



**UNIVERSIDAD
DEL AZUAY**

**Integración CAD/CAE y análisis metrológico de los
componentes del sistema de suspensión de un
vehículo eléctrico biplaza**

Facultad de Ciencia y Tecnología

Trabajo de titulación previo a la obtención
del título de:

Ingeniero en Mecánica Automotriz

Autores:

Flavio David Rodriguez León

Boris Alfonso Patiño Criollo

Director:

Ing. Boris Mauricio Coello Salcedo Mgst.

CUENCA - ECUADOR

2022

DEDICATORIA

Todo el esfuerzo empleado en la concepción de este proyecto se lo quiero dedicar a Dios por lo que me ha permitido ser y lograr a lo largo de toda mi vida.

Dedico este trabajo a mi familia, especialmente a mis padres, a quienes siempre quiero llenar de orgullo y alegría, y a cada persona que a lo largo de mi trayecto profesional me ha sabido ayudar y servir de apoyo.

Flavio David Rodríguez León

DEDICATORIA

A Sonia y Joel por su motivación y apoyo durante todo este proceso de formación y aprendizaje, también a mujeres muy importantes para mí: Violeta, Marisol, Abigail y Stefany por ser parte de este logro en mi vida.

Boris Alfonso Patiño Criollo

AGRADECIMIENTOS

Por habernos permitido llegar a donde estamos hoy, con fortaleza y esmero damos gracias a Dios.

Agradecemos a nuestros familiares y allegados cercanos, en quienes hemos encontrado la motivación y valor para cumplir con nuestros objetivos.

Y finalmente queremos expresar nuestro agradecimiento a los docentes de la Universidad del Azuay, por guiarnos en nuestro camino académico.

*Flavio David Rodríguez León
Boris Alfonso Patiño Criollo*

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDOS	v
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE TABLAS	vii
RESUMEN	viii
ABSTRACT	ix
INTRODUCCIÓN	- 1 -
METODOLOGÍA	- 2 -
A. Materiales.....	- 3 -
1) Software de diseño asistido por computador, CAD.....	- 3 -
2) Software de ingeniería asistida por computador, CAE.....	- 3 -
B. Datos Preliminares.....	- 3 -
C. Estructuración de modelos y pruebas CAE	- 4 -
1) Creación de modelos CAE	- 4 -
2) Optimización de la ubicación de dirección	- 4 -
3) Pruebas cinemáticas y de esfuerzos.....	- 5 -
RESULTADOS	- 5 -
A. Análisis de interferencias	- 5 -
B. Ángulos de inclinación	- 6 -
1) Análisis Camber	- 6 -
2) Análisis Caster.....	- 6 -
3) Análisis Toe.....	- 6 -
C. Esfuerzos en componentes de suspensión	- 7 -
1) Análisis de esfuerzos en los componentes de la suspensión	- 7 -
2) Análisis de esfuerzos en el chasis.....	- 7 -
CONCLUSIONES	- 8 -
REFERENCIAS	- 9 -

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Modelo CAD de chasis y sistema de suspensión	- 2 -
Figura 2. Diagrama de procesos llevados a cabo para la concepción de la investigación.....	- 3 -
Figura 3. Modelo CAD de suspensión delantera McPherson	- 3 -
Figura 4. Vista explosionada de suspensión delantera McPherson	- 3 -
Figura 5. Modelo CAD de suspensión posterior Eje Rígido	- 3 -
Figura 6. Vista explosionada de suspensión posterior Eje rígido	- 3 -
Figura 7. Modelo CAE de suspensión delantera McPherson	- 4 -
Figura 8. Modelo CAE de suspensión posterior Eje Rígido	- 4 -
Figura 9. Nodo de estudio para el proceso de optimización	- 5 -
Figura 10. Análisis de cuatro postes	- 5 -
Figura 11. Comportamiento de la suspensión delantera	- 6 -
Figura 12. Comportamiento de la suspensión posterior	- 6 -
Figura 13. Comparativa de curvas en comportamiento cinemático	- 6 -
Figura 14.a. Esfuerzo trapecio delantero	- 7 -
Figura 14.b. Esfuerzo trapecio delantero vista inferior	- 7 -
Figura 15.a. Esfuerzo trapecio posterior	- 7 -
Figura 15.b. Esfuerzo trapecio posterior vista superior	- 7 -
Figura 16.a. Esfuerzos en chasis	- 7 -
Figura 16.b. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en los puntos de apoyo del trapecio delantero	- 8 -
Figura 16.c. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en los puntos de apoyo del trapecio posterior	- 8 -
Figura 16.d. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en los puntos de apoyo del trapecio posterior	- 8 -
Figura 16.e. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en los puntos de apoyo del amortiguador posterior	- 8 -

ÍNDICE DE TABLAS

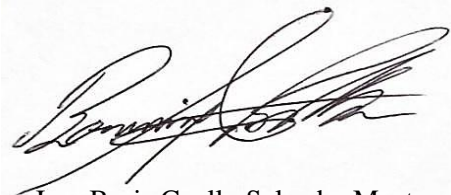
Tabla I. Lista de propiedades del vehículo.....	- 4 -
Tabla II. Propiedades mecánicas de muelles y amortiguadores.....	- 4 -
Tabla III. Características de los elementos finitos.....	- 4 -
Tabla VI. Propiedades mecánicas de los componentes de suspensión.....	- 5 -
Tabla V. Rango de movimiento del conjunto suspensión - dirección.....	- 5 -
Tabla VI. Valores de ángulos de alineación de las ruedas delanteras.....	- 6 -

INTEGRACIÓN CAD/CAE Y ANÁLISIS METROLÓGICO DE LOS COMPONENTES DEL SISTEMA DE SUSPENSIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO BIPLAZA

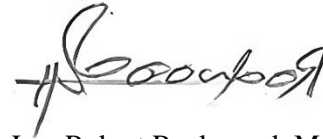
RESUMEN

En el siguiente trabajo se ha investigado el análisis dinámico del sistema de suspensión para un vehículo eléctrico biplaza. Dicho sistema fue modelado mediante un programa de diseño asistido por computador (CAD) en referencia a cotas establecidas previamente en los requisitos del vehículo y posterior a ello se validó su funcionamiento utilizando el software de dinámica de cuerpos múltiples (MBD), *Altair® MotionView®*. Se realizaron simulaciones cinemáticas con el fin de identificar los conflictos de interferencias mecánicas entre el chasis y los componentes de la suspensión, y analizar su comportamiento cinemático; para ello como datos de entrada se usaron: el peso del automóvil y los rangos de movimiento que se pretenden alcanzar. A su vez se realizaron pruebas de conducción estática y análisis de 4 postes con el propósito de determinar los esfuerzos que se producen en los componentes de la suspensión y en los soportes donde irán sujetos al chasis. Mediante el software de optimización, *Altair® HyperStudy®*, se estableció la posición idónea del sistema de dirección para un correcto desempeño en conjunto con el sistema de suspensión. De esta manera, los resultados obtenidos garantizan un desempeño apto en condiciones reales de funcionamiento.

