



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO
FACULTAD DE INGENIERÍA

Universidad Autónoma de Querétaro

Campus San Juan del Río

Facultad de Ingeniería

Área Mecánica y Automotriz

Tesis

“Sistema de monitoreo de vibraciones para el análisis
dinámico de suspensiones automotrices”

Que para obtener el título de:

Ingeniero Mecánico y Automotriz

Presenta:

José Manuel Jiménez García

Director:

Juan José Saucedo Dorantes

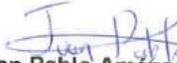
**“Sistema de monitoreo de vibraciones para el análisis dinámico
de suspensiones automotrices”**

SINODALES:



Dr. Juan José Saucedo Dorantes
Presidente

SECRETARIO
Dr. Carlos Gustavo Manríquez Padilla
Secretario



Dr. Juan Pablo Amézquita Rodríguez
Vocal



Dr. Juan Primo Benítez Rangel
Suplente

AGRADECIMIENTOS.

Para mis queridos padres, los cuales me han brindado
Todo el apoyo del mundo y sin los cuales no sería
Posible el que hoy estuviera aquí culminando este
Trabajo de tesis y la carrera en ingeniería mecánica y automotriz.

DEDICATORIA.

A mi madre por todos sus consejos, por su amor incondicional, por sus desvelos apoyándome cuando sentía que ya no podía más, por su gran esfuerzo por siempre darme lo mejor para poder salir adelante y por la confianza que depositó en mi para poder lograr esta primera meta de muchas en mi vida.

A mi padre por sus sacrificios para poder apoyarme durante mi carrera, por su tristeza al separarse de mi cuando me fui a vivir a otro estado, y por su apoyo incondicional siempre y sus sabias palabras en los momentos cuando más lo necesitaba o cuando estaba perdiendo el camino correcto.

A mis catedráticos que pusieron su mayor esfuerzo para poder transmitirme sus conocimientos y hacer de mí una mejor persona cada día, al Dr. Juan José Saucedo por ser mi director de tesis y apoyarme a lo largo de este tiempo para la culminación de este trabajo, al Dr. Martín Valtierra Rodríguez por ayudarme a lo largo de la carrera en momentos donde necesitaba un apoyo para poder sacar adelante proyectos en áreas las cuales no eran de mi total dominio.

A mis compañeros y amigos que fui conociendo durante la carrera los cuales me mostraron distintas maneras de aprender, y con los cuales pasé gratos momentos de diversión que siempre llevaré en el recuerdo.

RESUMEN.

En la industria automotriz es de gran importancia el estudio de diferentes sistemas que componen el automóvil, cada uno juega un papel fundamental en el funcionamiento de este, pero existen algunos sistemas los cuales tienen mayor importancia como lo es el sistema de suspensión, esto debido a las diferentes funciones que desempeña dicho sistema, los cuales son dar confort, estabilidad y reducir todas las perturbaciones que se encuentren en el camino, por lo tanto que este sistema se encuentre siempre en óptimas condiciones es de suma importancia. Para poder actuar antes de que el sistema falle o presente algún problema que ponga en riesgo la integridad del usuario, así como del sistema de suspensión y sistemas exteriores, se empezaron a realizar estudios con los cuales se pudiera detectar anomalías con tiempo antes de que se produzca un fallo mayor, la problemática actual es que los equipos que se cuentan comercialmente para el análisis de este sistema son de costos elevados y de arquitecturas cerradas. En esta tesis se propone realizar un sistema de bajo costo con arquitectura abierta para la obtención de datos de vibraciones y el análisis dinámico del sistema de suspensión automotriz, esto mediante la programación de un protocolo de comunicación SPI mediante el lenguaje de programación VHDL y a través del programa Matlab realizar el procesamiento de los datos adquiridos por el sistema. Por otra parte, para fines didácticos y comparativos se integra una simulación de una suspensión automotriz mediante el programa Simulink, esto para una mayor visualización del comportamiento esperado de una suspensión en buen, regular y mal estado.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS.....	3
DEDICATORIA.....	4
RESUMEN.....	5
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN:	9
1.1 ANTECEDENTES:.....	15
1.2 OBJETIVOS.....	25
1.2.1 Objetivo General:.....	25
1.2.2 Objetivos particulares:.....	25
1.2.3. Problemática:.....	26
1.3 JUSTIFICACIÓN:	27
1.4 PLANTEAMIENTO GENERAL.....	28
CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	30
2.1. VIBRACIONES EN EL AUTOMÓVIL.....	31
2.2 SISTEMA DE SUSPENSIÓN:	32
2.2.1 Funciones de la suspensión:	33
2.2.3 Fallas comunes en el sistema de suspensión.....	35
2.2.4 Principales riesgos en un sistema de suspensión en malas condiciones.....	37
2.3 MODELO CUARTO DE VEHÍCULO (MASA, RESORTE, AMORTIGUADOR).....	39
2.4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO.....	41
CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.....	44
3.1 CONSTRUCCIÓN DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SPI	46
3.2 ELABORACIÓN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS	54
3.3 INSTRUMENTACIÓN EN SUSPENSIÓN AUTOMOTRIZ	59
3.4 SIMULACIÓN SISTEMA MASA, RESORTE, AMORTIGUADOR.....	61
3.5 EXPERIMENTACIÓN.....	67
CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES:	70

4.1 ANÁLISIS DE LAS SEÑALES:	70
4.2 COMPARATIVA DE SEÑALES:	77
Conclusion:.....	81
Bibliografía	83
Anexos.....	85

Tabla de Figuras

FIGURA 1. RANKING DE ECONOMÍAS MUNDIALES (2015). (CEFP, 2017).....	13
FIGURA 2. MONOCORDIO UTILIZADO POR PITÁGORAS, TIEMPO DESPUÉS TAMBIÉN SE CREÓ LA ESCALA PITAGÓRICA.....	16
FIGURA 3. ZHANG HENG Y SU SISMÓGRAFO	18
FIGURA 4. DIAGRAMA PLANTEAMIENTO GENERAL.	29
FIGURA 5. REPRESENTACIÓN ESQUEMÁTICA DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN PASIVO (GERARDO HURTADO HURTADO, 2014)	40
FIGURA 6. DIAGRAMA DE BLOQUES METODOLOGÍA.	45
FIGURA 7. ESQUEMA DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DORANTES, 2020).....	47
FIGURA 8. DIAGRAMA DE BLOQUES, ESTRUCTURA DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SPI (DORANTES, 2020).....	48
FIGURA 9. DIAGRAMA DE MÁQUINA DE ESTADOS DEL SINCRONIZADOR SPI (ESTADO 0 A ESTADOS 3) (DORANTES, 2020)	49
FIGURA 10. MÁQUINA DE ESTADOS PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SPI, (ESTADO 0 A ESTADO 5). (DORANTES, 2020)	51
FIGURA 11. DIAGRAMA CONTROLADOR DEL SPI (DORANTES, 2020).....	52
FIGURA 12. DIAGRAMA DE MÁQUINA DE ESTADOS COMPLETA DEL PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SPI (DORANTES, 2020).	53
FIGURA 13. DIAGRAMA DE CONEXIONES.....	55
FIGURA 14. TARJETA FPGA CONECTADA A PC VISTA DESDE LA PARTE TRASERA DEL AUTOMÓVIL.....	56
FIGURA 15. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS COMPLETO (TARJETA FPGA, ACCELERÓMETRO, PC).	57
FIGURA 16. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS, VISTA DESDE LA PARTE TRASERA DEL AUTOMÓVIL.....	58
FIGURA 17. DIAGRAMA REPRESENTATIVO DE DONDE SE ENCUENTRA APROXIMADAMENTE EL CENTRO DE MASA DEL AUTOMÓVIL. (G, 2015).....	59
FIGURA 18. SUSPENSIÓN MCPHERSON.....	60
FIGURA 19. DIAGRAMA DE BLOQUES PARA INSTRUMENTACIÓN DEL SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS EN LA SUSPENSIÓN AUTOMOTRIZ	60
FIGURA 20. MODELADO DE UN VEHÍCULO (DANIEL GARCIA-POZUELO, 2014).	62
FIGURA 21. COEFICIENTES DE ELASTICIDAD Y AMORTIGUAMIENTO PARA DIFERENTES VEHÍCULOS. (DANIEL GARCIA-POZUELO, 2014)	65

FIGURA 22. SIMULACIÓN CON COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO DE 3.5K Y COEFICIENTE DE ELASTICIDAD DE 30K.....	66
FIGURA 23. MAZDA 6 MODELO 2014®.	68
FIGURA 24. PLANO DE REFERENCIA PARA LOS EJES X, Y, Z.	69
FIGURA 25. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 10 KM/H EN SUSPENSIÓN EN BUEN ESTADO.....	71
FIGURA 26. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 10 KM/H EN SUSPENSIÓN EN BUEN ESTADO.....	71
FIGURA 27. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 10 KM/H EN SUSPENSIÓN EN BUEN ESTADO.....	72
FIGURA 28. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 10 KM/H EN SUSPENSIÓN EN BUEN ESTADO.....	73
FIGURA 29. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 10 KM/H EN SUSPENSIÓN DESGASTADA.....	74
FIGURA 30. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 10 KM/H EN SUSPENSIÓN DESGASTADA.....	74
FIGURA 31. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 10 KM/H EN SUSPENSIÓN DESGASTADA.....	75
FIGURA 32. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 15 KM/H EN SUSPENSIÓN EN BUEN ESTADO.....	76
FIGURA 33. GRÁFICA PRUEBA REALIZADA A 15 KM/H EN SUSPENSIÓN DESGASTADA.....	76
FIGURA 34. COMPARATIVA DE GRÁFICAS SUSPENSIÓN EN BUEN ESTADO Y DESGASTADA A UNA VELOCIDAD DE 10 KM/H	78
FIGURA 35. COMPARATIVA DE GRÁFICAS SUSPENSIÓN EN BUEN ESTADO Y DESGASTADA A UNA VELOCIDAD DE 15 KM/H.	79

Índice de Tablas

TABLA 1. CAUSAS Y FALLAS DE LA SUSPENSIÓN AUTOMOTRIZ (RODARTE, 2018).....	35
TABLA 2. MATRIZ DE EXPERIMENTACIÓN.....	70

Anexos

ANEXO 1: DIAGRAMA DE BLOQUES PARA LA SIMULACIÓN DE UN SISTEMA MASA-RESORTE-AMORTIGUADOR	85
ANEXO 2: FUNCIÓN PARA RECREAR UN “TOPE” EN LA SIMULACIÓN.....	86
ANEXO 3: ILUSTRACIÓN DE PERTURBACIÓN DE ENTRADA (TOPE) EN SIMULINK.	87
ANEXO 4: CÓDIGO PARA CAMBIAR EL COEFICIENTE DE AMORTIGUAMIENTO Y ELASTICIDAD EN LA SUSPENSIÓN.	88

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN:

A partir de la aparición de los primitivos instrumentos musicales, en especial los de cuerda, la comunidad científica de aquellos tiempos comenzaron a mostrar interés por el análisis y comprensión de las vibraciones, en especial las vibraciones mecánicas, un paradigma de ello fue cuando Galileo relacionó la longitud de cuerda del péndulo y su frecuencia de oscilación (Jimenez, 2018), conjuntamente descubrió una correlación entre tensión, longitud y frecuencia de las vibraciones que se generan en las cuerdas. (Jimenez, 2018). Dicho estudio y estudios posteriores definieron la conexión existente entre el sonido y las vibraciones mecánicas. Conforme pasó el tiempo diferentes autores aportaron otros trabajos que establecieron un gran aporte y avance en el estudio de la anteriormente mencionada área de la ciencia, dentro de los nombres destacados encontramos a Taylor, Bernoulli, D' Alembert, LaGrange, Fourier, por mencionar algunos (Jimenez, 2018).

La ley de elasticidad de Hooke, o también conocida como ley de los resortes, fue reconocida en 1876 es una de las primeras aportaciones respecto a la elasticidad, así como Coulomb, el cual estableció la teoría y la experimentación de oscilaciones torsionales (Jimenez, 2018).

Distintos fallos tales como un sistema de suspensión defectuoso en un vehículo o un aislamiento deficiente en un equipo industrial pueden causar daños en diferentes componentes del sistema (Manuel, 2014). Estos son algunos ejemplos de dificultades que pueden ser evitados mediante un estudio de vibraciones. El fenómeno que puede causar daños a las máquinas se denomina “resonancia”, cuyas consecuencias pueden ser desastrosas para el sistema (Manuel, 2014). La maquinaria industrial y los sistemas de suspensión automotrices son sistemas que requieren monitoreo continuo o un mantenimiento predictivo (Gonzales, 2010); este mantenimiento es muy importante para el crecimiento económico de una empresa o del usuario tanto de la máquina como del automóvil, porque anticiparse a una falla es sinónimo de programar eventos que le permitan a la compañía analizar y dictaminar el punto conveniente de interrumpir la maquinaria para el mantenimiento correspondiente y para los sistemas automotrices puede incluso llegar a salvar vidas

debido a que un funcionamiento óptimo de los sistemas automotrices ocasiona un funcionamiento confiable del automóvil. El estudio de vibraciones es de suma importancia en dicho mantenimiento, ya que es necesario detectar vibraciones en distintas ubicaciones de la maquinaria para estudiar su comportamiento y con ello poder tener una idea del estado actual del equipo.

Antes de mencionar en que consiste el presente trabajo es importante entender la importancia e impacto que se puede llegar a tener, para ello hay que saber un poco sobre cómo se mueve el mundo respecto a la necesidad de tener herramientas que ayuden a un mantenimiento preventivo y predictivo.

La industria manufacturera internacional tiene depende en gran medida de las máquinas dinámicas (Technology, 2014), lo que significa directamente que dichas máquinas están sujetas a vibraciones mecánicas, y las variaciones de estas son indicadores de posibles fallas, que son empleadas para determinar las condiciones de trabajo de las máquinas y determinar cuándo es conveniente iniciar un programa de mantenimiento. México se está industrializando de forma rápida y hoy en día es una de las principales economías manufactureras del mundo (Technology, 2014), lo que exige estándares de calidad rigurosos para las diferentes industrias, y por consecuencia esto hace de los servicios de monitoreo algo fundamental para el óptimo funcionamiento de las máquinas, hoy en día se cuentan con diferentes métodos y dispositivos para la medición de las condiciones de la maquinaria industrial pero estos métodos generan costos elevados y necesitan de personal altamente capacitado en el área de vibraciones mecánicas para el buen manejo de estas.

Hoy en día, debido al constante desarrollo que han tenido las diferentes industrias en México y el mundo, tales como la creciente industria automotriz, la industria aeroespacial y la industria manufacturera, las máquinas-herramienta se ha convertido en un nuevo paradigma de interés.

Alemania, Japón, Estados Unidos, Italia y Corea del Sur exportan principalmente a los otros grandes países industrializados o a mercados cercanos. Por ejemplo, el 51.3 % de las exportaciones de máquinas-herramienta estadounidenses se dirigen a **Canadá y México**. Aproximadamente el 50 % de las exportaciones de Alemania se dirigen a otros países europeos. Pero para el resto de las exportaciones de estos países productores, compiten por y en los mismos mercados. (MMS, Modern Machine Shop, 2021)

Las exportaciones alemanas de máquinas-herramienta aumentaron cuatro por ciento en 2015 (MMS, 2016). Con 9,4 millones de euros, las exportaciones se mantuvieron bajas en comparación con su máximo histórico logrado en el año 2012, con 9,56 millones de euros, cabe resaltar que México se convirtió en el cuarto mercado para los alemanes (MMS, 2016). La sorpresa entre los mercados fue, sin duda México, con su sector de la fabricación de automóviles en vigorosa expansión. Actualmente, México se ubica el séptimo lugar entre los manufactureros de vehículos automotrices a nivel mundial, esto debido a una fabricación de más de 3,6 millones de vehículos en 2015 (MMS, 2016). En particular, los fabricantes de equipos pretenden continuar con sus importantes inversiones, al igual que la industria aeroespacial y automotriz. Al mismo tiempo aumentó la demanda de máquinas herramienta. Con un asombroso aumento al 70%, México logró posicionarse en el lugar número cuatro dentro del mercado de máquinas herramienta alemanas (MMS, 2016).

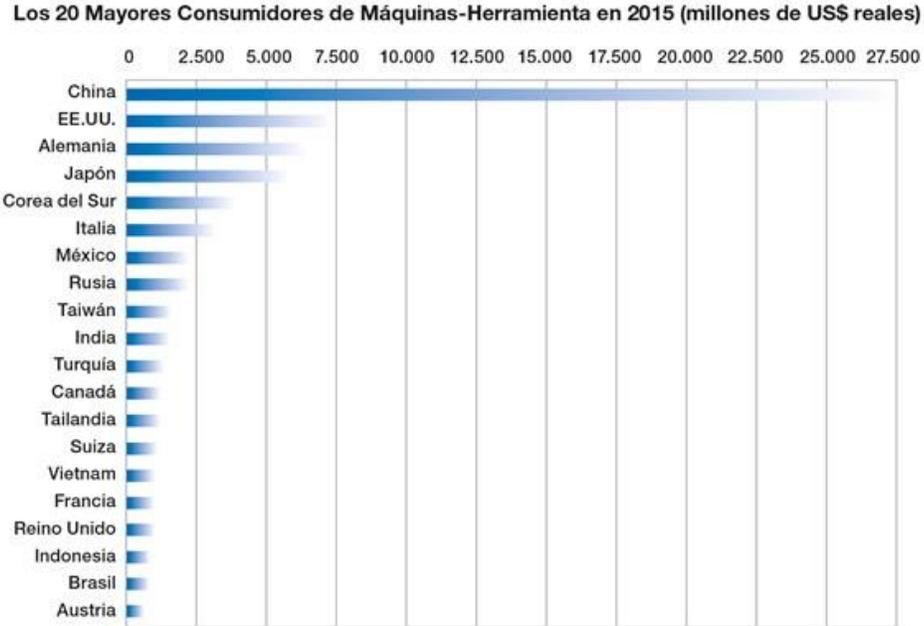
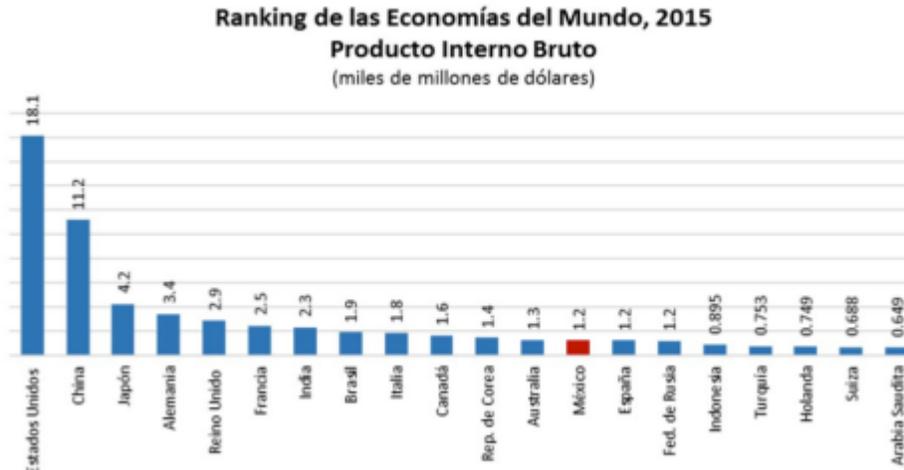


Figura 1. Principales Países consumidores de Máquinas-Herramienta(2015) (CEFP, 2017)

El presidente de la Asociación Mexicana de Distribuidores de Maquinaria (AMDM) Ramón Brambilia, describe a México como un país en constante proceso de industrialización y posicionándose en un lugar importante entre las principales naciones manufactureras.

Para el país mexicano las importaciones de maquinaria aumentaron significativamente, permitiendo que diversas industrias accedan a distintas máquinas-herramienta de mejor calidad y tecnología de punta.

Para hacerle frente a la competencia y proporcionar productos con los altos estándares de calidad, las industrias deben asegurar, un correcto funcionamiento en su maquinaria de manufactura. Por tal motivo, un mantenimiento predictivo es de suma importancia para las industrias del sector manufacturero.



Fuente: Elaborado por el CEFP con datos del Fondo Monetario Internacional.

Figura 1. Ranking de Economías Mundiales (2015). **(CEFP, 2017)**

Mundialmente México se encuentra posicionado en el lugar número nueve en el área de producción automotriz, también se encuentra en la posición seis como uno de los principales países exportadores en este ámbito. La industria automotriz genera el 3.0% del Producto Interno Bruto (PIB) total y el 17.2% de este, lo aporta la industria manufacturera (Economía, 2011). El empleo directo que se genera gracias a este sector representa el 16.4% del total manufacturero (Economía, 2011). Por lo tanto, al ser uno de los mayores productores de automóviles, es necesario contar con herramientas accesibles tanto para la industria como para la población en general con la cual realizar un correcto mantenimiento preventivo y/o predictivo.

Dicho la información anterior y viendo las Figuras 1 y 2, se puede entender la gran necesidad del mercado mundial y de la industria mexicana, de máquinas-herramienta y con ello la importancia que tiene el mantenimiento preventivo y predictivo en la industria.

El mundo y las tecnologías automotrices se están desarrollando a una velocidad vertiginosa. Debido a esto los principales países manufactureros no escatiman en la inversión de recursos para desarrollar tecnologías que brinden seguridad y confort a los distintos usuarios.

La suspensión automotriz tiene como objetivo principal mejorar la calidad del

vehículo, adicional a esto tiene como objetivos secundarios brindar seguridad de transporte, facilidad de carga y descarga. Por otra parte, la carrocería se aísla de los desniveles del suelo lo que reduce el impacto transmitido al conductor generado por las perturbaciones del terreno. Análogamente, modifica los movimientos verticales de los neumáticos para asegurar que cuando exista el contacto entre la rueda y el terreno el usuario pueda maniobrar el volante y evitar daños en el automóvil o en el camino (Criollo-Yanchatipan, 2021).

