

 <b>UIDE</b> <small>Powered by Arizona State University</small>	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	<b>INGENIERIA AUTOMOTRIZ</b>
	<b>TITULACIÓN</b>



## ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo integración Curricular previa a la obtención del título de Ingeniero en Automotriz.**

**AUTORES:**

Kevin Richard Estrella Vásquez  
Cristopher Alexander Guamán Mejía

**TUTOR:**

MSc. Gabriela Stefany Chávez Tapia

Tema

**Optimización topológica mediante el método de elementos finitos de una mesa de suspensión para un automóvil Chevrolet Aveo**

**Activo**

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	<b>INGENIERIA AUTOMOTRIZ</b>
	<b>TITULACIÓN</b>

### **CERTIFICACIÓN DE AUTORÍA**

Nosotros, **Kevin Richard Estrella Vásconez** y **Cristopher Alexander Guamán Mejía** declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

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



**Kevin Richard Estrella Vásconez**



**Cristopher Alexander Guamán Mejía**

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

### **APROBACIÓN DEL TUTOR**

Yo, **MSc. Gabriela Stefany Chávez Tapia** certifico que conozco a los autores del presente trabajo, siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.



**MSc. Gabriela Stefany Chávez Tapia**

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

### **Dedicatoria**

A mis padres por ser el apoyo incondicional en toda etapa de mi vida y carrera, quienes han sido ejemplo de dedicación y superación, enseñándome a soñar en grande y que todo lo que me proponga lo puedo lograr.

A mi familia por toda la ayuda brindada para superar cada uno de los obstáculos y acompañarme en cada parte del camino que hoy me trajo hasta aquí.

Kevin Richard Estrella Vásquez.

A mis padres que han sido quienes me impulsan a seguir adelante y esforzarme por cumplir mis metas, sueños y anhelos.

A mis abuelitos por ayudarme en el proceso, ser mi base y darme la fuerza necesaria para lograr mis metas y proyectos.

Cristopher Alexander Guamán Mejía.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

## **Agradecimiento**

A mis padres, por darme todo y más en la vida, por haberme educado para ser el hombre que soy, cada uno de mis metas se los debo a ustedes, siempre me han enseñado a trabajar duro para hacer realidad mis sueños y hoy después de muchos esfuerzos estoy cumpliendo uno de ellos.

A mi familia por siempre estar apoyándome y dándome ánimos en cada una de mis decisiones, gracias por confiar en mí y formar la persona que he logrado ser.

Kevin Richard Estrella Vásquez

Quiero agradecer a mis padres ya que confiaron en mí, me dieron la oportunidad de tener un futuro mejor, guiarme en cada una de las decisiones difíciles de la vida y decirme las palabras adecuadas en los momentos difíciles cuando pensaba en rendirme.

A mi familia por apoyarme y brindarme una ayuda en los momentos difíciles y por darme el apoyo necesario.

Cristopher Alexander Guamán Mejía.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

## **Optimización topológica mediante el método de elementos finitos de una mesa de suspensión para un automóvil Chevrolet Aveo activo**

### **Topological optimization using finite element method of a Suspension for Chevrolet Aveo active**

Kevin Richard Estrella Vásconez<sup>1</sup>, Cristopher Alexander Guamán Mejía<sup>2</sup>  
<sup>1, 2</sup> Universidad Internacional del Ecuador

keestrellava@uide.edu.ec: Kevin Richard Estrella Vásconez  
 crguamanme@uide.edu.ec: Cristopher Alexander Guamán Mejía

#### **Resumen**

En el presente artículo se da a conocer un estudio de optimización topológica aplicado a la mesa de suspensión de un automóvil Chevrolet Aveo activo aplicando el método de elementos finitos. Su objetivo principal, mantiene mejorar la eficiencia estructural de la mesa de suspensión, reduciendo su peso sin comprometer su rendimiento y resistencia.

Con el proceso de optimización topológica, basado en la aplicación de algoritmos computacionales que generan diseños optimizados mediante la distribución de material en una estructura tridimensional. El análisis se realiza aplicando el método de elementos finitos, que permite revisar el comportamiento de la mesa de suspensión bajo diferentes condiciones de carga y determinar las áreas que están sujetas a mayores niveles de tensión.

Se utilizan criterios de diseño y restricciones específicas para guiar el proceso de optimización. Estos incluyen la carga máxima que puede soportar la mesa de suspensión, los límites de desplazamiento y las restricciones geométricas necesarias para su integración en el automóvil. Además, se consideran aspectos de fabricación y costos para garantizar la viabilidad práctica de los diseños optimizados.

Los resultados obtenidos muestran que la optimización topológica puede conducir a mejoras significativas en la eficiencia estructural de la mesa de suspensión del Chevrolet Aveo activo. Los diseños optimizados logran reducciones sustanciales en el peso, manteniendo un rendimiento y resistencia adecuados. Esto no solo contribuye a la eficiencia del vehículo, sino que también puede tener beneficios en términos de economía de combustible y reducción de emisiones.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

**Palabras Clave:** optimización topológica, método de elementos finitos, mesa de suspensión, automóvil, Chevrolet Aveo activo, eficiencia estructural, peso reducido, rendimiento, resistencia, carga máxima, desplazamiento, restricciones geométricas, diseño optimizado, eficiencia del vehículo, componentes automotrices, suspensión automotriz.

### **Abstract**

This article presents a topological optimization study applied to the suspension of an active Chevrolet Aveo car using Finite Element Method. The main objective is to improve the structural efficiency of the suspension table, reducing its weight without compromising its performance and resistance.

Topological optimization process is based on the application of computational algorithms that generate optimized designs by distributing material in a three-dimensional structure. The analysis is carried out using finite element method, which allows simulate the suspension behavior under different load conditions in order to determine areas that are subject to higher stress levels.

Design criteria and specific constraints are used to guide the optimization process. These include the maximum load that the suspension can support, the limits of displacement and the geometric restrictions necessary for its integration into the car. In addition, manufacturing and cost aspects are considered to ensure the practical feasibility of optimized designs.

Results obtained show that topological optimization can lead to significant improvements in the structural efficiency of the suspension. Optimized designs achieve substantial reductions in weight while maintaining adequate performance and strength. This not only contributes to vehicle efficiency but can also have benefits in terms of fuel economy and reduced emissions.

