



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

ESCUELA DE INGENIERÍA EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ

**Medición de esfuerzos en los platos oscilantes de la suspensión de un vehículo eléctrico
biplaza a través de galgas extensiométricas**

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Autores:

Job Agustín Sánchez Rivera

César Javier Andrade Ortega

Director:

Ing. Robert Rockwood Iglesias M.I.

**CUENCA – ECUADOR
2025**

Dedicatoria

Quisiera dedicar este trabajo a mis padres, por ser mi guía y apoyo incondicional en toda mi formación académica, a mis hermanos, por estar siempre presentes en los momentos que más los he necesitado.

Agradezco también a todos aquellos que de una u otra forma me han ayudado a alcanzar mis metas y cumplir mi objetivo de tener un título universitario.

César Javier Andrade Ortega

Dedicatoria

En profundo agradecimiento a mis padres, quienes a lo largo de sus vidas me han inculcado la cultura del trabajo y estudio. Su dedicación y esfuerzo constante para asegurarme una educación son un regalo que valoro más allá de las palabras.

A mi pareja, por ser mi compañera inmutable, por su paciencia, su comprensión y su cariño en los momentos más difíciles. Gracias por caminar a mi lado, por apoyarme sin reservas y por impulsarme a seguir adelante incluso cuando las fuerzas flaqueaban.

Job Agustín Sanchez Rivera

Agradecimientos

Primeramente, agradecemos a Dios, por brindarnos la inteligencia para llegar a donde estamos, por guiarnos y permitirnos alcanzar nuestras metas.

A nuestros padres y familiares por su guía, paciencia y apoyo incondicional en el transcurso de nuestra carrera.

A nuestros profesores por ofrecernos su guía e impartirnos los conocimientos básicos para nuestra formación como profesionales.

César Javier Andrade Ortega

Job Agustín Sánchez Rivera

Índice de contenido

Dedicatoria	i
Dedicatoria	i
Agradecimientos.....	iii
Índice de contenido	iv
Índice de figuras	v
Índice de tablas.....	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT	vii
INTRODUCCIÓN	1
Tipos de Galgas.....	3
Galgas extensiométricas uniaxiales.....	3
Galgas extensiométricas biaxiales.....	3
Galgas extensiométricas tipo roseta	3
METODOLOGÍA	4
A. Recursos empleados	4
1) Software de ingeniería asistida por computador, CAE	4
2) Galgas extensiométricas	4
3) Cuarto de puente de Wheatstone.....	4
4) El NI 9219	5
B. Datos Preliminares	5
PROCESAMIENTO DE DATOS RECOPIADOS	7
MAPA DE RUTA	7
RESULTADOS.....	8
Proceso de obtención de esfuerzo de Von Mises con datos originales (sin filtro).	8
Aplicación del filtro Butterworth:	10
Análisis de los esfuerzos obtenidos:.....	11
Resultados De La Simulación (Combinados).	11
CONCLUSIONES	11
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
ANEXOS.....	13
Anexo 1.	13

Índice de figuras

Figura 1. Vehículo eléctrico manufacturado biplaza.....	2
Figura 2. Estudio de dinámica de cuerpos múltiples del vehículo eléctrico biplaza	2
Figura 3. Configuración de una galga extensiométrica	3
Figura 4. Tipos de galgas extensiométrica:1) uniaxial 2) biaxial 3) roseta.....	3
Figura 5. Modelo CAD de suspensión delantera McPherson.....	4
Figura 6. Modelo CAD de suspensión posterior Eje Rígido.....	4
Figura 7. Tipos de Galgas extensiométricas en base a su geometría.....	4
Figura 8. Características de galgas uniaxiales.....	4
Figura 9. Configuración del $\frac{1}{4}$ de puente de Wheatstone.....	5
Figura 10. Tarjeta de adquisición NI 9219 DAQ	5
Figura 11. Zona de esfuerzo trapecio delantero – esfuerzo máximo: 241.36 MPa	5
Figura 12. Zona de esfuerzo trapecio delantero, vista inferior.....	5
Figura 13. Zona mayor esfuerzo trapecio posterior – esfuerzo máximo: 207.62 MPa	6
Figura 14. Zona de esfuerzo trapecio posterior, vista superior	6
Figura 15. Instalación de las galgas tipo roseta en trapecio delantero.	6
Figura 16. Instalación de las galgas tipo roseta en trapecio posterior.	6
Figura 17. Conexiones instaladas en los trapecios oscilantes para su integración con el sistema DAQ.....	6
Figura 18. Montaje de trapecio dispuesto con las galgas extensiométricas	7
Figura 19. Montaje de tarjeta de adquisición NI 9219 DAQ.	7
Figura 20. Ruta recorrida por el vehículo eléctrico biplaza con la instrumentación montada	8
Figura 21. Gráfica de variación de voltaje en cada galga de la roseta.	8
Figura 22. Gráfica de los datos originales del esfuerzo de Von Misses.....	8
Figura 23. Representación espectral de la señal en función de la frecuencia vs la amplitud.....	9
Figura 24. Gráfica de la amplitud máxima de la señal de la galga extensiométrica a 45°	9
Figura 25. Gráfica de la amplitud máxima de la señal de la galga extensiométrica a 90°	9
Figura 26. Gráfica de la amplitud máxima de la señal de la galga extensiométrica a 135°	9
Figura 27. Agrupación de frecuencias (Hz).	9
Figura 28. Gráficas de las señales originales vs filtradas – galga extensiométrica a 45°.....	10
Figura 29. Gráficas de las señales originales vs filtradas - galga extensiométrica a 90°	10
Figura 30. Gráficas de las señales originales vs filtradas - galga extensiométrica a 135°	10
Figura 31. Gráfica sin filtro de esfuerzo de Von Misses.....	10
Figura 32. Gráfica con filtro de esfuerzo de Von Misses.....	10
Figura 33. Gráfica Esfuerzo máx. 13.4 MPa.....	10
Figura 34. Programación de MATLAB utilizada.....	13

Índice de tablas

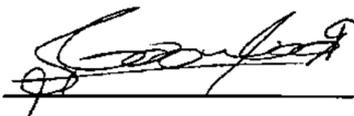
TABLA 1. COMPARACIÓN RESULTADOS DE ESFUERZOS FLEXIONANTES.....	3
TABLA 2. PROPIEDADES DEL VEHÍCULO	5
TABLA 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPONENTES DE LA SUSPENSIÓN	5
TABLA 4. DATOS DE RUTA	8
TABLA 5. ESFUERZO DE VON MISES EN FUNCIÓN DEL TIEMPO	11
TABLA 6. DATOS OBTENIDOS A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN CAE.....	11

MEDICIÓN DE ESFUERZOS EN LOS PLATOS OSCILANTES DE LA SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO BIPLAZA A TRAVÉS DE GALGAS EXTENSIOMÉTRICAS

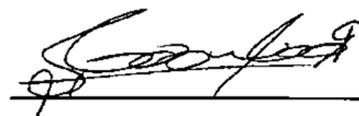
RESUMEN

En el presente estudio se evaluó, el desempeño estructural de los trapecios oscilantes de la suspensión de un vehículo eléctrico biplaza mediante la medición de esfuerzos utilizando galgas extensiométricas. La instrumentación se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de los fabricantes Omega Engineering® y HBM®, así como la norma ASTM E251-1999 (2014). La medición de esfuerzos se realizó en diferentes puntos de los oscilantes mientras el vehículo circulaba en condiciones normales de operación en tramos urbanos de la ciudad de Cuenca. Los resultados fueron comparados con los obtenidos previamente a través de simulaciones Computacionales de Ingeniería Asistida CAE. El análisis de los resultados muestra que los esfuerzos medidos utilizando galgas extensiométricas son significativamente menores para condiciones normales de operación del vehículo. Los hallazgos del presente estudio permitirán retroalimentar el modelo computacional utilizado para estimar los esfuerzos mecánicos bajo cargas dinámicas en diferentes componentes de la suspensión.