Palabras clave - vehículo eléctrico, sistema de suspensión, dinámica de cuerpos múltiples, *Altair® Motionview®*



Ing. Boris Coello Salcedo. Mgst.
Director del trabajo de titulación



Ing. Robert Rockwood. Mgst.
Director de Escuela



Flavio David Rodriguez León
Autor



Boris Alfonso Patiño Criollo
Autor

CAD/CAE INTEGRATION AND METROLOGICAL ANALYSIS OF SUSPENSION SYSTEM COMPONENTS OF A TWO-SEATER ELECTRIC VEHICLE

ABSTRACT

In the following work, the dynamic analysis of the suspension system for a two-seater electric vehicle has been researched. This system was modeled using a computer aided design (CAD) program with reference to dimensions previously established in the vehicle requirements and then its performance was validated using the multi-body dynamics (MBD) software, Altair® MotionView®. Kinematic simulations were performed in order to identify the mechanical interference conflicts between the chassis and the suspension components, and to analyze their kinematic behavior; for this purpose, the following data were used as input data: the weight of the car and the ranges of motion intended to be achieved. At the same time, static driving and static balancing tests were carried out in order to determine the stresses produced in the suspension components and in the supports where they will be attached to the chassis. By means of the optimization software, Altair® HyperStudy®, the ideal position of the steering system was established for a correct performance in conjunction with the suspension system. In this way, the results obtained guarantee a suitable performance in real operating conditions.

Keywords - electric vehicle, suspension system, multi-body dynamics, Altair® Motionview®



Ing. Boris Coello Salcedo. Mgst.
Director of the degree project



Ing. Robert Rockwood. Mgst.
School Director

Translated by:



Flavio David Rodriguez León
Author



Boris Alfonso Patiño Criollo
Author



Integración CAD/CAE y análisis metrológico de los componentes del sistema de suspensión de un vehículo eléctrico biplaza.

Boris Mauricio Coello Salcedo
Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Universidad del Azuay
boriscoello@es.uzuay.edu.ec

Flavio David Rodriguez León
Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Universidad del Azuay
d.rodriguez@es.uzuay.edu.ec

Boris Alfonso Patiño Criollo
Facultad de Ciencia y Tecnología
Ingeniería en Mecánica Automotriz
Universidad del Azuay
boris-pa89@es.uzuay.edu.ec

Resumen — En el siguiente trabajo se ha investigado el análisis dinámico del sistema de suspensión para un vehículo eléctrico biplaza. Dicho sistema fue modelado mediante un programa de diseño asistido por computador (CAD) en referencia a cotas establecidas previamente en los requisitos del vehículo y posterior a ello se validó su funcionamiento utilizando el software de dinámica de cuerpos múltiples (MBD), Altair® MotionView®. Se realizaron simulaciones cinemáticas con el fin de identificar los conflictos de interferencias mecánicas entre el chasis y los componentes de la suspensión, y analizar su comportamiento cinemático; para ello como datos de entrada se usaron: el peso del automóvil y los rangos de movimiento que se pretenden alcanzar. A su vez se realizaron pruebas de conducción estática y balanceo estático con el propósito de determinar los esfuerzos que se producen en los componentes de la suspensión y en los soportes donde irán sujetos al chasis. Mediante el software de optimización, Altair® HyperStudy®, se estableció la posición idónea del sistema de dirección para un correcto desempeño en conjunto con el sistema de suspensión. De esta manera, los resultados obtenidos garantizan un desempeño apto en condiciones reales de funcionamiento.

Palabras clave — *vehículo eléctrico, sistema de suspensión, dinámica de cuerpos múltiples, Altair® MotionView®*

Abstract — In the following work, the dynamic analysis of the suspension system for a two-seater electric vehicle has been investigated. This system was modeled using a computer aided design (CAD) program with reference to dimensions previously established in the vehicle requirements and then its performance was validated using the multi-body dynamics (MBD) software, Altair® MotionView®. Kinematic simulations were performed in order to identify the mechanical interference conflicts between the chassis and the suspension components, and to analyze their kinematic behavior; for this purpose, the following data were used as input data: the weight of the car and the ranges of motion intended to be achieved. At the same time, static driving and static balancing tests were carried out in order to determine the stresses produced in the suspension components and in the supports where they will be attached to the chassis. By means of the optimization software, Altair® HyperStudy®, the ideal position of the steering system was established for a correct performance in conjunction with the suspension system. In this way, the results obtained guarantee a suitable performance in real operating conditions.

Keywords — *electric vehicle, suspension system, multi-body dynamics, Altair® MotionView®*

I. INTRODUCCIÓN

El presente estudio forma parte del proyecto de unidad de titulación de la carrera de Ingeniería en Mecánica Automotriz de la Universidad del Azuay, cuyo objetivo es caracterizar los procesos de diseño en los contextos de aplicación de software de simulación, destacando las técnicas de elementos finitos en un programa computacional de cálculo estructural Altair® Hypermesh® y en el estudio predictivo de multicuerpos Altair® MotionView®. Las pruebas realizadas fueron: prueba de optimización de la locación de los elementos de dirección, prueba de interferencias y prueba de rigidez de los elementos.

De acuerdo con lo dicho, el software de simulación virtual es la herramienta más importante, pues ha permitido el desarrollo de varias pruebas físicas que figuran costos y tiempos elevados; con lo cual, por medio del análisis de interferencias, se pudo validar el funcionamiento del sistema de suspensión McPherson (frontal) y de eje rígido (posterior), en base a los resultados alcanzados. Cabe mencionar que se partió de modelos de suspensión ya construidos con lo que se pretendía adecuarlos a un nuevo chasis. Siendo este el punto de partida, se realizaron las respectivas modificaciones donde se busca obtener un correcto montaje y desempeño del nuevo conjunto de suspensión.

Dentro del sistema de suspensión los ángulos de inclinación tienen gran incidencia, ya que su finalidad es mantener la estabilidad del vehículo en su desempeño dinámico, por esto, es muy importante mantener los parámetros adecuados asegurando la maniobrabilidad y evitar desgastes innecesarios en los componentes del automóvil.

Al respecto, el estudio realizado por Arzola N. [1], propone analizar el comportamiento dinámico de una suspensión de doble horquilla independiente de $\frac{1}{4}$ de vehículo, cuyos modelos anteriores desarrollados por Rojas y Arzola (2013), Thacker (2015) y Yu, Evangelou y Dini (2017), verificaron las curvas de posición, velocidad y aceleración, así como la fuerza de entrada de la suspensión, con pruebas de algunos casos típicos y resultados experimentales.