**Keywords:** topological optimization, finite element method, FEM, suspension table, automobile, active Chevrolet Aveo, structural efficiency, reduced weight, performance, strength, maximum load, displacement, geometric constraints, optimized design, vehicle efficiency, automotive components, automotive suspension.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

## Introducción

En el presente, el campo de la industria automotriz está viviendo un crecimiento exponencial debido a los cambios en los últimos años que está relacionado con las nuevas tecnologías, la digitalización de las piezas, las leyes ambientales y los cambios políticos. Según Llopis Albert et al. (2023) nos explica que los nuevos vehículos deben tener máximas prestaciones, el confort, debe ser amigable con el entorno, calidad, seguridad y teniendo una reducción de peso, costo y tiempo de producción.

El objetivo de la investigación es utilizar la optimización topológica mediante el método de elementos finitos para diseñar una mesa de suspensión para un automóvil Chevrolet Aveo activo, que mejore su rendimiento y eficiencia, brindando una conducción confortable y aislar el chasis de los impactos generados por las malas condiciones de la carretera. Por ejemplo, Burdzik et al. (2022) concuerda que el sistema de suspensión tiene que realizar varios objetivos en función de la comodidad de conducción. Mientras que Thoresson et al. (2009) nos dice que el sistema de suspensión debe ser capaz de aislar la carrocería de las perturbaciones que existen en el camino.

Se han realizado varios análisis topológicos en varias investigaciones en las cuales usan varias metodologías para piezas automotrices, carrocerías o estructuras que pueden ser usadas en varias áreas tanto automotriz e industrial. Por ejemplo, Nguyen et al. (2023) nos explica sobre la optimización topológica del tablero de un automóvil donde el autor considera los objetivos estructurales como las limitaciones de fabricación. Mientras que Gadiri et al. (2023) se basa en buscar una mejor forma estructural para evitar los daños en las partes laterales del vehículo para garantizar una mejor resistencia y reducir los daños de los ocupantes.

La razón principal de este estudio es la reducción de peso y mantener las condiciones de seguridad y resistencia de las partes que componen a un automóvil en especial la parte de la mesa suspensión ya que se encarga de absorber los impactos y brindar comodidad al momento de conducir, por ejemplo, Llopis et al. (2023) nos dice que una buena optimización va más allá que presentar un diseño de suspensión eficiente tomando en cuenta las variables de conducción en diferentes sectores y considerando el comportamiento dinámico y cinemático.

Por lo expuesto en este estudio se tiene como objetivo resolver el peso del vehículo buscando la mejora en el rendimiento general del vehículo, reducción de la carga en la suspensión, consideraciones de seguridad y costos de fabricación. Según Mitra et al. (2016) la optimización está sujeta a muchas variables de diseño, las tensiones y los desplazamientos. De igual manera Mitra et al (2016) nos menciona que se debe ser lo más exacto posible con las cargas a las que está sujeta la pieza para poder obtener un resultado acertado ya que si no son lo suficientemente exactos pueden causar problemas en el proceso de optimización.

Por ejemplo, Naude et al. (2003) nos menciona que la industria de las piezas de automóviles tiene mucha importancia en la estrategia de los negocios para poder mejorar la competitividad, ya que la materia prima tiene alto costo, un ciclo largo de trabajo. Mientras que Ghoniem et al. (2020) nos menciona que el uso de elementos finitos nos permite

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

localizar los lugares que sufren más esfuerzo o son más concurrentes a daños por golpes o al momento de su fabricación se crean grietas durante el enfriamiento del hierro fundido.

Mediante el uso de los programas de simulación podemos realizar un modelo CAD de la pieza y realizar la mayor cantidad de pruebas posibles en programas como inventor que nos permite aplicar fuerzas y cargas en las magnitudes de peso de un vehículo tomando en cuenta el peso de nuestro automóvil. Se tiene pensado realizar las simulaciones en los programas mencionados anteriormente y conocer la resistencia y durabilidad del material para obtener una simulación más acertada de esta manera poder contar con todos los datos de manera más exacta para saber si la pieza modificada tiene mejor o igual resistencia que la pieza original.

### **Marco teórico**

La Optimización topológica (OT) en ingeniería y como se define: “Una técnica cubierta en el en área del análisis estructural, basado en el análisis de una estructura o material, cuyo objetivo principal es reducir el volumen de los componentes, conservando sus funciones correspondientes de las partes mecánicas” (Román, 2018).

La definición de OT y sus aplicaciones se consideran infinitos. Importancia en el campo automotriz, de igual manera los elementos que la componen, a su vez, con las prestaciones de este proceso, es posible reducir el valor de la estructura, elementos lo que conduce a una reducción para disipar la materia prima y su mejora en la agilidad del componente afectado y mayor eficiencia de su sistema. Esto representa una acción de aplicación positiva. La optimización de la estructura implica reducir el volumen del componente estudiado. Reducen o pierden sus propiedades de resistencia estructural. (Á Remache, 2019).

### **Tipos de optimización**

- Optimización de tamaño

Por medio de la optimización estructural o de tamaño en el campo establecido, pretende determinar ciertas dimensiones optimas de cada elemento establecido que forman un mecanismo estructural. (Bendsoe, M. P., & Sigmund, O, 2003).

- Optimización de forma

También conocida como optimización de ingeniería, se enfoca en el exterior de la estructura, donde la red debe encontrar la manera de adaptarse a la nueva geometría. Su finalidad es cambiar ciertos parámetros del modelo diseñado para mejorar su comportamiento mecánico, como por ejemplo reducir las altas concentraciones de tensiones que suelen darse en las esquinas de las piezas o en aquellas donde hay un cambio brusco en la forma de la sección. (Bendsoe, M. P., & Sigmund, O, 2003).

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

- Optimización topológica

La optimización de la estructura se utiliza a menudo para obtener un diseño inicial aceptable del casco, que luego se refina con Shape Optimizer. El proceso de optimización de la estructura continúa paso a paso con la eliminación gradual de pequeñas porciones del material sometido a bajos niveles de tensión. Su uso habitual es que permite obtener la configuración deseada a partir de una configuración inicial que dista mucho de ser la óptima. (Bendsoe, M. P., & Sigmund, O, 2003).

La optimización topológica es más útil y práctica que el método de optimización de forma porque este último método solo permite cambiar los límites del dominio, lo que limita severamente las áreas de aplicación; Mientras que los métodos topológicos pueden controlar el campo de la estructura a través de agujeros o cavidades, y modificar su densidad, para reducir el peso y, por lo tanto, el costo. (CATEC, 2019).

### **Topología de Optimización de Elementos Estructurales**

En el diseño de un elemento donde se considera principalmente la optimización estructural continua a través de un continuo, lo que se intenta no es más que la distribución óptima de la estructura, donde mediante la personalización del dominio y con la ayuda de la aplicación de elementos finitos se obtiene que cada elemento bajo el estudio que está representado por divisiones de materiales con la correcta aplicación de la optimización de la estructura topológica. En el marco del estudio de estructuras discretas con su optimización topológica, se puede especificar que este es un método basado en dominio que se divide en dos categorías:

- Topología de estructura discreta optimizada.
- Optimización de la topología de la red continua.