Palabras clave — Medición de esfuerzos con galgas extensiométricas, dinámica de cuerpos múltiples sistema de suspensión, trapecios oscilantes.



Ing. Robert Rockwood. Mgst.
Director del trabajo de titulación



Ing. Robert Rockwood. Mgst.
Director de Escuela



Cesar Javier Andrade Ortega
Autor



Job Agustín Sánchez Rivera
Autor

MEASURING STRESS ON THE SUSPENSION SWING PLATES OF A TWO-SEATER ELECTRIC VEHICLE USING STRAIN GAUGES

ABSTRACT

This study evaluated the structural performance of the swing arms of the suspension system of a two-seater electric vehicle by measuring stresses using strain gauges. The instrumentation was carried out following the recommendations of manufacturers Omega Engineering® and HBM®, as well as the ASTM E251-1999 (2014) standard. Stress measurements were taken at various points on the swing arms while the vehicle was operating under normal conditions on urban roads in the city of Cuenca. The results were compared with those obtained previously through Computer-Aided Engineering (CAE) simulations. The analysis of the results shows that the stresses measured using strain gauges are significantly lower under normal operating conditions of the vehicle. The findings of this study will provide feedback to the computational model used to estimate mechanical stresses under dynamic loads in different suspension components.

Keywords — Stress measurement with strain gauges, multi-body dynamics, suspension system, swing arms.



Ing. Robert Rockwood. Mgst
Director of the degree project



Ing. Robert Rockwood. Mgst
School Director



Cesar Javier Andrade Ortega
Author



Job Agustín Sánchez Rivera
Author

Medición de esfuerzos en los platos oscilantes de la suspensión de un vehículo eléctrico biplaza a través de galgas extensiométricas.

Robert Rockwood

*Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Universidad del Azuay*
rockwood@uazuay.edu.ec

Andrade Ortega César Javier

*Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Universidad del Azuay*
javierandrade21@es.uazuay.edu.ec

Job Agustín Sánchez Rivera

*Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Universidad del Azuay*
agustin@es.uazuay.edu.ec

Resumen — En el presente estudio se evaluó, el desempeño estructural de los trapecios oscilantes de la suspensión de un vehículo eléctrico biplaza mediante la medición de esfuerzos utilizando galgas extensiométricas. La instrumentación se llevó a cabo siguiendo las recomendaciones de los fabricantes Omega Engineering® y HBM®, así como la norma ASTM E251-1999 (2014). La medición de esfuerzos se realizó en diferentes puntos de los oscilantes mientras el vehículo circulaba en condiciones normales de operación en tramos urbanos de la ciudad de Cuenca. Los resultados fueron comparados con los obtenidos previamente a través de simulaciones Computacionales de Ingeniería Asistida CAE. El análisis de los resultados muestra que los esfuerzos medidos utilizando galgas extensiométricas son significativamente menores para condiciones normales de operación del vehículo. Los hallazgos del presente estudio permitirán retroalimentar el modelo computacional utilizado para estimar los esfuerzos mecánicos bajo cargas dinámicas en diferentes componentes de la suspensión.

Palabras clave — Medición de esfuerzos con galgas extensiométricas, dinámica de cuerpos múltiples sistema de suspensión, trapecios oscilantes.

Abstract — This study evaluated the structural performance of the swing arms of the suspension system of a two-seater electric vehicle by measuring stresses using strain gauges. The instrumentation was carried out following the recommendations of manufacturers Omega Engineering® and HBM®, as well as the ASTM E251-1999 (2014) standard. Stress measurements were taken at various points on the swing arms while the vehicle was operating under normal conditions on urban roads in the city of Cuenca. The results were compared with those obtained previously through Computer-Aided Engineering (CAE) simulations. The analysis of the results shows that the stresses measured using strain gauges are

significantly lower under normal operating conditions of the vehicle. The findings of this study will provide feedback to the computational model used to estimate mechanical stresses under dynamic loads in different suspension components.

Keywords — Stress measurement with strain gauges, multi-body dynamics, suspension system, swing arms.

INTRODUCCIÓN

El presente estudio forma parte de la unidad de titulación de la carrera de Ingeniería en Mecánica Automotriz de la Universidad del Azuay, en la cual se diseñó y manufacturó un vehículo eléctrico biplaza. Dentro de este proyecto se realizaron diferentes estudios para garantizar las prestaciones mecánicas del bastidor, como: optimización topológica, optimización de tamaño de elementos estructurales, análisis de rigidez, medición de esfuerzos y deformación bajo cargas estáticas y pseudo dinámicas, análisis de deformación plástica bajo suposiciones de impacto, análisis de esfuerzos y deformación bajo cargas dinámicas (dinámica de cuerpos múltiples), entre otros y respecto al sistema de suspensión: optimización de la geometría de ruedas, análisis de interferencia mecánica, análisis de esfuerzo y deformación de elementos del sistema de suspensión y dirección bajo cargas estáticas, análisis de esfuerzo y deformación de elementos del sistema de suspensión y dirección bajo cargas dinámicas (dinámica de cuerpos múltiples), entre otros. A partir de estos estudios el vehículo fue manufacturado, mismo que se muestra en la figura 1.

El presente estudio tiene como objetivo medir los esfuerzos que se generan en los oscilantes del sistema de suspensión de este vehículo utilizando galgas extensiométricas, junto con un sistema de adquisición y procesamiento de datos. Los resultados permitirán conocer el nivel de correlación entre los

esfuerzos medidos, en comparación con los estimados en las simulaciones computacionales, y de esta forma generar a futuro simulaciones que permitan una mayor precisión. Esto debido a que no existe información de libre acceso respecto a metodologías de análisis computacional de componentes mecánicos en el sector automotriz, debido a que este conocimiento lo concentran las grandes empresas de manufactura de vehículos, los cuales guardan celosamente esta información.



Figura 1. Vehículo eléctrico manufacturado biplaza

Es por ello que el presente estudio aporta con la generación de conocimiento académico en la rama automotriz, en miras de impulsar esta industria en países en vías de desarrollo, considerando que los procesos de ingeniería traen valor agregado, garantizan soberanía tecnológica, y generan crecimiento económico.

En la medición del esfuerzo de la suspensión se pueden emplear diversos métodos, como son: a través de cálculos matemáticos, mediante instrumentación, y por validación en un software de cálculo a partir del uso de métodos discretos (método de elementos finitos FEM), sin embargo, existe un margen de error en todos estos métodos, por lo cual es importante identificar el más eficiente al momento de dicha estimación, lo cual puede hacerse mediante datos comparativos, cuyo resultado permitirá identificar el método óptimo acorde a nuestra realidad.

Para lograr los objetivos planteados en este estudio, se llevó a cabo un proceso que incluyó múltiples pruebas para evaluar el comportamiento del sistema de medición frente a diversas cargas.