Urgilés S. [2], presenta el estudio numérico y experimental de la influencia del tamaño de las ruedas sobre los elementos de la suspensión McPherson, mediante el uso de programas CAE para el análisis y solución de casos de estudio de la suspensión

de un vehículo, validando los resultados de simulación obtenidos.

Bustamante B. [3] en su estudio del comportamiento de un corrector de ángulos Camber y Caster usando elementos finitos para su alineación en un vehículo con suspensión tipo McPherson, cuyo objetivo es obtener los ajustes correctos en los ángulos de alineación Camber y Caster del sistema de dirección, determinando los parámetros adecuados para la corrección del ángulo Camber, así como también los esfuerzos producidos en elementos de la suspensión.

Así mismo, Arellano J. [4], plantea el diseño y construcción de un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula para la escuela de ingeniería automotriz, en el cual, determina los puntos más vulnerables en el diseño de una suspensión automotriz, utilizando software de simulación proporcionando un eficiente funcionamiento del vehículo.

En cuanto a Cebolla B. [5], en su investigación de modelado y caracterización de sistemas de suspensión en vehículos automóviles, que tenía como objetivo desarrollar una aplicación informática que modele la suspensión de un vehículo y mostrar los resultados por pantalla, mediante un análisis de frecuencia en el software Matlab®, logrando obtener una interfaz de usuario final (GUI) pudiendo describir el comportamiento de cada modelo.

En el trabajo de Arévalo C. [6], trata del estudio cinemático y dinámico de suspensión de un monoplaza de competencia eléctrico utilizando programas de simulación cinemática y cálculos matemáticos en los que se determinen el rendimiento del sistema de suspensión y ofrecer mejoras o soluciones a los problemas presentados durante el estudio.

Además, se resalta el análisis de Mejía O. [7], quien investigó el diseño y selección del sistema de suspensión de un prototipo de auto eléctrico biplaza, realizando simulaciones en Software CAD, se determinaron cargas máximas a las que está sometida y en base a los resultados obtenidos elegir de entre los modelos la opción de suspensión más óptima.

Con relación al estudio de Minga A. [8], en el que presenta el diseño y construcción de un sistema de suspensión para un prototipo híbrido biplaza 4x4, en el cual utilizando herramientas de simulación CAD/CAE, se establezcan los requerimientos y elementos necesarios del sistema de suspensión al validarse el diseño post-análisis.

Por otro lado, Lumiñana O. [9], presenta su estudio, optimización y rediseño de los elementos de suspensión de un vehículo clásico, con el objetivo de mejorar el rendimiento y estabilidad, realizando análisis dinámicos utilizando software de diseño y simulación.

De esta forma, se evidencian las aplicaciones de los programas de ingeniería de apoyo en el campo de la dinámica multicuerpo aplicada al diseño de sistemas de suspensión de automóviles. Sin duda, su uso mejora la productividad durante el desarrollo de nuevas propuestas, con muy buenos resultados.

Actualmente, los sistemas de suspensión no se desarrollan a través del conocimiento empírico sino a través de análisis complejos computarizados, siendo la dinámica de cuerpos uno

de los principales pilares del desarrollo de los sistemas de suspensión. Encontrar el diseño de suspensión perfecto para cada vehículo es uno de los mayores desafíos que enfrentan los fabricantes de automóviles, lo que lleva al desarrollo de una gran cantidad de métodos computacionales para el perfeccionamiento de suspensiones con el propósito de detectar, predecir fallas y mejorar la eficiencia y durabilidad de la mismas.

II. METODOLOGÍA

El proceso de investigación dio inicio con la obtención CAD de los modelos del sistema de suspensión tanto delanteros como posteriores, mismo que se basaron en los componentes del vehículo eléctrico Chok G2 por la facilidad de adaptabilidad que presentan.

El chasis del vehículo eléctrico con el que se está trabajando corresponde al modelo que se muestra en la figura 1. En dicho modelo se crearon puntos de anclaje donde irán sujetos los elementos de la suspensión. De esta manera se acopló los modelos CAD en los puntos de anclaje mencionados anteriormente, donde se dio especial énfasis en la geometría de las piezas y el rango de movimiento que presentan para evitar colisiones con el chasis.

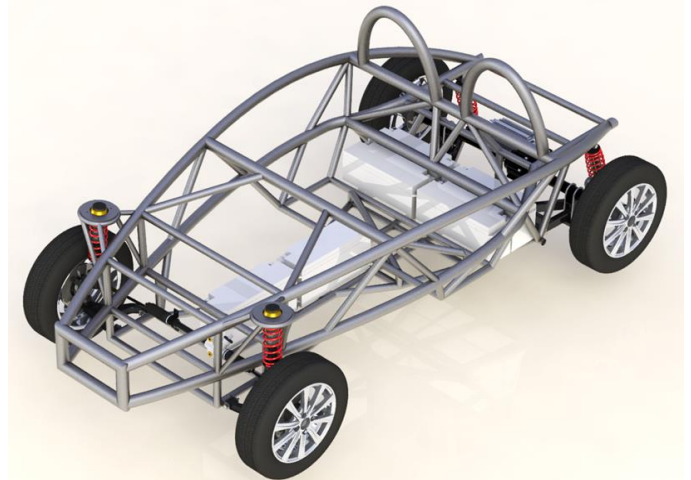


Fig 1. Modelo CAD de chasis y sistema de suspensión.

El objetivo que se tiene es la validación de la funcionalidad del sistema, para ello el proceso que se siguió consistió en realizar múltiples pruebas que evalúan el comportamiento de la cinemática. Con los resultados obtenidos se pretende que estos se adecuen a los valores normales de funcionamiento de una suspensión, teniendo como criterios principales suprimir cualquier interferencia mecánica entre los componentes, el desplazamiento vertical de la rueda y los ángulos de inclinación.

En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo que representa los diferentes procesos que se utilizaron en este estudio para la adecuación de la suspensión, con el fin de obtener resultados acordes a los objetivos planteados.