En el caso de la optimización estructural de una estructura discreta, se suele considerar un área en la que se introducen varios puntos de dispersión y la resultante, a su vez, se obtienen de forma óptima por métodos de solución matemática. Por otro lado, para mejorar la topología de la red de continuidad, el campo continuo de una estructura arbitraria se tiene en cuenta en un rango muy amplio y hay una coincidencia. (Sigmund, O, 2013).

### **Brazo Oblicuo de Suspensión**

El propósito de la mesa de suspensión es determinar la posición de la rueda en relación con la carrocería del automóvil y, al mismo tiempo, transmitir parte de la fuerza que deben intercambiar la rueda y la carrocería. (Gillespie, T. D, 1992).

### **Sistema de suspensión**

Los sistemas de suspensión se refieren a mecanismos diseñados para absorber el impacto

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

del movimiento al operar ciertas máquinas.

Para cualquier tipo de vehículo (coche, bicicleta, moto, etc.), la suspensión tiene como objetivo reducir el impacto de los desniveles del terreno y garantizar una mayor estabilidad. En los coches autónomos, la suspensión consiste en un sistema de muelles que conectan las ruedas al chasis y, a través de amortiguadores, complementan el mecanismo que normaliza el movimiento. (Gillespie, T. D, 1992).

### **Partes del sistema de suspensión**

- Amortiguadores: Proporciona estabilidad al vehículo gracias al agarre de los neumáticos al suelo.
- Muelles: Platos de acero para muelles, unidos por abrazaderas que permiten el deslizamiento entre platos porque se deforman por el peso que soportan.
- Barras estabilizadoras: Cuando el coche entra en una curva, esto evita que la carrocería se doble en esa dirección y corre el riesgo de volcar.
- Barra de torsión: un resorte basado en una barra de acero flexible sujeta en un extremo y en el otro aplicando un par.
- Plataforma: Es una pieza de acero flexible compuesta por alambre de diámetro variable (de 10 a 15 mm).
- Suspensión de horquilla: un tipo de suspensión de acero o aluminio que combina la rueda delantera con un conjunto de un solo punto central y un marco de dos puntos. Evite que la rueda gire hacia los lados y mantenga la llanta recta.
- Muelles helicoidales: Estos componentes de suspensión se utilizan para lograr la flexibilidad posterior al muelle sin ocupar espacio ni aumentar el peso.
- Rótula: La parte que permite que el sistema de suspensión se mueva sobre sus tres ejes importantes para la seguridad. (Gillespie, T. D, 1992).

### **Metodología**

La optimización de estructuras con su abreviatura OT se utiliza para diseñar elementos estructurales para la reducción de peso como un método numérico que permite la síntesis de texturas con valores óptimos para uno o más parámetros físicos. El objetivo de reducir el peso de la mesa de suspensión activa del Chevrolet Aveo en comparación con el componente original es mejorar su desempeño creando una propuesta de retrofit que en algún momento actúe como un banco de datos. La fase de diseño y aplicación puede comenzar con la prueba física del componente, mejorando así el proceso de fabricación del material utilizado.

De igual forma, utilizando el Software Ansys, el proceso puede ser aplicado a otras piezas fabricadas en la industria automotriz. Para el presente proyecto de investigación demostramos que es un proyecto experimental en el cual se investiga todo el tema de manera controlada y por medio del cual se obtienen valores y resultados significativos, luego de realizar el análisis correspondiente. En este proyecto se realiza un análisis directo de la suspensión del Chevrolet Aveo. De acuerdo con la especificación de la mesa de suspensión, estos valores son la base de los cálculos en nuestros estudios establecidos para que puedan compararse con los resultados proporcionados por el programa para rediseñar el modelo.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

Para llevar a cabo la optimización topológica se considera tomar los siguientes puntos:

1. **Diseño inicial:** Se crea un modelo geométrico inicial de la mesa de suspensión en un software de escaneo en 3D para obtener la pieza en escala real. Este modelo incluye las dimensiones y la forma general de la mesa de suspensión.

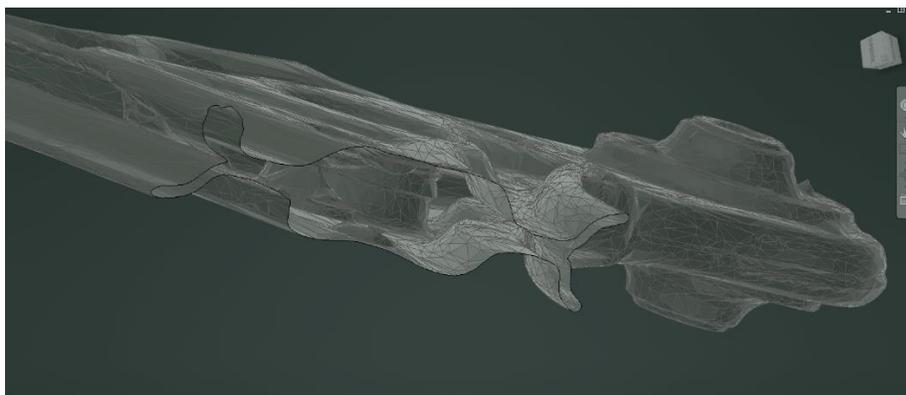
**Figura 1.**

Mesa de suspensión Chevrolet Aveo activo escaneado en 3D.



**Figura 2.**

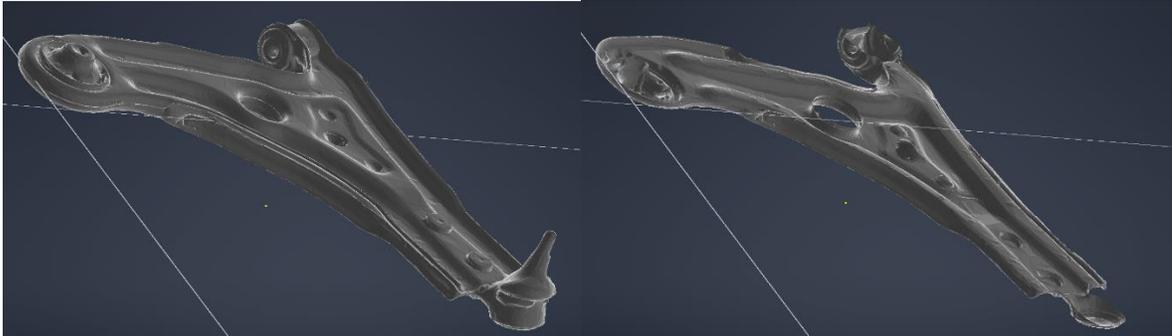
Mesa de suspensión Chevrolet Aveo activo escaneado en 3D vista parte interna.