Al empezar con el proceso práctico de la colocación de galgas, se obtuvo primeramente datos de la simulación del desempeño mecánico de los componentes del sistema de suspensión, los que permitieron identificar los puntos críticos

(puntos de concentración de esfuerzos) de los oscilantes de rueda, en donde se instalaron las galgas, permitiendo así medir el esfuerzo en los trapecios oscilantes del sistema de suspensión. El vehículo equipa un sistema de suspensión de tipo McPherson en las ruedas delanteras, y de eje rígido en las ruedas posteriores.

El artículo realizado por Rodríguez y Patiño (2022) aborda el análisis de la dinámica de cuerpos múltiples del sistema de suspensión del vehículo eléctrico biplaza que utilizaremos en nuestro estudio. Para llevar a cabo este análisis, emplearon un modelo elaborado en un programa de diseño asistido por computadora (CAD), siguiendo las especificaciones establecidas en los requisitos del vehículo. La validez del funcionamiento del sistema se verificó mediante el uso de un software de dinámica de cuerpos múltiples, el cual permitió analizar los conflictos de interferencias mecánicas entre el chasis y los componentes de la suspensión, logrando estimar los esfuerzos y deformaciones que se generan en los elementos de la suspensión como los que se transmitirían de estos hacia el chasis.

El modelo de excitación de la suspensión se configuró a partir de desplazamientos aleatorios en las cuatro ruedas del vehículo, los mismos que alcanzaron 76.08 mm, además se consideró: el peso del automóvil [725 Kg.], las constantes del sistema de suspensión tales como: constante de elasticidad del resorte (*delantero* [25,7 N/mm]; *posterior* [12,0 N/mm]) y la constante de amortiguamiento viscoso (*delantero* [8.68]; *posterior* [7.60]), así como la geometría de los elementos de este sistema, propiedades de los materiales utilizados y la configuración de grados de libertad en cada una de las articulaciones.

Para establecer la posición ideal del sistema de dirección, utilizaron el software Altair® HyperStudy® como se evidencia en la figura 2. (Rodríguez & Patiño, 2022).

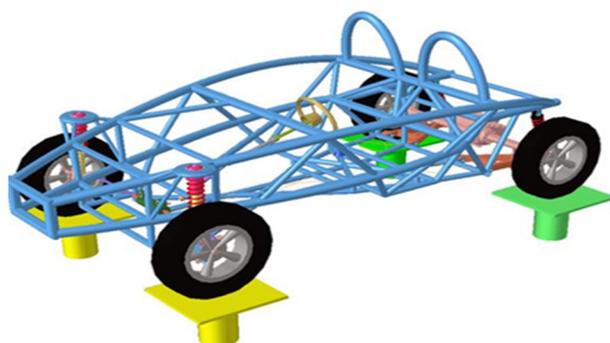


Figura 2. Estudio de dinámica de cuerpos múltiples del vehículo eléctrico biplaza.

Fuente: (Rodríguez & Patiño, 2022)

Existen otros estudios que contribuyeron al diseño del vehículo y sus componentes de suspensión, como el realizado por Encalada y Montaleza (2021). Ellos determinaron la geometría para los sistemas de suspensión delantera (push rod) y posterior (pull rod) de un vehículo eléctrico mediante una metodología que define la morfología de cada componente según indicadores de desempeño y condiciones de contorno. Este proceso se llevó a cabo utilizando herramientas de Diseño Asistido por Computador (CAD) para definir cada componente, obteniendo las principales especificaciones después de aplicar el proceso de validación mediante Ingeniería Asistida por Computador (CAE). Los resultados proporcionaron los planos de diseño para la manufactura. Sin embargo, debido al alto nivel tecnológico necesario para su construcción, no fue posible fabricar estos componentes, por lo que el sistema fue rediseñado posteriormente (Encalada y Montaleza, 2021).

Respecto a la utilización de galgas extensiométricas para la medición de deformaciones lineales, y a partir de ellas estimar esfuerzos, conviene revisar el estudio realizado por Muñoz Arévalo Felipe, cuyo título es: “Validación de metodologías empleadas en simulaciones CAE utilizado para el desarrollo del prototipo SHELL ECO-MARATHON de la Universidad del Azuay”, en él, se diseñó un sistema de adquisición de datos que permite conocer en tiempo real los esfuerzos que soportan diferentes puntos del bastidor de este vehículo. Estos resultados fueron comparados versus los estimados a partir de diferentes simulaciones CAE, este estudio muestra una excelente correlación de resultados, no obstante, este vehículo no posee sistema de suspensión, por los que no existen factores asociados que puedan generar perturbaciones en los datos. Los resultados obtenidos en este estudio se presentan en la tabla 1.

TABLA 1. COMPARACIÓN RESULTADOS DE ESFUERZOS FLEXIONANTES

Pesos empleados en Bastidor [Kg]	Esfuerzo medido	Esfuerzo calculado	Esfuerzo simulación CAE	
	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa]	Esfuerzo [MPa] min.	Esfuerzo [MPa] máx.
0	0	0	0	0
1	3.37	5.89	4.57	7.62
2	14.71	11.78	8.44	14.07
3	20.91	17.67	12.31	20.25
4	25.32	23.56	16.16	26.97

Una galga extensiométrica es un dispositivo diseñado para medir la deformación de un material cuando se le aplica una carga. Funciona convirtiendo los cambios en longitud del material en variaciones de resistencia eléctrica. Normalmente, está compuesta por un alambre o una fina película de material

conductor que se adhiere a la superficie del objeto que se está evaluando, (figura 3). Cuando el material se deforma, la galga también se deforma, lo que provoca un cambio en su resistencia. Este cambio se puede medir para determinar el esfuerzo o la tensión aplicados al material.

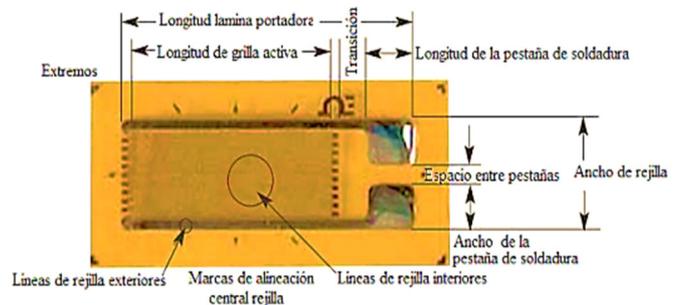


Figura 3. Configuración de una galga extensiométrica. Fuente: (magnetism.org, 2025)

Tipos de Galgas:

Existen diferentes tipos de galgas extensiométricas como se puede ver en la siguiente figura 4:

Galgas extensiométricas uniaxiales: Dispositivos que miden la deformación en una sola dirección. Se colocan sobre un objeto para medir cómo se estira o comprime en una sola dimensión, lo que permite calcular la tensión o esfuerzo en esa dirección específica. (Figura 4).

Galgas extensiométricas biaxiales: Estas galgas miden la deformación en dos direcciones perpendiculares entre sí. Son útiles para evaluar esfuerzos en materiales o estructuras que experimentan deformaciones en más de una dirección, proporcionando una visión completa de las tensiones aplicadas.

Galgas extensiométricas tipo roseta: Consisten en un conjunto de tres galgas dispuestas en un patrón específico, generalmente formando un ángulo de 120 grados entre sí. Permiten medir deformaciones en tres direcciones diferentes, lo que facilita la determinación de esfuerzos en cualquier orientación dentro de un plano.