Una suspensión automotriz con fallas imposibilita garantizar el amortiguamiento de las perturbaciones generadas por la carretera (Criollo-Yanchatipan, 2021). Tal como se describió en párrafos anteriores, las vibraciones deterioran el funcionamiento de la suspensión. En caso de que exista una falla importante en la suspensión, el usuario final podrá notar irregularidades en el manejo y comodidad. El sistema de dirección también se verá afectado debido al bajo rendimiento de la suspensión. Cada componente en el sistema de suspensión genera diferentes problemáticas en casos de fallas, en algunos casos suelen categorizarse como complicadas debido a su falta de mantenimiento (Criollo-Yanchatipan, 2021). Por consiguiente, tener vehículos en óptimas condiciones para circular por las carreteras del país es necesario para evitar accidentes que pueden terminar en percances mortales, esto como se menciona en párrafos anteriores es posible mediante el estudio de las vibraciones por eso se recalca la necesidad e importancia de un sistema de adquisición de datos para realizar un estudio y un mantenimiento preventivo y predictivo en la suspensión automotriz.

El propósito del presente trabajo es solucionar dicho problema por medio del desarrollo de un sistema de adquisición de datos que tiene como objetivo analizar el comportamiento vertical de un automóvil el cual es sometido a las fuerzas excitadoras de la carretera, esto con el fin de proporcionar una herramienta que facilite analizar el comportamiento de las vibraciones en el sistema de suspensión. Este sistema con el que se abordan las diferentes problemáticas que se han mencionado anteriormente, consta de un sensor y una tarjeta de adquisición de datos en la cual podremos obtener en tiempo real, los datos que las vibraciones van

generando en el sistema, almacenarlos y después observar la gráfica de la señal en base a los datos adquiridos mediante el sensor, con esto se puede observar algún patrón que sea de interés y poder analizarlo de forma más concreta.

Para llevar a cabo el análisis de la señal se utiliza el software “Matlab”, la finalidad es poder observar los cambios que existen entre una suspensión a punto de tener algún fallo o incluso ya presentarlo, en comparación a los datos que se recopilen de una suspensión en buen estado. Dentro de ésta herramienta se busca encontrar patrones en las vibraciones que indique alguna irregularidad en el sistema, con lo que se puede deducir que en el sistema existe un mal funcionamiento.

1.1 ANTECEDENTES:

Es de gran dificultad determinar el tiempo en el que se originó la ciencia de las vibraciones mecánicas, hasta el día de hoy no se ha podido dar el reconocimiento a un investigador en específico debido a que a lo largo del tiempo distintas personalidades científicas postularon importantes contribuciones las cuales ayudaron a que el estudio de las vibraciones sea considerado una rama de las ciencias. Estos descubrimientos pueden clasificarse en tres diferentes líneas de tiempo que se mencionan a continuación:

1. Orígenes.
2. Formalización.
3. Aplicación.

- 1. Orígenes** - Durante éste periodo se presentaron diferentes acontecimientos con los cuáles los estudiosos de aquellos tiempos sentaron las bases conceptuales de lo que hoy es el campo de estudio de las vibraciones. Este periodo se considera que comenzó en el año 3000 A.C. hasta 1500 D.C.

(Jimenez, 2018) en el periodo del renacimiento, algunos de los trabajos realizados durante dicho periodo son los siguientes:

- 3000 a.C – Fohi postulo su trabajo titulado “consonancias” en el que aborda el tema de la música y las vibraciones. (Jimenez, 2018)
- 570 - 497 a.C. - Pitágoras describió la hipótesis de los números, la música y la armonía, en la cual correlaciono las mencionadas ciencias. Experimentó haciendo vibrando algunas agujas de grosores y tensiones similares, aunque de diferentes longitudes. De este modo logró deducir que las notas musicales dependen de la frecuencia de las vibraciones, análogamente Pitágoras llego a la conclusión que la música tan solo es una relación matemática de vibraciones medidas en diferentes lapsos de tiempo. (Jimenez, 2018)

Pitágoras hizo otra aportación adicional al crear el monocordio (Figura 2), el cual es una guitarra elaborada con una sola cuerda y sin caja para que ni existiera la resonancia. Con esto, Pitágoras observó que al pisar la cuerda por la mitad resultaba un sonido equivalente al que producía la cuerda entera, hoy a esto se le conoce como una “octava” (Torral, 2020).



Figura 2. Monocordio utilizado por Pitágoras, tiempo después también se creó la escala pitagórica.

- 374-355 a.C. – El científico griego Aristóteles analizó los postulados que rigen la dinámica, y en consecuencia logró escribir los primeros conocimientos relacionados con la acústica, titulado a su escrito como *On Acoustic*. (Jimenez, 2018)
- 429 a.C.– 347 a.C. – El filósofo griego Platón indagó en diferentes temas referentes a la vibraciones simpáticas, la cual actualmente se conoce como resonancia (Jimenez, 2018). Para tener una mejor idea de que es la vibración simpática se da el siguiente ejemplo: Cuando se toca una campana, otra campana idéntica colocada al otro extremo de la sala empezará a vibrar, produciendo el mismo sonido que la primera campana. (Torral, 2020)
- 350 a.C. – 275 a.C. Euclides utilizó el péndulo como un medidor de vibraciones. (Torral, 2020)
- 287 a.C.– 212 a.C. – El matemático Arquímedes estableció las normas correspondientes al comportamiento de la estática y la hidrostática. (Jimenez, 2018)
- 130 d.C. – Se descubrió el sismógrafo chino, dicho dispositivo consiste en una vasija de bronce con seis dragones chinos a su alrededor, dentro de sus bocas se encontraban seis bolas de hierro en equilibrio, y su funcionamiento refiere a que si estas esferas caían significaba que se estaba generando una onda sísmica. Se atribuye este invento al científico Zhang Heng. (Jimenez, 2018). En la Figura 3 se puede observar el sismógrafo realizado por Zhang Heng.



Figura 3. Zhang Heng y su sismógrafo

- 480 d.C.–524 d.C – Boëthius, describe en sus aportaciones para la ciencia de la musicología que el sonido es una manifestación de ondas ondulatorias, debido a la observación de estas en el agua. (Jimenez, 2018)

2. **Formalización** – Durante esta época se estableció un enorme desarrollo tanto matemático como conceptual, de los cuales se logra consolidar la fundamentación teórica en la rama de las vibraciones mecánicas, de igual manera distintos avances respecto a la instrumentación. Este periodo se considera que tiene una duración que comienza en la época renacentista y culmina a mitad del siglo XIX.

A continuación, se menciona algunos trabajos realizados durante éste periodo:

- 1492-1519 – Leonardo da Vinci desarrolla algunos trabajos sobre mecánica. (Jimenez, 2018)

Algunos de los aportes que Leonardo da Vinci hizo en el área son los siguientes:

- Pionero en establecer los principales conocimientos de los principios de la inercia, lo cual tiempo después Galileo desarrolló experimentalmente. (Jimenez, 2018)
 - Mostró mediante la experimentación la incapacidad de “movimiento continuo” como una fuente de energía. (Jimenez, 2018)
 - Utilizó los conocimientos relacionados a esta imposibilidad de tal manera que logró demostrar la ley de la palanca por método de velocidades virtuales, una norma que ya establecía el matemático Aristóteles y tiempo después fue utilizado por Bernardino Bladi y Galileo Galilei. (Jimenez, 2018)
- 1564-1642 – El físico italiano Galileo Galilei descubrió una correlación entre la longitud de cuerda del péndulo y la frecuencia de oscilación, así como también demostró la conexión existente entre la tensión, longitud y frecuencia de vibración de las cuerdas. En 1583 se percató de que el peso del objeto en el péndulo daba igual, lo relevante era la longitud de la cuerda que lo sujetaba. (Jimenez, 2018)

- 1588 – 1648 – Marin Mersenne en el año 1640, analizó medidas de velocidad del sonido utilizando el fenómeno del eco y demostró que, opuesto a lo afirmado por Aristóteles, dicha velocidad es independiente a la frecuencia de la perturbación.
- 1642-1727 - Isaac Newton, es un científico dedicado al estudio en el área matemática conocida como cálculo. Analizó y respondió diferentes interrogantes relacionadas con la luz y la óptica, describió las leyes del movimiento y concluyó a partir de las aportaciones ya mencionadas, la ley de la gravitación universal. (Jimenez, 2018)
- 1678 – Robert Hooke, científico inglés escribió la publicación: “Ut Pondus Sic Tensia”, traducido al español significa “Como el peso así es la tensión”, el cual presenta la primera afirmación de la conocida ley de la elasticidad. (Jimenez, 2018)
- 1700-1782 - Daniel Bernoulli, matemático suizo, observó la manera en que los cuerpos vibran, utilizando el principio de superposición de armónicos. (Jimenez, 2018)
- 1768-1830 -Una de las contribuciones más grandes en el campo de las vibraciones la aportó el físico Joseph Fourier, en el año 1807 remitió su trabajo de investigación a la Academia de Ciencias de Paris, en este presentó una explicación matemática acerca de los problemas relacionados al tema de conducción de calor. Aunque su investigación fue rechazada, aportaba datos que tiempo después se postularían en el área matemática, llamada en su honor, análisis de Fourier. Dentro de las principales aportaciones de los descubrimientos de Fourier, se encuentran las funciones más conocidas, las series de senos y cosenos; de modo que esta aportación es una de las más relevantes en el área de las vibraciones mecánicas debido a que, con base al algoritmo de la serie

de Fourier funcionan los actuales analizadores de vibración. (Jimenez, 2018)

3. **Aplicación** – Periodo comprendido aproximadamente de 1850 a 1950, durante dicho periodo se afianzó un enfoque ingenieril en las vibraciones, impulsado por la industrialización (Jimenez, 2018). En esta etapa se exponen distintos desarrollos ingenieriles para maquinarias tales como: locomotoras, autos, aviones, las cuales comprenden desde la máquina de vapor hasta turbinas. (Toral, 2020)

En los siguientes párrafos se muestran algunos aportes realizados durante dicho periodo:

- 1820-1872 W.J.M Rankie en el año de 1869 inicia el estudio referente a los movimientos giratorios de un rotor. La investigación en esta área se desarrolló significativamente a finales del siglo XIX gracias a las contribuciones de Pierre Laval, así como de otros científicos. (Toral, 2020)
En un principio el desafío principal para los científicos y diseñadores de máquinas rotativas fue predecir la velocidad crítica, porque lo que más les interesaba era evitar la resonancia. (Toral, 2020)
- 1909, Frahm postuló la nueva manera de disminuir vibraciones mecánicas por medio de la ejecución de sistemas agregados, es decir un sistema masa-resorte. (Jimenez, 2018)
- 1859–1943 - Stodola Aurel realizó importantes aportaciones relacionadas con las vibraciones de membranas, vigas y placas. (Jimenez, 2018)
- 1872-1972 - Timoshenko descubrió distintos conocimientos que fueron de gran relevancia para teoría en vibración de vigas. (Jimenez, 2018)

- Hort escribió la primera publicación de ingeniería de las vibraciones. (Jimenez, 2018)

Las vibraciones en los sistemas mecánicos integran una de las áreas de estudio con mayor relevancia en la física (Technology, 2014). Todos los sistemas poseen una capacidad de vibración y la totalidad de estos vibran libremente en distintas formas. Generalmente, algunas vibraciones preponderantes en cuerpos pequeños pueden ser rápidas, en cambio las de objetos de mayor tamaño pueden ser lentas. La tierra, posterior a sufrir un fenómeno sísmico, tiende a continuar vibrando en un ritmo de oscilación por hora aproximadamente. La anatomía humana contiene sorprendentes actividades vibratorias, por ejemplo, el corazón late, los pulmones oscilan y las cuerdas bucales vibran (Technology, 2014).

De esta forma queda claro que los efectos “vibratorios u oscilatorios” están presentes en toda nuestra vida cotidiana y entorno, debido a esto es importante el estudio, análisis e interpretación de las mismas para ver sus efectos y/o repercusiones que estos tienen en diferentes sistemas o aplicaciones que queramos, ya que al estar presentes en todo momento pueden llegar a repercutir en algún proceso o sistema, de manera que nuestro sistema tienda a fallar o desgastarse, por lo que, poder entender el comportamiento y accionar para la mitigación de vibraciones es de vital importancia para el óptimo funcionamiento de estos.

Dicho esto y enfocándolo a nuestro campo de los sistemas de suspensión automotrices, se entiende que el sistema siempre va a estar en un constante contacto con vibraciones, ya sean generadas naturalmente por el sistema, como lo pueden ser vibraciones por el mismo motor, caja de transmisión, sistema de dirección, por citar algunos, así como por agentes exteriores, como lo es el camino donde se encuentra recorriendo el automóvil, perturbaciones como topes, baches, caminos sinuosos o de terracería, e incluso por el mismo usuario que utiliza el

automóvil. Por lo tanto, es necesario contar con un diagnóstico del estado actual de la suspensión y con base a ello, realizar las acciones pertinentes para lograr el buen funcionamiento de este en caso de tener algún fallo, esto es importante ya que un buen funcionamiento de dicho sistema garantiza la seguridad para el usuario del automóvil, la estabilidad del automóvil y su confort a la hora de “suavizar” las vibraciones u oscilaciones que el camino genera en el sistema.

Bruno Bono realizó un artículo en el cual se estudia el caso de múltiples sistemas de suspensión automotriz y el comportamiento de las fuerzas generadas por el terreno donde se conduce. Según el autor “el propósito de su aportación es desarrollar un software informático, para ser utilizado como una herramienta dentro del estudio del comportamiento vertical de un vehículo sometido a las fuerzas excitadoras introducidas por el terreno.” (Bono, 2017)

Por otro lado, el autor Jorge L. Hurel Ezeta menciona en la tesis “Modelado analítico y control inteligente de un sistema de suspensión activa para un cuarto de vehículo” que, para el desarrollo del controlador en un sistema de suspensión, es necesaria la elaboración de un modelo que reproduzca de manera rápida y efectiva la cinemática y la dinámica automotriz. De esta manera, la tesis propone algunas aportaciones para el modelado analítico y control inteligente de estos sistemas (Ezeta, 2013).

Para el autor, otro de los objetivos de su investigación es determinar los procesos para el desarrollo de aplicación de software de simulación, destacando métodos predictivos de multi cuerpos, elementos finitos y modelado matemático, para el reconocimiento de sus propiedades de trabajo al emplearlo en la suspensión (William,2017).

En comparación a los artículos de los autores mencionados, la finalidad del presente trabajo es afrontar diferentes problemáticas con las cuales se encuentra hoy en día parte del estudio en cuanto a vibraciones del sistema automotriz se

refiere, las cuales son un sistema de bajo costo que nos facilite poder sustraer los datos necesarios para el estudio de algún fenómeno de interés en dicho sistema y segundo, una comparación con un modelo teórico ya establecido, esto último, no solo es de suma importancia para alcanzar las objetivos metas establecidas en este trabajo, también es de suma importancia para poder servir como una base para futuras investigaciones y con ello aportar a que se siga estudiando este campo de las vibraciones mecánicas.

En resumen, el propósito es realizar un sistema de adquisición de datos de bajo costo y así poder analizar una respuesta dinámica de una suspensión automotriz y con ello poder realizar una comparación con un modelo teórico existente y en base a los resultados realizar las conclusiones pertinentes para aportar los patrones diferentes encontrados en comparación a dicho modelo teórico.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General:

Desarrollar un sistema de monitoreo de vibraciones para analizar la respuesta dinámica de una suspensión automotriz que permita evaluar su estado actual y realizar una comparativa contra un modelo teórico.

1.2.2 Objetivos particulares:

1. Desarrollar un sistema de monitoreo mediante lenguaje de programación en Hardware para adquirir múltiples señales de vibración en una suspensión automotriz.
2. Utilizando una tarjeta FPGA, realizar una implementación con acelerómetros para la obtención de señales de vibración en la suspensión automotriz
3. Analizar señales de vibración adquiridas de una suspensión automotriz **(Mazda 6 GT 2014)**.
4. Comparar los valores de vibración adquiridos con valores establecidos por normas para determinar el estado actual de la suspensión automotriz

1.2.3. Problemática:

Hoy en día, en la industria automotriz se busca continuamente realizar mejoras para un mayor desarrollo en componentes del automóvil, en materiales para la fabricación, ensamblado de los mismos automóviles, así como un mayor rendimiento de estos. Para poder realizar dichos objetivos es necesario realizar cada vez análisis más precisos con la finalidad de mejorar los puntos de interés, en cuantos a las suspensiones de los automóviles se busca que cada vez sean más estables, brinden mayor seguridad tanto al conductor como a los pasajeros y una amortiguación a la hora de pasar por alguna perturbación del camino con la cual los pasajeros sienta confort durante todo su viaje. El punto de interés más importante en el estudio de la suspensión y en el cual se enfoca mayormente la industria automotriz es el de la seguridad, es bien sabido que las suspensiones automotrices es uno de los sistemas más importantes dentro del automóvil, por lo tanto, el buen funcionamiento de esta puede evitar accidentes que pueden llegar a ser mortales.

Adicional a lo anteriormente mencionado una de las grandes problemáticas para poder monitorear el comportamiento de las vibraciones en la suspensión automotriz radica en la falta de sistemas a bajo costo, hoy en día los sistemas que se encuentran en el mercado son de costos sumamente altos y de arquitectura cerrada, es decir que el usuario no puede modificar el funcionamiento ni añadir periféricos que puedan ayudarlo a hacer un análisis más detallado de ser necesario. A lo largo del presente trabajo se deberán superar algunos retos los cuales irán apareciendo conforme se vaya desarrollando el trabajo desde algunos de un grado de dificultad menor, hasta algunos donde se deberán recordar todos los conocimientos adquiridos durante de la carrera académica esto con la finalidad de desarrollar el sistema de adquisición propuesto y obtener los resultados esperados con este trabajo, después de plantear un plan de trabajo para el desarrollo del trabajo se llegó a la conclusión de que algunos retos a vencer son los mencionados a continuación:

- Programación de estructura en VHDL para el funcionamiento de tarjeta FPGA
- Sincronizado de temporizadores para la comunicación entre tarjeta FPGA y acelerómetro.
- Construcción de protocolo SPI
- Construcción de sistema de adquisición de datos de bajo costo
- Ubicación de sistema de adquisición de datos en un lugar donde las señales recibidas sean claras y con el menor índice de ruido posible.
- Tratamiento de las señales para su posterior análisis.
- Simulación de un sistema masa-resorte-amortiguador.
- Diseño de una señal para la perturbación del sistema (tope).

1.3 JUSTIFICACIÓN:

Para solucionar el problema anterior, se busca realizar un sistema con el cual se pueda realizar una medición precisa del comportamiento de la suspensión automotriz a la hora de analizar los fenómenos que ocurren en dicho sistema debido a las fuerzas longitudinales que el camino ejerce sobre dicho sistema, para que con ello se pueda hacer un análisis, observar patrones y poder dar una respuesta sobre el modelado dinámico del sistema.

Con el sistema de medición antes mencionado se obtendrá una herramienta para el modelado dinámico y a un costo bajo, con esto se soluciona una gran problemática para los estudiantes e investigadores que tenga el interés o la necesidad de estudiar esta área de las vibraciones, ya que los sistemas comerciales

que hay en el mercado hoy en día es necesario realizar una gran inversión de dinero ya que los costos para adquirir uno son bastante elevados.

Por lo tanto, al tener un sistema de bajo costo con el cual podamos realizar análisis de los datos arrojados por los comportamientos en las suspensiones y a partir de ellos poder determinar ciertos patrones, así como, obtener gráficas e interpretarlas para detectar anomalías en estos sistemas, la cantidad de fines pueden llegar a ser bastante extensos, ya sea en las diferentes áreas de la industria, en la vida cotidiana, en proyectos académicos y de investigación, es importante poder tener un análisis de un sistema antes de que este pueda llegar a fallar, ya sea en máquinas industriales, industria aeroespacial, y en este caso aplicado a la industria automotriz.

1.4 PLANTEAMIENTO GENERAL.

En la Figura 5 se define el planteamiento general que se realizará para este proyecto.

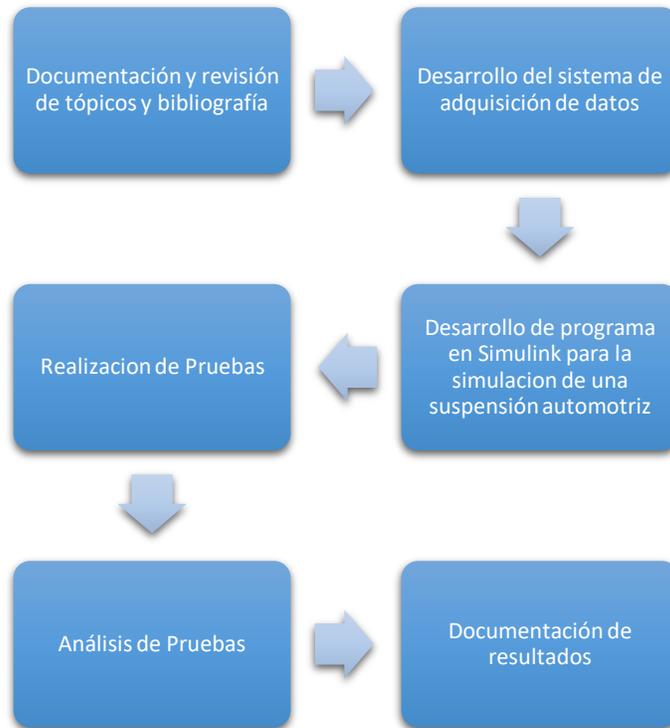


Figura 4. Diagrama planteamiento general.

Documentación y revisión de tópicos y bibliografía:

Dentro de este módulo se analizan libros, artículos o tesis en los que se plantean paradigmas del estudios de monitoreo y análisis de vibraciones, adquisición de vibraciones, modelado de un sistema de suspensión automotriz, así como la importancia del monitoreo del estado de la suspensión automotriz y sus consecuencias de un uso en mal estado.

Desarrollo del sistema de adquisición de datos:

Utilizando un acelerómetro triaxial ADXL345 y una tarjeta FPGA Spartan se adquieren las señales de vibraciones generadas por el sistema de suspensión de un Mazda 6 2014 el cual será puesto a prueba con 2 velocidades distintas al momento de pasar por la perturbación (tope) y 2 estados de funcionamiento diferentes, uno en buen estado y el otro con componentes dañados.