**Figura 3.**

Mesa de suspensión Chevrolet Aveo activo escaneado en 3D vista parte interna.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN



2. **Generación de malla:** Se genera una malla de elementos finitos en el modelo de CAD. La malla divide la geometría en pequeños elementos para facilitar los cálculos numéricos. La calidad y densidad de la malla pueden influir en los resultados de la optimización. A su vez se redujo material como los bujes, para obtener una mejor creación de malla sobre la pieza.

Para lograr la corrección de la malla, fue necesario llevar a cabo un proceso de limpieza exhaustivo en la pieza. Debido a que se trataba de un escaneo 3D, se generaron múltiples micro caras, las cuales incrementaron considerablemente el número de nodos y elementos en la malla. Además, estas micro caras crearon un vacío en el interior de la pieza, lo cual obstaculiza la creación de la malla.

Para abordar este problema, se implementaron diversas técnicas de procesamiento de datos. En primer lugar, se llevó a cabo múltiples limpiezas en la pieza escaneada con el fin de eliminar las micro caras existentes. Este proceso implicó la eliminación de las caras innecesarias y la corrección de las imperfecciones presentes en la superficie de la pieza.

Además de la limpieza, se realizó una reconstrucción en determinadas áreas con el objetivo de eliminar casi en su totalidad las micro caras. Este proceso implicó la regeneración de las superficies afectadas para obtener una representación más precisa y continua de la pieza.

### Tabla 1

*Información del material, Acero inoxidable.*

---

#### Estructural

---

Elasticidad isotrópica

- Derivar de

El módulo de Young y la relación de Poisson

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

• Módulo de Young	1.93e+05 MPa
• Radio de Poisson	0,31000
• Módulo de Bulk	1.693e+05 MPa
• Módulo de corte	73554 MPa
Coeficiente Secante Isotrópico de Expansión Térmica	1.7e-05 1/°C
Resistencia de compresión máxima	0 MPa
Resistencia a la fluencia compresiva	207.00 MPa
Resistencia máxima a la tracción	586.00 MPa
Resistencia al rendimiento de tracción	207.00 MPa

**Tabla 2**

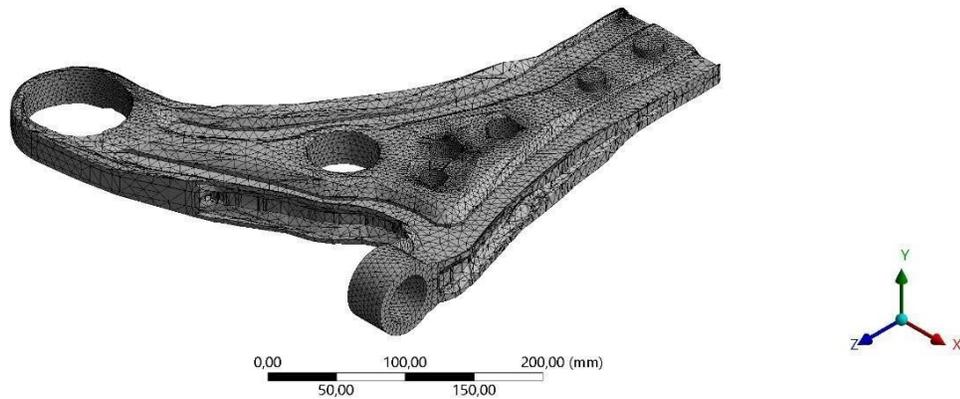
*Calidad Skewness del mallado.*

<b>Calidad</b>	
Suavizado	Medio
Métrica de malla	Skewness
Mínimo	9.0207e-006
Máximo	0.9999
Promedio	0.23385
Desviación estándar	0.1493

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	<b>INGENIERIA AUTOMOTRIZ</b>
<b>TITULACIÓN</b>	

**Figura 4.**

Malla – Vista Isométrica.



- Definición de restricciones y cargas:** Se definen las restricciones y cargas que actúan sobre la mesa de suspensión. Esto puede incluir restricciones de desplazamiento en ciertos puntos, fuerzas aplicadas en ciertas ubicaciones, entre otros.

**Figura 5.**

Fórmula de velocidad en curva.

$$V \text{ curva} = \sqrt{cf * R * g}$$

$$V \text{ curva} = \sqrt{0.7 * 30 * 9.8}$$

$$V \text{ curva} = 14.34/2 = 7.17$$

- cf = coeficiente del asfalto.
- R = radio.
- g = gravedad.

**Figura 6.**

Fórmula de aceleración centrípeta.

	Universidad Internacional del Ecuador
	DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

$$a_c = \frac{v^2}{R}$$

$$a_c = \frac{7.17^2}{30} = 1.71$$

- v = velocidad.
- R = radio.

#### Figura 7.

Fórmula.

$$G = \frac{a_c}{g}$$

$$G = \frac{1.71}{9.8}$$

$$G = 0.17$$

- $a_c$  = aceleración centrípeta.
- g = gravedad.

#### Figura 8.

Fórmula.

$$T_p = \frac{G \cdot P \cdot C_{gh}}{V}$$

- P = peso.
- $C_{gh}$  = altura de centro de gravedad.
- V = ancho de vía.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

### Figura 9.

Peso del vehículo con una persona y diferencia de carga entre eje delantero.

Peso con una persona

715 kg

53% de 715 = 378 .95 kg (lado derecho)

47 % de 715 = 336,05 kg (lado izquierdo)

$$T_p = \frac{G+P \cdot Cgh}{V}$$

$$T_p = \frac{0.17 \cdot 715 + 0.98}{1.53} = 77.85 \text{ kg}$$

$$378.95 + 77.85 = 456.8 \text{ kg}$$

### Figura 10.

Peso del vehículo con dos personas y diferencia de carga entre eje delantero.

Peso con dos personas

755 kg

53% de 755 = 400.15 kg (lado derecho)

47 % de 755 = 354.85 kg (lado izquierdo)

$$T_p = \frac{G+P \cdot Cgh}{V}$$

$$T_p = \frac{0.17 \cdot 755 + 0.98}{1.53} = 82.21 \text{ kg}$$

$$400,15 + 82,21 = 482.36 \text{ kg}$$

### Figura 11.

Peso del vehículo con tres personas y diferencia de carga entre eje delantero.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

Peso con tres personas

771 kg

53% de 771 = 408.63 kg (lado derecho)

47 % de 771 = 362.37 kg (lado izquierdo)

$$T_p = \frac{G+P \cdot C_{gh}}{V}$$

$$T_p = \frac{0.17 \cdot 771 + 0.98}{1.53} = 83.95 \text{ kg}$$

$$408.63 + 83.95 = 492.58 \text{ kg}$$

**Figura 12.**

Peso del vehículo con cuatro personas y diferencia de carga entre eje delantero.