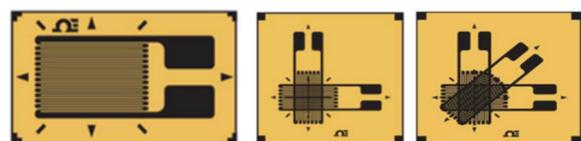


Figura 4. Tipos de galgas extensiométrica: 1) uniaxial 2) biaxial 3) roseta.

Fuente: (mx.omega, 2025)

La demanda constante de mejoras en el diseño de elementos y estructuras ha impulsado el desarrollo y la aplicación de galgas extensiométricas como método experimental

fundamental que respalda el proceso de diseño de componentes mecánicos (Muñoz Arévalo, 2020).

El presente estudio se centrará en medir los esfuerzos que se producen en los platos oscilantes del vehículo eléctrico biplaza, el cual equipa un sistema de suspensión Mc. Pherson en la parte delantera, y de eje rígido en la parte posterior, la figura 5 y 6 muestran los componentes de estos sistemas.



Figura 5. Modelo CAD de suspensión delantera McPherson
Fuente: (Rodríguez & Patiño, 2022)



Figura 6. Modelo CAD de suspensión posterior Eje Rígido
Fuente: (Rodríguez & Patiño, 2022)

Una vez instrumentado el vehículo se realizarán mediciones de esfuerzo considerando un ciclo urbano de conducción en la vía pública, bajo consideraciones estándar.

METODOLOGÍA

Esta investigación se estructura en seis etapas que resumen el desarrollo del proyecto y están diseñadas para alcanzar los objetivos propuestos.



A. Recursos empleados

1) Software de ingeniería asistida por computador, CAE
Programas empleados para llevar a cabo las simulaciones cinemáticas, análisis de optimización, pruebas de rigidez y presentación de datos en base a los modelos CAD establecidos.

- Altair® MotionView®
- Altair® Hypermesh®
- HyperStudy®

2) Galgas extensiométricas

Tanto el tipo roseta (figura 7b) como la uniaxiales (figura 7a), según lo mencionado en la página oficial de OMEGA ENGINEERING [5] en la sección de transductores, deben operar dentro de la zona de deformación plástica. Si se sobrepasa este límite (figura 8), las galgas pueden mostrar mediciones incorrectas y dañar el elemento de medición.

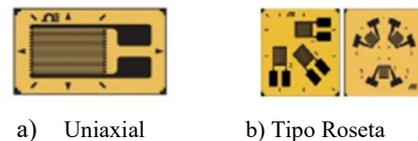


Figura 7. Tipos de Galgas extensiométricas en base a su geometría
Fuente: (Hottinger Bruel & Kjaer, 2023)

Se muestra en su tamaño real: 11.4 mm 	SGD-7/350-LY11	350	6,50 3,10 11,40 5,10 (0,256) (0,122) (0,449) (0,201) Patrón lineal de pequeño tamaño de 120 Ω	15	Conductores planos	ST
	SGD-7/350-LY13	350		20	Conductores planos	AL
	SGD-7/350-LY41	350		15	Zapatillas soldadas	ST
	SGD-7/350-LY43	350		20	Zapatillas soldadas	AL
No se muestran los conductores						

Figura 8. Características de galgas uniaxiales
Fuente:(Hoffmann, 1996)

1) Cuarto de puente de Wheatstone

Configuración particular del puente Wheatstone que se utiliza comúnmente con galgas extensiométricas. Consiste en una red de resistencias donde tres de ellas son conocidas (permanecen constantes) y una cuarta, la galga extensiométrica, varía en función de los esfuerzos inducidos tal como se puede apreciar en la figura 9. A partir de la variación de voltaje (Vm) es posible calcular la deformación elástica que sufrió la galga extensiométrica, a partir de la variación de su resistencia.

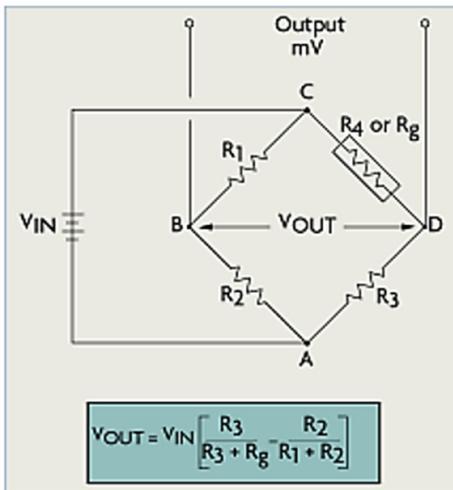


Figura 9. Configuración del ¼ de puente de Wheatstone.
Fuente: (Hoffmann, 1996)

2) El NI 9219

Es un módulo de adquisición de datos (DAQ) fabricado por National Instruments (NI). Este módulo está diseñado para medir señales analógicas con alta precisión en aplicaciones industriales y de laboratorio. (figura10)

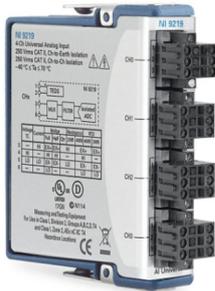


Figura10. Tarjeta de adquisición NI 9219 DAQ
Fuente: (Hottinger Bruel & Kjaer, 2024)

B. Datos Preliminares

TABLA 2. PROPIEDADES DEL VEHÍCULO

Parámetros	Datos
Distancia entre ejes (batalla)	2301.63 mm
Distancia entre ruedas (ancho de vía)	1458.8 mm
Centro de gravedad respecto al piso (eje z)	404.98 mm
Masa suspendida en el chasis	725 kg

TABLA 3. PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPONENTES DE LA SUSPENSIÓN

Componente	Módulo de elasticidad E[GPa]	Límite de fluencia Sy [MPa]	Densidad ρ [kg/m ³]	Coefficiente de Poisson NU
Trapezio delantero	210	370	7870	0.3
Trapezio posterior	210	370	7870	0.3
Chasis	210	250	7850	0.3

En la investigación realizada por Rodríguez y Patiño (2022), como ya se mencionó previamente, se analizó los esfuerzos en los componentes del sistema de suspensión y el chasis del vehículo eléctrico, considerando las cargas dinámicas que se transmiten a través del sistema, por lo cual constituye un estudio de la dinámica de cuerpos múltiples.

Mediante el estudio mencionado, se logró identificar los esfuerzos combinados de Von Mises que se generan en los platos oscilantes delanteros y posteriores, mismos que alcanzan una magnitud máxima de 207.62 MPa (fig. 13) y 241.36 MPa (fig. 11) respectivamente.

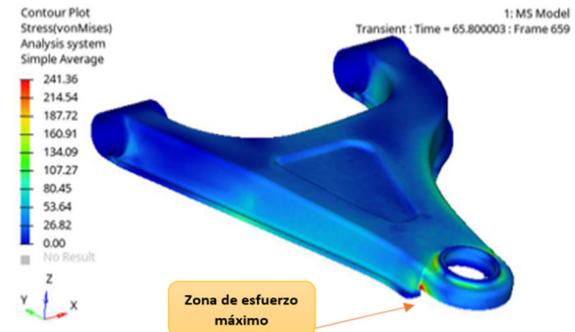


Figura 11. Zona de esfuerzo trapezio delantero - esfuerzo máximo: 241.36 MPa.