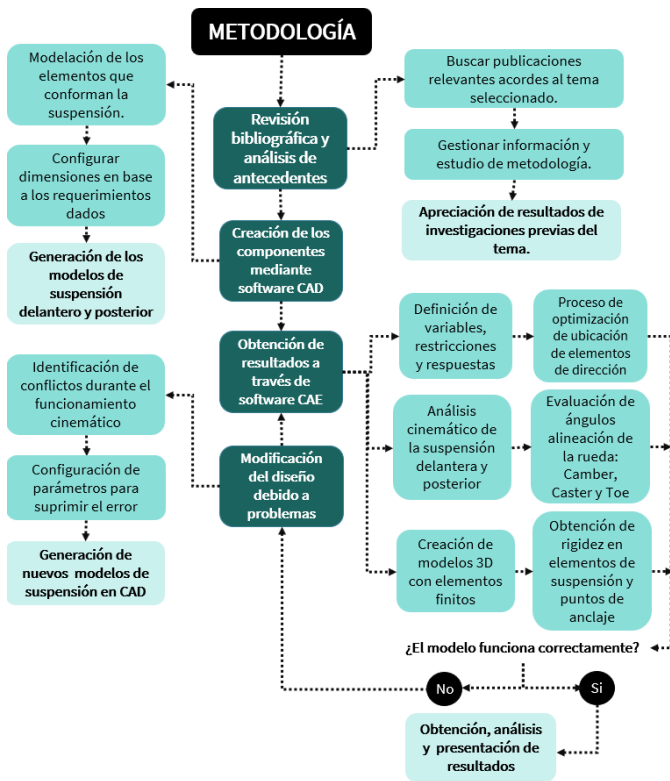


Fig 2. Diagrama de procesos llevados a cabo para la concepción de la investigación.

A. Materiales

1) *Software de diseño asistido por computador, CAD:* Programas empleados para llevar a cabo el modelado de todos los componentes de las suspensiones y ensamblaje de los mismos dentro del chasis (en las figuras 3 y 5 se pueden observar los resultados de los diseños creados).

- SolidWorks 2020
- Fusion 360

Por otra parte, en las figuras 4 y 6 se muestran ambos conjuntos, tanto la suspensión delantera como trasera, en una vista explosionada, permitiendo entender el acople de los componentes que los constituyen.

2) *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
- HyperMesh
- HyperStudy
- HyperGraph 2D
- MotionSolve



Fig 3. Modelo CAD de suspensión delantera McPherson



Fig 4. Vista explosionada de suspensión delantera McPherson

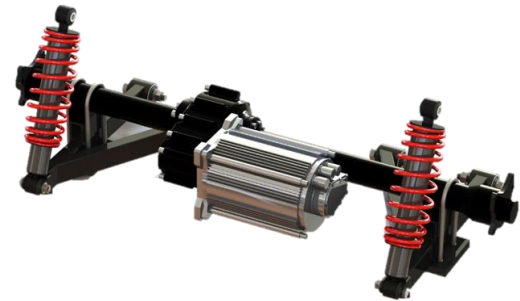


Fig 5. Modelo CAD de suspensión posterior Eje Rígido

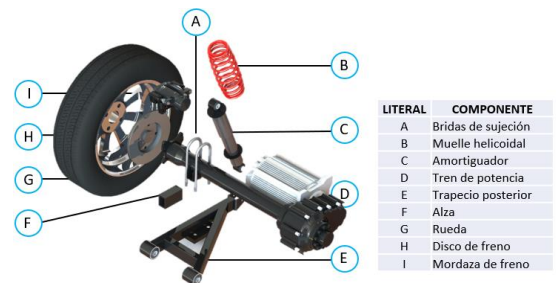


Fig 6. Vista explosionada de suspensión posterior Eje rígido

B. Datos preliminares

Como se mencionó anteriormente para este sistema de suspensión los modelos que se usaron fueron: McPherson (suspensión delantera) y Eje rígido (suspensión posterior).

En la suspensión McPherson se une un brazo oscilante (trapezio de suspensión) al chasis a través de un cojinete y de

otro extremo se conecta la mangueta por medio de la rótula. La mangueta se conecta en la parte superior de su eje al amortiguador, mismo que se encuentra funcionando en conjunto con el muelle. Todo el sistema se apoya en una plataforma del chasis que se encuentra conectado a la parte superior del amortiguador.

En el sistema de Eje Rígido, el tren de potencia forma un solo conjunto con los dos brazos oscilantes que se encuentran unidos a este mediante bridas. Estos brazos por uno de sus extremos se acoplan al chasis en 4 puntos de conexión y en el otro extremo se une a los amortiguadores mediante bujes. Los amortiguadores, que forman un solo cuerpo con los muelles, se sujetan por la parte superior a los puntos de anclaje del chasis permitiendo la movilidad del sistema.

A continuación, en la tabla 1 se enlistan las especificaciones técnicas del vehículo, en la tabla 2 se presentan las propiedades mecánicas del sistema de amortiguación y en la tabla 3 se muestran los valores referentes a las propiedades mecánicas de los elementos en los que se llevará a cabo los análisis de esfuerzo.

TABLA I.
LISTA DE 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 II.
PROPIEDADES MECÁNICAS DE MUELLES Y AMORTIGUADORES

Elemento		Constante de elasticidad k [N/mm]	Índice del resorte c
Muelle	Delantero	25,7	8.68
	Posterior	12,0	7.60
Amortiguador	Delantero	0	1
	Posterior	0	1

Con respecto al peso que se manejó en la investigación se tuvo en consideración la aplicación de 6 baterías de plomo de 52 kg cada una y dos personas adultas de 80 kg. Estas cargas sumadas al peso del chasis nos dan un total de 580 kg, a este peso se le sumó un 25% más que representa los accesorios que irán montados en el automóvil dando un total de 725 kg. En cuanto al neumático que se está utilizando, presenta las especificaciones 165/70R15 con un radio de carga libre de 306 mm.

TABLA III.
PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS COMPONENTES DE SUSPENSIÓN

Componente	Módulo de elasticidad E [GPa]	Límite de fluencia Sy [MPa]	Densidad RHO [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

C. Estructuración de modelos y pruebas CAE

1) *Creación de modelos CAE:* Se generaron los modelos en el programa Altair®MotionView®. Este software trabaja bajo el concepto de generación y adecuación de nodos en el plano tridimensional. Así pues, los nodos representativos están en los puntos de conexión de los elementos de la suspensión del modelo CAD.

Se partió por un modelo genérico que trae la librería del programa y se adecuo en base a las cotas referenciales que se manejan. Además, se cargaron los valores de las propiedades del vehículo, amortiguadores y muelles. En las figuras 7 y 8 se muestran dichos modelos.