Desarrollo de programa en Simulink para la simulación de una suspensión automotriz:

Utilizando el programa Simulink de Matlab® se realizará una simulación de un sistema de suspensión automotriz, con el cual se tendrá un resultado esperado a observar físicamente para después realizar una comparación entre los resultados obtenidos con las pruebas físicas y la simulación.

Realización de pruebas:

Mediante el uso de la misma propulsión del automóvil se introducirán dos diferentes velocidades al sistema de suspensión para así obtener las señales vibratorias del sistema de suspensión utilizando un acelerómetro ADXL345.

Análisis de pruebas:

Se llevará a cabo el análisis de las señales adquiridas durante el módulo de pruebas, estas se encuentran divididas en dos tipos, suspensión sana y suspensión desgastada.

Documentación de resultados:

Se desarrollará la documentación de los resultados obtenidos del análisis para determinar el estado en el que se encuentra la suspensión automotriz y obtener el título de ingeniero por medio de esta investigación.

CAPÍTULO 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.

Para desarrollar un análisis de vibraciones con el que se pueda obtener la respuesta dinámica del automóvil y proponer una metodología aplicada a la detección de fallas y diagnóstico del estado actual del sistema, primero se debe

comprender algunos conceptos que se utilizaran en el transcurso del desarrollo de este trabajo, por lo tanto, a continuación, se menciona algunos conceptos básicos necesarios para fundamentar teóricamente la investigación. Mediante la instalación de un sistema de adquisición de datos, se busca identificar patrones que definan comportamientos específicos de la dinámica vehicular y con ello obtener un diagnóstico del sistema.

Las fuerzas horizontales se refieren a las cargas a las cuales está sometido el sistema, generadas por el contacto con el suelo por donde se encuentra transitando el automóvil, dichas fuerzas son “mitigadas o amortiguadas” de diferente forma, dependiendo del estado en el que se encuentra dicho sistema, de igual manera son ocasionadas por perturbaciones las cuales son naturales del camino, como lo son el tipo de suelo, baches o topes.

2.1. VIBRACIONES EN EL AUTOMÓVIL.

Los equipos automotrices están sujetos a una amplia gama de vibraciones, las cuales comunican a los usuarios de manera táctil, visual o audible. El concepto de vibración se utiliza comúnmente para referirse a la vibración táctil y visual, de este modo la vibración audible se conoce como ruido. El espectro de vibraciones puede dividirse por la frecuencia y clasificarse en oscilaciones (0-25 Hz) y ruido (25-25000 Hz). Con aproximaciones, la frecuencia máxima de 25 Hz es la frecuencia subalterna del umbral de audición y análogamente el límite máximo frecuencial es la oscilación normal en los automóviles de motor. Con la finalidad de analizar el marco vibracional del automóvil se deben explicar fuentes de excitación de oscilaciones, el comportamiento del auto, la percepción y tolerancia humana a las vibraciones. Si se limita solamente a frecuencias verticales, la gama existente se divide en tres tipos:

- 1-3 Hz: Frecuencias naturales de carrocería.

- 5-40 Hz: Frecuencias de oscilación de masas que no se encuentran suspendidas (entre 10 y 20 Hz).

- 40-250 Hz: Oscilaciones producidas en las masas no suspendidas, consecuentes a las vibraciones naturales en los neumáticos.

Las fuentes de excitación con las que se generan vibraciones en el vehículo se dividen en las siguientes secciones:

- Externas: transfieren a la masa suspendida mediante masas no suspendidas de las cuales su fundamental exponente son las irregularidades del terreno por donde circula.

- Directas: actúan en la masa suspendida por los objetos comprendidos en esta, son fuentes de excitación vibrantes que se encuentran añadidas al automóvil y surgen generalmente de partes giratorias o rotativas de este, tales como llantas/neumáticos, sistema de tracción/transmisión, el motor y acciones aerodinámicas. (Bono, 2017)

2.2 SISTEMA DE SUSPENSIÓN:

El sistema de suspensión de un automóvil está conformado por piezas, las cuales tienen como función absorber y amortiguar las anomalías del terreno en el que se circula (Bono, 2017), evitando que las vibraciones que se crean en las ruedas debido al estado de la carretera afecten a los usuarios del automóvil.

El sistema de suspensión mantiene la conexión entre las ruedas y la carretera sin importar el estado de la marcha. De esta manera mejora la guía y la adherencia de las ruedas, contribuyendo a la estabilidad y comodidad del automóvil (Bono,

2017). Los componentes y elementos mostrados a continuación integran el sistema de suspensión:

- Elásticos.
- Componentes de amortiguación y estabilidad.
- Elementos de fijación y guiado.

2.2.1 Funciones de la suspensión:

La suspensión de un automóvil se conforma mediante las siguientes funciones:

1. Mejora del confort.
2. Protección del automóvil.
3. Función estabilizadora.
4. Mejora en el manejo del vehículo.

1. **Función de mejora del confort.**

La tarea con la que cumple la suspensión consiste en eludir las anomalías de la carretera por las que el automóvil transita se transfieran a este (IngeMecanica, 2018), aumentando el confort en usuarios, de igual manera mejora el tránsito del automóvil.

2. **Función de protección del vehículo.**

Cuando se obstruye la transmisión de anomalías de la carretera, las cuales dañarían el chasis (IngeMecanica, 2018), así como a otros elementos del vehículo. Del mismo modo los neumáticos cumplen una tarea importante, al absorber las pequeñas anomalías, reduciendo el impacto en la suspensión (IngeMecanica, 2018).

Como se puede entender, el sistema de suspensión es un gran módulo de componentes los cuales trabajan de forma armónica para el buen funcionamiento de ésta, cuando algún componente comienza a fallar es notable el cambio en el confort dentro del automóvil, ya que las vibraciones generadas por el camino o alguna perturbación serán más notables para el usuario.

3. Función estabilizadora.

La función estabilizadora se ejecuta y absorbe gran parte de la fuerza centrífuga generada al cambiar de dirección, previniendo por medio de la deformación de los componentes elásticos, que la fuerza sea transmitida en su totalidad a los neumáticos (IngeMecanica, 2018). Esto concede un menor impacto en las ruedas, aumentando el punto máximo de adherencia lo que evita balanceos. En esta tarea la suspensión se apoya en un elemento adicional, llamado barra de estabilidad. Este trabajo se confronta con la de mejora para la comodidad, debido a que las dos dependen de la dureza en componentes elásticos. De esta manera, cuanto más suaves son más cómodo es el automóvil, en deterioro de su estabilidad (IngeMecanica, 2018). Por otro lado, la suspensión con componentes elásticos de gran dureza otorga más estabilidad en curvas, ya que cuentan con un límite muy alto de absorción de fuerzas.

4. Mejorar el manejo del automóvil.

Se cumple asegurando el contacto entre los neumáticos con el terreno, manteniendo la función directriz (IngeMecanica, 2018)

2.2.3 Fallas comunes en el sistema de suspensión.

Localizar tempranamente fallas en la suspensión para su pronto seguimiento aminora los costos de mantenimiento y proporciona confortabilidad para los usuarios, seguridad para todos los ocupantes y evita el desgaste de otros sistemas externos los cuales se pueden ver afectados por un mal funcionamiento del sistema de suspensión. Se discuten diferentes métodos para la detección de fallas en la suspensión, esta tiene la tarea de conservar el neumático en el suelo, aislando perturbaciones del camino, soportando el peso estático del automóvil y brindando al usuario condiciones de maniobrabilidad de calidad al momento de acelerar, frenar y girar (Criollo-Yanchatipan, 2021), todo lo anterior influye en el desgaste del sistema. A continuación, en la Tabla 1, se observan algunas de las principales fallas del sistema de suspensión junto a sus causas, componentes involucrados y la solución a dicho fallo.

Tabla 1. Causas y Fallas de la suspensión automotriz **(Rodarte, 2018)**

Fallas	Elementos Implicados	Origen de las fallas	Solución factible
Existe muelle constante que se incrementa cuando al pasar un tope de control en la velocidad.	Resortes helicoidales y amortiguador es en un sistema suspensión mixto.	Debido a que los amortiguadores se encuentran en un estado prácticamente inservibles, contraponen	Cambio de kit completo de amortiguadores.

		resistencia al movimiento del resorte y en consecuencia la oscilación es excesiva, constante y prolongada.	
Sistema de suspensión rígido.	Pernos y bujes de la suspensión en muelles parabólicos.	La tolerancia del perno adentro del buje de asentamiento es muy estrecha.	Reemplazamiento del buje para cumplir la función antifricción de componentes en el equipo.
El eje direccional no conserva la dirección del automóvil, en consecuencia, puede girar hacia distintos lados.	Los componentes tensores están doblados.	Al transitar en irregularidades del terreno tales como topes, vibradores o baches a altas velocidades, la suspensión es receptora de fuertes impactos.	Sustituir los componentes tensores que se encuentren doblados.
Rechinidos en el sistema suspensión.	Rótulas	Carente lubricación.	Lubricación de rótulas de movimiento.
Oscilación excesiva en el volante de la dirección, al	Barra estabilizadora	Carencia de barra estabilizadora o componente dañado debido al	Colocar componente si el automóvil carece de este; o reemplazarlo

momento en el que se transita en el terreno.		impacto por algún objeto externo de la carretera.	si es que se encuentra dañado.
El vehículo parqueado y sin carga tiende a inclinarse hacia algún flanco.	Se encuentran en estado caduco los componentes de soporte, tales como amortiguadores, muelles parabólicos o resortes helicoidales.	Los componentes que dan soporte a la carga del automóvil y de igual manera sujetan los ejes están en mal estado debido al tiempo de uso.	Cambiar el kit completo de los componentes.
Al transitar por las irregularidades en la carretera, se transmite un gran impacto al área de los neumáticos.	Amortiguadores.	Sobrepaso de capacidad de carga en los amortiguadores, o estado caduco de estos componentes respecto a su ciclo de vida útil.	Reemplazo de amortiguadores.

2.2.4 Principales riesgos en un sistema de suspensión en malas condiciones.

- **Peligro de volcadura o siniestro:** El sistema de suspensión absorbe irregularidades del terreno, previniendo que las llantas pierdan contacto con

el suelo (canalMOTOR, 2019). Si se circula con amortiguadores en mal estado, su tarea es más complicada de llevar a cabo para este sistema y con esto aumenta la posibilidad de que las ruedas dejen de estar en contacto con el terreno y con ello sea fácil perder el control del automóvil.

- **Daño en el motor.** Los amortiguadores en mal estado desestabilizan la suspensión y provocan que el engranaje del motor tenga que un mayor desgaste y en peores condiciones puede sufrir situaciones de estrés mecánico (canalMOTOR, 2019), en consecuencia, se acelera su desgaste e incluso puede llegarse a romper diferentes piezas de forma anticipada. Otro ejemplo el cual ha sido comprobado es el que los frenos se usan de mayor manera con amortiguadores en mal estado lo que ocasiona el desgaste anticipado y con ello se corre el riesgo de que no tengan una óptima respuesta a la hora de accionarse.
- **Ruedas excesivamente desgastadas o desgaste irregular.** Los neumáticos se encuentran entre los principales perjudicados de una suspensión en mal estado. Es habitual que las llantas se desgasten excesivamente y se vuelvan sumamente peligrosos para la circulación (canalMOTOR, 2019).
- **Seguridad mermada.** La distancia de frenado aumenta con amortiguadores caducos, en mal estado, o inservibles, la dirección comienza a ser inestable, fenómenos como el aquaplaning¹ son mucho más frecuentes (canalMOTOR, 2019) al igual que “jaloneos” cuando se alcanzan altas velocidades. Es por eso que es de suma importancia reemplazar los amortiguadores cuando se encuentran en un mal estado, si no se realiza se debe de ser consiente el peligro que representa circular con un sistema de suspensión en mal estado.
- **Mayor consumo de combustible.** Cuando una pieza clave de sistema de suspensión automotriz como los amortiguadores no se encuentran en plenas condiciones, aumenta el desgaste del vehículo (canalMOTOR, 2019). Dicho aumento no es fácil de notar si se maneja durante pocos kilómetros, pero está comprobado que el gasto de combustible aumenta cuando se tiene un sistema de suspensión en mal estado.

¹ Se refiere cuando el agua almacenada entre los neumáticos y el asfalto no puede ser desplazada.

- **Menos confort.** Cuando se tiene una falla en el sistema de suspensión el confort en el interior siempre tenderá a ser pésimo, con ello los viajes que se realicen dentro del automóvil será muy incómodos por el ruido que se genere en el sistema, la mala amortiguación al momento de pasar por alguna perturbación o al momento de hacer una maniobra en la conducción se sentirá mucho más “brusco” y con ello los pasajeros podrían llegar a sufrir alguna lesión.

2.3 MODELO CUARTO DE VEHÍCULO (MASA, RESORTE, AMORTIGUADOR).

El modelo de un vehículo se utiliza para analizar teóricamente y diseñar un sistema de suspensión pasiva, activa o semiactiva (Hurel, 2017). Con este modelo se puede presentar de manera adecuada la problemática sobre el control de variaciones de carga en las llantas el impacto en el sistema de suspensión ante alguna perturbación. Eliminando la amortiguación de las ruedas en el diseño del automóvil, la teoría del control define limitaciones consecuentes a la falta de adaptabilidad de los coeficientes de la función de transferencia normalizada (Hurel, 2017). Considerando la amortiguación de las llantas, se obtiene una reducción en la aceleración vertical de la masa suspendida sin aumentar la carrera de la suspensión y la deflexión del neumático. Una suspensión pasiva es caracterizada por no recibir aplicación de energía externa y está conformada por un resorte, amortiguador y elementos de conexión (Hurel, 2017), sus parámetros están previamente estudiados y comprobados para absorber perturbaciones generadas por la carretera.

En la Figura 5, se observa el diseño de un sistema de suspensión pasiva, en el cual:

- M_2 es la masa suspendida (chasis del vehículo).

- M1 es la masa no suspendida (neumático).
- K2 es la rigidez de la suspensión.
- K1 es la rigidez del neumático.
- B2 es el coeficiente de amortiguamiento de la suspensión.
- B1 es el coeficiente de amortiguamiento del neumático.

La curva irregular que se observa en la parte baja de la Figura 5, muestra la carretera en la cual se desplaza la llanta.

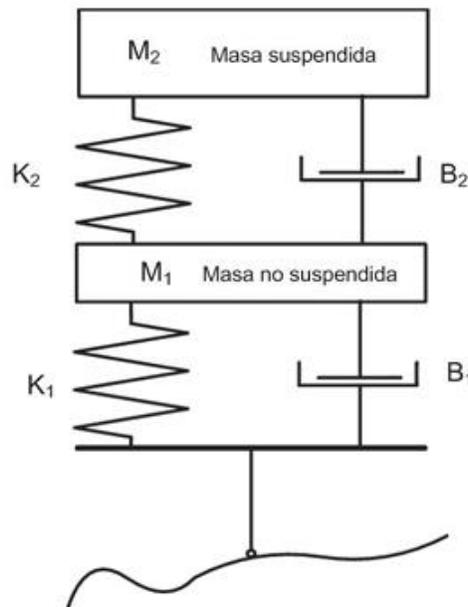


Figura 5. Representación esquemática del sistema de suspensión pasivo **(Gerardo Hurtado Hurtado, 2014)**

La ecuación diferencial 1, es la que modela el comportamiento del sistema mostrado en la figura 5.

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + D \frac{dx}{dt} + kx = F \quad [1]$$

Y su ecuación característica es muestra en la ecuación 2:

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad [2]$$

En la ecuación 3 se muestra la ecuación con la cual podemos encontrar la variable “lambda”:

$$\lambda_{1,2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad [3]$$

Del análisis de los tres casos posibles surgen los diferentes tipos de amortiguamiento. Sobre amortiguamiento cuando $\left(\frac{c}{2m}\right)^2 > \frac{k}{m}$; amortiguamiento crítico si $\left(\frac{c}{2m}\right)^2 = \frac{k}{m}$ y sub amortiguamiento cuando $\left(\frac{c}{2m}\right)^2 < \frac{k}{m}$. Es importante destacar el comportamiento del sistema en estos casos. En los dos primeros no hay oscilación, mientras que en el último hay un movimiento vibratorio que se extingue con el tiempo (Azurmendi, 2017).

2.4 MANTENIMIENTO PREVENTIVO Y PREDICTIVO

1. Mantenimiento Predictivo.

El mantenimiento predictivo responde ante la necesidad de la industria, con el fin de afianzar un buen funcionamiento en los equipos de producción (Cesáreo, 1998). La base de este paradigma de mantenimiento radica en el estudio del estado actual de los equipos. Con esto se pueden abordar dos problemáticas al mismo tiempo; la primera es el reemplazo de elementos los cuales no se encuentren en óptimas condiciones operativas y con ello evitar las paradas innecesarias de operaciones para inspeccionar y el segundo punto es que se evitan las averías imprevistas mediante su detección temprana.

(Cesáreo, 1998) menciona en su libro que un mantenimiento predictivo radica en los siguientes pilares fundamentales:

- La existencia de parámetros funcionales con los cuales sepamos de la situación del equipo.
- El monitoreo continuo de equipos, para detectar el mal funcionamiento antes de que ocurra, observar su evolución y predecir la vida útil de los elementos.

La mayoría de los componentes en las máquinas y/o sistemas “advienten” de alguna manera antes de que ocurra una falla (Cesáreo, 1998).

Entre las ventajas más importantes que se reflejan al usar este mantenimiento se encuentran las siguientes:

- Detectar e identificar anticipadamente desperfectos que pueden aparecer en el sistema o máquina sin necesidad de desmontar o detener.
- Observa aquellos defectos que solo pueden ser detectados cuando la maquina o el sistema está en funcionamiento.
- Seguir la evolución de la falla hasta estimar que es peligrosa.
- Determinar el historial de funcionamiento de la maquina con el desarrollo de parámetros funcionales y la conexión con cualquier suceso importante: revisión, lubricación, reemplazo de componentes, cambio en las condiciones de funcionamiento y/o fallas detectadas.
- Programar suministro de repuestos y mano de obra.
- Programar el paro de la maquinaria o sistema, para la corrección del fallo detectado, haciéndolo de la mejor manera posible para evitar pérdidas en el proceso de producción.
- Reducir el tiempo de reparación, debido a que anteriormente existe un diagnóstico de la falla o avería de los componentes que afectan al sistema o a la máquina.
- Proporcionar criterios para una selección satisfactoria de la máquina, y en general de todo el sistema.

Sin embargo (Cesáreo, 1998) explica que los puntos anteriormente mencionados solo son una fundamentación teórica del mantenimiento predictivo, y otro hecho muy diferente es lo que puede ocurrir en la práctica. Las dificultades para el desarrollo de este resultan de principios:

No existe ningún parámetro funcional, no hay quiera una relación entre ellos, que sea capaz de reflejar cuál es el estado de una máquina.

Como segundo lugar, es poco viable una vigilancia continua de todos los parámetros funcionales relevantes para todos los equipos en una instalación. (Cesáreo, 1998). De igual manera, el número de parámetros que son monitoreados para para el análisis en un programa de mantenimiento tienden a limitarse al igual que al número de máquinas implicadas. Consecuentemente las limitantes antes mencionadas pueden representarse en las siguientes fallas:

- El defecto se produce en un intervalo de tiempo comprendido entre dos medidas contiguas.
- Una falla no detectada por la medición y análisis de los parámetros del programa.
- Aun siendo detectado un defecto, éste puede ser no diagnosticado correctamente o en toda su gravedad.
- Habiendo realizado un diagnóstico correcto, puede no ser posible programar la suspensión de la máquina o del sistema en el momento oportuno, y en consecuencia correr el riesgo de sufrir el fallo.

2. Mantenimiento Preventivo.

El propósito del mantenimiento preventivo es afianzar la disposición de los equipos, sistemas e instalaciones industriales, para obtener el rendimiento esperado de estas (Cesáreo, 1998). Esto se logra ya que con el mantenimiento preventivo se busca disminuir o evitar la reparación de lo maquinaria o sistemas, por medio de una rutina de inspección periódica y la substitución de

componentes deteriorados. A diferencia del mantenimiento predictivo, para poder realizarse este tipo de mantenimiento es necesario que durante las inspecciones se desmonte total o parcialmente la maquinaria o sistema a revisar.

Un intervalo demasiado largo entre escaneos crea el riesgo de la aparición de fallos entre dos escaneos consecutivos, mientras que en un intervalo bastante pequeño tiende a encarecer significativamente el proceso de producción (Cesáreo, 1998).

El éxito de este mantenimiento depende de la selección acertada del tiempo de revisión.

La principal desventaja que presenta la aplicación de este mantenimiento es el costo de revisiones. Desmontar y revisar un equipo que está funcionando correctamente o la sustitución de elementos (lubricante, rodamientos, etc.) que no es encuentren en mal estado conlleva a una intervención innecesaria.

CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA.

A continuación, se presenta la metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo, dicha metodología se basa en el diagrama bloques de la Figura 6.

