativa. Para eliminar de forma definitiva esa deriva, se necesita utilizar la fusión sensorial con nuevos parámetros de medición. En los mayores casos, cuando se calcula la posición tridimensional de un cuerpo con un MPU, se utiliza como un parámetro adicional, un compás o un magnetómetro.

El magnetómetro puede proporcionar información sobre el campo magnético de la Tierra, que se puede utilizar para corregir la deriva en el eje Z del ángulo de guiñada. Sin embargo, mencionado anteriormente en el capítulo 2, la precisión del magnetómetro puede verse afectada por campos magnéticos externos y el proceso de calibración puede llevar mucho tiempo. Por lo que se recomienda medirlo en lugares más abiertos o al aire libre.

Primero, se utiliza el sensor de magnetómetro HMC5883L en un código aparte para el cálculo del ángulo de rotación en el eje Z utilizando los datos y la operación de la ecuación 2.22,.

Después de calibrar y comprobar su funcionamiento, se procede a realizar la fusión sensorial de los dos módulos [7]. Aunque el integrado MPU6050 se considera como fusión sensorial debido a que implementa el acelerómetro y el giroscopio para la medición de datos más precisos, los problemas de deriva persisten, por lo que se utiliza el sensor del magnetómetro HMC5883L para desarrollar los cálculos restantes, combinando sus datos y obteniendo la orientación correcta de los ángulos del neumático.

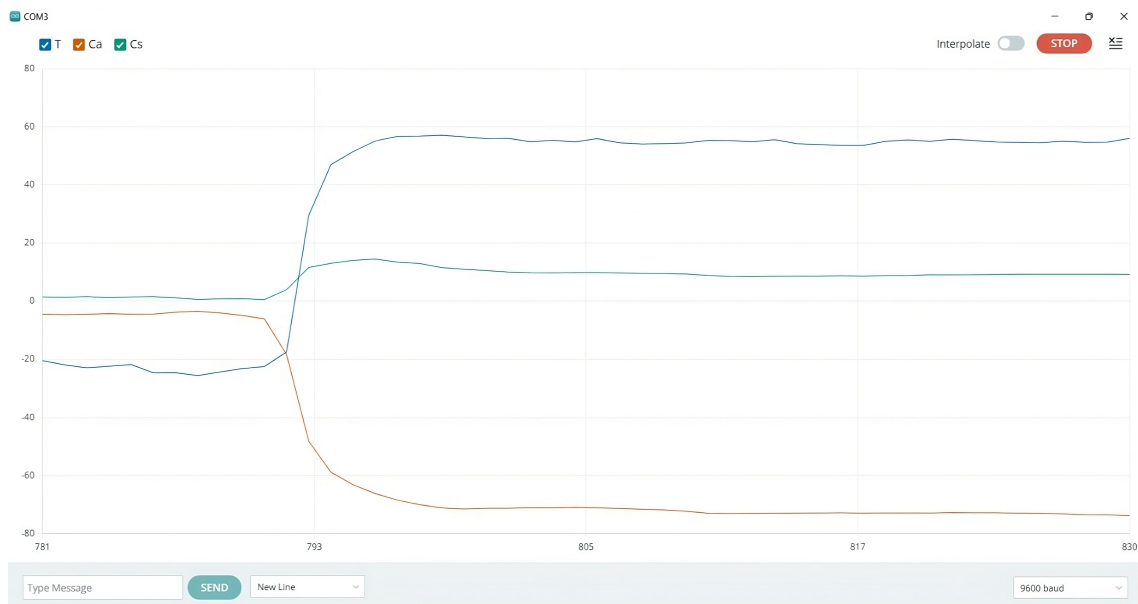


Figura 4.10: *Gráficas de las primeras pruebas de la fusión sensorial entre los módulos de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro para el cálculo de los ángulos del Camber y Toe del neumático*

En la figura 4.10, se demuestra que los módulos presentan ahora estabilidad en cuanto a la adquisición de las muestras de los ángulos Camber y Toe en sus ejes correspondientes, por lo que el sistema de programación y obtención de datos está calibrada, validando los resultados de cada uno de los temas desarrollados en el capítulo 2, dejando como última tarea la medición del Caster.

4.5. Corrección del Ángulo de Caster

Con el fin de poder encontrar de forma más precisa y completa el Caster, se necesita mover la rueda en los dos sentidos (izquierda y derecha) para poder hallar las variaciones y diferencias del Camber, lo que representa en la ecuación 23 del capítulo 3. También se asumirá que el ángulo del Toe gira exactamente de 10 a 20° en ambos sentidos dependiendo del sistema de alineación que se utiliza, por lo que solo se mide dichas variaciones en el Camber.