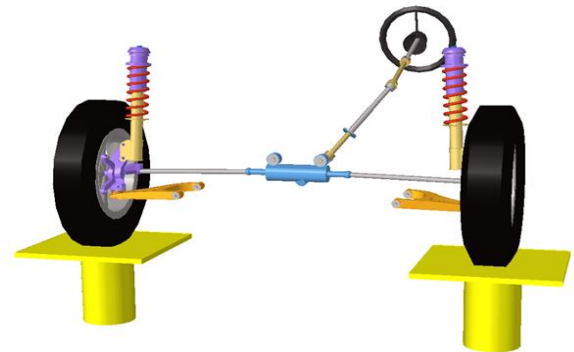


Fig 7. Modelo CAE de suspensión delantera McPherson

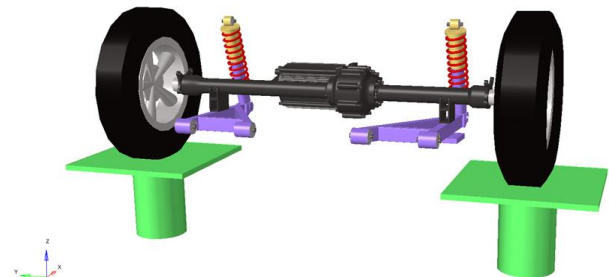


Fig 8. Modelo CAE de suspensión posterior Eje Rígido

2) *Optimización de la ubicación de dirección:* La dirección es uno de los sistemas que tiene una incidencia directa en el comportamiento de la suspensión, tal es así que la ubicación de este conjunto modifica en gran medida los valores

de los ángulos de inclinación de la rueda durante su desplazamiento vertical.

Cabe mencionar que los vehículos de propulsión presentan una peculiaridad durante el arranque ya que al iniciar el movimiento “empujan” las ruedas del eje delantero. La resistencia a la rodadura en los neumáticos provoca arrastre el cual incide en el movimiento de los brazos oscilantes de la suspensión delantera contra sus bujes provocando divergencia, esto se compensa con un ángulo Toe positivo que garantiza que las ruedas giren de manera paralela.

Por consiguiente, se evaluó la posición óptima del nodo que conecta la barra y la cremallera de la dirección como se puede observar en la figura 9. Para este proceso de optimización, dentro del programa *HyperStudy*®, la variable a considerar fue el desplazamiento del nodo y la restricción se aplicó a los grados de libertad pudiendo únicamente moverse a lo largo de los ejes Y y Z. El objetivo que se busca es que la curva generada por el ángulo toe se aproxime a una recta de convergencia propuesta. Estos resultados fueron expuestos por el software *HyperGraph*® 2D

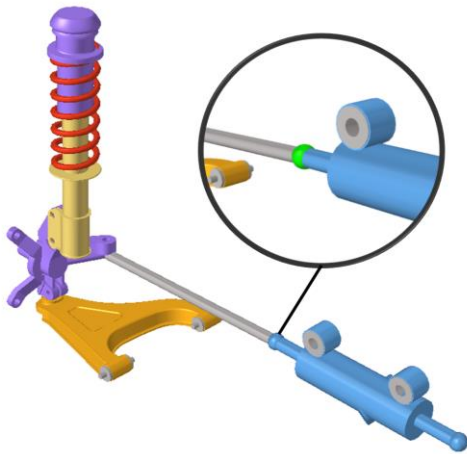


Fig 9. Nodo de estudio para el proceso de optimización

3) *Pruebas cinemáticas y de esfuerzos*: Las pruebas que se realizaron para el estudio seccionado de la suspensión en la parte frontal y posterior fueron de dos tipos: análisis de la cinemática y cumplimiento (kinematics and compliance analysis) y análisis de conducción estática (static ride analysis). Con la primera se determinó el rango de desplazamiento vertical de las ruedas, el hallazgo de colisión entre elementos y el ángulo de giro de la dirección y con la segunda prueba se obtuvo los esfuerzos de los trapecios tanto delanteros como posteriores.

La prueba que se realizó para todo el conjunto ensamblado (suspensión y chasis) fue el análisis de 4 postes (4 post analysis) como se presenta en la figura 10, con esta prueba se determinó los esfuerzos que se generan en los puntos de anclaje de la suspensión al chasis.

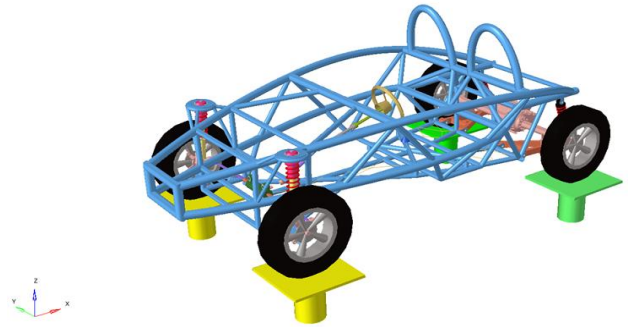


Fig 10. Análisis de cuatro postes

La preparación de los elementos finitos tanto para los componentes de la suspensión como del chasis se lo realizó en *HyperMesh*® y el procesamiento de los cálculos se lo realizó con *MotionSolve*®. En la tabla 4 se detalla las propiedades los de los elementos utilizados en el mado.

TABLA IV.
CARACTERÍSTICAS DE LOS ELEMENTOS FINITOS

Conjunto	Chasis	Anclajes	Trap. delt	Trap. post
Malla 2D	x		x	x
Malla 3D		x		
Tipo elemento	triangular	pirámide	triangular	triangular
Tamaño de elemento	Max	5	5	5
	Min	1	1	1

III. RESULTADOS

A. Análisis de interferencias

Con este estudio los resultados nos demostraron los rangos de desplazamiento a los cuales puede funcionar la suspensión de manera óptima y el máximo ángulo de giro al cual pueden llegar las ruedas, como se muestra en la tabla 5, además, se comprobó dentro del trayecto de movimiento que no exista colisión entre los componentes de la suspensión con el chasis o la rueda. En las figuras 11 y 12 se puede visualizar el comportamiento de la suspensión.

TABLA V.
RANGO DE MOVIMIENTO DEL CONJUNTO SUSPENSIÓN - DIRECCIÓN

Parámetros de movimiento	Valor
Elevación máxima rueda delantera	80 mm
Descenso mínimo rueda delantera	10 mm
Elevación máxima rueda posterior	65 mm
Descenso mínimo rueda posterior	10 mm
Ángulo de giro de la dirección	320 °