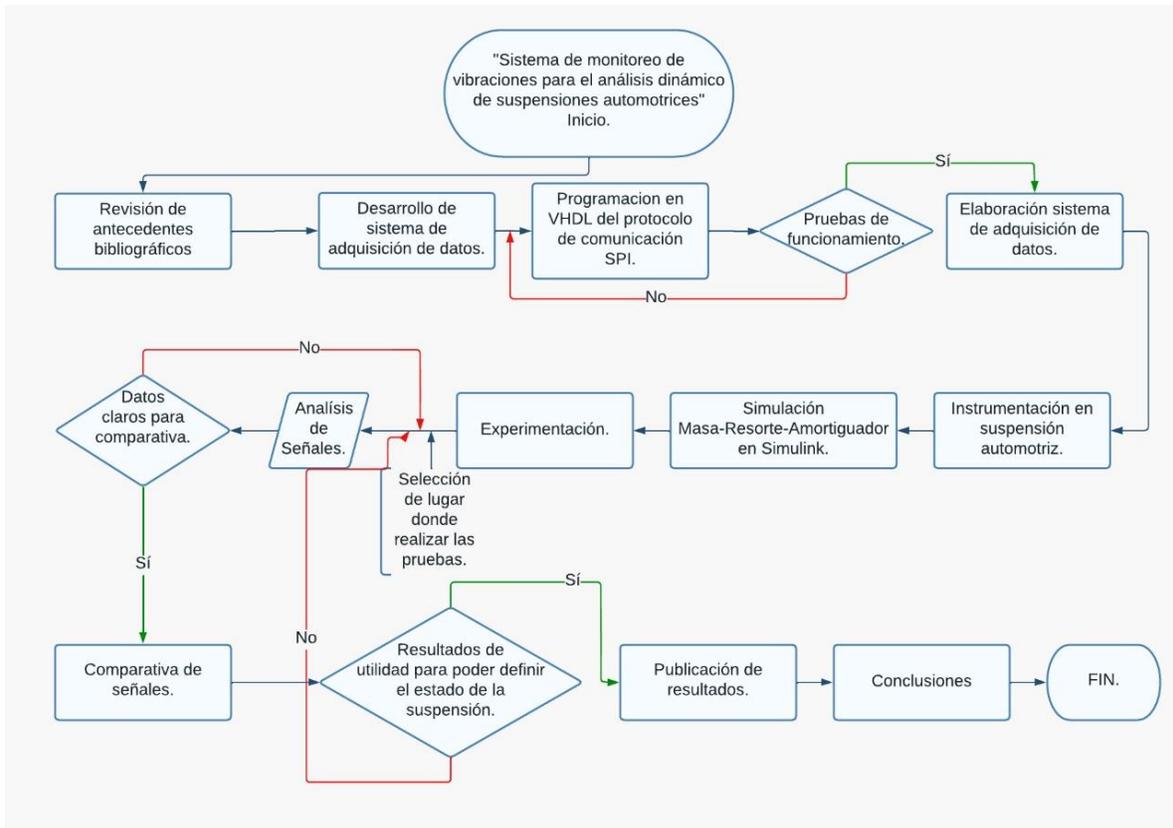


Figura 6. Diagrama de bloques metodológica.

Se comienza con la revisión de la bibliografía acerca del tema para tener un conocimiento avanzado y más específico sobre este tema a desarrollar, de igual manera se busca poder aprender y conocer acerca de los trabajos realizados anteriormente sobre el tema o relacionado a este y con ello obtener información y conocimientos con el cual se afrontará las problemáticas descritas en capítulos anteriores y abordarlas de la mejor manera para poder superarlas.

Una vez realizado el punto antes mencionado, con los conocimientos adquiridos se procede con el siguiente objetivo el cual consiste en elaborar un sistema de adquisición de datos con un bajo presupuesto para después una vez probado su funcionamiento comenzar con lo siguiente en la lista de tareas, el cual es la instrumentación de dicho sistema y con ello poder obtener las señales de interés

con las cuales se va a desarrollar a cabo un análisis de las diferentes señales obtenidas ante diferentes tipos de perturbaciones como entrada al sistema de suspensión y con ello realizar comparaciones en los comportamientos de cada una de las diferentes perturbaciones ya que con ello se extraerán algunos patrones los cuales serán analizados, interpretados y comparados con señales y datos ya normalizados para realizar una conclusión correcta de dicha experimentación y cumplir los objetivos planteados en el presente trabajo.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE PROTOCOLO DE COMUNICACIÓN SPI

Para la realización de este trabajo fue necesario construir un protocolo de comunicación con el cual la tarjeta FPGA se comunicará con el acelerómetro y por lo consiguiente se pudo realizar un sistema de adquisición de datos. Para ello se eligió el protocolo de comunicación SPI (Figura 7) el cuál se describe a continuación:

De forma general el Protocolo de Comunicación SPI está conformado principalmente por dos circuitos digitales que son SPI y Control SPI.

- El primer circuito, SPI, genera las señales de control necesarias (SCLK, CS) para realizar escritura/lectura en el sensor; además, este mismo circuito será el encargado de manejar las señales SDI y SDO durante los procesos de lectura/escritura.

- El segundo circuito, Control SPI, proporciona al circuito SPI las direcciones de los registros (A) que se quieran modificar junto con el valor del nuevo dato (Di). El proceso de modificación de valores de registro se hace como parte del proceso de configuración del sensor para hacer que salga del modo standby.

Otra de las funcionalidades de este circuito es la de devolver los valores de aceleración leídos (A_x , A_y , A_z) por el sensor. Los valores mencionados se refieren

a cada una de las direcciones de los ejes coordenados, cada uno tiene una lectura independiente

En resumen, el circuito Control SPI es el que se encarga de decirle al circuito SPI cuando se realizarán escrituras y lecturas sobre los registros del sensor.

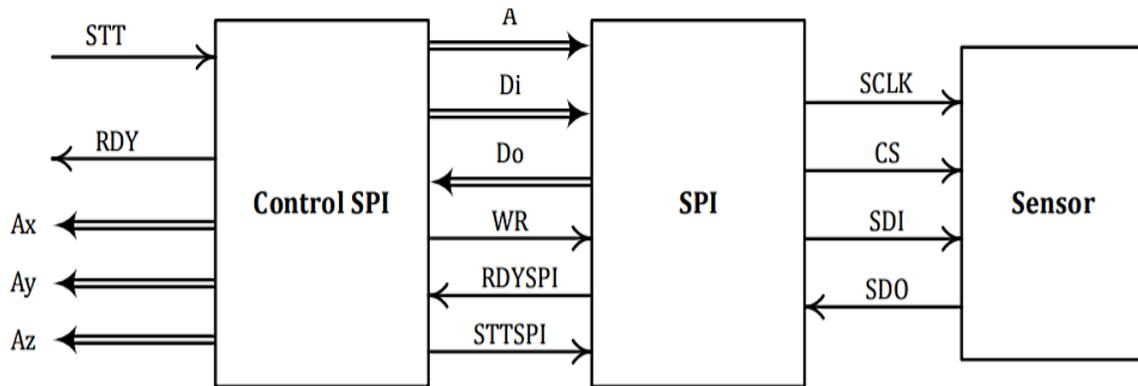


Figura 7. Esquema del sistema de adquisición de datos (Dorantes, 2020).

- El circuito SPI está constituido como se muestra en la figura ocho y considera las siguientes entradas y salidas:

Entradas: WR, STTSPI, A, Di, SDO

Salidas: Do, RDYSPI, SCLK, CS, SDO

- Hay algunas consideraciones sobre el diseño:

a) El registro de Concatenación genera una variable D1 de 16 bits que está formada como anteriormente se explico

b) Todos los circuitos que se encuentran dentro del recuadro de línea punteada trabajar a la misma frecuencia de reloj en la que opera el sensor, es decir, a DCLK

c) El Circuito de Cuadratura y el Sincronizador son los únicos circuitos que operan a la frecuencia de operación de la tarjeta (50 MHz o 48 MHz)

$D1 \leftarrow WR \ \& \ MB \ \& \ A \ \& \ Di$

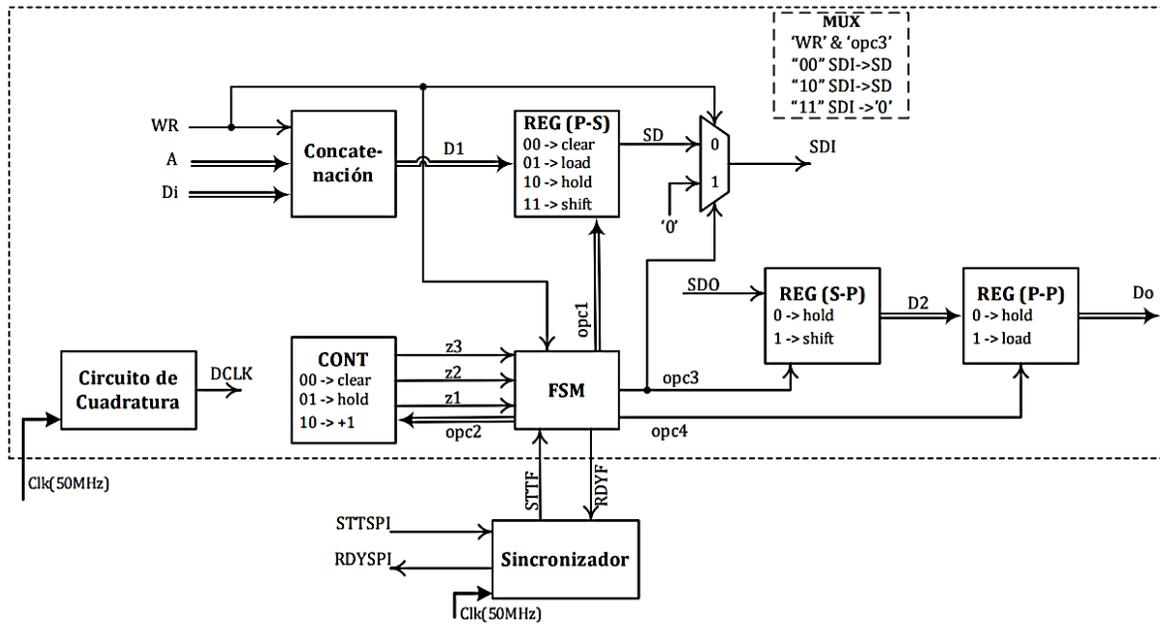


Figura 8. Diagrama de bloques, estructura de protocolo de comunicación SPI (Dorantes, 2020)

- De todos los bloques que componen al circuito SPI, la FSM y el Sincronizador son los más importantes ya que la FSM se encargará de activar y desactivar los habilitadores correspondientes para lograr generar las señales DCLK, DCS y de manejar las señales SDO y SDI.

El Sincronizador mostrado en la figura nueve se encargará únicamente de sincronizar a aquellos elementos que trabajan a 50 MHz con los elementos que trabajen a una frecuencia diferente.

- Sincronizador

Entradas: STTSPI, RDYF

Salidas: STTF, RDYSPI

Proceso detallado para el Sincronizador del protocolo de comunicación SPI:

1. Estado 0: Se espera a el cambio de estado (bajo a alto) de la señal de inicio STTSPI para cambiar al Estado 1, la señal de salida se mantiene en bajo.

2. Estado 1: Cambia de estado a la señal que inicializa el proceso que opera a la frecuencia DCLK, es decir, se mantiene en alto a STTSPI hasta que se haya terminado de realizar todo el proceso que es operado a la frecuencia DCLK. El cambio al Estado 2 se da cuando RDYF cambia de bajo a alto.

3. Estado 2: Las salidas STTF y RDYSPI se cambian ha estado bajo y se mantienen ahí mientras el estado de RDYF sea alto. El cambio al Estado 3 se da cuando RDYF cambia de alto a bajo. 4.

4. Estado 3: Se cambia de bajo a alto la salida RDYSPI y sin condición se pasa al Estado 0.

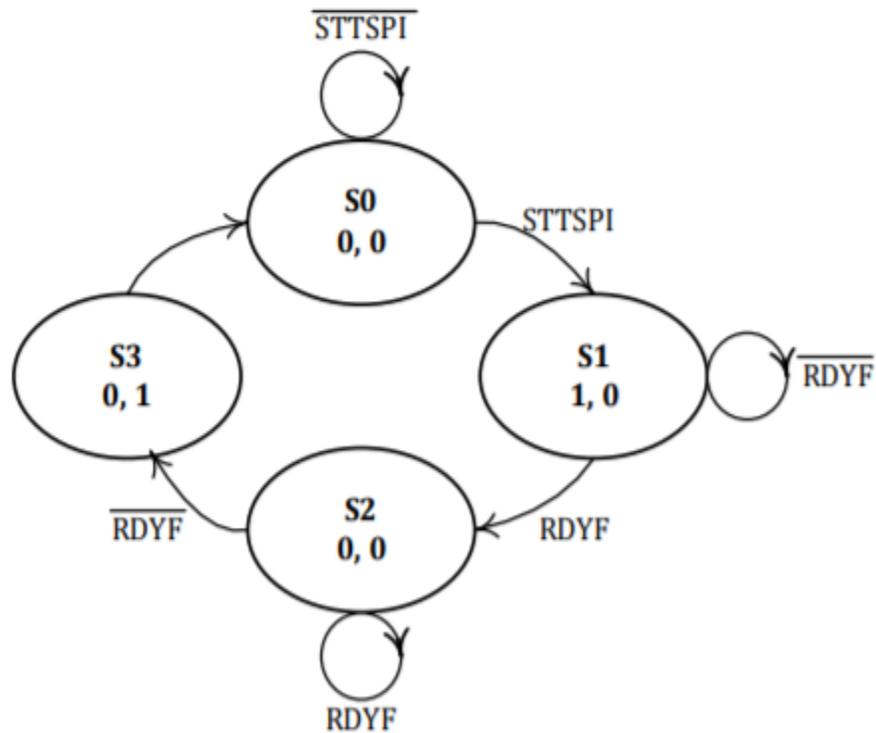


Figura 9. Diagrama de máquina de estados del Sincronizador SPI (estado 0 a estados 3) (Dorantes, 2020)

- FSM (Finite State Machine o máquina de estados finitos)

Entradas: STTF, WR, z1, z2, z3

Salidas: opc1, opc2, opc3, opc4, CS, RDYF

Proceso de trabajo e ilustración gráfica de la máquina de estados para el protocolo de comunicación SPI:

1. Estado 0: Se inicializan contadores y registros manteniendo en alto a CS, para cambiar al Estado 1 se espera que cambia de bajo a alto STTF.

2. Estado 1: Carga los valores de D1 en el Registro P-S, se mantiene los valores en el resto de contadores y registros, se sigue mantenido en alto a CS. En caso de escritura se pasará al Estado 2 si WR está en bajo, en caso de lectura se pasará al Estado 4 y WR estará en alto.

3. Estado 2: Cambia de estado a CS (bajo), el Registro P-S comienza a desplazar los valores los valores cargados en D1, el Contador comienza a contar, el cambio al Estado 3 se da hasta que el contador haya alcanzado una cuenta de 15 y en z1 se dé el cambio de estado de bajo a alto.

4. Estado 3: Contadores y registros mantienen los valores, se cambia de estado a CS (alto) y se activa la señal de que ha finalizado la escritura. Sin condición se pasa al Estado 0.

5. Estado 4: El registro P-S comienza a desplazar los valores los valores cargados en D1, el Contador comienza a contar, el cambio al Estado 5 se da hasta que el contador haya alcanzado una cuenta de 7 y en z2 se dé el cambio de estado de bajo a alto. S0 0, 0 S1 1, 0 S2 0, 0 S3 0, 1 RDYF STTSPI RDYF RDYF RDYF STTSPI

6. Estado 5: El registro P-S deja de hacer desplazamiento, el contador se mantiene incrementando la cuenta, el cambio al Estado 6 se da hasta que el contador haya

alcanzado una cuenta de 55 y en z3 se dé el cambio de estado de bajo a alto.

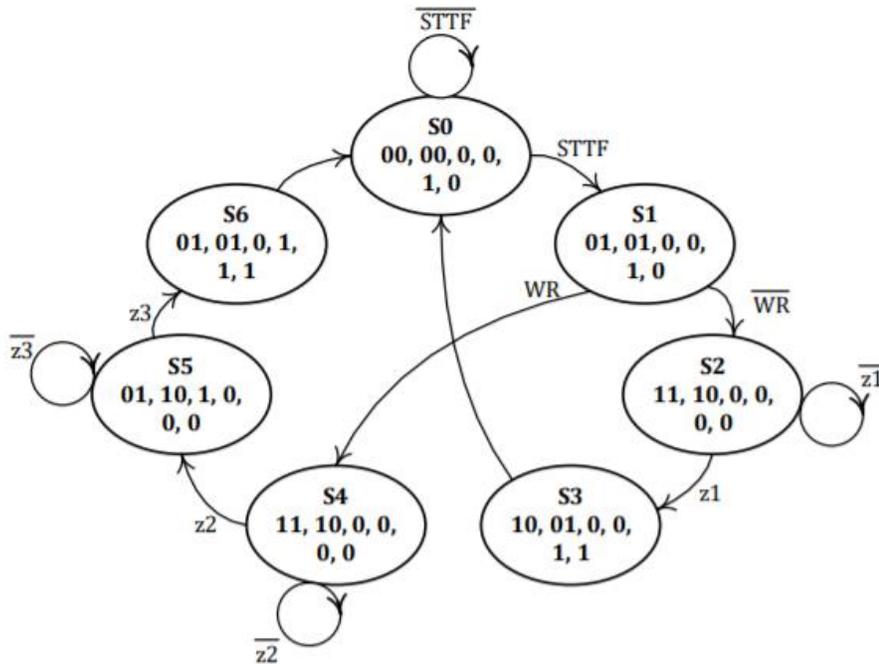


Figura 10. Máquina de estados protocolo de comunicación SPI, (estado 0 a estado 5). (Dorantes, 2020)

CONTROL SPI

- El circuito de control SPI está constituido como se muestra en la figura 11 y considera las siguientes entradas y salidas:

Entradas: STT, RDYSPI, Do

Salidas: WR, RDY, STTSPI, A, Di, Ax, Ay, Az

- Hay algunas consideraciones sobre el diseño:

a) Este circuito es el encargado de definir si se harán procesos de escritura o lectura sobre el sensor

b) La frecuencia de operación es de 50 MHz

c) Las lecturas de aceleración leídas son desplegadas por este circuito en Ax, Ay y Az.

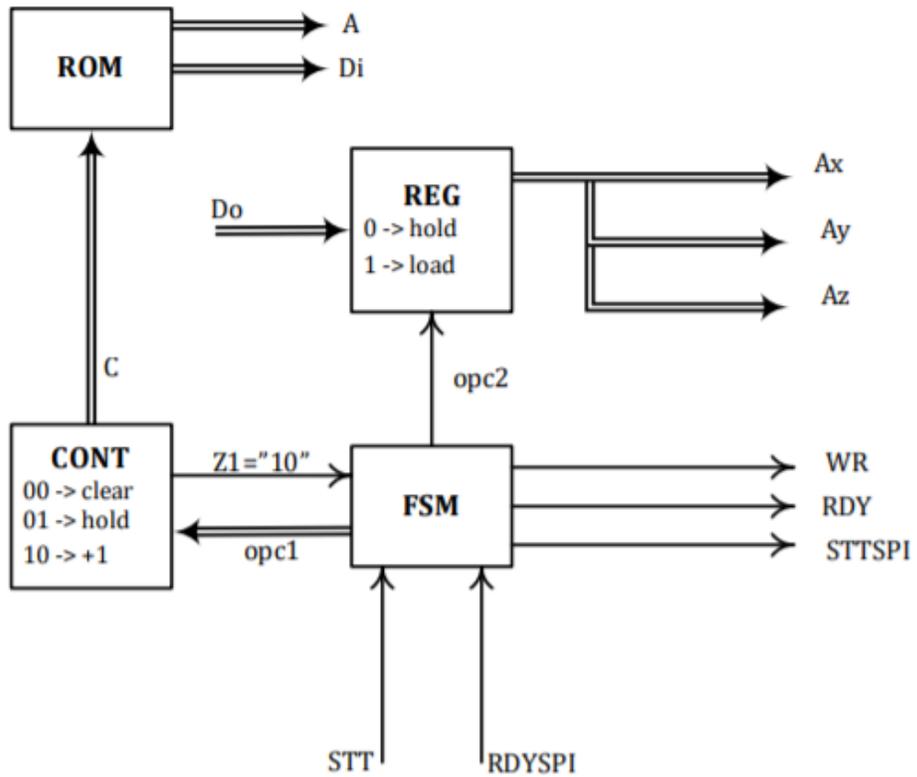


Figura 11. Diagrama controlador del SPI (Dorantes, 2020).

FSM completa del protocolo de comunicación SPI

A continuación, se describen las entradas, salidas y consideraciones de la máquina de estados finitos terminada, dicha máquina será la encargada de controlar todo el proceso para la adquisición de datos, se puede observar su diagrama en la figura 12.

Entradas: STTF, z1, STTSPI

Salidas: opc1, opc2, STTSPI, WR, RDY Consideraciones:

- a) La señal z1 es la que define la cantidad de registros a modificar para configurar el sensor, en el caso del IIS3DWB son dos registros y en el caso del ADXL345 son tres.

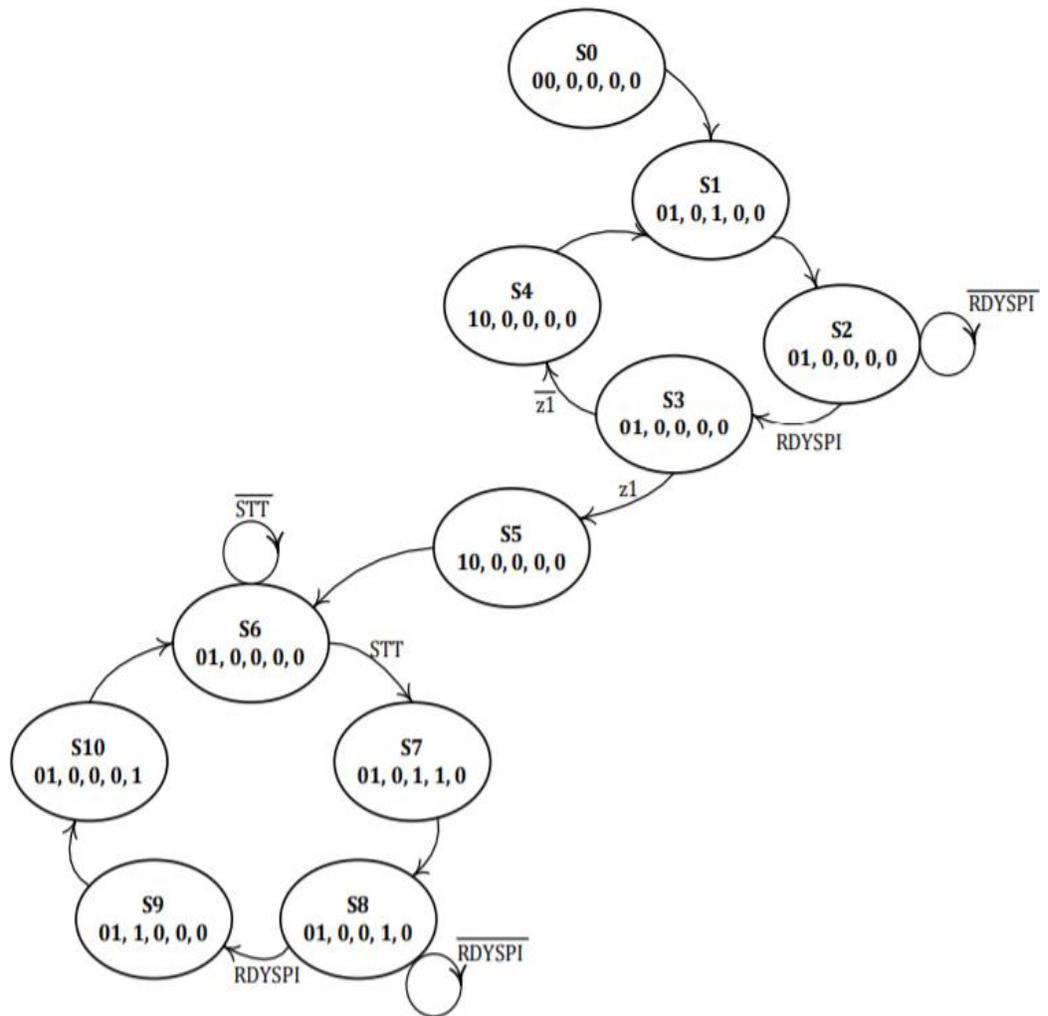


Figura 12. Diagrama de máquina de estados completa del protocolo de comunicación SPI (Dorantes, 2020).