4.6. Validaciones Finales

El desarrollo de esta ratificación consiste en probar los métodos de cálculo y compararlos con un sistema de alineación 3D de cualquier marca. Estos sistemas permiten la medición de estos ángulos a través de un sistema óptico de posicionamiento de placas conectadas a las llantas y mediante construcción tridimensional. Normalmente, estos sistemas son costosos debido a su tamaño, el software especializado del fabricante, ahorro de tiempo, la habilidad de almacenar hasta 100 marcas, 50000 modelos y funciones adicionales.

Se procede a montar el prototipo en uno de los neumáticos para calcular sus respectivos ángulos, el Camber y el Toe se visualizarán en el Serial Monitor del Arduino, y para el calcular el Caster, usamos el magnetómetro conectado al neumático para posicionarlo a 10 o 20° y tomar los dos Camber de cada uno. Cada resultado se contrastará con los ángulos que el sistema dedicado a la alineación y balanceo efectuará.

Primero, las verificaciones realizadas en los pasos anteriores con el propósito de comprobar los resultados y de que estos coincidan con las teorías mencionadas en el capítulo 3 las validaciones de los ángulos. Se diseñó un pequeño mecanismo con un tornamesas para poder realizar los movimientos de los tres ejes visualizado en la figura 4.11, usando también un motor paso a paso para controlar el movimiento y finalmente acoplado el Arduino, los módulos y sensores correspondientes en un circuito o protoboard para dicha verificación antes de poder montarlo en planta.

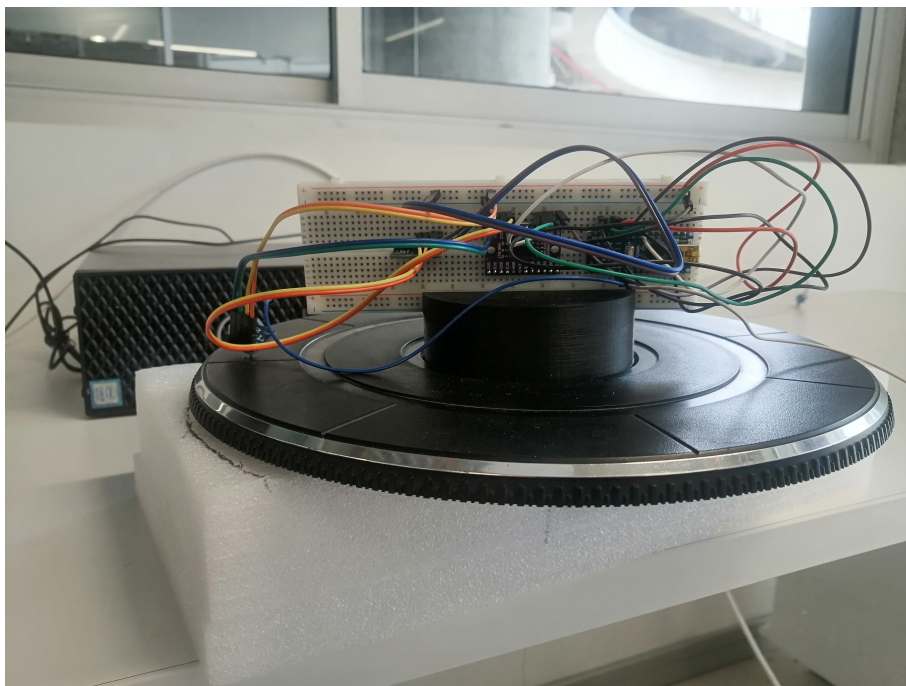


Figura 4.11: *Diseño de Tornamesas y prototipo acoplado*

4.7. Comparación Alineador-Prototipo

La validación final se desarrolla en acoplar o en colocar de forma paralela el prototipo junto con una de las placas del neumático del alineador dedicado por visión 3D, los mecánicos encargados de la alineación realizan las primeras pruebas de balanceo instalando dichas placas al neumático del vehículo de acuerdo a su diámetro, lo primero que se halla es el ángulo Camber y Toe. Finalmente, para conseguir el Caster, el mecánico mueve el volante para girar la dirección de los neumáticos a 10° en cada sentido, aplicando la teoría del cálculo del Caster en la ecuación 23. Se realizaron 3 pruebas. La primera fue con un vehículo de la Marca Kia, un modelo Picanto del año 2015; la segunda prueba con un Renault Sandero del 2018 con diámetro de 15 pulgadas y la tercera prueba fue con un Volkswagen Gol de 2017, mismo diámetro del Sandero, 15 pulgadas.

En la figura 4.12, el diámetro de la rueda del Kia es de 13 pulgadas (330.2 mm), utilizando como referencia la medida, el prototipo se programa con el acelerómetro, giroscopio y magnetómetro para proceder a calcular sus respectivos ángulos y compararlos con el sistema de alineación del taller. Los resultados fueron anotados en la tabla 1.

Prueba 1: Kia Picanto (2015)	Alineador	Prototipo
Camber	-0.8°	-0.8°
Toe	1.2°	0.9°
Caster	2.0°	1.6°

Tabla 4.1: Comparación de los datos del prototipo y alineador en el Kia Picanto (2015).