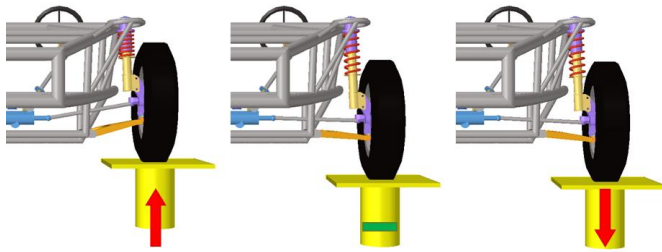


Fig 11. Comportamiento de la suspensión delantera

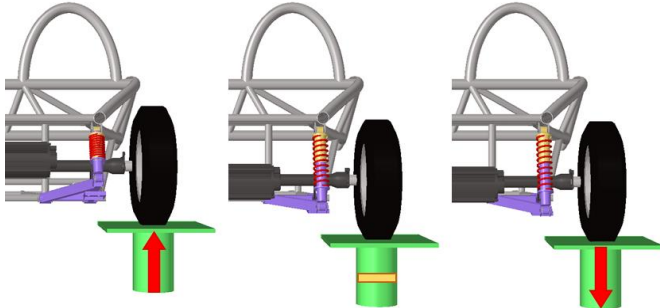


Fig 12. Comportamiento de la suspensión posterior

B. Ángulos de inclinación

1) *Análisis Camber*: El ángulo Camber, conocido también como ángulo de caída, es el que se forma entre el plano central de la rueda y el plano vertical de la calzada. Dicho esto, en la simulación realizada, para el estado inicial (desplazamiento 0 mm) se obtuvo un ángulo negativo de 0.02. Así mismo, durante el mayor desplazamiento de la rueda (80.0 mm) se genera un ángulo de 0.16 grados, y, por otra parte, en el menor movimiento (-10.0 mm) se origina un ángulo de 0.11 grados.

Dicho esto, al presentar un Camber cercano a ser negativo en el momento de comprimirse la suspensión, y un Camber positivo al contraerse, se garantiza la prevención desgastes excesivos en los neumáticos al reducir los esfuerzos ejercidos sobre el resto de componentes. En las ruedas posteriores el ángulo Caster tiene un valor de cero ya que el sistema funciona como un solo cuerpo.

2) *Análisis Caster*: El ángulo de avance, o Caster, formado entre el eje de pivote de la mangueta y el plano vertical del eje de la rueda, es el valor que se ve afectado por la fuerza de resistencia a la rodadura en vehículos de propulsión provocando un retraso en el arranque. Sabiendo esto, en cuanto a nuestro modelo tenemos que en un estado inicial (desplazamiento 0 mm) la rueda forma un ángulo de 2.54 grados, luego con el máximo desplazamiento (80 mm) se genera un valor de 2.93 grados y finalmente con un mínimo desplazamiento (-10 mm), el ángulo que se forma es de 2.5 grados.

Esto genera que se produzcan fuerzas en los elementos de la dirección, incrementando el esfuerzo de manejo, sin embargo, esto no resulta problemático ya que el modelo cuenta con dirección electro asistida. Por otro lado, para la suspensión posterior no se presentan valores debido a que el eje del amortiguador no coincide con el eje de la rueda.

3) *Análisis Toe*: El ángulo de convergencia o divergencia (toe) es el que señala la dirección a la cual apuntan las ruedas en correlación a la línea horizontal del vehículo observándose desde un plano superior. Ahora, al evaluar nuestro modelo en la parte delantera y tomando los valores de la tabla 6 tenemos que para el instante en que el desplazamiento es nulo (0 mm) se tiene un ángulo -0.02 (divergencia), Por otra parte, cuando el desplazamiento vertical es los más alto (80 mm) se forma un ángulo de 0.99 (convergencia), y para el desplazamiento mínimo (-10 mm) un ángulo de 0.1 grados (convergencia).

Esto no siempre fue así ya que previamente en la propuesta inicial se tenía otra ubicación del sistema de la dirección con lo cual generaba una curva (originaria) desfasada del funcionamiento normal. Para ello el proceso de optimización nos dio como resultado una curva (optimizada) que se aproxima en mejor medida a la recta de convergencia como se presenta en la figura 13.

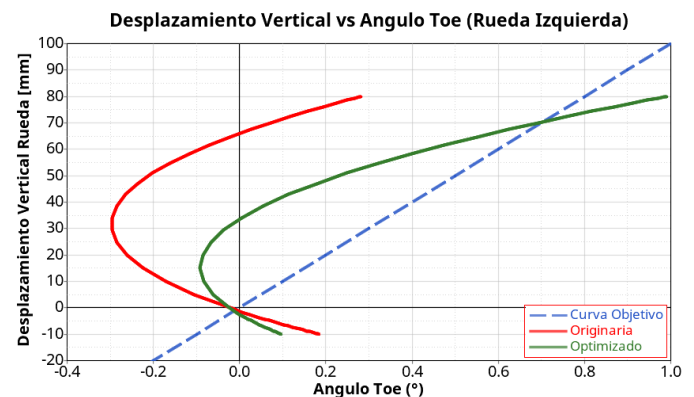


Fig 13. Comparativa de curvas en comportamiento cinemático

Por otra parte, el ángulo Toe en las ruedas posteriores tiene un valor de cero ya que en todo momento las ruedas funcionan de forma paralela, esto debido a la geometría del sistema. En la tabla 6 se presenta un resumen de los valores de los ángulos de inclinación.

TABLA VI.
VALORES DE ÁNGULOS DE ALINEACIÓN DE LAS RUEDAS DELANTERAS

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
2.5	80	0.99	0.16	2.93

3	76.08	0.87	0.09	2.91
3.5	64.72	0.55	-0.07	2.85
4	47.02	0.18	-0.21	2.76
4.5	24.72	-0.07	-0.21	2.65
5	0	-0.02	-0.02	2.54
5.5	-3.09	0.01	0.02	2.53
6	-5.88	0.04	0.06	2.52
6.5	-8.90	0.07	0.08	2.51
7	-9.51	0.09	0.1	2.5
7.5	-10	0.1	0.11	2.5

C. Esfuerzos en componentes de suspensión

1) *Análisis de esfuerzos en los componentes de la suspensión:* Durante el análisis en el programa Motion® View® se describieron los esfuerzos máximos y mínimos, obteniendo para el trapecio delantero un esfuerzo máximo de 241.36 MPa, en donde se aprecian cerca del alojamiento de la rótula, esto a causa de los esfuerzos provocados en el momento de arrancar al vencerse la inercia. Con esto, utilizando la relación de resistencia a la fluencia y esfuerzo máximo se obtiene un factor de seguridad (η) de 1.53. (figura 14.a y 14.b)

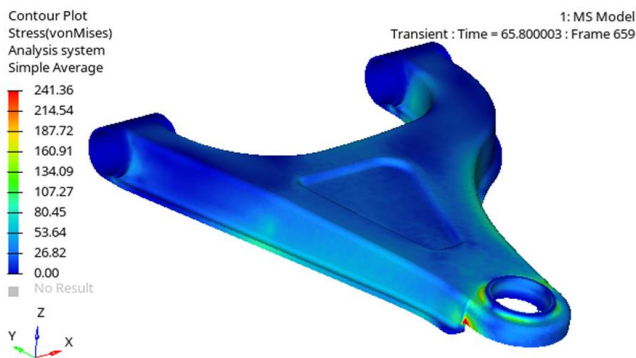


Fig 14.a. Esfuerzo trapecio delantero
 $S_y: 370 \text{ MPa}$
 Esfuerzo máximo: 241.36 MPa
 Factor de seguridad calculado: 1,53