Peso con 4 persona

780 kg

53% de 780 = 413.4 kg (lado derecho)

47 % de 780 = 366,6 kg (lado izquierdo)

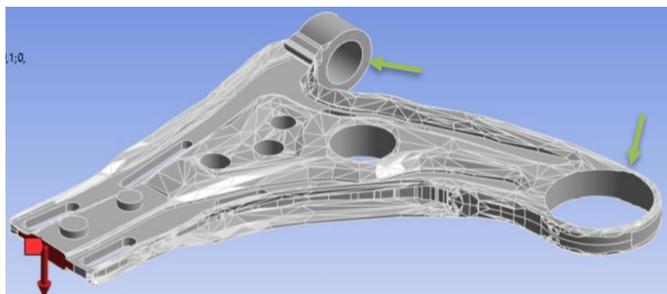
$$T_p = \frac{G+P \cdot C_{gh}}{V}$$

$$T_p = \frac{0.17 \cdot 780 + 0.98}{1.53} = 84.93 \text{ kg}$$

$$413.4 + 84.93 = 498.33 \text{ kg}$$

**Figura 13.**

Soportes y carga.



	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

En el modelo de CAD se utilizó dos restricciones fijas y una de movimiento, se aplicó una carga diferente para cada situación establecida y así obtener varios resultados. Es importante tener en cuenta que en la parte delantera del vehículo se concentra más peso debido al motor y al peso del conductor. Por lo tanto, fue necesario consultar en el manual del vehículo para obtener los valores específicos correspondientes a estas condiciones.

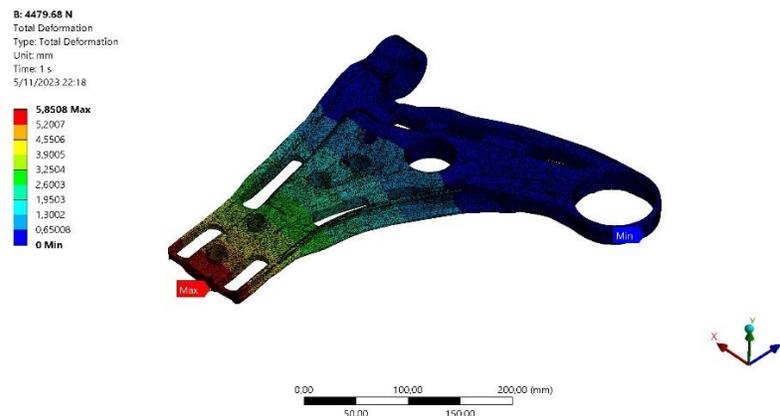
Teniendo en cuenta estos factores, se realizó un cálculo preciso para determinar la capacidad de carga que cada eje debe soportar. Esta información es fundamental para garantizar un funcionamiento seguro y óptimo del vehículo, evitando sobrecargar los ejes y comprometer la estabilidad y la capacidad de maniobra.

Al consultar en el manual del vehículo, se accede a datos técnicos y especificaciones que permiten determinar los límites de carga para cada eje en función de las características del vehículo, como su diseño estructural, sistema de suspensión y distribución de peso. Estos valores son fundamentales para garantizar que el vehículo opere dentro de los límites establecidos por el fabricante y cumpla con las normativas y regulaciones correspondientes.

- Análisis por elementos finitos:** Se realiza un análisis por elementos finitos utilizando un software de simulación. Este análisis calcula el comportamiento estructural de la mesa de suspensión bajo las restricciones y cargas definidas. Proporciona información sobre las deformaciones, esfuerzos y rigidez de la estructura.

**Figura 14.**

Deformación Vista Isométrica con carga de 456,8 kg.

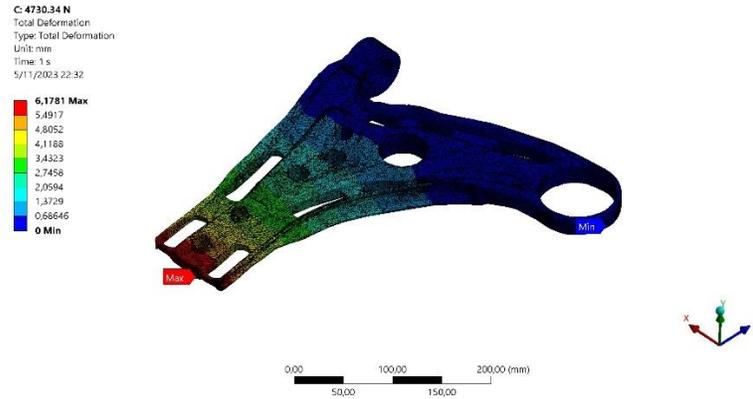


Como se puede observar en la figura 14 la parte roja es donde se aplica la mayor parte de la carga ya que es donde está conectado la mesa de suspensión con la rueda del automóvil.

**Figura 15.**

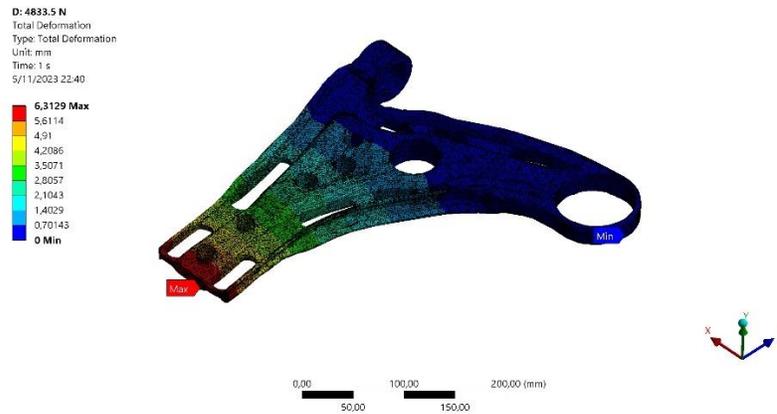
	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	<b>INGENIERIA AUTOMOTRIZ</b>
	<b>TITULACIÓN</b>

Deformación Vista Isométrica con carga de 482,36 kg.