3.2 ELABORACIÓN SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la elaboración del sistema de adquisición presentado, se necesitó realizar la conjunción de los diferentes elementos mencionados anteriormente junto a el protocolo de comunicación y con esto se lograrse la elaboración de un sistema con el cual se obtuvieron los datos necesarios para la comparación de las señales en tiempo real con las señales esperadas a partir de datos normalizados y con ello observar patrones con los cuales se pueden identificar los diferentes estados en los cuáles se encuentra la suspensión automotriz, es decir si el sistema se encuentra en un buen estado o si simplemente tenemos un sistema deteriorado o ya en un estado crítico.

A continuación, se presenta el proceso con el cual se elaboró el sistema de adquisición de datos.

Como primera parte la elaboración del sistema de adquisición de datos se tuvo que plantear la forma más eficiente para poder adquirir los datos necesarios, se plantearon diferentes ideas, para escoger el lenguaje de programación que nos permitiera una mejor implementación, y de igual forma se discutieron diferentes lugares para poder muestrear, una vez discutido lo anterior se tomó la decisión de que la mejor opción era realizar un sistema de adquisición de datos utilizando un lenguaje de programación en VHDL y con ayuda de una tarjeta FPGA realizar todo el procedimiento de adquisición mediante algunos otros periféricos como lo es un acelerómetro externo el cual envía los datos a la tarjeta para que con estos datos se realice el análisis de los datos, dicha decisión está fundamentada en que una tarjeta FPGA tiene mayor protección contra factores del exterior en comparación a otros dispositivos programables, al igual que la arquitectura con la que trabaja nos permite incluir más periféricos de ser necesario.

Una vez pasado la parte mencionada se comenzó a programar el código para poder realizar la comunicación mediante el acelerómetro y la tarjeta FPGA.

Una vez terminada dicha parte de la programación, se pasó a la parte en la cual se realizaron todas las conexiones pertinentes para el funcionamiento de nuestro sistema de adquisición.

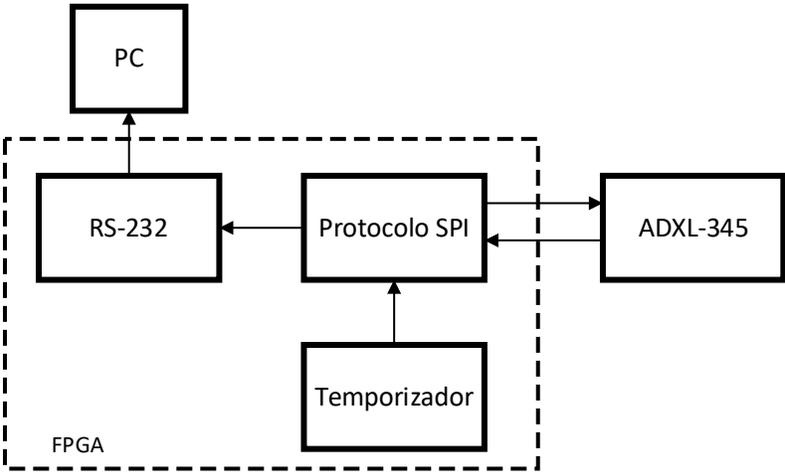


Figura 13. Diagrama de conexiones.



Figura 14. Tarjeta FPGA conectada a PC vista desde la parte trasera del automóvil

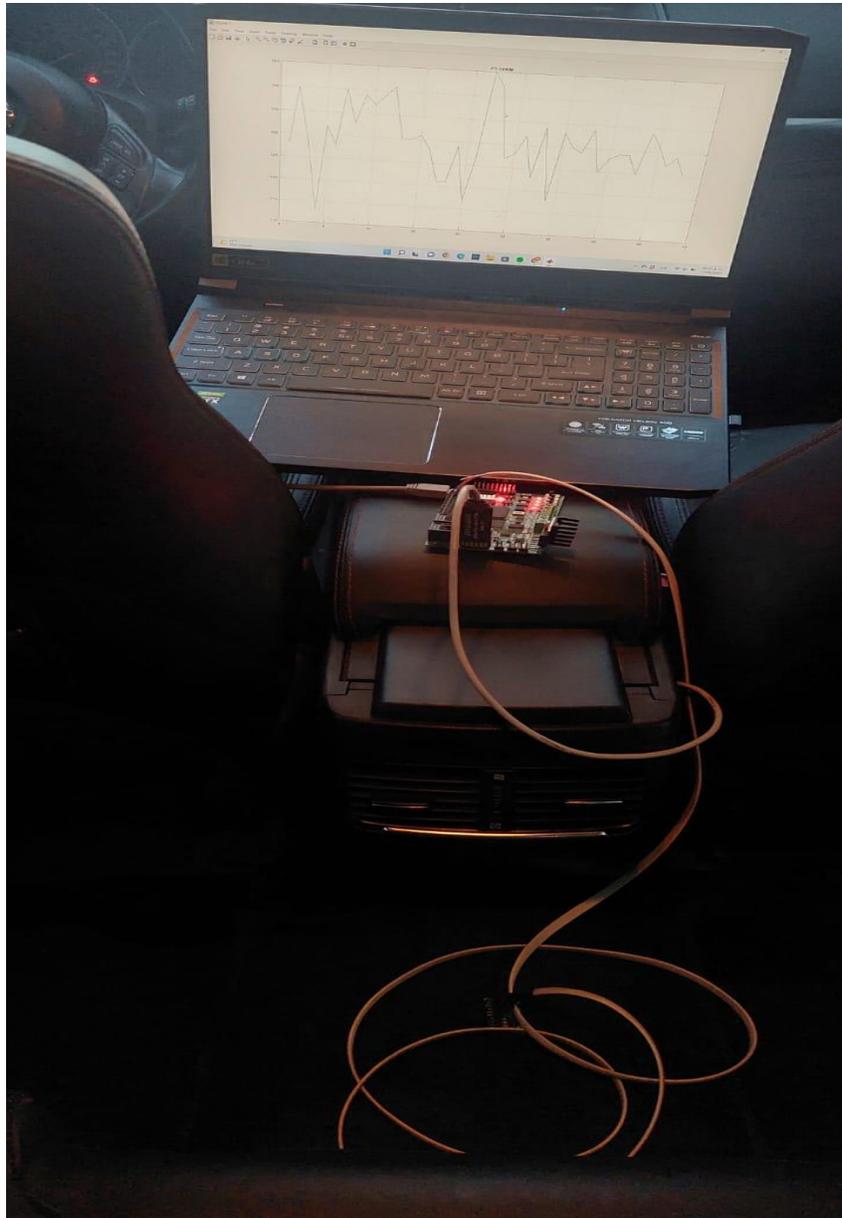


Figura 15. Sistema de adquisición de datos completo (Tarjeta FPGA, Acelerómetro, PC).

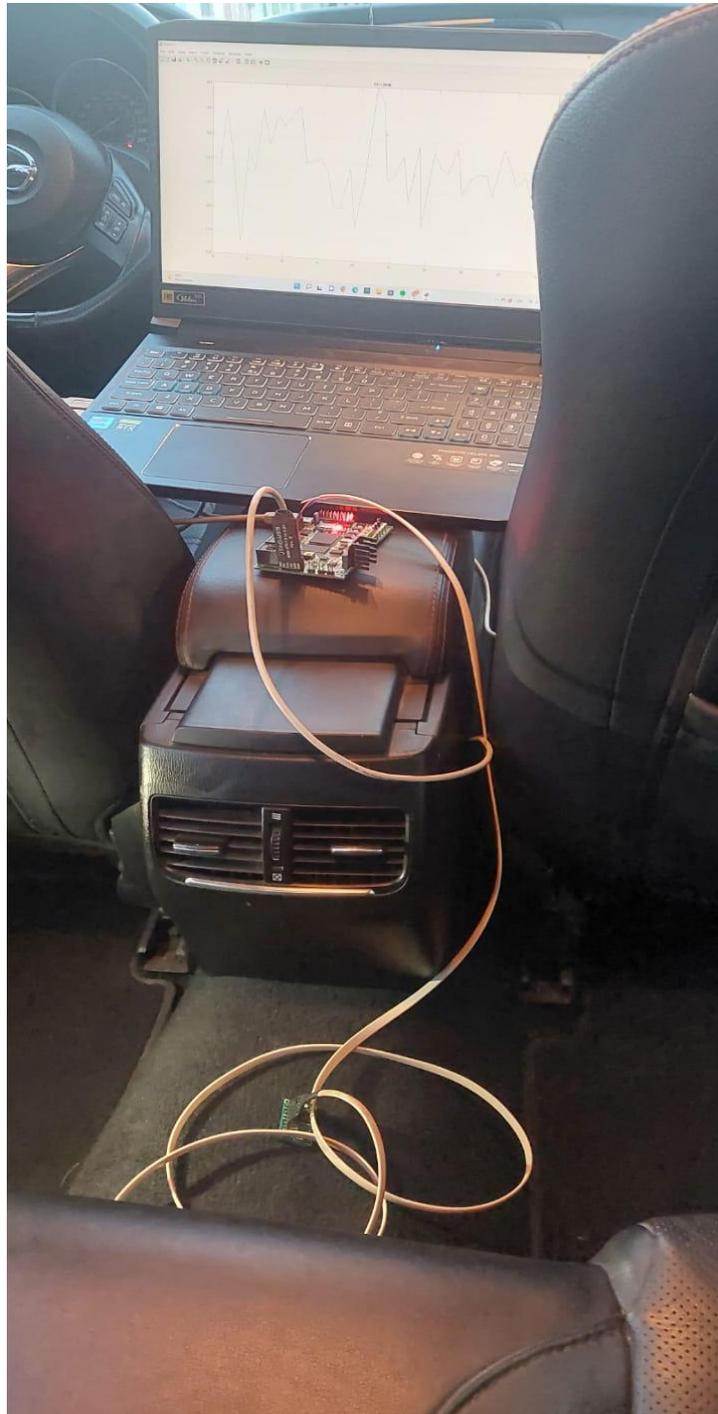


Figura 16. Sistema de adquisición de datos, vista desde la parte trasera del automóvil.

3.3 INSTRUMENTACIÓN EN SUSPENSIÓN AUTOMOTRIZ

Con la finalidad de obtener las señales necesarias para este trabajado es de suma importancia escoger un lugar adecuado, en el cual las lecturas del sistema de adquisición de datos sean las más correctas posibles y que tengan menos perturbaciones del exterior para su correcta interpretación. Por lo cual se escogió realizar la implementación del sistema de adquisición de datos en lo más próximo al centro de masa del automóvil con ello se obtuvieron señales con muy poco ruido y con las cuales se realizaron pruebas satisfactorias.

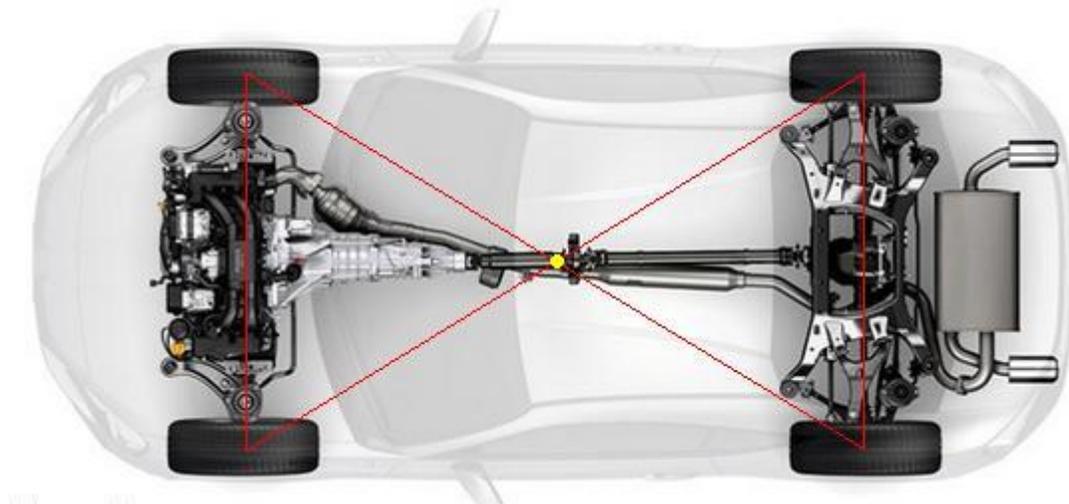


Figura 17. Diagrama representativo de donde se encuentra aproximadamente el centro de masa del automóvil. **(G, 2015)**

Para la instrumentación del sistema se procedió a colocar el acelerómetro con ayuda de una cinta doble cara en la parte central del automóvil marca Mazda, modelo 2014 el cual cuenta se encuentra equipado con suspensiones de tipo McPherson (Figura 17.) (Mazda, 2013), decisión que fue fundamentada debido a que es cercano al centro de masa del vehículo y determinado después de una serie de pruebas para poder observar donde obteníamos una señal clara y sin ruido, para poder descartar el amortiguamiento de la tapicería se tuvo que hacer un corte en ella poner el acelerómetro y tomar señales las cuales fueron comparadas después

con una teniendo la vestidura puesta una vez que analizamos las señales pudimos observar que no existía una diferencia entre ambas señales, con lo cual se descartó el amortiguamiento; una vez realizado esto el sistema se colocó en el asiento de copiloto y con esto se realizaron las pruebas correspondientes.



Figura 18. Suspensión McPherson

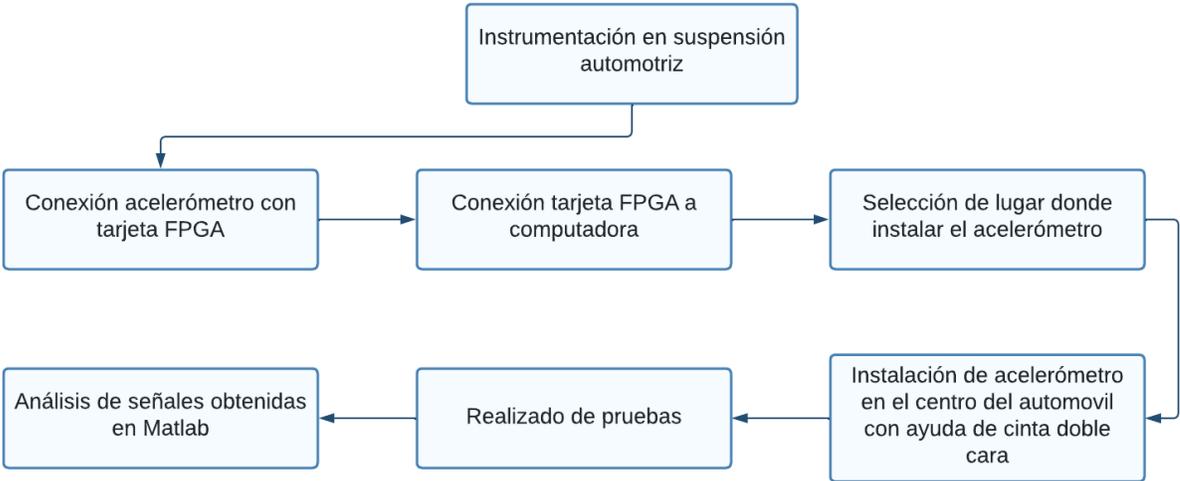


Figura 19. Diagrama de bloques para instrumentación del sistema de adquisición de datos en la suspensión automotriz

3.4 SIMULACIÓN SISTEMA MASA, RESORTE, AMORTIGUADOR

Con el fin de poder obtener una referencia de lo esperado en la adquisición y procesamiento de los datos, se necesitó realizar la simulación de una suspensión automotriz, esto para tener una comparativa entre señales y poder realizar una variación en las condiciones de amortiguamiento, en la viscosidad del fluido del amortiguador y con variables diferentes en cuanto a velocidad al pasar una perturbación se refería, en este caso se realizó una función para poder simular un reductor de velocidad (tope), y con ello realizar una perturbación en el sistema.

Cabe resaltar que antes de realizar la simulación, fue necesario conocer las ecuaciones diferenciales que establecen el comportamiento de nuestro sistema, para ello basta con realizar un análisis a un sistema masa-resorte-amortiguador, una vez realizado el análisis de dicho sistema se obtuvieron las siguientes ecuaciones diferenciales:

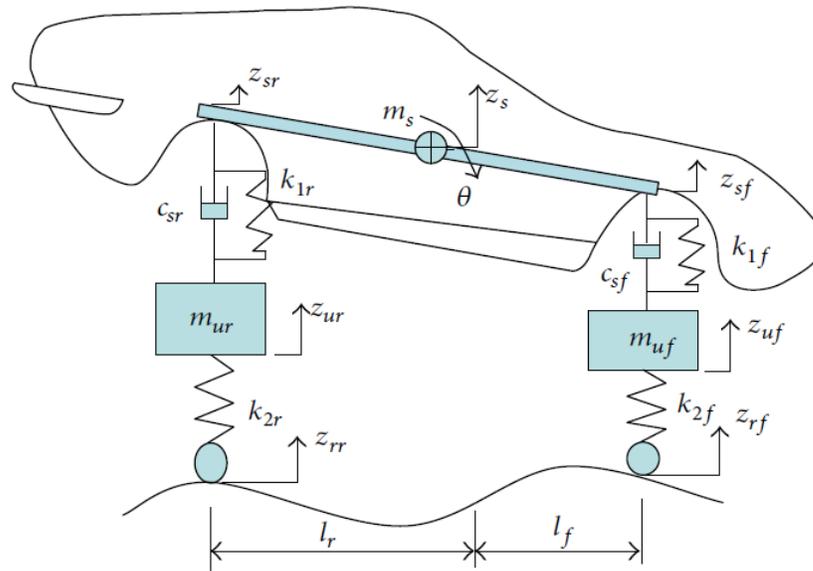


Figura 20. Modelado de un vehículo (**Daniel Garcia-Pozuelo, 2014**).

El modelo tiene cuatro grados de libertad, representado en la Figura 18. Los cuatro grados de libertad son la aceleración de la masa suspendida, el ángulo de inclinación, la masa no suspendida delantera aceleración y la aceleración de la masa no suspendida trasera.

El movimiento de la masa suspendida se representa de la siguiente manera como lo muestran las ecuaciones cuatro y cinco:

$$m_s \ddot{z}_s = -k_{1f}(z_s - l_f \theta - z_{uf}) - c_{sf}(\dot{z}_s - l_f \dot{\theta} - \dot{z}_{uf}) - k_{1r}(z_s - l_r \theta - z_{ur}) - c_{sr}(\dot{z}_s - l_r \dot{\theta} - \dot{z}_{ur}) \quad [4]$$

$$J_y \ddot{\theta} = -l_f [k_{1f}(z_s - l_f \theta - z_{uf}) - c_{sf}(\dot{z}_s - l_f \dot{\theta} - \dot{z}_{uf})] + l_r [-k_{1r}(z_s - l_r \theta - z_{ur}) - c_{sr}(\dot{z}_s - l_r \dot{\theta} - \dot{z}_{ur})] \quad [5]$$

Donde:

- i. m_s : masa suspendida (kg).
- ii. z_s : desplazamiento vertical del centro de gravedad del vehículo (m).

- iii. k_{1f} : rigidez de la suspensión vertical delantera (N/m).
- iv. l_f : distancia entre el eje delantero y el centro de gravedad (m).
- v. z_{uf} : desplazamiento vertical de la masa no suspendida delantera (m).
- vi. c_{sf} : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión delantera (N*s/m).
- vii. θ : paso del vehículo (rad).
- viii. k_{1r} : rigidez de la suspensión vertical trasera (N/m).
- ix. l_r : distancia entre el eje trasero y el centro de gravedad (m).
- x. c_{sr} : coeficiente de amortiguamiento de la suspensión trasera (N*s/m).
- xi. z_{ur} : desplazamiento vertical de la masa no suspendida trasera (m).
- xii. J_y : momento de inercia.