Para las pruebas 2 y 3 con el Sandero y el Gol, se utilizó el mismo tamaño del rin, como se muestra en las figuras 30 y 31 correspondientes (15 pulgadas [381 milímetros]). Al tener una rueda de la misma medida, se puede suponer que las variaciones de los ángulos no cambian entre los dos vehículos. No obstante, este no parece ser el caso debido a que son de diferente marca, modelo y año de fabricación, igualmente, se debe tener en cuenta las especificaciones técnicas que suministran las compañías de autos para una correcta y adecuada alineación de los neumáticos como si fueran salidos recientemente de manufactura, además de algunos casos que relacionan con las pretensiones de los usuarios que puedan modificar los ángulos para lograr algunas funciones de manejo personalizado. Las pruebas determinaron que cada ángulo de los dos vehículos son distintos y se comprueban en las tablas 2 y 3 respectivamente.

Prueba 1: Renault Sandero (2018)	Alineador	Prototipo
Camber	-0.4°	-0.7°
Toe	1.0°	1.0°
Caster	2.8°	1.8°

Tabla 4.2: Comparación de los datos del prototipo y alineador en el Renault Sandero (2018).

Prueba 1: Volkswagen Gol (2017)	Alineador	Prototipo
Camber	-0.7°	-0.7°
Toe	0.05°	0.2°
Caster	4.8°	5.5°

Tabla 4.3: Comparación de los datos del prototipo y alineador en el Volkswagen Gol (2017).

Los resultados del proceso de validación revelaron una estrecha concordancia entre los ángulos de alineación obtenidos del sistema prototipo y la máquina de alineación de ruedas. A pesar de que el prototipo tenía un rango de 1° de diferencia en comparación con la máquina, los ángulos mostrados exhibieron patrones consistentes y estaban dentro de un margen de error aceptable.

Específicamente, los ángulos de Camber y Toe obtenidos del sistema prototipo estaban dentro de $\pm 0,5^\circ$ de los ángulos obtenidos de la máquina de alineación de ruedas para ambos vehículos. El Caster cuenta con desviaciones de $\pm 1^\circ$ entre el sistema prototipo y el alineador, pero esto se debe al cálculo de la ecuación 23 que realiza las diferencias del Camber a 10° de Toe, por lo que se puede recomendar hacer el experimento unas cuantas veces para mitigar la diferencia del Caster con respecto al sistema.

Estos hallazgos indican la efectividad y confiabilidad del sistema prototipo para medir y calcular con precisión los ángulos de alineación, incluso cuando se compara con una máquina de alineación de ruedas estándar. El rango de diferencia de 1° del sistema prototipo en comparación con la máquina de alineación de ruedas no tuvo un impacto significativo en la precisión general de los ángulos medidos. Esto valida la capacidad del sistema prototipo para proporcionar mediciones confiables del ángulo de alineación para vehículos con diferentes ángulos de Camber, Toe y Caster en cualquier tipo de vehículo.