**Figura 16.**

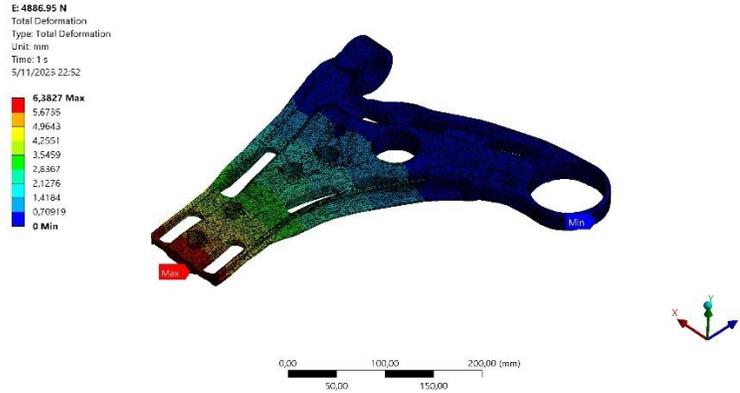
Deformación Vista Isométrica con carga de 492,58 kg.



**Figura 17.**

Deformación Vista Isométrica con carga de 498,33 kg.

 <p>UIDE Powered by Arizona State University</p>	<p align="center"><b>Universidad Internacional del Ecuador</b></p>
	<p align="center"><b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b></p>
	<p align="center">INGENIERIA AUTOMOTRIZ</p>
<p align="center">TITULACIÓN</p>	



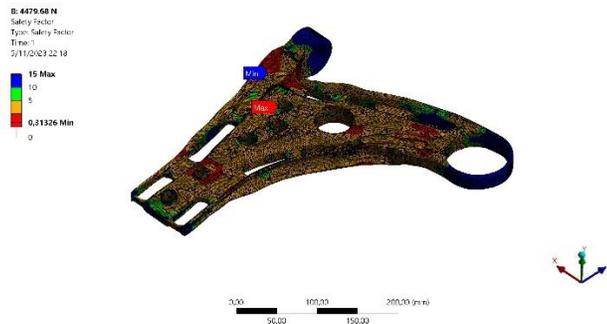
Como se observa en las imagines, la deformación total de la pieza que obtenemos al aplicar las diferentes cargas nos da una deformación de 5 a 6 mm aproximadamente.

- Optimización topológica:** Se aplica un algoritmo de optimización para determinar la configuración geométrica óptima de la mesa de suspensión. Este algoritmo puede basarse en métodos de optimización como la optimización basada en gradiente, la optimización evolutiva o el método de homogeneización. El objetivo es minimizar la masa de la estructura mientras se cumplen los requisitos de rigidez y resistencia.

## Resultados y discusión

**Figura 18.**

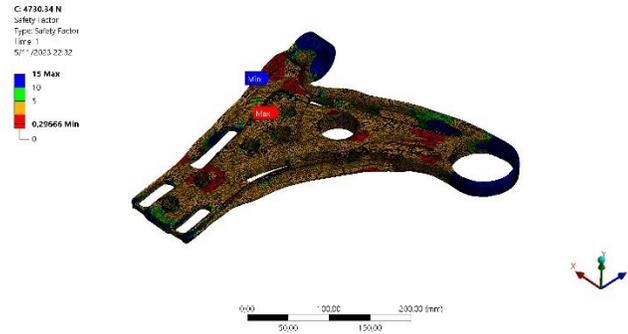
Análisis estructural – Factor de seguridad. (456,8 kg)



**Figura 19.**

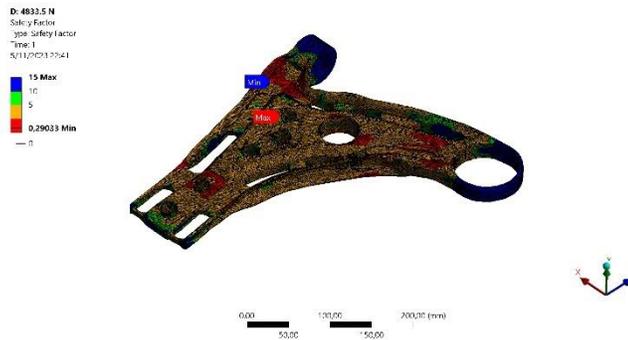
Análisis estructural - Factor de seguridad. (482,36 kg)

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	<b>INGENIERIA AUTOMOTRIZ</b>
	<b>TITULACIÓN</b>



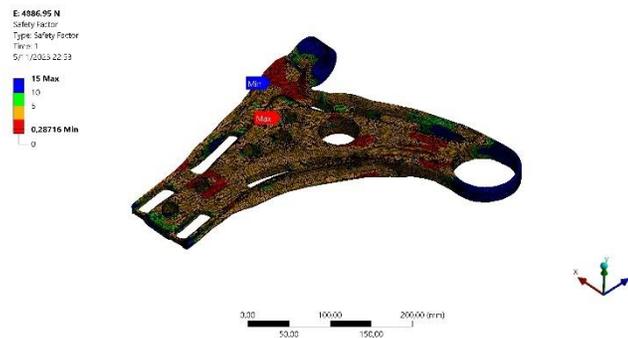
**Figura 20.**

Análisis estructural - Factor de seguridad. (492,58 kg)



**Figura 21.**

Análisis estructural - Factor de seguridad. (498,33 kg)



El factor de seguridad mínimo que tiene que obtener cada pieza debe ser mayor que uno (1), ya que, si es menor, la pieza tiende a deformarse y pierde la resistencia en los puntos críticos que se representa de color rojo. Se sugiere que las partes analizadas de color naranja tienen un margen suficiente de resistencia en relación con las cargas aplicadas, sin embargo, es importante evaluar el contexto específico y los estándares aplicables para determinar si este valor cumple con los criterios de diseño y las normas de seguridad

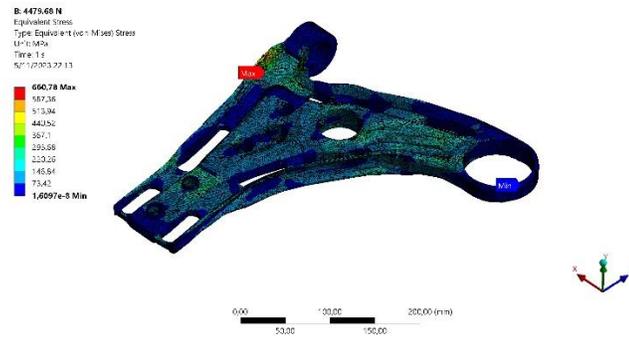
 <p><b>UIDE</b> Powered by Arizona State University</p>	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

requeridas.

6. **Evaluación de resultados:** Se evalúan los resultados de la optimización. Esto implica revisar las configuraciones geométricas resultantes, analizar los esfuerzos y deformaciones en la estructura optimizada y comparar los resultados con los criterios de rendimiento establecidos previamente.