El movimiento de la masa no suspendida se representa con las ecuaciones seis y siete:

$$m_{uf}\ddot{z}_{uf} = k_{1f}z_s + c_{sf}\dot{z}_s - k_{1f}l_f\theta - c_s l_f \dot{\theta} - (k_{1f} + k_{2f})z_{uf} - c_{sf}\dot{z}_{uf} + k_{2f}z_{rf} \quad [6]$$

$$m_{ur}\ddot{z}_{ur} = k_{1r}z_s + c_{sr}\dot{z}_s - k_{1r}l_r\theta - c_{sr}l_r\dot{\theta} - (k_{1r} + k_{2r})z_{ur} - c_{sr}\dot{z}_{ur} + k_{2f}z_{rr} \quad [7]$$

Donde:

- i. m_{uf} : masa no suspendida delantera (kg).
- ii. k_{2f} : rigidez vertical del neumático delantero (N/m).
- iii. z_{rf} : desplazamiento vertical frontal del pavimento (m).
- iv. m_{ur} : masa no suspendida trasera (kg).
- v. k_{2r} : rigidez vertical del neumático trasero (N/m).
- vi. z_{rr} : desplazamiento vertical posterior del pavimento (m).

Una vez obtenidas las ecuaciones se procede a la implementación de estas en Simulink. Para realizar la simulación es necesario utilizar el software Matlab y

consiguiente a ello en la herramienta simulink se procede a realizar la implementación de los diagramas de bloques con los cuales se realiza la simulación de nuestro sistema el cual se puede observar en el anexo 1.

Una vez realizada dicha simulación se realizaron diferentes iteraciones con distintos coeficientes de elasticidad y amortiguamiento, simulando así el deterioro de los componentes del sistema, y con ello tener una referencia de lo que se espera sea el cambio en las señales que se desea conocer. Se debe tomar en cuenta la siguiente tabla, los cuales contienen valores de elasticidad y amortiguamiento previamente normalizados con los cuales se tiene un estándar sobre el comportamiento de la suspensión automotriz.

Es importante mencionar que se tomó una velocidad de 15 km/h a la hora en que el sistema recibe la perturbación creada por el tope, para realizar tanto la prueba como la simulación.

En el anexo dos y tres, se muestra el código e imagen ilustrativa con el cual fue generada la señal que simula nuestra perturbación (tope) y cabe recalcar que la simulación de dicha señal es de suma importancia para que con ello la simulación nos de los resultados que buscamos, ya que las señales a comparar serán entre la simulación y los datos tomados en tiempo real.

	Vehicle category			
	A	C	D	E
Percentage of front weight	60%	60%	60%	60%
Front suspension stiffness (K_{1f})	15000 N/m	15000 N/m	30000 N/m	40000 N/m
Rear suspension stiffness (K_{1r})	15000 N/m	15000 N/m	30000 N/m	30000 N/m
Rear damping coefficient (c_{sr})	1700 N-s/m	1700 N-s/m	3500 N-s/m	5000 N-s/m
Front damping coefficient (c_{sf})	1700 N-s/m	1700 N-s/m	3500 N-s/m	5000 N-s/m
Sprung mass (M_s)	800 kg	950 kg	1527 kg	2210 kg
Front unsprung mass (M_{uf})	70 kg	70 kg	100 kg	120 kg
Rear unsprung mass (m_{ur})	70 kg	70 kg	80 kg	120 kg
Front tyre stiffness (K_{2f})	220000 N/m	200000 N/m	220000 N/m	250000 N/m
Rear tyre stiffness (K_{2r})	220000 N/m	200000 N/m	220000 N/m	250000 N/m
Moment of inertia (J_y)	1000	1000	1000	1000
Wheelbase (L)	2.35 m	2.47 m	2.69 m	2.85 m

Figura 21. Coeficientes de elasticidad y amortiguamiento para diferentes vehículos. **(Daniel Garcia-Pozuelo, 2014)**

Como se puede observar en el anexo 2 se realizó una simulación utilizando valores estandarizados y a partir de estos valores se realizaron más simulaciones variando los valores en los coeficientes de amortiguamiento y elasticidad, en la imagen se observa una simulación utilizando coeficientes de elasticidad de 30000 y coeficientes de amortiguamiento de 3500

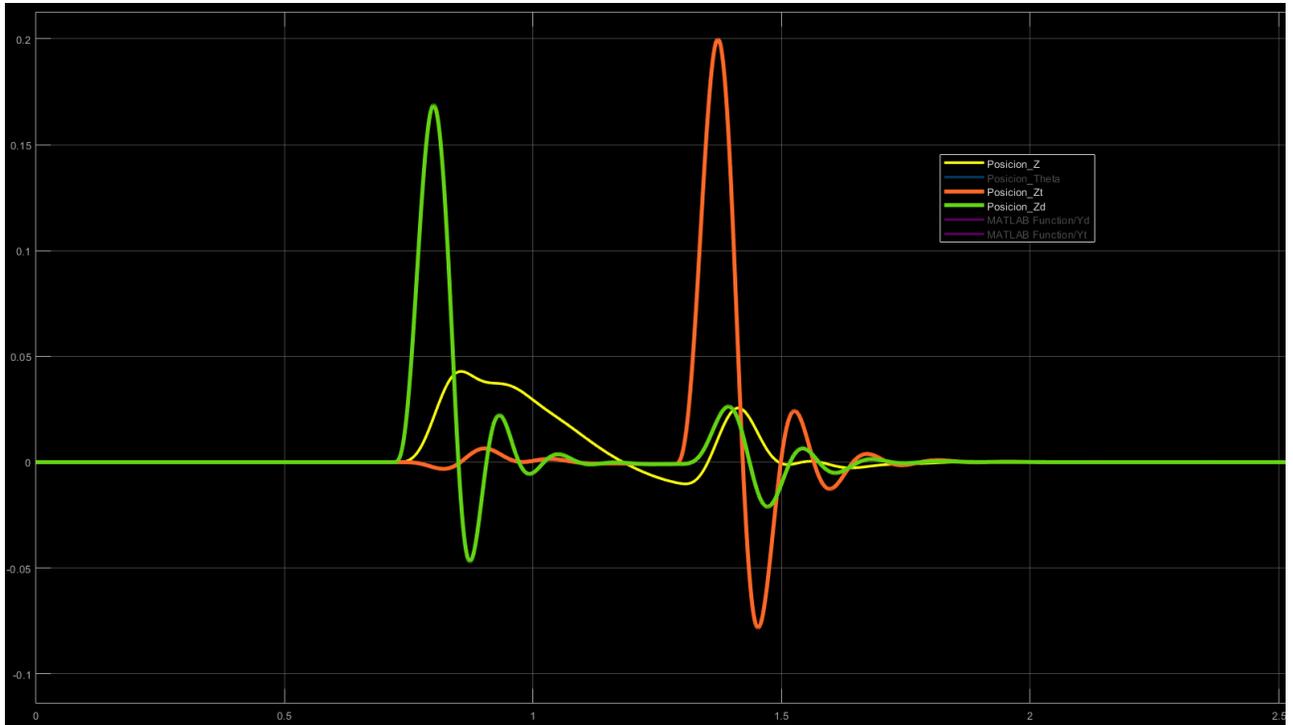


Figura 22. Simulación con coeficiente de amortiguamiento de 3.5K y coeficiente de elasticidad de 30K.

En la gráfica anterior (Figura 20) se presenta los resultados de la simulación realizada con coeficientes ideales dados por parámetros estándares, en dicha figura se puede apreciar el comportamiento de los diferentes ejes de la suspensión Z_t nos muestra el comportamiento trasero de la suspensión, Z_d el comportamiento delantero y la posición Z muestra el comportamiento combinado, los coeficientes que fueron utilizados en dicha simulación fueron los siguientes:

KD y KI: 30000

Ct y Cd: 3500

Una vez realizada la simulación con los datos estandarizados en cuanto a coeficiente de elasticidad y de amortiguamiento, se procedió a realizar iteraciones con diferentes coeficientes de amortiguamiento y elasticidad, cabe recalcar que, para poder realizar simulaciones correctas, se realizó una investigación acerca del

desgaste en amortiguadores, en la cual se encontraron los siguientes datos, los cuales sirven de referencia para la elaboración de dicha simulación.

Dentro de la investigación realizada se encontró la vida útil promedio de los amortiguadores automotrices la cual es la siguiente, se considera que la vida útil en los amortiguadores es de cuatro a cinco años o a los 60,000 kilómetros (Cristobal, 2014), una vez pasado dicho tiempo de vida, es muy probable que los amortiguadores comiencen a presentar un desgaste considerable y/o algunos fallos visibles (fugas de líquido del amortiguador, pérdida de coeficiente de amortiguación, nula amortiguación).

Es importante conocer el estado en los amortiguadores debido a que son de las partes en la suspensión automotriz donde se recibe uno de los mayores desgastes.

Un amortiguador se comprime entre 5.000 a 7.000 veces por minuto, trabajan de forma constante y es conveniente revisarlos cada cuatro años o cada 60.000 kilómetros, lo que antes suceda. Durante este periodo, los amortiguadores del automóvil se habrán comprimido 420.000.000 veces. (Cristobal, 2014)

3.5 EXPERIMENTACIÓN.

Para la experimentación se utilizaron dos diferentes suspensiones, los cuales se seleccionaron para poder realizar la comparación y con ello observar y analizar las señales que rigen a cada una de ellas, se tomó una suspensión de un Mazda 6 2014 de la cual hablamos en el subcapítulo 3.3, la cual cuenta con diferentes fallos previamente detectados, como desgaste en amortiguadores y bujes, para la adquisición de las señales se puso el sistema de adquisición en la parte central del automóvil, cercano al centro de masa y con ello tener una medición más precisa y sin ruido, a comparación de si se realizaba una medición directamente en el amortiguador o alguna otra parte de la suspensión automotriz, una vez que se puso

en su lugar el sistema de adquisición de datos, se continuó realizando diferentes pruebas y a diferentes velocidades, la prueba consistía en insertar una perturbación al sistema para que éste amortiguara dicha perturbación, la perturbación consiste en pasar un reductor de velocidad a una cierta velocidad y con ello observar como es el comportamiento del sistema de suspensión a dicha entrada.



Figura 23. Mazda 6 modelo 2014®.

Para la primera prueba se propuso pasar por la perturbación a una velocidad de 10 km/h siguiendo la matriz de experimentación mostrada en la Tabla 2, una vez que se realizaron dichas pruebas se procedió a graficar los datos adquiridos para ver el comportamiento de la suspensión.

En el capítulo cuatro, se muestran las gráficas adquiridas de la primera prueba realizada en una suspensión en buen estado. Cabe resaltar que los datos de interés para nuestra experimentación son los datos recibidos en el eje z, en la Figura 24 es en donde se observa la disposición de los ejes utilizados, una vez obtenidos los datos, se procedió a graficarlos.

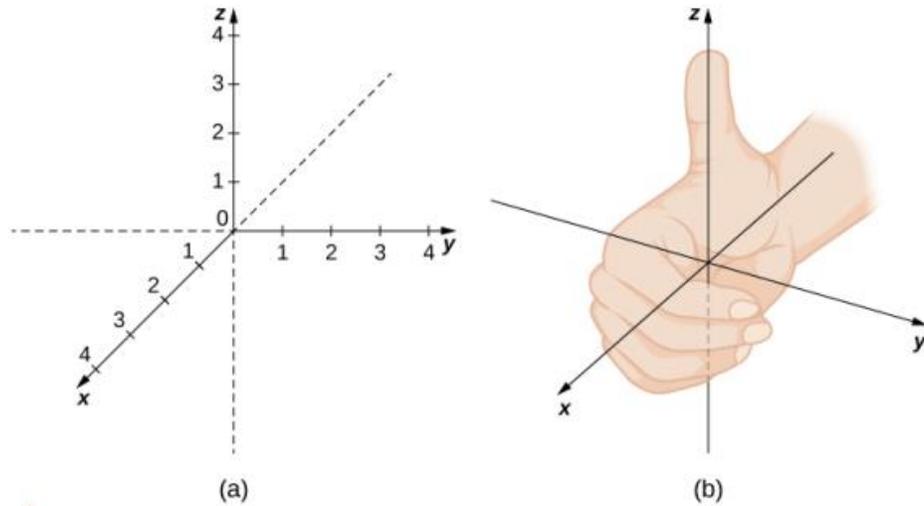


Figura 24. Plano de referencia para los ejes X, Y, Z.

Después de mostrar los resultados obtenidos en la suspensión en buen estado se procedió a mostrar los resultados de las pruebas realizadas utilizando una suspensión con desgaste, para llevar a cabo dicho experimento se realizó el mismo procedimiento mencionado anteriormente con una velocidad de 10 km/h al momento de pasar sobre la perturbación, cabe decir que ambas simulaciones se realizaron en el mismo camino con las mismas perturbaciones para poder tener datos en las cuales las condiciones de camino sean las mismas para ambos experimentos. Teniendo estas pruebas, se procedió a realizar de nuevo el experimento pasando a una velocidad de 15 km/h con cada una de las suspensiones a estudiar, una vez que se realizó un filtrado de los resultados se escogieron las gráficas en donde se observan de forma más clara la diferencia entre una suspensión en buen estado comparado a una suspensión con desgaste, en el capítulo cuatro se hablará sobre los resultados obtenidos.

Tabla 2. Matriz de Experimentación.

Condiciones	Velocidad del Vehículo	
	10 km/h	15 km/h
Sano	1	5
	2	6
	3	7
	4	8
Desgaste	9	14
	10	15
	11	16
	12	17
	13	18

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIONES:

4.1 ANÁLISIS DE LAS SEÑALES:

En las siguientes figuras se muestran las gráficas seleccionadas de una suspensión en buen estado y las de una suspensión desgastada, se dará una breve descripción en cada una de ellas y al final de la sección en el subcapítulo “4.2 Análisis de señales” se debatirán los resultados obtenidos en las comparaciones.

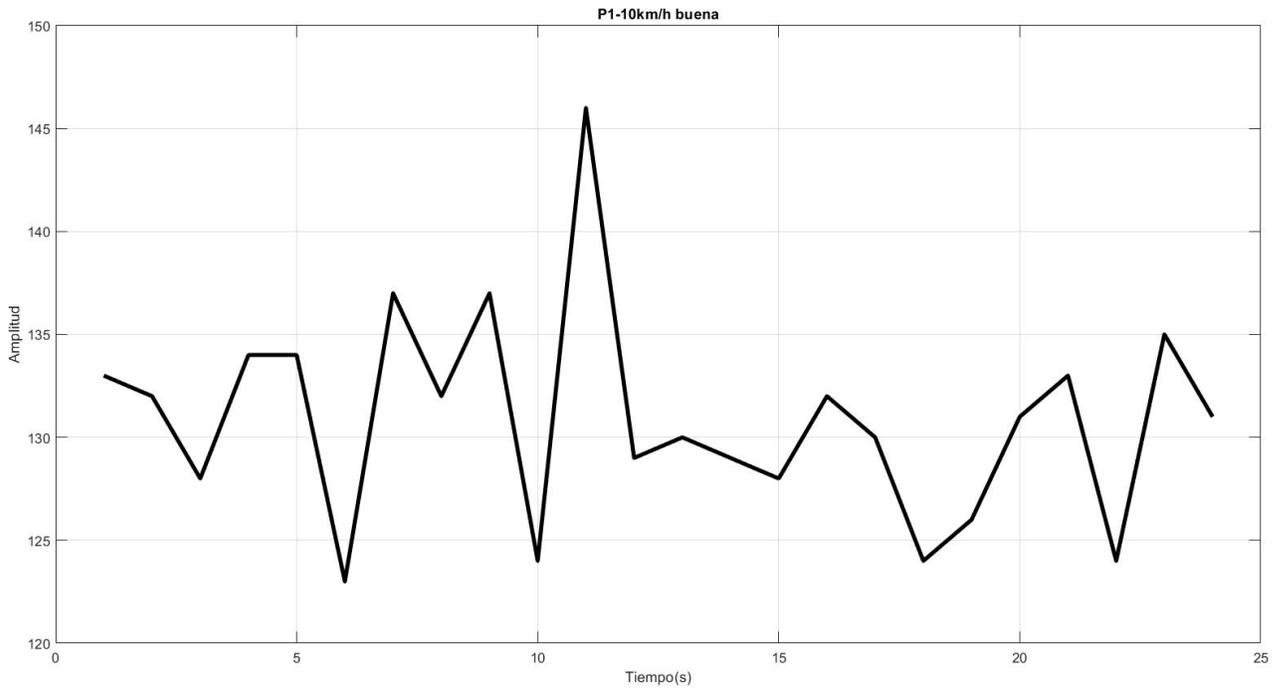


Figura 25. Gráfica prueba realizada a 10 km/h en suspensión en buen estado.

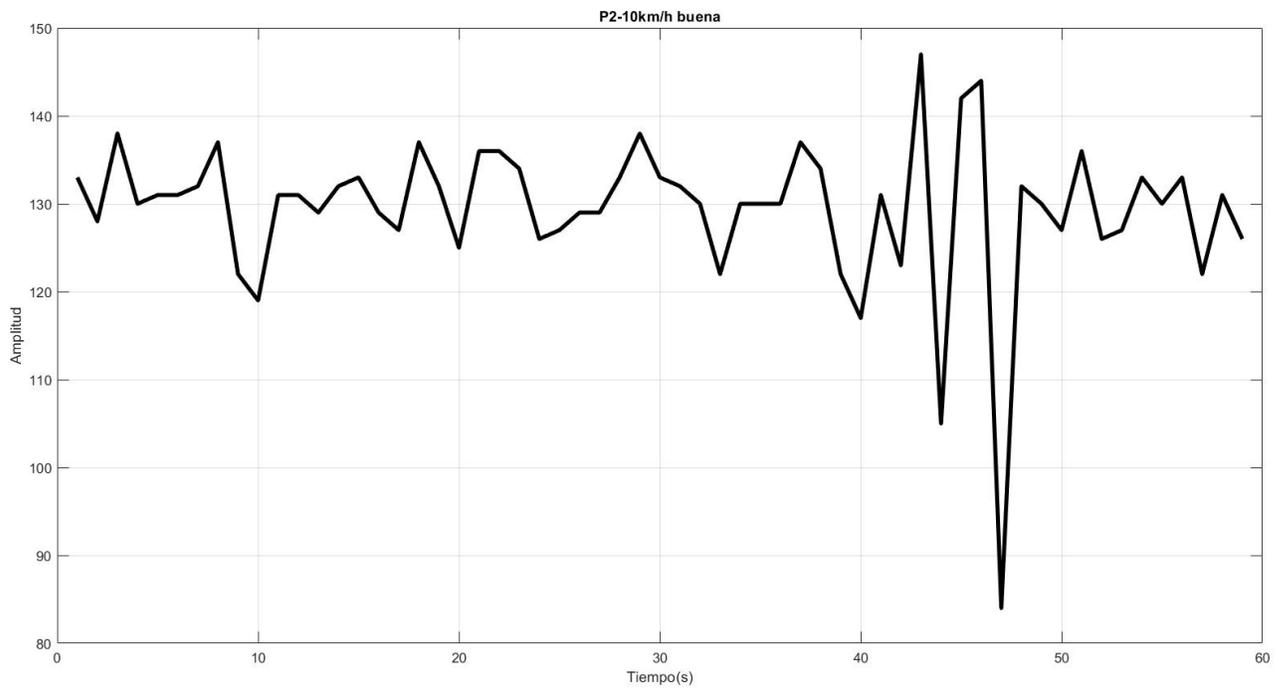


Figura 26. Gráfica prueba realizada a 10 km/h en suspensión en buen estado.

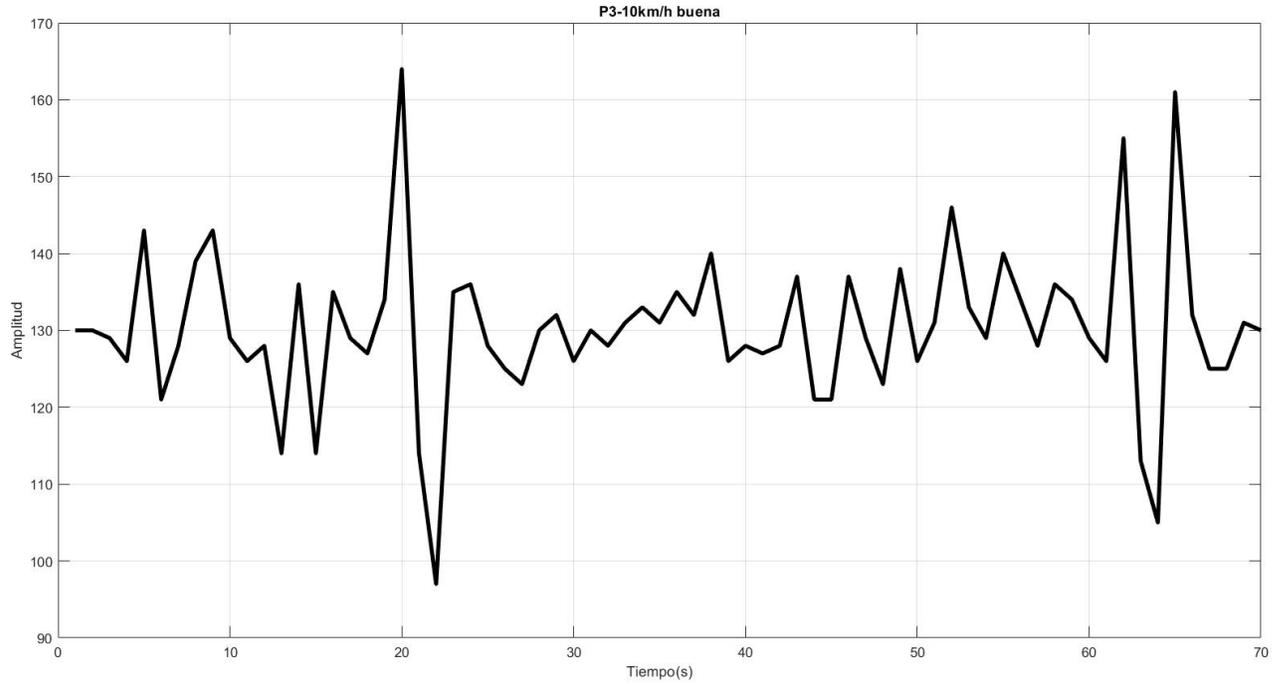


Figura 27. Gráfica prueba realizada a 10 km/h en suspensión en buen estado.