Fuente: (Rodríguez. & Patiño, 2022)

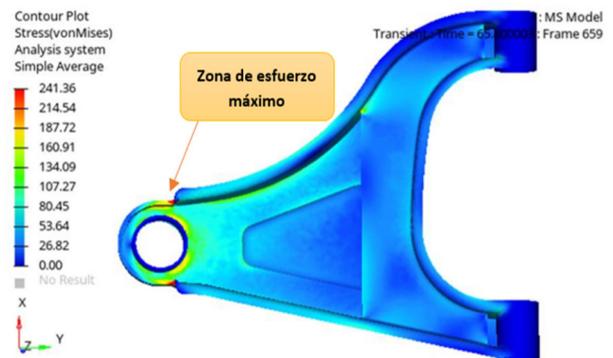


Figura 12. Zona de esfuerzo trapezio delantero, vista inferior.

Fuente: (Rodríguez. & Patiño, 2022)

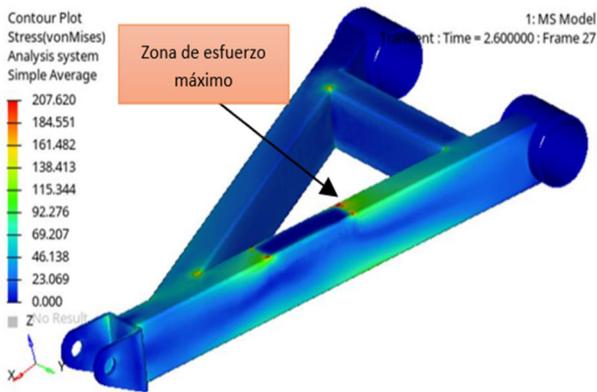


Figura 13. Zona mayor esfuerzo trapecio posterior - esfuerzo máximo: 207.62 MPa.
Fuente: (Rodríguez. & Patiño, 2022)

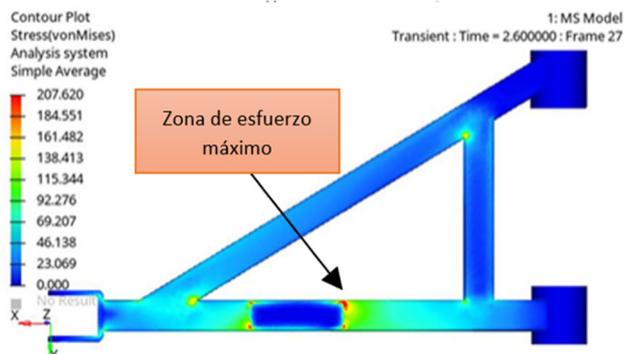


Figura 14. Zona de esfuerzo trapecio posterior, vista superior.
Fuente: (Rodríguez. & Patiño, 2022)

Para medir los esfuerzos en los trapecios oscilantes de la suspensión, luego de identificar las zonas de mayor esfuerzo mediante el software de simulación (figuras 12 y 14), se instalaron galgas extensiométricas de tipo roseta sobre la superficie de los elementos preparados específicamente para este propósito.

Además, se identificaron áreas donde se concentran los esfuerzos de manera significativa, que incluyen el soporte inferior de la rueda posterior (figura 15), la zona superior de la rueda posterior y el soporte de la mangueta de las ruedas delanteras (figura 16).

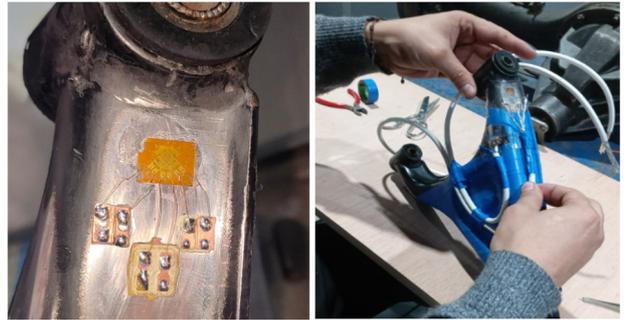


Figura 15. Instalación de las galgas tipo roseta en el trapecio delantero



Figura 16. Instalación de las galgas tipo roseta en el trapecio posterior

Posteriormente, se llevó a cabo el montaje de las conexiones necesarias sobre los trapecios, las cuales se enlazarán con la tarjeta de adquisición para la toma de datos (Figuras 17).



Figura 17. Conexiones instaladas en los trapecios oscilantes para su integración con el sistema DAQ

Finalmente, reinstalamos los elementos de la suspensión en el vehículo y aseguramos la tarjeta de adquisición al chasis del vehículo biplaza (Figuras 18 y 19).



Figura 18. Montaje de trapecio dispuesto con las galgas extensiométricas



Figura 19. Montaje de tarjeta de adquisición NI 9219 DAQ

PROCESAMIENTO DE DATOS RECOPIRADOS

Las deformaciones presentes en las galgas se relacionan directamente con los esfuerzos a los que está sometido el material de la estructura. El criterio de Von Mises es útil en el contexto de las galgas extensiométricas porque permite evaluar si la deformación medida excede el límite elástico del material, lo cual podría indicar el inicio de la deformación plástica y potencialmente, la falla estructural.

Transformación de voltaje en deformación:

La relación entre el voltaje medido en una galga extensiométrica y la deformación es dada por la ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta V}{V_0} \times \frac{1}{GF}$$

Donde:

ε = es la deformación unitaria.

ΔV = es la variación del voltaje medida.

V_0 = es el voltaje inicial (de referencia).

GF = es el factor de ganancia o "gauge factor" de la galga extensométrica.

Estimación del esfuerzo axial

Una vez que tienes la deformación, puedes estimar el esfuerzo axial utilizando la siguiente ecuación, que es la ley de Hooke para materiales en régimen elástico:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon$$

Donde:

σ = es el esfuerzo axial (en unidades de presión, como Pascales).

E = es el módulo de elasticidad (o módulo de Young) del material.

ε = es la deformación unitaria obtenida previamente.

Calculamos los esfuerzos principales:

$$\sigma_1; \sigma_2 = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \quad (1)$$

Donde:

σ_1 = Esfuerzo principal primario.

σ_2 = Esfuerzo principal secundario.

σ_x = Esfuerzo normal en el eje x.

σ_y = Esfuerzo normal en el eje y.

Y finalmente el esfuerzo de Von Mises:

$$\sigma_{VM} = \sqrt{(\sigma_x)^2 + (\sigma_y)^2 - \sigma_x \sigma_y + 3(\tau_{xy})^2} \quad (2)$$

Donde:

σ_{VM} = Esfuerzo de Von Mises.

σ_x = Esfuerzo normal en X.

σ_y = Esfuerzo normal en Y.

τ_{xy} = Esfuerzo cortante.

MAPA DE RUTA

Para la adquisición de datos, tras el montaje de la instrumentación en el vehículo, se llevó a cabo el recorrido previamente analizado (figura 20).

Esto permitió que el sistema de suspensión experimentara esfuerzos debido a los peraltes y obstáculos presentes en la ruta, generando vibraciones que fueron captadas por las galgas extensiométricas. La distancia promedio recorrida fue de 2,95 km. (Tabla 4).