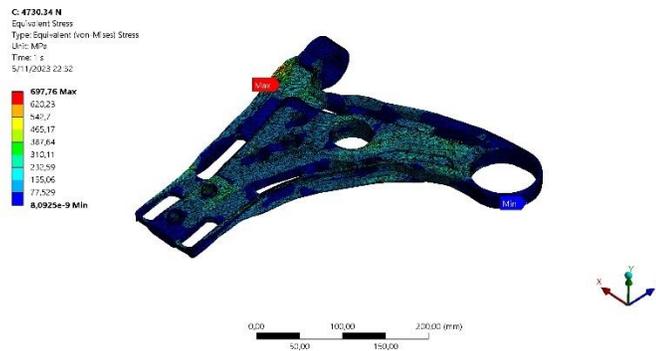
**Figura 22.**

Análisis estructural - Esfuerzo máximo von Mises. (456,8 kg)



**Figura 23.**

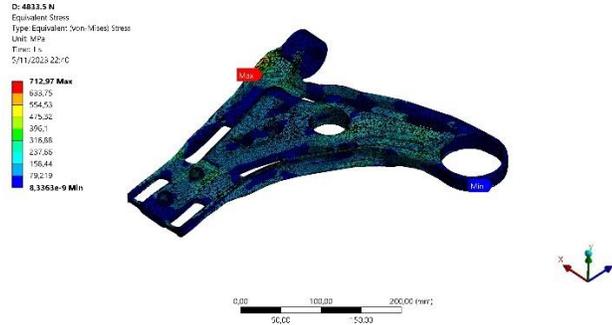
Análisis estructural - Esfuerzo máximo von Mises. (482,36 kg)



**Figura 24.**

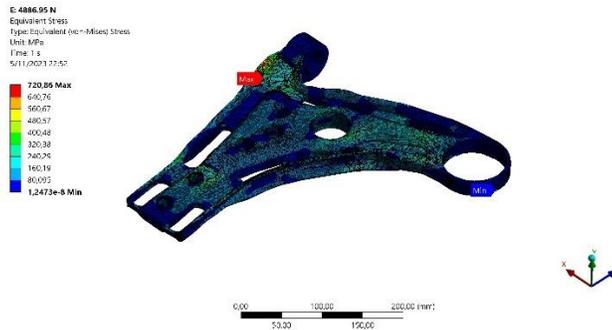
Análisis estructural - Esfuerzo máximo von Mises. (492,88 kg)

 <p><b>UIDE</b> Powered by Arizona State University</p>	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	<b>INGENIERIA AUTOMOTRIZ</b>
	<b>TITULACIÓN</b>



**Figura 25.**

Análisis estructural - Esfuerzo máximo von Mises. (498,33 kg)



El valor de esfuerzo máximo de von Mises de las diferentes cargas aplicadas tienen un aproximado de 600 a 720 MPa lo que nos indica la magnitud del esfuerzo equivalente en la pieza. Este dato debe ser comparado con los límites de resistencia y los criterios de diseño aplicables para determinar si el material y la estructura de la pieza son adecuados para soportar las cargas a las que está sometida.

**Tabla 3**

*Propiedades de masa de pieza final.*

<b>Propiedades</b>	<b>Material: acero inoxidable</b>
Densidad	0.001 g*mm <sup>3</sup>
Masa	6654.35 g
Volumen	853,121.60 mm <sup>3</sup>
Área de superficie	181,803.49 mm <sup>2</sup>

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

	X = 43.50
Centro de masa (mm)	Y = -124.36
	Z = 202.70
	Ix = (-0.56, 0.00, 0.83)
	Iy = (0.83, 0.00, 0.56)
Ejes principales de inercia y momentos principales de inercia: (g*mm)	Iz = (0.00, 1.00, 0.00)
Medidos desde el centro de masa	Px = 24,873,256.60
	Py = 80,548,994.26
	Pz = 104,679,179.14

**Tabla 4**

*Propiedades de masa de pieza optimizada.*

<b>Propiedades</b>	<b>Material: acero inoxidable</b>
Densidad	0.01 g*mm <sup>3</sup>
Masa	5921.41 g
Volumen	759,154.99 mm <sup>3</sup>
Área de superficie	174,839.82 mm <sup>2</sup>
Centro de masa (mm)	X = 45.73
	Y = -124.36
	Z = 208.80

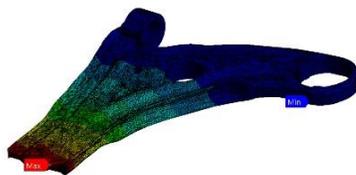
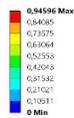
**Figura 26.**

Comparación de pieza original y pieza optimizada.

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	<b>INGENIERIA AUTOMOTRIZ</b>
	<b>TITULACIÓN</b>

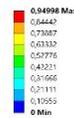
F: REFINAMIENTO MANUAL - 766.1 N

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1 s  
29/10/2023 21:19



R: Static Structural

Total Deformation  
Type: Total Deformation  
Unit: mm  
Time: 1 s  
29/10/2023 18:12



Es interesante observar los cambios realizados después del proceso de optimización topológica. Como se puede apreciar, se realizaron varias perforaciones estratégicas en las zonas donde el factor de seguridad lo permitió, sin embargo, al aplicar las diferentes cargas, la pieza tiende a deformarse por tener un factor de seguridad menor de lo establecido y esta llega a su punto crítico o zona plástica lo que se deforma.

Es importante destacar que durante el proceso de optimización topológica se deben tener en cuenta varios aspectos, como el factor de seguridad, la estabilidad, el rendimiento y las limitaciones de fabricación. El objetivo es lograr una geometría óptima que cumpla con los requisitos de resistencia y funcionalidad del componente.

Al realizar las perforaciones en las áreas adecuadas, al inicio se logra un equilibrio entre la reducción de peso y la integridad estructural de la pieza. Esto permite mantener las garantías de seguridad y asegurar que la pieza siga siendo capaz de soportar las cargas y condiciones de operación previstas. Al aplicar las cargas vemos que tiende a darse varias variaciones lo que nos impide obtener datos importantes al ver que no se puede reducir mucho material por todo el peso que tiene que soportar la mesa de suspensión.

## Conclusiones

Lamentablemente, no se logró el objetivo de realizar una optimización topológica mediante el método de elementos finitos de la mesa de suspensión para el automóvil Chevrolet Aveo Activo con la reducción de material y peso requerida, manteniendo al mismo tiempo el estándar de calidad deseado. A pesar de nuestros esfuerzos, los resultados no fueron satisfactorios y no pudimos alcanzar los niveles de optimización deseados. Este proceso ha demostrado ser más desafiante de lo previsto, y es necesario revisar y ajustar nuestra estrategia para futuros intentos de optimización.