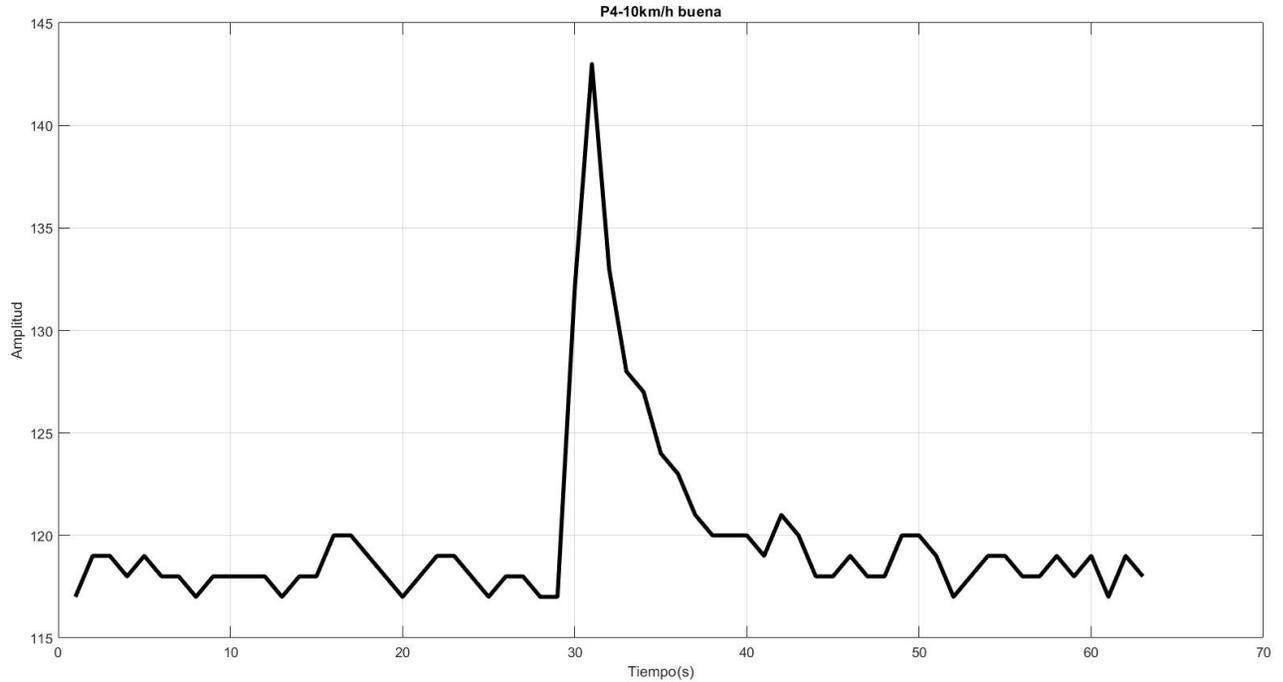


Figura 28. Gráfica prueba realizada a 10 km/h en suspensión en buen estado.

Como puede observarse en las figuras anteriores, la forma en que se “disipan” las oscilaciones en las gráficas es de forma rápida, al observar que tenemos picos pequeños después de haber pasado por la perturbación nos indica una buena amortiguación del sistema de suspensión automotriz, esto en la vida real se verá reflejado en la comodidad a la hora de pasar un tope o cualquier otra perturbación del camino.

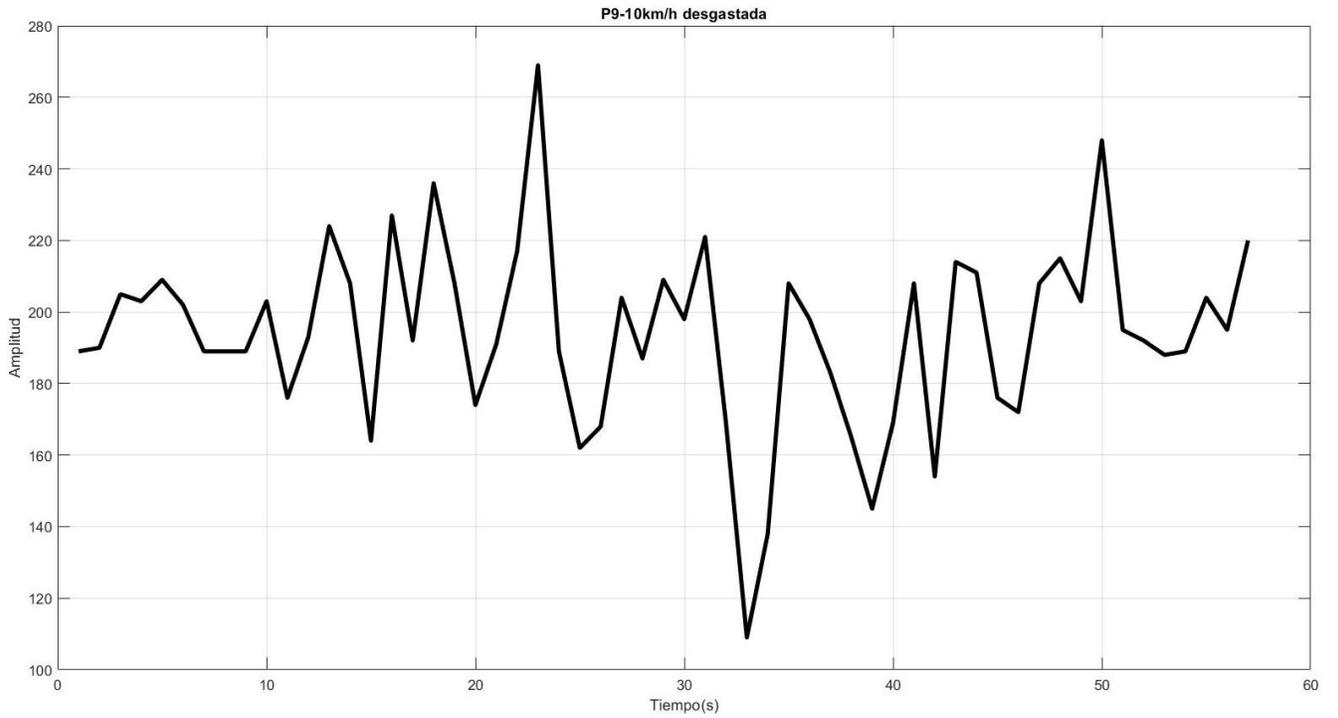


Figura 29. Gráfica prueba realizada a 10 km/h en suspensión desgastada.

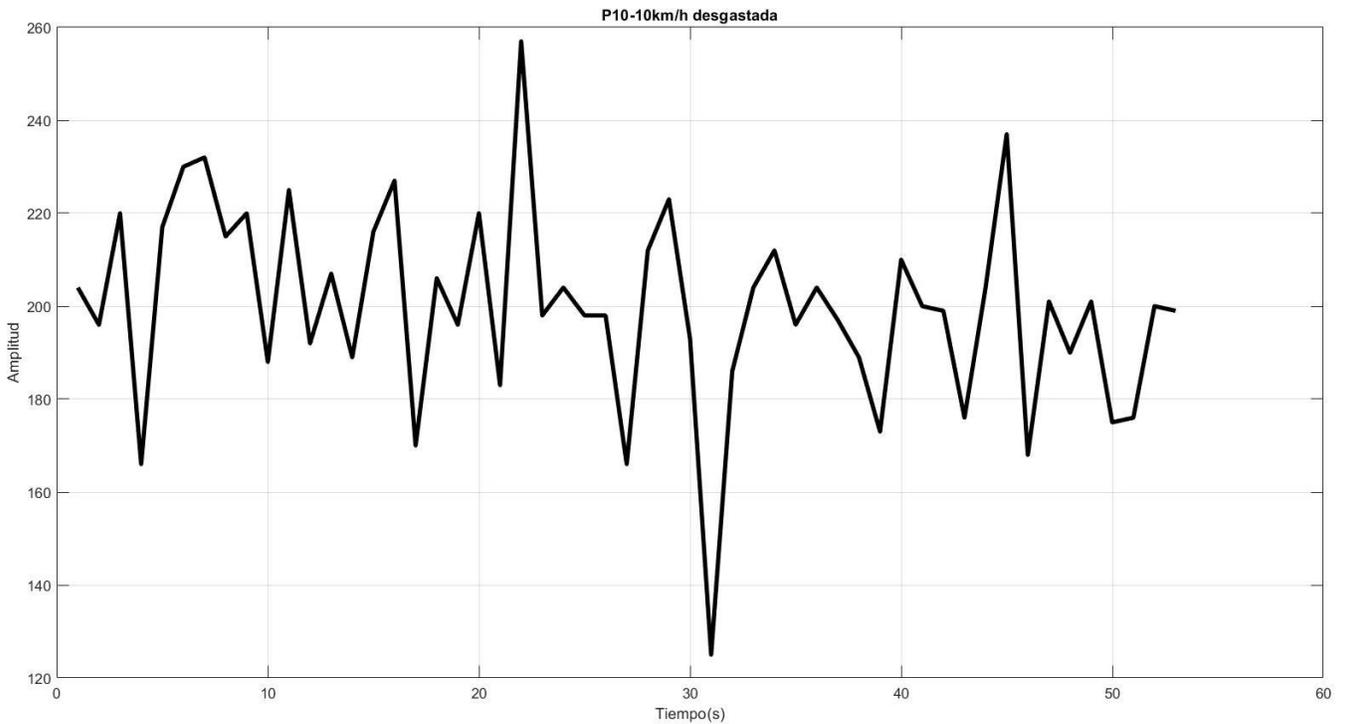


Figura 30. Gráfica prueba realizada a 10 km/h en suspensión desgastada

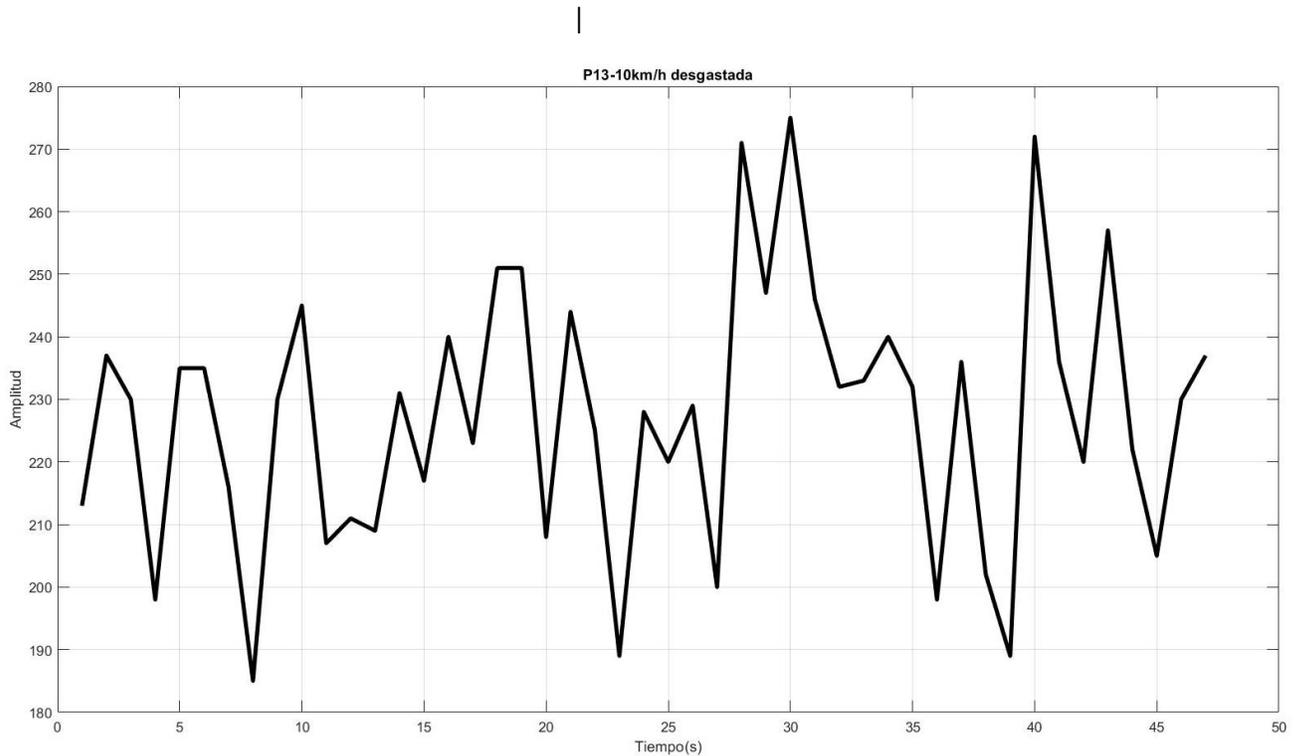


Figura 31. Gráfica prueba realizada a 10 km/h en suspensión desgastada

En las figuras 26,27 y 28 se observa el comportamiento de la suspensión en la cual existe un desgaste del sistema, se puede observar como la suspensión tiende a oscilar, tarda más en poder regresar a su estado inicial, tiende a tener picos negativos, al igual que amplitudes mucho mayores en la señal, esto se reflejará en la vida real a una sensación de sube y baja en la suspensión automotriz y un golpe brusco a la hora de pasar por la perturbación.

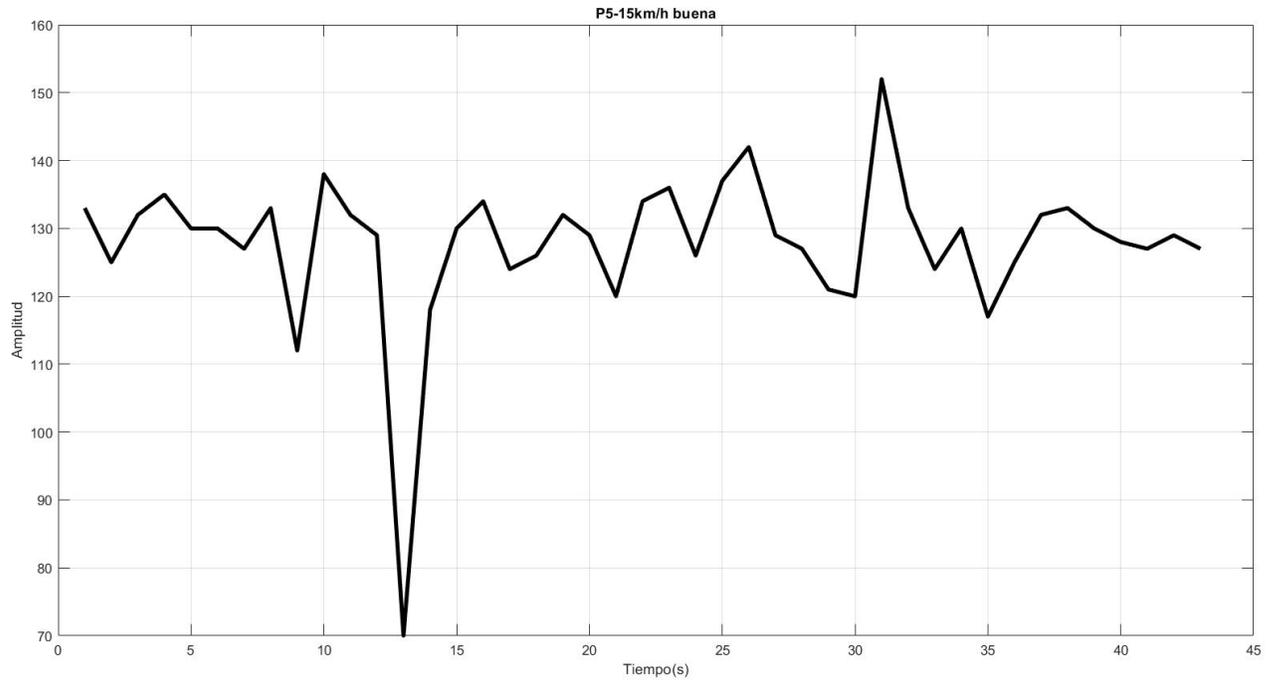


Figura 32. Gráfica prueba realizada a 15 km/h en suspensión en buen estado.

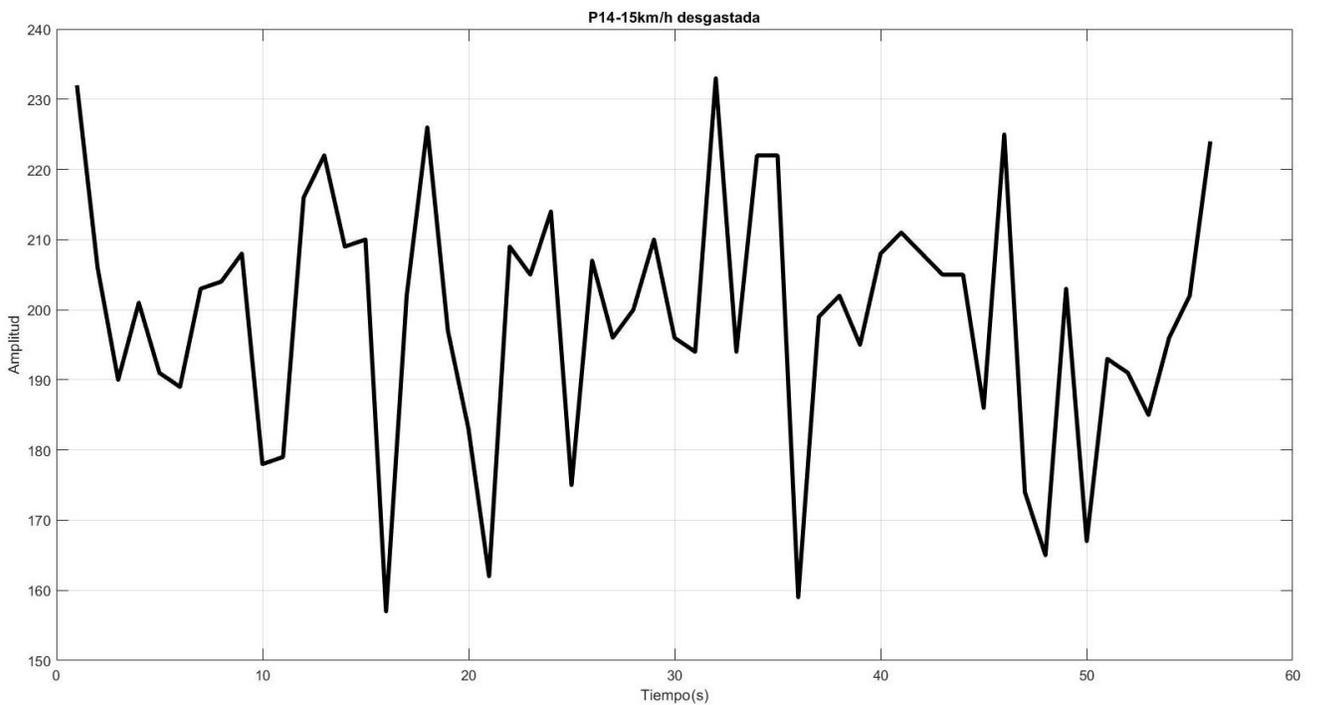


Figura 33. Gráfica prueba realizada a 15 km/h en suspensión desgastada.

En las figuras anteriores (Figura 32 y Figura 33), se muestran dos graficas las cuales fueron tomadas a la misma velocidad (15 km/h), la misma suspensión, pero una con componentes en buen estado y otra con desgaste. Se puede apreciar que a pesar de ser similares cuentan con cambios los cuales se abordaran a continuación.

4.2 COMPARATIVA DE SEÑALES:

Como se puede observar, tanto en la simulación como en las pruebas físicas, el amortiguamiento es en menor tiempo y de forma menos “brusca” como se puede observar los picos ocasionados por las perturbaciones a las cuales fue sometida la suspensión, tendieron a desaparecer de forma más rápida y con oscilaciones menores, esto nos demuestra que la suspensión se encuentra en óptimas condiciones debido a que cumple con la función esperada.