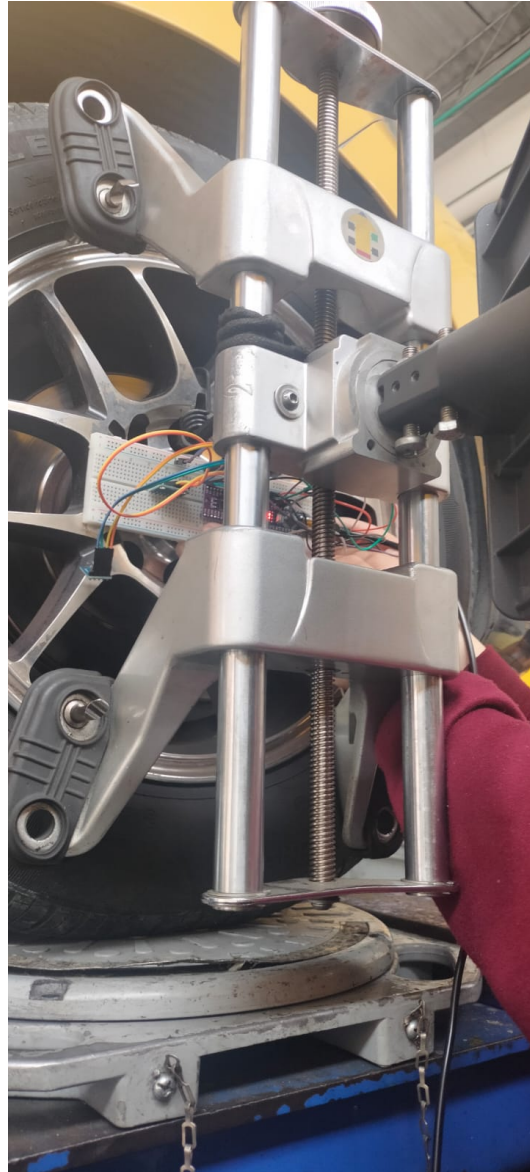


Figura 4.12: *Montaje del prototipo de Prueba 1 (Kia Picanto (2015)).*



Figura 4.13: *Montaje del prototipo de Prueba 2 (Renault Sandero (2018)).*



Figura 4.14: *Montaje del prototipo de Prueba 3 (Volkswagen Gol (2017)).*

5 Propuesta de diseño: Plataforma de Movimiento Stewart 6DOF

Una plataforma Stewart 6DOF puede utilizarse para controlar con precisión la posición y orientación de una rueda de automóvil, con el fin de calibrar el sistema de alineación. La plataforma Stewart provee al usuario con la posibilidad de cambiar los diferentes ángulos de la rueda de forma controlada, precisa y repetible.

La plataforma es un manipulador paralelo que cuenta con seis actuadores prismáticos, es decir, es un sistema que tiene 6 grados de libertad (6DOF). Esto permite que un posible cuerpo suspendido se logre mover libremente en sus tres movimientos lineales X, Y, Z (lateral, longitudinal y vertical) y las tres rotaciones (Guiñada, Cabeceo y Balanceo).

Existe un problema cinemático inverso, de la cual consiste en encontrar los valores que deben adoptar las coordenadas articulares de la plataforma $q = [q1, q2. \dots q6]$ para que su extremo se posicione y oriente según una determinada localización espacial. Al contrario que el problema cinemático directo, el cálculo de la cinemática inversa no es sencilla, ya que consiste en la resolución de una serie de ecuaciones fuertemente dependiente de la configuración del robot, además de existir diferentes puntos $q = [q1, q2. \dots qn]$ que resuelven el problema [13].

- **Vector posición de un cuerpo** Es posible definir la localización de un cuerpo en el espacio a partir de las coordenadas cartesianas de un punto cualquiera presente en el cuerpo. Se observa que el punto O del cuerpo está posicionado en las coordenadas:

$$O' = O_x X + O_y Y + O_z Z$$

Que pueden ser representados en forma vectorial como:

$$O' = \begin{bmatrix} O_x X \\ O_y Y \\ O_z Z \end{bmatrix}$$

- **Matriz de rotación de un cuerpo** A pesar del vector posición, presentado anteriormente, definir la posición del cuerpo en el espacio, se sabe que el mismo puede tener múltiples diferentes orientaciones, resumiendo, él puede estar rotado por un ángulo

cualquiera en torno de los tres ejes del sistema de referencia. Así, para describir la orientación de este cuerpo, se hace necesario la ubicación de un segundo sistema de referencia acoplado a este cuerpo, de forma a permitir la correcta descripción de cuanto este cuerpo está rotado en lo que se refiere al sistema de coordenadas de referencia de la base.

Se toma el sistema de referencia $X' Y' Z'$ Localizado en el punto O , pudiendo ahora definir las posibles relaciones (Ángulos α, β, γ) en sentido antihorario en torno de cada uno de los ejes $X-Y-Z$ del sistema de referencia [10].

- **Cinemática Inversa** La plataforma Stewart también tiene sus ejes de coordenadas $X; Y; Z$. En el centro de gravedad de la misma, tomando el eje Z como perpendicular al centro de gravedad. Cada uno de estos sistemas de coordenadas es denotado como la base y el superior respectivamente.

La cinemática inversa de una plataforma Stewart es el cálculo de la longitud de la pierna dada la posición requerida de la plataforma. La cinemática directa no es distinta y solo se puede determinar con restricciones adicionales o entrada de sensor. La plataforma consta de dos marcos, el marco base y el marco de la plataforma que están conectados con seis patas de longitud variable. Con esta configuración, la plataforma se puede mover en tres dimensiones de traslación y tres dimensiones de rotación, como se observa en la figura 5.1 [17].

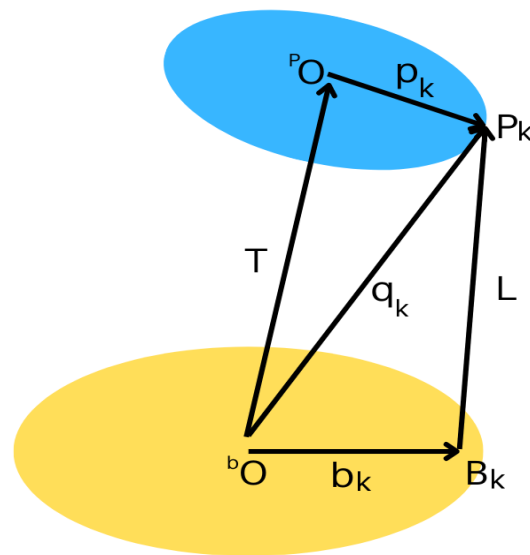


Figura 5.1: *Diagrama de cuerpo libre de la plataforma Stewart [17]*

En la cinemática inversa, utilizamos un prototipo a baja escala usando servomotores que actúan como sistemas de biela-manivela en los anclajes de tanto la base superior

como de las boquillas que conectan al eje del servo.