Figura 20. Ruta recorrida por el vehículo eléctrico biplaza con la instrumentación montada

TABLA 4. DATOS DE LA RUTA

Datos de ruta	
Punto de partida	Av. 24 de mayo
Dirección del trayecto	Av. 24 de mayo - Av. 27 de Febrero - Av. Francisco Moscoso
Nº de pruebas	4 pruebas
Distancia recorrida	2.95 Km
Velocidad media	30 km/h
Velocidad máxima	60 km/h
Tiempo	18 min
Visible	Ruta marcada, visible en el mapa de obtenido en la aplicación STRAVA, demarcado con color naranja.
Oculta	Ruta que se podría seguir en caso de requerimiento, según la aplicación STRAVA, demarcado en color gris.

RESULTADOS

Proceso de obtención de esfuerzo de Von Mises con datos originales (sin filtro).

Una vez obtenidos los datos por medio de la tarjeta de adquisición de datos, procedimos a ingresar los mismos en el programa MATLAB®, habiendo sido realizada la programación para que se apliquen las fórmulas determinadas para el cálculo del esfuerzo de Von Mises. Anexo 1

Dando como resultado las siguientes gráficas (fig.21), que se encuentran en configuración a 45°, 90° y 135°:

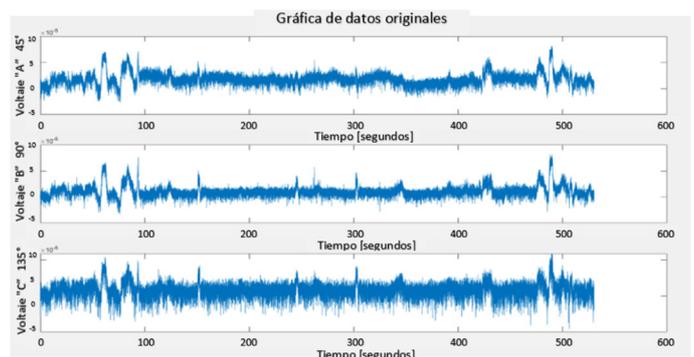


Figura 21. Gráfica de variación de voltaje en cada galga de la roseta.

Como podemos observar (Fig.21) se obtuvieron datos de variación de voltaje, en la galga tipo roseta durante todo el recorrido del vehículo, si bien es cierto, se aprecian ciertos picos de deformación, es necesario realizar un proceso posterior para filtrar dichos valores y eliminar el ruido existente.

Luego obtenemos la gráfica del esfuerzo de Von Mises a partir de los datos originales:

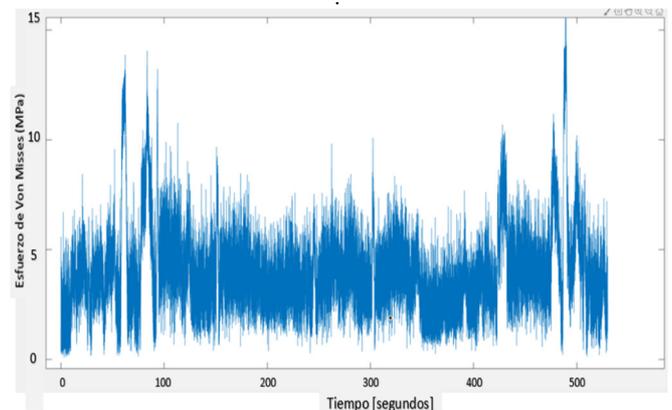


Figura 22. Gráfica de los datos originales del esfuerzo de Von Mises

Una vez obtenidos los datos de la tarjeta de adquisición, se procede a calcular el esfuerzo de Von Mises (fig. 22) utilizando el programa Matlab®. No obstante, al igual que en la gráfica anterior, se observa una franja de ruido en la parte media de los datos. Por lo tanto, es fundamental aplicar un filtro pasa bajo para eliminar dicho ruido y poder visualizar los datos de manera más precisa, lo que permitirá determinar correctamente los esfuerzos presentes.

Se aplica un filtro de "Transformada Rápida de Fourier (FFT)" a los datos originales con el objetivo de mostrar los resultados en el espectro (dominio de la frecuencia) obtenidos durante la prueba dinámica. Esto permite obtener los datos correspondientes a las frecuencias, que se utilizarán como el eje X en la gráfica del espectro. Al aplicar la FFT, se obtienen valores tanto reales como imaginarios: los valores reales representan la amplitud y los imaginarios el ángulo de fase de la señal. Por lo tanto, para graficar la amplitud en función de la frecuencia, se utilizan únicamente los valores absolutos de la señal filtrada.

Dando como resultado una gráfica del espectro de la señal para cada una de las galgas (fig.23):

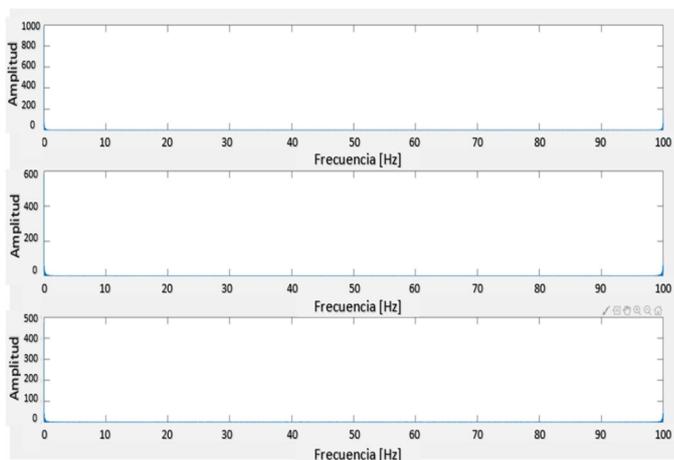


Figura 23. Representación espectral de la señal en función de la frecuencia vs la amplitud.

Aunque las gráficas son similares a simple vista, al hacer un acercamiento en cada una de ellas se puede observar que las amplitudes máximas varían notablemente (fig. 24-25-26).

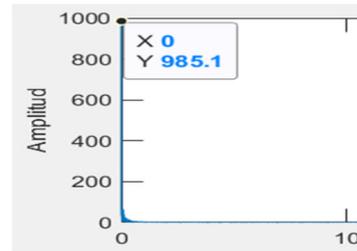


Figura 24. Gráfica de la amplitud máxima de la señal de la galga extensiométrica a 45°.

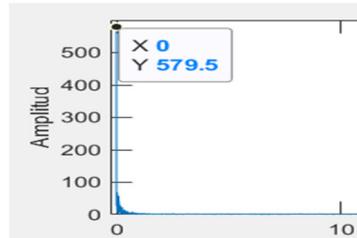


Figura 25. Gráfica de la amplitud máxima de la señal de la galga extensiométrica a 90°.

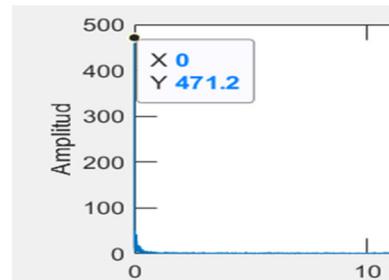


Figura 26. Gráfica de la amplitud máxima de la señal de la galga extensiométrica a 45°.

Si nos acercamos lo suficiente a estos valores, podremos observar que los datos se agrupan en frecuencias que van desde 0 Hz hasta 0.5 Hz (fig.27).