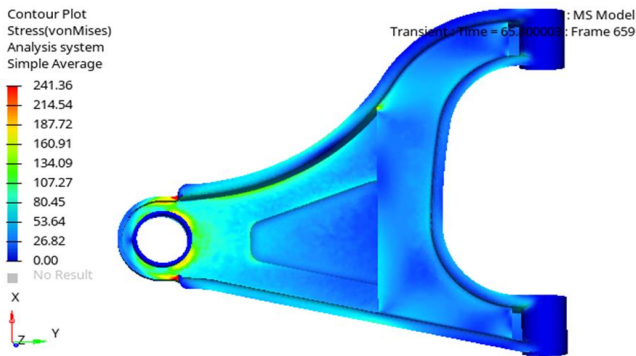


Fig 14.b. Esfuerzo trapecio delantero, vista inferior

Por otra parte, para el trapecio posterior se obtuvo un valor máximo de 207.62 MPa, produciéndose en los apoyos del tren motriz. Como resultado se logra un factor de seguridad (η) de 1.78. como se muestran en las figuras 15.a y 15.b.

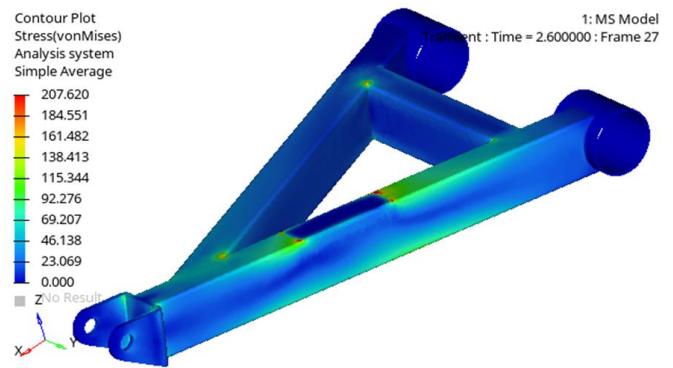


Fig 15.a. Esfuerzo trapecio posterior
 $S_y: 370 \text{ MPa}$
 Esfuerzo máximo: 207.62 MPa
 Factor de seguridad calculado: 1,78

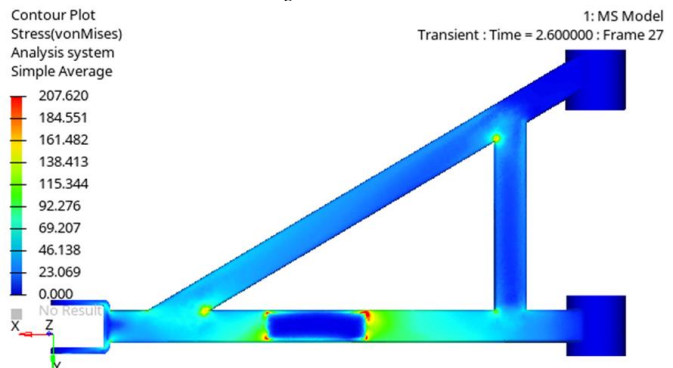


Fig 15.b Esfuerzo trapecio posterior, vista superior

2) *Análisis de esfuerzos en el chasis:* Los resultados obtenidos en los esfuerzos que se generan en el chasis debido al funcionamiento de la suspensión se presentan en las figuras de la 16.a hasta 16.e. En las gráficas se puede evidenciar que el esfuerzo máximo tiene un valor de 182.89 MPa lo que en relación con el límite de fluencia del material nos da un factor de seguridad de 1,12.

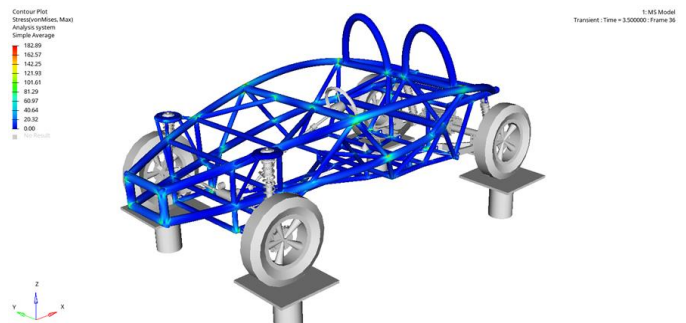


Fig 16.a. Esfuerzos en chasis
 $S_y: 250 \text{ MPa}$
 Esfuerzo máximo: 182.89 MPa
 Factor de seguridad calculado: 1,12

En la parte delantera del chasis, en los puntos de anclaje donde se conectan los trapecios delanteros, los esfuerzos rondan un valor de 160 MPa (figura 16.b). Igualmente, en las torretas, donde se apoyan los amortiguadores, se observa que los valores de esfuerzo son de 140 MPa (figura 16.c).

IV. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en las simulaciones cinemáticas validan que no existe interferencia o colisión entre elementos de la suspensión durante su funcionamiento con el modelo propuesto. Además, nos muestran los desplazamientos máximos a los cuales puede llegar este sistema en su parte frontal y posterior, siendo de 80 y 65 mm respectivamente. Esto debido al diseño de compresión máxima admisible por los amortiguadores.

El ángulo Camber obtenido en un estado inicial muestra un valor negativo, ideal para el modelo propuesto que integra un tren motriz posterior, además, en el máximo desplazamiento de la rueda el ángulo es positivo y cercano a cero, y negativo en el rango mínimo, de esta manera se evitan desgastes innecesarios en los neumáticos. En cuanto al ángulo Caster, presenta valores positivos los cuales ofrecen un mejor desempeño asegurando estabilidad lineal al vehículo.

El proceso de optimización hizo que el nodo de estudio se desplace +7 mm a lo largo del eje Z, con lo que se generaron valores positivos del ángulo Toe, permitiendo una convergencia de los neumáticos. Estos valores aseguran que al tener carga pesada o una compresión máxima del muelle delantero las ruedas no tengan divergencia y que durante la marcha del vehículo se mantenga el paralelismo de las mismas.

Respecto a los análisis de esfuerzo a los que están sometidos los elementos de suspensión, los factores de seguridad calculados bajo condiciones de funcionamiento exigentes, siendo el más crítico en el alojamiento de la rótula en el trapecio delantero, seguido de los apoyos del tren motriz en el trapecio posterior, son los adecuados, garantizando la seguridad al mismo tiempo que se mantiene una proporción entre la resistencia y el peso del material.