Teniendo en cuenta el vector posición del cuerpo, la ecuación de una pierna quedaría:

$$q_k = T + R_b * p_k = T + R \times p \times \bar{R}$$

$$L = P_k - B_k = T + R \times p \times \bar{R} - b_k \quad (5.1)$$

Donde:

- L Es la longitud de una de las piernas de la plataforma.
- P_k Es el Anclaje de la plataforma base.
- B_k Es el Anclaje de la plataforma superior.
- T Es el vector de posición denotado por: $T = (t_x, t_y, t_z)^T$
- $R \times p \times \bar{R}$ Es la ecuación del cuaternio unitario, una notación matemática para representar las orientaciones y las rotaciones de objetos en tres dimensiones.
- q_k es el vector de cálculo de la pierna de la plataforma con respecto a la plataforma base y plataforma superior.
- R_b es la rotación de la plataforma por la ecuación del cuaternario.

5.1. Diseño

Diseño Hexagonal

El diseño de la plataforma se hace en escala pequeña, partiendo del modelo matemático mencionado de forma hexagonal. Un hexágono posee un alto grado de simetría, con cada pierna distribuida uniformemente alrededor de la plataforma central. Esta disposición simétrica ayuda a lograr cargas y fuerzas equilibradas en la plataforma, lo que da como resultado una estabilidad y un rendimiento mejorados.

Se utilizó como software Fusión 360 de Autodesk por ser un programa robusto de construcción en 3D de elementos y su sencillo interfaz. Como materiales, las piezas como las bases superior e inferior (preferiblemente en forma de hexágono) que conectan los servomotores y las bielas fueron en impresión 3D con material PLA y se incorporan 6 servomotores para los 6 grados de libertad del dispositivo. Teniendo en cuenta la aplicación de la plataforma, estos parámetros podrían variar desde la escala de centímetros hasta metros; en el caso de este proyecto se tomó la escala de milímetros porque el modelo está definido como un prototipo de carácter experimental para la validación de los ángulos; pero en el caso de los simuladores más robustos, generalmente se usa la escala de metros y para sus piernas se utilizan actuadores lineales con el modelo matemático mencionado en el capítulo 3, por las diferentes aplicaciones a las que se encuentra expuesto [39].