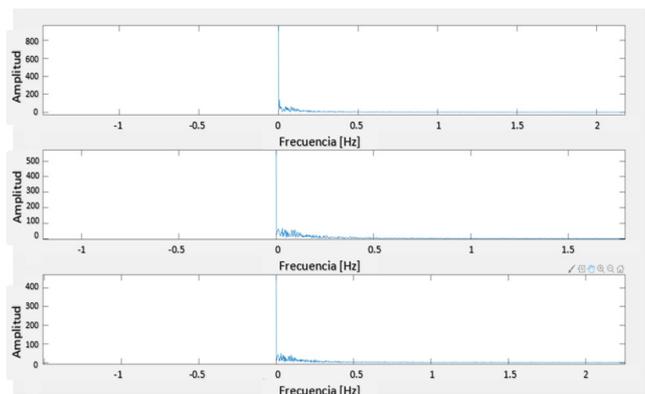


Figura 27. Agrupación de frecuencias (Hz)

Aplicación del filtro Butterworth:

Como se observó anteriormente, los datos relevantes están agrupados en el intervalo de frecuencias de 0 a 0.5 Hz. Por lo tanto, se aplicará un filtro paso bajo Butterworth a cada una de las señales originales. (fig. 28-29-30)

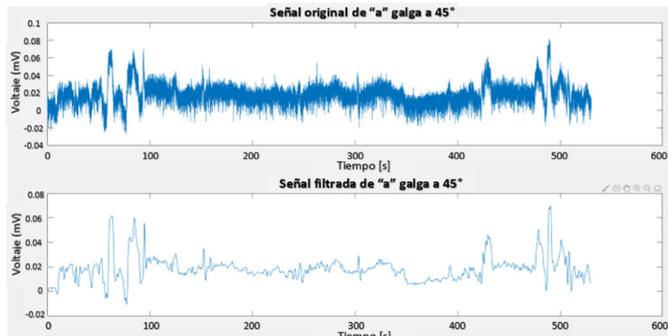


Figura 28. Gráficas de las señales originales vs filtradas – galga extensiométrica a 45°

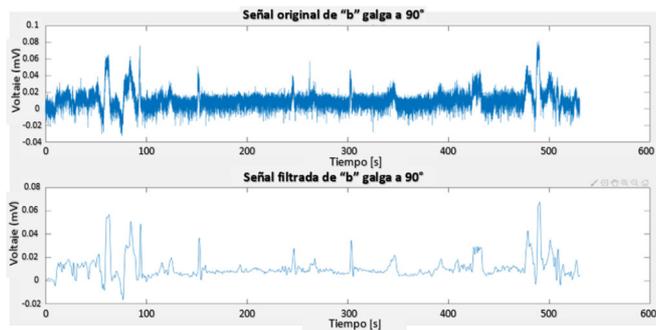


Figura 29. Gráficas de las señales originales vs filtradas - galga extensiométrica a 90°

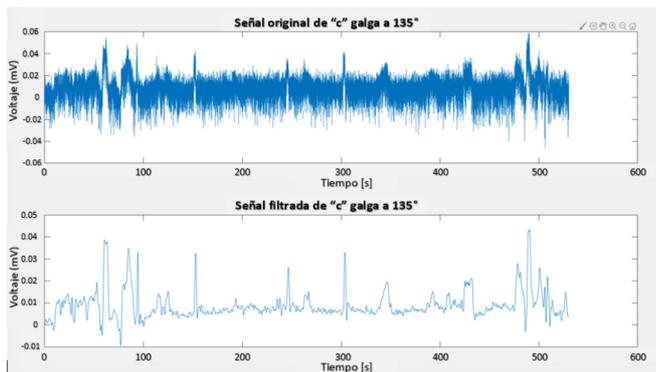


Figura 30. Gráficas de las señales originales vs filtradas - galga a extensiométrica a 135°

Para calcular el esfuerzo de Von Mises después de aplicar el filtro a la señal original (fig. 31), se puede utilizar un código que tome en cuenta los valores filtrados (fig.32).

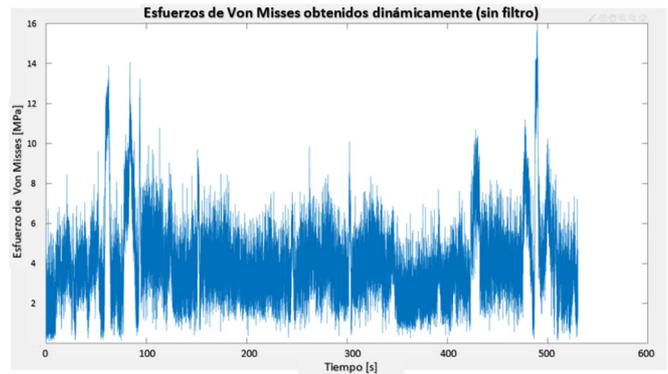


Figura 31. Gráfica sin filtro de esfuerzo de Von Mises

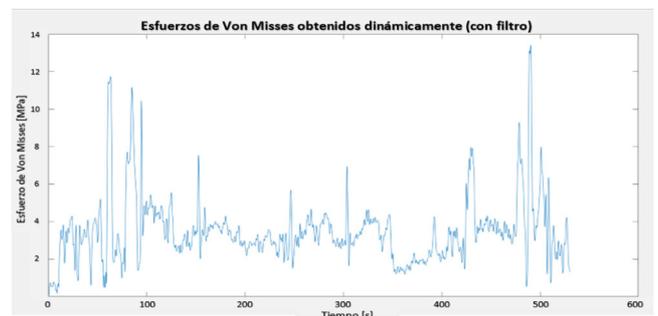


Figura 32. Gráfica con filtro de esfuerzo de Von Mises

Para calcular el esfuerzo de Von Mises después de haber aplicado el filtro a la señal original, necesitaremos emplear un código que tome en cuenta los datos filtrados y los utilice para realizar el cálculo. Anexo 1.

Obteniendo finalmente el valor del esfuerzo máximo (fig.33):

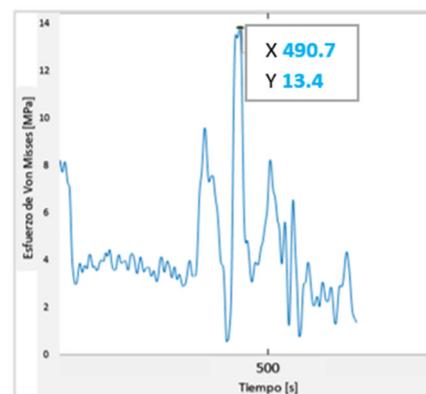


Figura 33. Gráfica Esfuerzo máx. 13.4 MPa.

Análisis de los esfuerzos obtenidos:

Se ha analizado en intervalos de 1 minuto los resultados (tabla 5):

TABLA 5. ESFUERZO DE VON MISES MAXIMO EN FUNCIÓN DEL TIEMPO

Tiempo_inicial_seg	Tiempo_final_seg	Promedio_de_Von_Mises_MPa
0	60	2.5702
60	120	4.9976
120	180	3.5098
180	240	2.9744
240	300	3.3819
300	360	3.2216
360	420	2.2944
420	480	4.2007
480	530.29	4.2867

Resultados De La Simulación (Combinados).

Si hacemos una comparativa con los resultados obtenidos en la simulación CAE (Tabla 6) en función del desplazamiento vertical de la rueda tenemos estos resultados:

TABLA 6. DATOS OBTENIDOS A TRAVÉS DE LA SIMULACIÓN CAE.