Para finalizar, se puede contemplar como el funcionamiento de la suspensión incide directamente en el chasis de un vehículo eléctrico, generando múltiples esfuerzos en varios puntos de su geometría como se presenta en la figura 16.a, de ahí la importancia de un buen diseño. Se define, así pues, que el mayor esfuerzo generado en el chasis es de 182.89 MPa, un valor que es producido en la situación de mayor exigencia de la suspensión. En cuanto a los puntos de anclaje, evidenciamos que todos ellos se encuentran bajo el límite de fluencia del material y que los más elevados se localizan en los apoyos de la suspensión delantera. Documentándose de esta forma que el chasis, con este modelo de suspensión garantiza seguridad y un correcto desempeño.

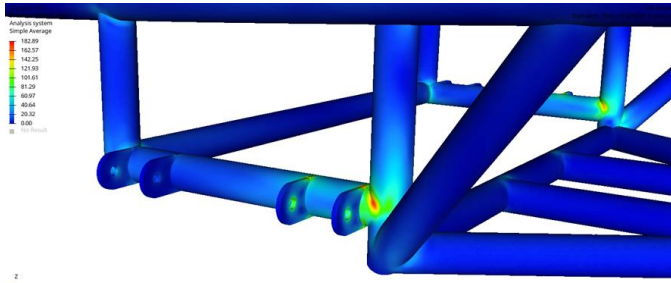


Fig 16.b. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en los puntos de apoyo del trapecio delantero

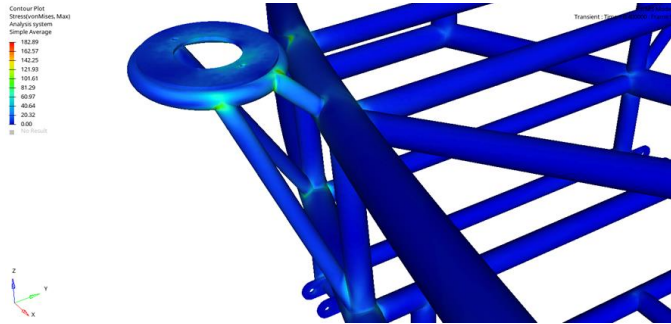


Fig 16.c. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en la torreta de apoyo de la suspensión delantera

En la parte posterior del chasis, en los puntos de anclaje donde se conectan los trapecios posteriores, los esfuerzos rondan en 150 MPa (figura 16.d). En la zona superior donde se conecta el amortiguador se aprecian valores de esfuerzo bajos, aproximadamente 40 MPa (figura 16.e).

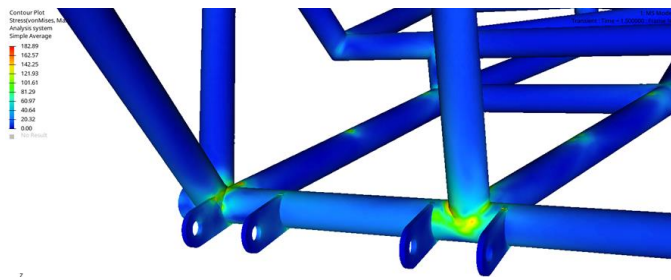


Fig 16.d. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en los puntos de apoyo del trapecio posterior

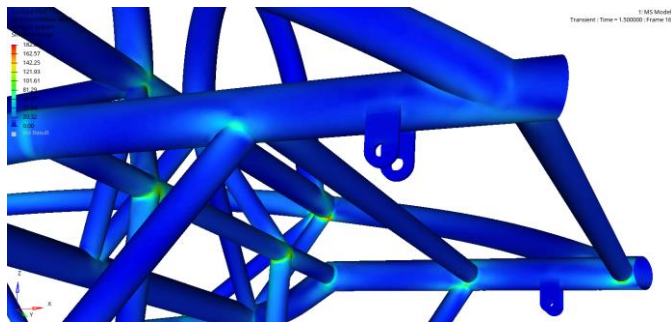


Fig 16.e. Esfuerzos en chasis, vista focalizada en los puntos de apoyo del amortiguador posterior

REFERENCIAS

- [1] Arzola de la Peña, N., y Castro Torres C. A. (2019). Análisis del comportamiento dinámico de una suspensión de vehículo independiente de doble horquilla. *Revista Logos Ciencia & Tecnología*, 11(2),10-33. <http://dx.doi.org/10.22335/rlct.v11i2.641>
- [2] Urgilés Verdugo, SI, y Álvarez Cárdenas, CL (2017). Estudio numérico y experimental de la influencia del tamaño de las ruedas sobre los elementos de la suspensión McPherson. Universidad del Azuay. <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6927>
- [3] Bustamante, B. V. (2020). Estudio del comportamiento de un corrector de camber y caster usando elementos finitos para su alineación en un vehículo con suspensión tipo MCPHERSON [Tesis de pregrado, Universidad Técnica del Norte]. <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/10222K>. Elissa, "Title of paper if known," unpublished.
- [4] 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. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/6192>
- [5] Cebolla Bono B. (2017). Modelado y caracterización de sistemas de suspensión en vehículos automóviles., Universitat Politècnica de Valencia. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/89391/cebolla%20-%20modelado%20y%20caracterización%20de%20sistemas%20de%20uspensión%20en%20vehículos%20automóviles.pdf?sequence=1>
- [6] 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. <https://doi.org/10.17163/ings.n20.2018.09>
- [7] Mejía O., y Reyes D. (2018). Diseño y selección del sistema de suspensión de un prototipo de auto eléctrico biplaza UTA-CIM17. Universidad Técnica de Ambato. <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/27928>
- [8] 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. <http://dspace.esPOCH.edu.ec/handle/123456789/9830>
- [9] Limiñana Ó. (2021). Estudio, optimización y rediseño de los elementos de suspensión de un vehículo clásico para mejorar su rendimiento y estabilidad. Universitat Politècnica de València. <http://hdl.handle.net/10251/169478>
- [10] Navarro L., García J. , y Rodríguez H. (2018). Consideraciones cinemáticas y dinámicas para el desarrollo de control a un sistema de suspensión. *Revista colombiana de tecnologías de avanzada*, 1(31). <https://doi.org/10.24054/16927257.v31.n31.2018.2761>
- [11] 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. <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/8979>
- [12] Vega W., Llanes-Cedeño E., Molina J. y Rocha-Hoyos, J. (2018). Revisión de las Características de Modelado y Optimización para el Diseño del Sistema de Suspensión Macpherson. *Información tecnológica*, 29(6), 221-234. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000600221>
- [13] Aguilar Aguilar, C. F., & Aguilar Masache, D. S. (2020). Elaboración de guías didácticas para el análisis de suspensiones empleadas en vehículos usando la herramienta universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca. *Adams/Car*. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18801>