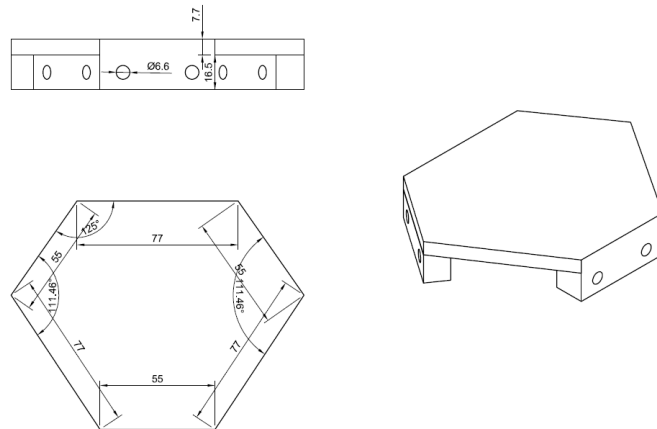


Figura 5.2: *Diseño de la base superior*

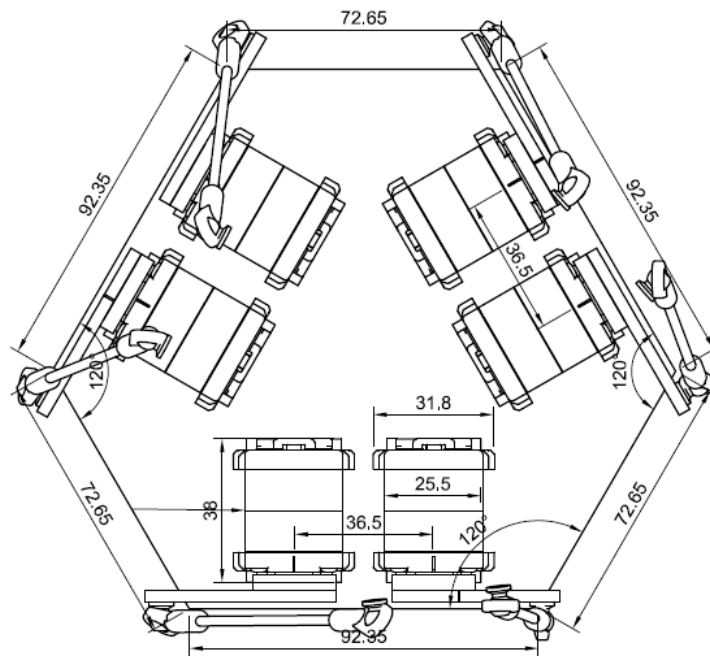


Figura 5.3: *Diseño de la base inferior y distancia de servomotores*

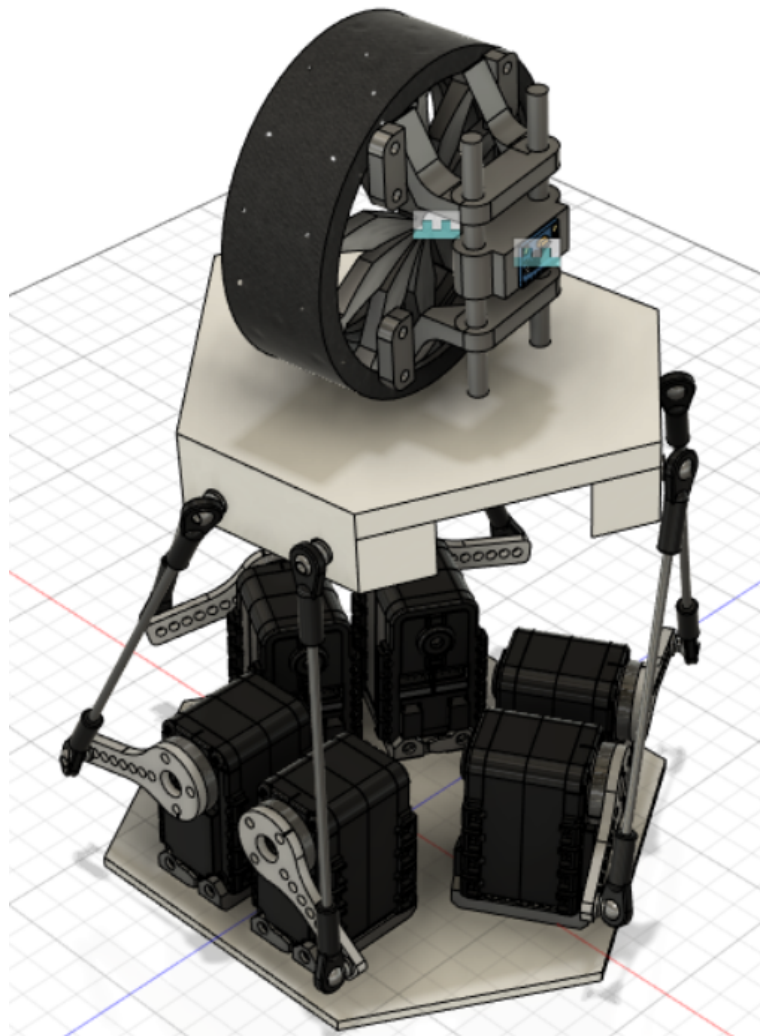


Figura 5.4: *Diseño de la plataforma Stewart 6DOF con el neumático y el módulo en Fusión 360*

6 Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

Este trabajo tuvo como objetivo desarrollar una solución integral para resolver los ángulos de alineación del vehículo utilizando sensores de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. El objetivo principal fue construir un prototipo mecatrónico para simular los movimientos de las ruedas y calcular los ángulos de alineación con precisión. A lo largo de esta investigación, se adoptó un enfoque sistemático para abordar los desafíos asociados con la alineación de vehículos y diseñar una metodología eficaz para la determinación del ángulo.

Se corrobora que se puede usar la aplicación en la que se utiliza la fusión de los sensores de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. Estos sensores se colocaron estratégicamente en un tornamesas que simulaba los movimientos de las ruedas en uno de sus ejes, lo que permitía medir los ángulos de alineación dinámica. La plataforma se diseñó para realizar en un futuro simulaciones realistas del movimiento de las ruedas y minimiza los errores de medición al compararlos con un sistema dedicado de alineación, teniendo a la par la calibración de los módulos.

Se llevaron a cabo extensos experimentos de los datos utilizando programaciones en Python y Arduino simulando los sensores, una variedad de modelos de vehículos y condiciones de manejo para validar la precisión y confiabilidad del enfoque propuesto. Los datos recopilados se procesaron y analizaron utilizando técnicas avanzadas de procesamiento de señales y fusión de datos. Este análisis permitió la extracción de ángulos de alineación, proporcionando una base para evaluar la efectividad de la metodología desarrollada.

Los resultados obtenidos de los experimentos demostraron la viabilidad del enfoque propuesto para determinar con precisión los ángulos de alineación del vehículo. Los ángulos calculados coincidieron estrechamente con los obtenidos con los métodos de alineación tradicionales, lo que destaca la fiabilidad de la metodología desarrollada. La solución propuesta mostró varias ventajas, incluida su portabilidad y facilidad de implementación.