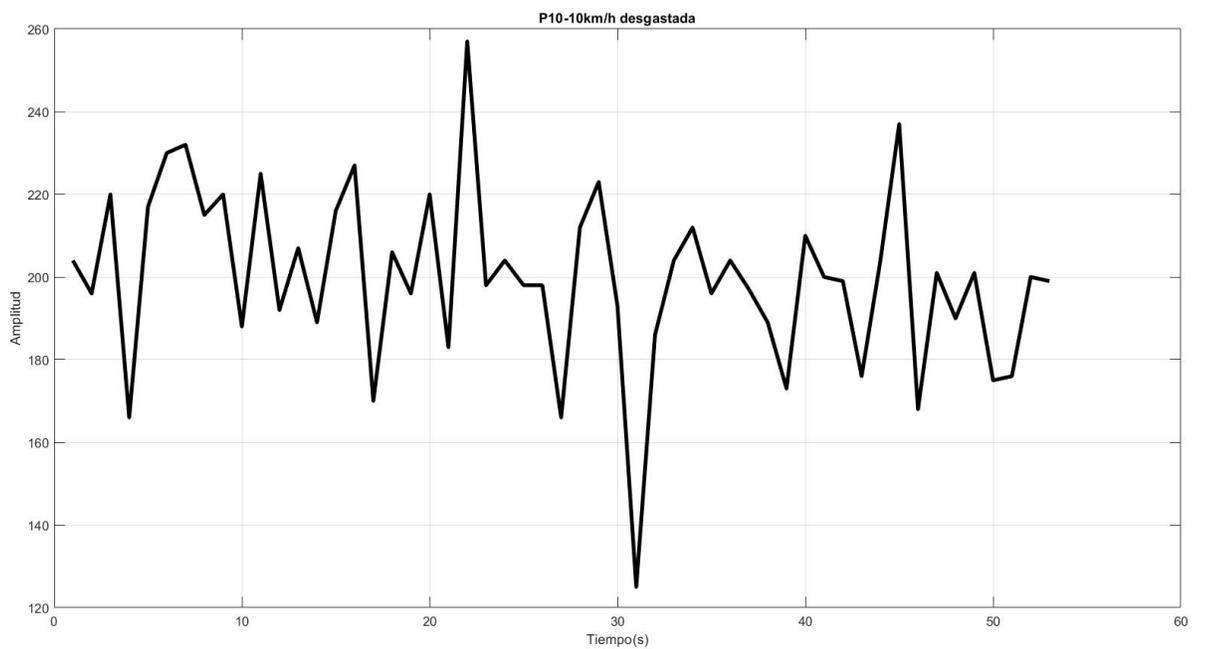
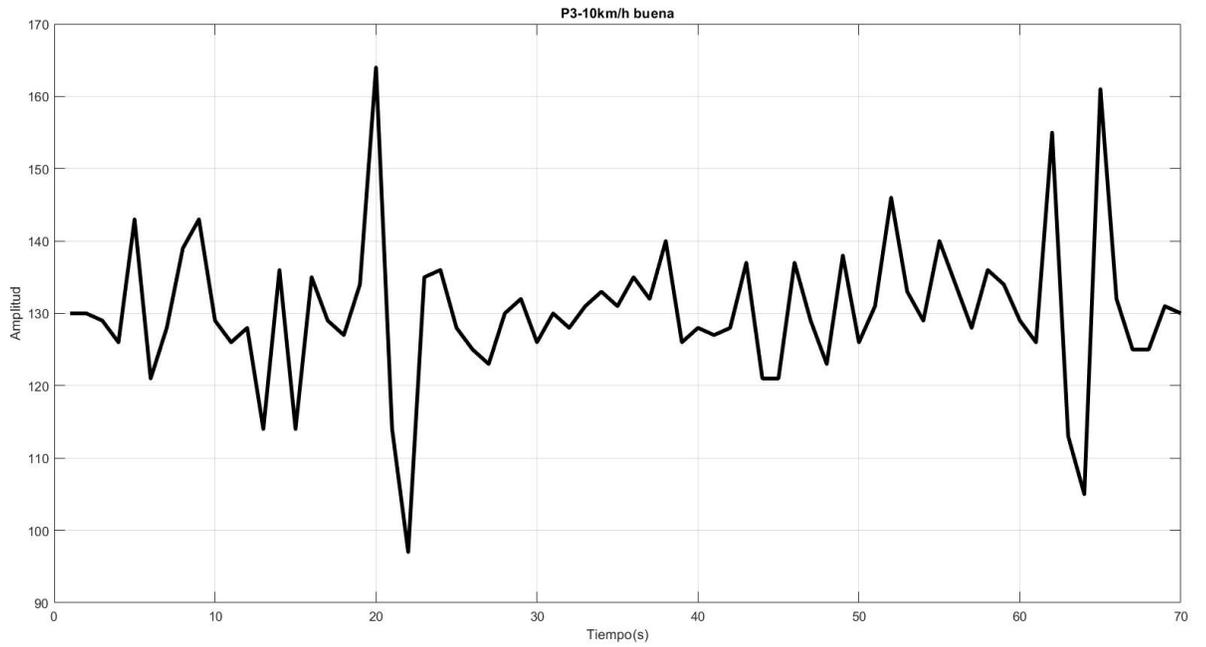


Figura 34. Comparativa de gráficas suspensión en buen estado y desgastada a una velocidad de 10 km/h

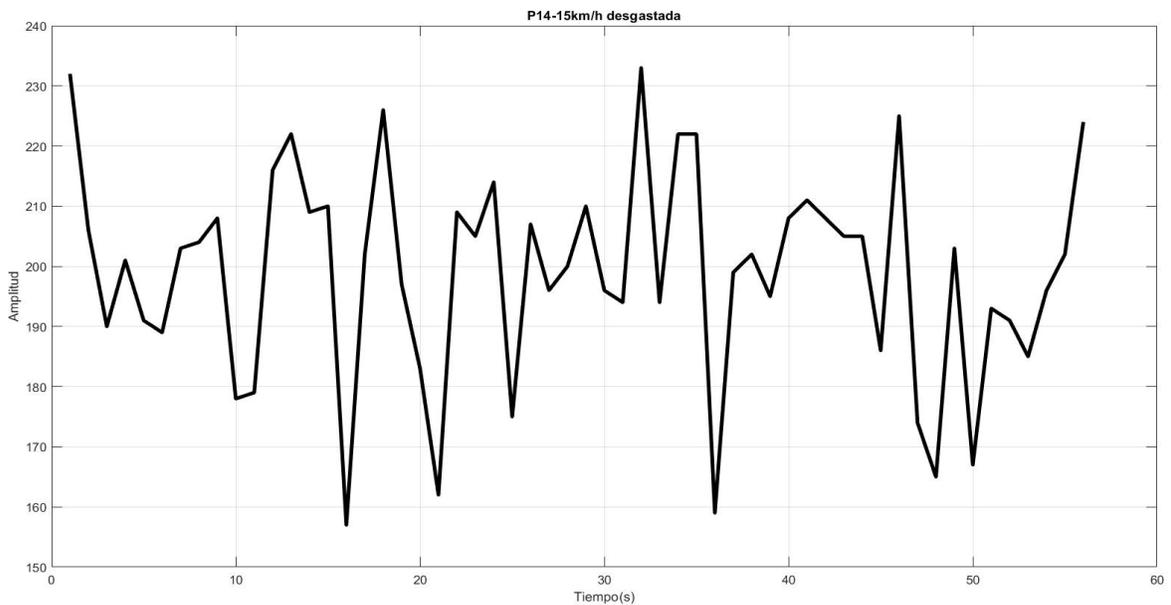
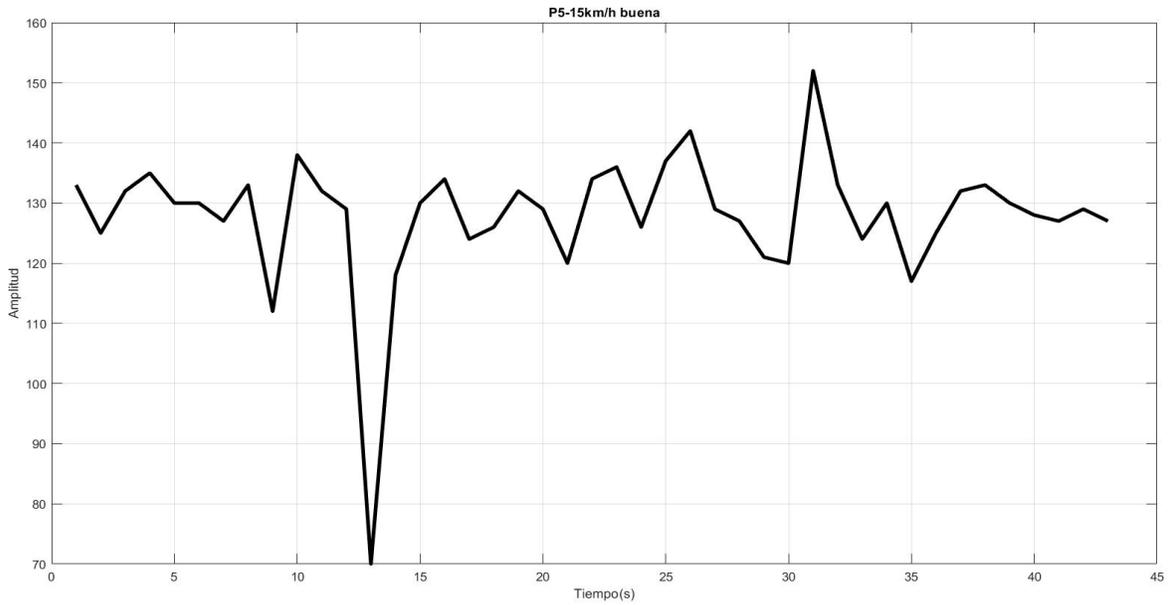


Figura 35. Comparativa de gráficas suspensión en buen estado y desgastada a una velocidad de 15 km/h.

Como se puede observar en la figura 35 y 36 las cuales son la comparativa entre 2 gráficas a la misma velocidad pero en diferente estado la suspensión , es notable la diferencia que existe en el amortiguamiento de una suspensión en la cual

existe un desgaste o en este caso múltiples fallos, es claramente notable la diferencia en comparación a una suspensión en buen estado la cantidad de oscilaciones que pasan antes de que pueda terminar de amortiguar la perturbación, de igual manera se puede observar como los “picos” son mayores respecto a la suspensión en estado óptimo, ahora siendo más explícitos se concluyó que la amplitud de las señales en mal estado tienden a estar en un periodo entre 180 a 220 G (m/s), un incremento considerable en comparación a las señales obtenidas en una suspensión en buen estado las cuales trabajan entre un promedio de 100 a 160 G, en la figura 35 se puede identificar diversos patrones comenzando en el intervalo de tiempo entre 10 y 20 segundos momento en el cual se pasa por una perturbación del camino y se ven los cambios en amplitud los cuales son similares en el primer pico, pero después se puede notar drásticamente como la suspensión en mal estado se mantiene oscilando por mayor tiempo hasta que se llega al siguiente intervalo comprendido entre 25 y 30 segundos, donde nuevamente tenemos una perturbación, las dos suspensiones pasan por la perturbación y después se vuelve a ver una oscilación con amplitudes que van desde los 230 hasta los 160 G. Este comportamiento es debido a que los factores de elasticidad y amortiguamiento, así como el mismo sistema se encuentran deteriorados, esto termina ocasionando que al pasar alguna perturbación durante el trayecto del automóvil se puedan llegar a sentir diferentes molestias, como puedes ser que el automóvil siga muelleando después de haber pasado una perturbación, que el automóvil no se sienta rígido al momento de entrar y salir de la perturbación, así como diferentes ruidos los cuales son ocasionados por el mal estado de la suspensión.

CONCLUSION:

En este trabajo de tesis se desarrolló un sistema de adquisición de datos para el monitoreo de vibraciones para el análisis dinámico de suspensiones automotrices. Como aprendizaje se obtuvo un conocimiento más profundo trabajando con los programas Matlab y Active-VHDL, además de establecer un nuevo paradigma para la resolución de problemas de vibraciones utilizando propuestas basadas en el conocimiento ingenieril adquirido durante formación académica.

Para poder realizar el trabajo se pasaron por varias propuestas y dificultades, primero se abordó la problemática de elegir un sensor (acelerómetro) óptimo para obtener los datos requeridos, para esto se buscó información importante sobre la frecuencia a la que la suspensión automotriz trabaja, una vez obtenidos estos datos se encontró el acelerómetro que cubriera nuestras necesidades.

La parte más difícil del proyecto o en donde se presentó la mayor dificultad fue al momento de elaborar el protocolo de comunicación como la simulación, ya que en ambas el nivel de complejidad en la elaboración del código requiere de destreza, saber interpretar diagramas de bloques y de máquinas de estado para la correcta programación en VHDL, así mismo para elaborar la simulación de una suspensión automotriz se deben tener conocimientos en el área de SIMULINK, para hacer un correcto desarrollo de los bloques que se quiere utilizar al igual que saber programar en Matlab. De igual forma se realizaron varios cambios durante el proceso de elaboración con ayuda del asesor y los sinodales y que ellos realizaban observaciones para el óptimo desarrollo del trabajo.

Satisfactoriamente se obtuvo como producto final, un sistema de adquisición de datos el cual es de bajo costo y de arquitectura abierta, con el cual no solo se pueden seguir desarrollando aplicaciones para el sector automotriz, si no que puede llevarse a otras áreas de la ingeniería en las cuales se necesiten medir vibraciones,

esto es gracias a que el sistema puede funcionar en cualquier lugar donde pueda ser instalado, y que entre dentro de los parámetros que el sensor puede leer. Con esto este trabajo no solo pretende finalizar aquí, si no que puede ser usado para la elaboración de futuros proyectos que puedan terminar de complementarlo o que puedan incluirlo para la elaboración de diferentes ideas.

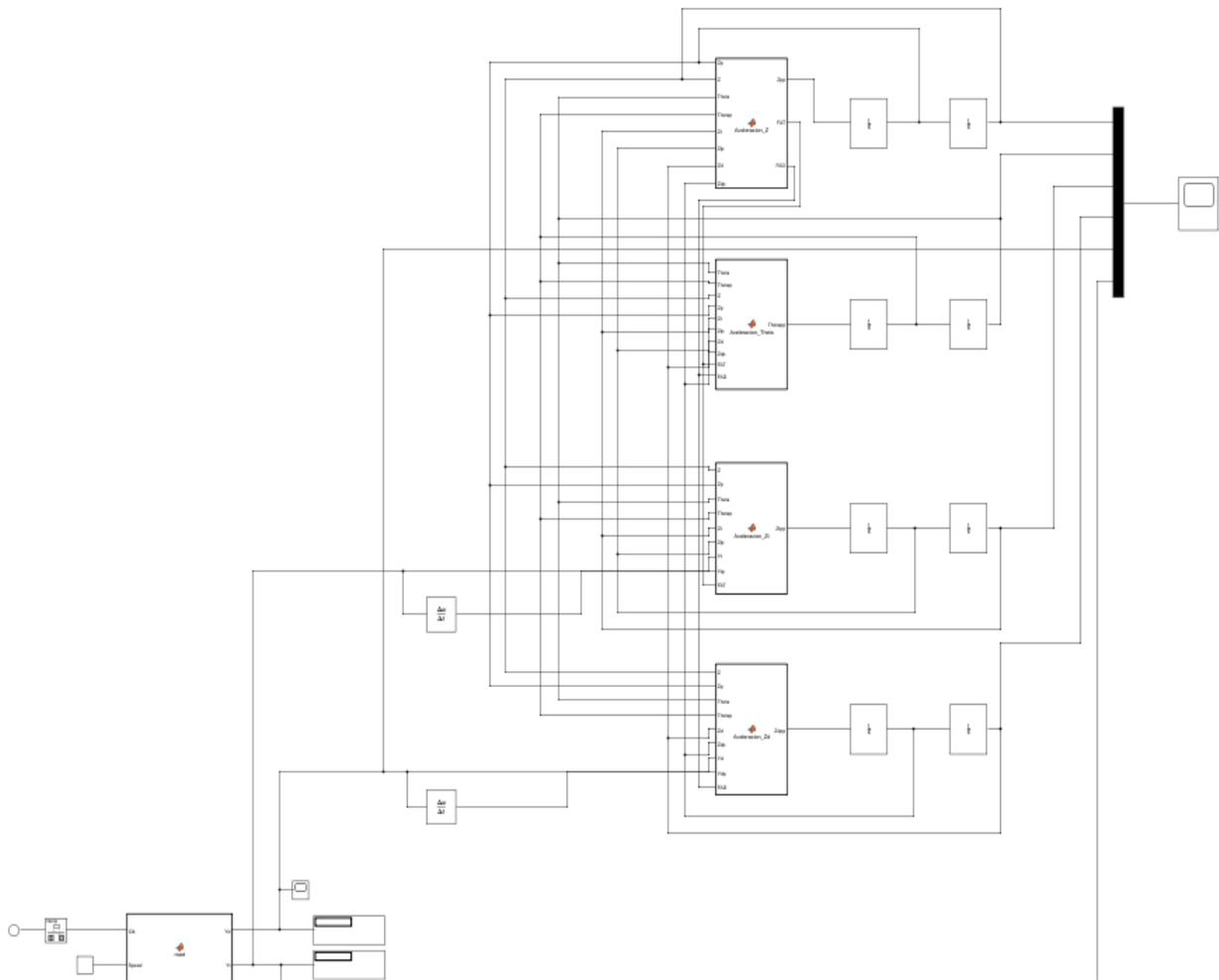
BIBLIOGRAFÍA

- Arias-Paz, M. (2000). *Manual de Automoviles*. Madrid: Dossat.
- Azurmendi, V. (2017). *VIBRACIONES MECÁNICAS Introducción al sistema de suspensión de un vehículo*. Bahía Blanca: edUTecNe.
- Bono, B. C. (2017). *Modelado y caracterización de sistemas de suspensión automotriz*. Valencia.
- CEFP. (2017). *Aspectos Relevantes de la Competitividad del*.
- Cesáreo, G. d. (1998). *Tecnología del Mantenimiento Industrial*. España: Universidad de Murcia.
- Criollo-Yanchatipan, L. P. (2021). Planificación del mantenimiento mediante la determinación del número prioritario. *Dominio de la Ciencia*, 16.
- Cristobal, C. V. (2014). *Análisis de Durabilidad y Caracterización del Comportamiento Dinámico de Amortiguadores*.
- Daniel Garcia-Pozuelo. (2014). Bump Modeling and Vehicle Vertical Dynamics Prediction. *Hindawi Publishing Corporation*, 10 .
- Dorantes, J. J. (2020). *Circuitos digitales SPI*. San Juan del Rio.
- Economía, S. d. (2011). Obtenido de <http://www.2006-2012.economia.gob.mx/comunidad-negocios/industria-y-comercio/informacion-sectorial/automotriz#:~:text=M%C3%A9xico%20ocupa%20la%20posici%C3%B3n%20n%C3%BAmero,el%2017.2%25%20del%20PIB%20Manufacturero>.
- Ezeta, D. J. (2013). *Modelado analítico y control inteligente de un sistema de suspensión activa para un cuarto de vehículo*. Málaga.
- G, C. M. (17 de Septiembre de 2015). *Motorydominio*. Obtenido de <https://www.motorydominio.com.mx/investigaciones/centro-de-gravedad-de-los-vehiculo#.Ype2WajMJPY>
- Gerardo Hurtado Hurtado, D. J. (2014). *Modelado y Visualización de la interacción Vehículo-Pavimento*. San Juan del Rio: UAQ.
- Gonzalez, A. G. (15 de Octubre de 2014). Obtenido de <http://panamahitek.com/como-funciona-el-protocolo-spi#:~:text=SPI%20es%20un%20acr%C3%B3nimo%20para,misma%20arquitectura%20del%20microcontrolador%20680000>.

- Hurel, J. (2017). Modelado Físico y Matemático del Sistema de Suspensión de un Cuarto de Vehículo .
15th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology, 8.
- IngeMecanica. (2018). *IngeMecanica*. Obtenido de
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn73.html>
- Jimenez, D. A. (2018). *PDF COFFEE*. Obtenido de <https://pdfcoffee.com/historia-de-las-vibraciones-mecanicas-4-pdf-free.html#Daniel+Andr%C3%A9+Santos+Jimenez>
- Luque, P., & Álvarez, D. (2004). *Ingeniería del Automóvil, Sistemas y Comportamiento Dinámico*.
Madrid: Paraninfo.
- Mazda. (Marzo de 2013). *Mazda*. Obtenido de https://www.mazda.com.co/noticias/vehiculos/mazda-6/ya-esta-en-colombia-el-nuevo-mazda6-2014-skyactiv/?fbclid=IwAR3gSWyV7mlr7ZiGfKTfN3AqdTVboXWV16_MNkDkqtqwNi5OJlqNqbwyAMo
- MMS. (17 de 03 de 2016). Obtenido de <https://www.mms-mexico.com/noticias/post/mxico-cuarto-consumidor-de-mquinas-herramienta-alemanas>
- MMS. (01 de 07 de 2021). *Modern Machine Shop*. Obtenido de <https://www.mms-mexico.com/articulos/produccion-mundial-de-maquinas-herramienta-supera-el-consumo>
- Ríos, O. (1998). *La suspensión. Automoviles de competición*. Barcelona: CEAC.
- Rodarte, G. (2018). *CAUSAS FRECUENTES DE FALLAS DE SUSPENSION*.
- Tecnology, M. I. (2014). *Vibraciones y Ondas*. Barcelona: Reverte.
- Toral, E. S. (26 de Septiembre de 2020). *Prezi*. Obtenido de <https://prezi.com/p/jqnaxcalwcxf/historia-de-las-vibraciones-a-traves-de-biografias/>

ANEXOS.

Anexo 1: Diagrama de bloques para la simulación de un sistema masa-resorte-amortiguador



Anexo 2: función para recrear un “tope” en la simulación

```
function [Yd,Yt] = road(Clk,Speed)

% R = load('ROAD_TEST.mat');

% speed = vehicle speed (km/h)
V = Speed*1000/3600; %vehicle speed (m/s)

Lt = 1.35;
Ld = 1;
dt = 0.001;

L0 = 3; %initial distance to cross the bump (front)
t1 = L0/V;

H = 0.15; %bump height
% L = 0.20; %bump length

N = 18; %number of segmented parts
L1 = 0; %bump perimeter
X1 = H*cos(0);
Y1 = H*sin(0);
for i=2 : N
    X2 = H*cos(((i-1)*pi)/(N-1));
    Y2 = H*sin(((i-1)*pi)/(N-1));

    L1 = L1 + sqrt((X2-X1)^2 + (Y2-Y1)^2);

    X1 = X2;
    Y1 = Y2;
end

%% Tope parte delantera
t2 = L1/V; %tiempo que le toma al vehiculo cruzar el tope
if (Clk <= t1)
    Yd = 0;
elseif (t1 < Clk) && ( Clk < t1+t2)
    Yd = 0.15*sin((pi/(t2)*(Clk-t1)));%Funcion del tope
else
    Yd = 0;
end
```

```

%% Tope parte trasera
t3 = (L0+Ld+Lt)/V; %initial distance to cross the bump (rear)
if (Clk <= t3)
    Yt = 0;
elseif (t3 < Clk) && ( Clk < t3+t2)
    Yt = 0.15*sin((pi/(t2)*(Clk-t3)));%Funcion del tope
else
    Yt = 0;
end

end

end

```

Anexo 3: Ilustración de perturbación de entrada (tope) en Simulink.



Anexo 4: Código para cambiar el coeficiente de amortiguamiento y elasticidad en la suspensión.

```
function                               Thetapp                               =  
Aceleracion_Theta(Theta,Thetap,Z,Zp,Zt,Ztp,Zd,Zdp,FAT,FAD)  
  
Kt = 30000;  
Ct = 3500;  
Kd = 30000;  
Cd = 3500;  
Lt = 1.69;  
Ld = 1;  
I = 1000;  
  
Thetapp = (1/I)*((Kt*Lt*(Z-(Theta*Lt)-Zt)) + (Ct*Lt*(Zp-(Thetap*Lt)-Ztp)) + (-  
Kd*Ld*(Z+(Theta*Ld)-Zd)) + (-Cd*Ld*(Zp+(Thetap*Ld)-Zdp)) + FAD*Ld -  
FAT*Lt );  
  
end
```