Tiempo	Desplazamiento vertical rueda [mm]	Toe [°]	Camber [°]	Caster [°]
0	0	-0.02	-0.02	2.54
0.5	24.72	-0.07	-0.21	2.65
1	47.02	0.18	-0.21	2.76
1.5	64.72	0.55	-0.07	2.85
2	76.08	0.87	0.09	2.91

Fuente: (Rodríguez & Patiño, 2022)

De acuerdo con los datos obtenidos en la simulación, la rueda se desplaza verticalmente en el rango máximo descrito, alcanzando un valor de 76,08 mm y generando un esfuerzo máximo de 241,36 MPa.

Sin embargo, los datos experimentales indican que el esfuerzo máximo registrado es de 13,4 MPa., considerando que el desplazamiento máximo de la rueda correspondiente alcanza tan solo 4.22 mm.

Este desplazamiento corresponde a la realidad acorde a las características de la ruta seleccionada para las pruebas, dado que la suspensión colocada en el vehículo biplaza es sumamente rígida y no llegaría a desplazarse 76,08 mm, ni duplicando el peso de sus ocupantes.

CONCLUSIONES

En la parte de instrumentación, la selección de las galgas extensométricas fue un aspecto crucial en el estudio debido a la complejidad geométrica de las zonas de interés, lo que dificultó la instrumentación. A pesar de estas dificultades, el análisis de los valores de esfuerzo axial en las zonas adyacentes permitió una mejor comprensión del desempeño en los puntos críticos. Esto reveló variaciones significativas en los esfuerzos debido a la naturaleza transitoria y progresiva de las cargas aplicadas en el estudio experimental. Los resultados obtenidos proporcionarán una base para futuros estudios de vida a fatiga de la estructura, permitiendo un diseño mejorado de las zonas de máximo esfuerzo.

El análisis de los resultados también identificó factores que inicialmente se consideraron de baja repercusión sobre el estado de carga, como las vibraciones producidas durante el desplazamiento del vehículo. Estas vibraciones afectan la respuesta de las galgas extensométricas, las cuales, debido a su alta sensibilidad, presentan variaciones atribuibles al ruido ambiental de la prueba. Comprender mejor este fenómeno será posible en estudios futuros mediante la implementación de filtros durante la fase de procesamiento de datos, que fue la herramienta que nos permitió un mejor análisis de los datos obtenidos.

Los hallazgos del estudio denotan la importancia de considerar adecuadamente el desplazamiento máximo de las ruedas en las simulaciones CAE de Dinámica de Cuerpos Múltiples. Se observaron esfuerzos excesivos en dichas simulaciones que no reflejan las condiciones normales de operación del vehículo, lo que explica por qué los esfuerzos medidos en este estudio fueron inferiores a los reportados en el análisis CAE. No obstante, es necesario realizar pruebas más exigentes que sometan a los componentes mecánicos del sistema de suspensión a mayores esfuerzos, para determinar los niveles adecuados de desplazamiento requeridos en condiciones críticas de operación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arellano J., y Taday E. (2016). Diseño y construcción de un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula para la Escuela de Ingeniería Automotriz. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/6192>
- Arévalo C., Medina A., y Valladolid J. (2018). Estudio cinemático y dinámico del sistema de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico Formula Student. Ingenius. Revista de Ciencia y Tecnología, (20), 96-101. Disponible en: <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.09>
- Cebolla Bono B. (2017). Modelado y caracterización de sistemas de suspensión en vehículos automóviles., Universidad Politécnica de Valencia. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89391/cebolla%20-%20modelado%20y%20caracterización%20de%20sistemas%20de>
- De la Cruz A., y Inga R. (2014). Diseño y construcción de los sistemas de dirección, suspensión, frenos y plegado, en un vehículo eléctrico biplaza plegable. Universidad de las fuerzas armadas. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8979>
- HBM, “Cómo seleccionar la galga extensométrica correcta | HBM.” (2023). Disponible en: <https://www.hbm.com/es/7164/como-seleccionar-la-galga-extensometrica-correcta/>
- HBM, (2024). “El puente de Wheatstone | Galgas extensométricas | HBM.” [Online]. Disponible en: <https://www.hbm.com/es/7163/el-puente-de-wheatstone-galgas-extensometricas/>
- Hoffmann K., “Una introducción a la medición mediante bandas extensométricas,” pp. 1–272, 1989.
- Hoffmann, K. “Practical hints for the installation of strain gages,” Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, p. 56, 1996.
- Jens B., “Clasificación Y Selección De Strain Gages Y Su Aplicación En La Industria Mecánica,” p. 166, 2017.
- Lizano Núñez, D. (2018). «Diseño y construcción de la estructura tubular para la carrocería del prototipo de un auto eléctrico BIPLAZA UTA-CIM17», 2018, Accedido: 11 de septiembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/27931>
- Loaiza, L. (2018) “Galgas.” [Online]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/luisalfonsoloaiza/galgas>
- Minga A., y Morocho C. (2018). Diseño y construcción de un sistema de suspensión posterior mediante software CAD/CAE para un prototipo híbrido biplaza 4x4 de la carrera de Ingeniería Automotriz. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/9830>
- OMEGA, (2023). “¿Qué son las galgas extensométricas? ¿Cómo se usan?” [Online]. Disponible en: <https://es.omega.com/prodinfo/galgas-extensometricas.html> [Accedido: 12-Feb-2019]
- Rodríguez, F. & Patiño, B. (2022) “Integración CAD/CAE y análisis metrológico de los componentes del sistema de suspensión de un vehículo eléctrico. biplaza. Universidad del Azuay. Disponible en: <https://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/12496/1/18023.pdf>

ANEXOS

Anexo 1.

```

%Calculo de esfuerzo de von
Mises a partir de la señal en
milivoltios
av=A/1000; bv=B/1000;
cv=C/1000;%se transforma de
milivoltios a voltios
E=2.5; k=2.1; cn=4/(E*k);%se
ingresa el voltaje de excitación
y la constante de la galga
eA=cn*av; eB=cn*bv; eC=cn*cv;%
calcula la deformación unitaria
eX=eA-eB+eC; eY=eB; tXY=eA-
eC;%calcula las deformaciones
unitarias normales "X" y "Y",
también la cortante tXY
e1=(0.5*(eX+eY))+0.5*(((eX-
eY).^2)+(tXY.^2)).^0.5);%deform
aciones unitarias principales
(-)e1=esfuerzo max,e2= esfuerzo
minimo
e2=(0.5*(eX+eY))-0.5*(((eX-
eY).^2)+(tXY.^2)).^0.5);
El=210000; %limite elastico del
material(MPa)
u=0.3;% coeficiente de poisson(-
)
S1=(El/(1-
u^2))*e1+(u*e2);%Esfuerzos
principales(MPa) S1= max, S2=min
S2=(El/(1-u^2))*e2+(u*e1);
Vm=(0.5*(((S1-
S2).^2)+(S2.^2)+(S1.^2))).^0.5;%
esfuerzo VM (MPa)
%
figure()
plot(t,Vm),title('Esfuerzos de
Von Mises obtenidos
dinámicamente (con
filtro)'),xlabel('Tiempo
(s)'),ylabel('Esfuerzo de Von
Misses (MPa)');

```

Figura 34. Programación de MATLAB utilizada.