Finalmente, este trabajo desarrolló con éxito una solución para calcular los ángulos de alineación del vehículo utilizando sensores de acelerómetro, giroscopio y magnetómetro. La propuesta a futuro consiste en la plataforma 6DOF diseñada que demostró su capacidad para simular con precisión los movimientos de las ruedas y calcular los ángulos de alineación. El enfoque propuesto ofrece una alternativa práctica y rentable a los métodos tradicionales de alineación, allanando el camino para avances en el mantenimiento de vehículos y mejorando la seguridad vial en general.

6.2. Recomendaciones

La investigación exploró el potencial de mejoras y optimizaciones adicionales, como el desarrollo de una interfaz de visualización interactiva, similar a los alineadores de fábrica y modelos de mejora de los programas desarrollados. Una vía prometedora para el trabajo futuro que implica la integración de algoritmos de aprendizaje automático para mejorar la precisión de los cálculos de los ángulos. Al entrenar el algoritmo con un conjunto de datos más grande, es posible lograr una exactitud aún mayor y tener en cuenta las variaciones en diferentes modelos y marcas de vehículos.

Bibliografía

- [1] Daniel B. January. *Steering geometry and Caster measurement*. 1985.
- [2] A. Santos-Lozano y N. Garatachea. “Tendencias actuales de la acelerometría para la Cuantificación de la Actividad Física”. En: *Revista Iberoamericana de Ciencias de la Actividad Física y el Deporte* 1.1 (2012), págs. 24-33. DOI: 10.24310/riccafd.2012.v1i1.2000.
- [3] Israel Magaña. *Conceptos de Alineación y balanceo automotriz*. Jun. de 2014. URL: <https://es.slideshare.net/maganus/conceptos-de-alineacin-y-balanceo-automotriz>.
- [4] Byron Fernando Paucar. “Estudio de las condiciones que generan un desgaste anormal de los neumáticos radiales para vehículos pesados”. Tesis doct. Universidad Politecnica Salesiana, 2015, págs. 5-7.
- [5] Joop P. Pauwelussen. “Chapter Two - Fundamentals of Tire Behavior”. En: *Essentials of Vehicle Dynamics*. Ed. por Joop P. Pauwelussen. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2015, págs. 7-74. ISBN: 978-0-08-100036-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100036-6.00002-9>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780081000366000029>.
- [6] Johan Wahlström, Isaac Skog y Peter Händel. “IMU alignment for smartphone-based automotive navigation”. En: *2015 18th International Conference on Information Fusion (Fusion)*. 2015, págs. 1437-1443.
- [7] Qian Zhang et al. “An Accurate Calibration Method Based on Velocity in a Rotational Inertial Navigation System”. En: *Sensors* 15.8 (2015), págs. 18443-18458. ISSN: 1424-8220. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/15/8/18443>.
- [8] CoExito. En: *Equipos de Alineación* (ago. de 2016), págs. 1-11.
- [9] Luis Llamas. *Medir La Inclinación Con Imu, Arduino y Filtro Complementario*. Sep. de 2016. URL: <https://www.luisllamas.es/medir-la-inclinacion-imu-arduino-filtro-complementario/#:~:text=El%5C%20filtro%5C%20complementario%5C%20se%5C%20comporta,para%5C%20la%5C%20se%5C%20del%5C%20aceler%5C%20metro>.
- [10] William C Rose. “Mathematics and Signal Processing for Biomechanics Rotation Matrices”. En: (sep. de 2017), págs. 1-10.
- [11] Weixin Yang, Alexandr Bajenov y Yantao Shen. “Improving low-cost inertial-measurement-unit (IMU)-based motion tracking accuracy for a biomorphic hyper-redundant snake robot”. En: *Robotics and Biomimetics* 4 (dic. de 2017). DOI: 10.1186/s40638-017-0069-z.

- [12] Jieh-Shian Young, Hong-Yi Hsu y Chih-Yuan Chuang. “Camber Angle Inspection for Vehicle Wheel Alignments”. En: *Sensors* 17 (feb. de 2017), pág. 285. DOI: 10.3390/s17020285.
- [13] Rely Petrescu et al. “Inverse Kinematics of a Stewart Platform”. En: *Journal of Mechatronics and Robotics* 2 (jun. de 2018), págs. 45-59. DOI: 10.3844/jmrsp.2018.45.59.
- [14] Nikita Rushmanov et al. *Wrench tip: How to do your own alignment!* Jul. de 2018. URL: <https://motoiq.com/wrench-tip-how-to-do-your-own-alignment/>.
- [15] “Chapter 7 - Miniature Inertial Measurement Unit”. En: *Space Microsystems and Micro/nano Satellites*. Ed. por Zheng You. Micro and Nano Technologies. Butterworth-Heinemann, 2018, págs. 233-293. ISBN: 978-0-12-812672-1. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812672-1.00007-2>.
- [16] Jieh-Shian Young y Hong-Yi Hsu. “Toe Angle Measurement for z-Axis Calibrations of the Toe Sensor Based on MCU”. En: *International Journal of Electronics and Electrical Engineering* 6 (2018), págs. 61-64.
- [17] Robert Eisele. *Inverse Kinematics of a Stewart Platform*. Feb. de 2019. URL: <https://www.xarg.org/paper/inverse-kinematics-of-a-stewart-platform/>.
- [18] Reza N. Jazar. *Advanced Vehicle Dynamics*. Springer, 2019.
- [19] Frieder Wittmann, Olivier Lambercy y Roger Gassert. “Magnetometer-Based Drift Correction During Rest in IMU Arm Motion Tracking”. En: *Sensors* 19 (mar. de 2019), pág. 1312. DOI: 10.3390/s19061312.
- [20] Lu Xiong et al. “IMU-Based Automated Vehicle Slip Angle and Attitude Estimation Aided by Vehicle Dynamics”. En: *Sensors* 19.8 (2019). ISSN: 1424-8220. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1930>.
- [21] Quan Zhang et al. “Velocity-Based Optimization-Based Alignment (VBOBA) of Low-End MEMS IMU/GNSS for Low Dynamic Applications”. En: *IEEE Sensors Journal* 20.10 (2020), págs. 5527-5539. DOI: 10.1109/JSEN.2020.2970277.
- [22] Feyijimi Adegbohun et al. “High Performance Electric Vehicle Powertrain Modeling, Simulation and Validation”. En: *Energies* 14 (mar. de 2021), pág. 1493. DOI: 10.3390/en14051493.
- [23] Kohei Arai. *Advances in information and communication. proceedings of the 2021 future of information and communication conference (FICC)*. Springer, 2021.
- [24] Esteban. *Todos los sensores Que Hay en un teléfono Android y Para Qué sirven*. Abr. de 2021. URL: https://www.lespanol.com/elandroidelibre/20200112/sensores-telefono-android-sirven/459204673_0.html.
- [25] Bingfei Fan et al. “Effects of IMU Sensor-to-Segment Misalignment and Orientation Error on 3D Knee Joint Angle Estimation”. En: *IEEE Sensors Journal* PP (dic. de 2021), págs. 1-1. DOI: 10.1109/JSEN.2021.3137305.
- [26] Parag Narkhede et al. “Cascaded Complementary Filter Architecture for Sensor Fusion in Attitude Estimation”. En: *Sensors* 21.6 (2021). ISSN: 1424-8220. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/1937>.

- [27] Dannylo Nogueira et al. “In Motion Low-Cost IMU-to-Vehicle Alignment for Intelligent Vehicle Applications Using Kalman Filter”. En: (sep. de 2021). DOI: 10.1109/ITSC48978.2021.9564862.
- [28] Vicent Rodrigo Marco et al. “A Novel IMU Extrinsic Calibration Method for Mass Production Land Vehicles”. En: *Sensors* 21.1 (2021). ISSN: 1424-8220. URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/7>.
- [29] Yichao Zhang et al. “Machine Learning for Light Sensor Calibration”. En: *Sensors* 21 (sep. de 2021), pág. 6259. DOI: 10.3390/s21186259.
- [30] Adam Mann. *What is Caster Angle? Positive, Negative Zero Caster Explained*. Dic. de 2022. URL: <https://low-offset.com/workshop/what-is-caster-angle/>.
- [31] Wayne Storr. *Low pass filter - passive RC filter tutorial*. Ago. de 2022. URL: https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html.
- [32] Vedantu. *Magnetometer*. Nov. de 2022. URL: <https://www.vedantu.com/physics/magnetometer>.
- [33] Tuncer Ören, Bernard P. Zeigler y Andreas Tolk. *Body of knowledge for modeling and simulation a handbook by the Society for Modeling and Simulation International*. Springer International Publishing, 2023.
- [34] Suspension Secrets. *Caster – Geometry explained*. Ene. de 2023. URL: <https://suspensionsecrets.co.uk/caster/#:~:text=What%5C%20Is%5C%20Caster%5C%3F,vertical%5C%20is%5C%20the%5C%20caster%5C%20angle..>
- [35] URL: <https://www.firestonecompleteautocare.com/repair/alignment/>.
- [36] URL: <https://www.lesschwab.com/article/alignment/understanding-camber-caster-and-toe.html>.
- [37] BricoGeek. *Módulo GY-521 ACELERÓMETRO Y Giroscopio Mpu-6050*. URL: <https://tienda.bricogeek.com/acelerometros/1682-modulo-gy-521-acelerometro-y-giroscopio-mpu-6050.html>.
- [38] Hunter Company. *Alignment systems*. URL: <https://www.hunter.com/en-int/alignment-machines/>.
- [39] Stephen. URL: <https://beirlaen.be/projects/stewart-platform-racing-simulator>.