La pérdida de volumen en la optimización topológica puede tener impactos significativos más allá de los ahorros en costos de materiales y fabricación. Esto incluye la reducción de peso, ya que implica un menor desgaste en el sistema de suspensión, mejora de la relación resistencia-peso, ahorros en los procesos de fabricación y la posibilidad de diseños más innovadores. Todos estos factores pueden contribuir a un producto final más eficiente, económico y con mejor rendimiento.

Esta investigación demuestra la optimización que puede tener una pieza de suma

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

importancia en el automóvil que nos sirve para mantener el confort y comodidad en diferentes condiciones que se someta. Se realizaron diferentes pruebas de simulación gracias al escaneado 3D y uso del Diseño Asistido por Computadora (CAD), donde la pieza original tiene una masa de 6654.35 g y la pieza optimizada tiene una masa de 5921.41 g, el volumen de la pieza original es el siguiente 759,154.99 mm cúbicos y la pieza optimizada tiene un volumen de 853,121.60 mm cúbicos lo que sugiere una mejora en la eficiencia del diseño en términos de consumo de material.

La justificación científica de este trabajo es la necesidad de optimizar la estructura de la mesa de suspensión para reducir el peso sin comprometer la seguridad y durabilidad del componente. Esta optimización se basa en los principios del análisis estructural y los métodos de optimización topológica. Se demuestra que, aplicando técnicas de optimización topológica y análisis de elementos finitos, es posible obtener una configuración geométrica óptima para la mesa de suspensión reduciendo su masa.

El impacto de esta investigación se basa en el conocimiento obtenido de la aplicación de la optimización topológica en el diseño de componentes automotrices. Es crucial cumplir con el factor de seguridad máximo establecido de 15 para garantizar la estabilidad y seguridad de la pieza. Superar este valor puede resultar en deformaciones y pérdida de integridad estructural, lo que hace que la pieza sea insegura. Por lo tanto, es esencial tener en cuenta este límite al evaluar y diseñar la pieza para asegurar su adecuada resistencia y cumplimiento de los estándares de seguridad.

Con los objetivos planteados, se logró reducir el 11,1% de la masa de la mesa de suspensión. Lamentablemente, no logramos alcanzar el objetivo deseado de obtener la configuración geométrica óptima para la mesa de suspensión mediante la perforación estratégica de áreas de la pieza original. A pesar de los esfuerzos realizados en esta investigación, los resultados no fueron los esperados. Esta experiencia nos lleva a cuestionar la efectividad de la optimización topológica en el diseño de componentes automotrices en este contexto específico, ya que no logramos la reducción de peso sin comprometer el desempeño estructural de la mesa de suspensión.

Si bien habíamos anticipado que esta investigación tendría aplicaciones significativas en la industria automotriz, en la práctica, no pudimos demostrar su utilidad en la reducción de peso de los componentes, lo que podría mejorar la eficiencia de los vehículos en términos de consumo de combustible y emisiones. Nuestra investigación no proporciona las metodologías efectivas necesarias para lograr este objetivo en el contexto de la mesa de suspensión automotriz. Esto sugiere que se requiere un enfoque diferente o más investigaciones para lograr los resultados deseados en futuros desarrollos de sistemas de suspensión más eficientes.

El factor de seguridad se obtiene al dividir el límite de fluencia (207 Mpa aprox) para el valor máximo del esfuerzo de Von Mises. Si ese resultado es menor que 1, entonces la pieza falla porque ingresa en la zona plástica del material y se deforma.

Los límites de la expansión de este trabajo se pueden encontrar en las especificaciones de la tabla de suspensión del Chevrolet Aveo activo. Es importante tener en

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

cuenta que los resultados y las conclusiones pueden diferir para otros vehículos o diferentes componentes de suspensión. Las implicaciones teóricas de este trabajo están relacionadas con la aplicación de la optimización topológica en el diseño de componentes automotrices, que pueden mejorar la eficiencia y el rendimiento de los vehículos.

### **Agradecimientos / Reconocimiento**

Deseamos expresar nuestro sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron de manera significativa al desarrollo y finalización de este artículo. Su apoyo incondicional y su valiosa orientación han sido fundamentales para el logro de este importante hito en nuestra carrera académica.

Deseo agradecer a nuestra asesora de tesis, por su guía experta y su dedicación inquebrantable. Su conocimiento profundo y su compromiso con nuestro crecimiento académico han sido fundamentales para la realización de esta investigación. Sus comentarios y sugerencias constructivas nos han ayudado a mejorar cada aspecto de este trabajo.

### **Referencias bibliográficas**

1. Multiobjective optimization framework for designing a vehicle suspension system. A comparison of optimization algorithms. Carlos Llopis-Albert, Francisco Rubio, Shouzhen Zeng. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997822002769?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=7b84f10fcc67cfa3](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997822002769?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7b84f10fcc67cfa3)
2. A comprehensive diagnostic system for vehicle suspensions based on a neural classifier and wavelet resonance estimators. Rafat Burdzik. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224122008132?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=7b84f8c86dd90dd6](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224122008132?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7b84f8c86dd90dd6)
3. Proposing an original control algorithm for the active suspension system to improve vehicle vibration: Adaptive fuzzy sliding mode proportional-integral-derivative tuned by the fuzzy (AFSPIDF). Duc Ngoc Nguyen, Tuan Anh Nguyen. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023014172?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=7b84fc074b062871](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023014172?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7b84fc074b062871)
4. Adaptive Integral Terminal Sliding Mode Control for the Nonlinear Active Vehicle Suspension System under External Disturbances and Uncertainties. Hamid Ghadiri, Allahyar Montazeri. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322021218?ref=pdf\\_download&fr=RR-2&rr=7b8501440fe60de7](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896322021218?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=7b8501440fe60de7)
5. Optimization of Passive Vehicle Suspension System by Genetic Algorithm. Anirban. C. Mitra, Gourav. J. Desai, Saaish. R. Patwardhan, Parag H. Shirke, Waseem M.H. Kurne, Nilotpall Banerjee. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877705816303046>
6. Efficient optimisation of a vehicle suspension system, using a gradient-based approximation

	<b>Universidad Internacional del Ecuador</b>
	<b>DOCUMENTO N°: UIDE- MAT-EIA</b>
	INGENIERIA AUTOMOTRIZ
	TITULACIÓN

- method, Part 1: Mathematical modelling. M.J. Thoresson, P.E. Uys, P.S. Els, J.A. Snyman.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0895717709002520>
7. Optimisation of road vehicle passive suspension systems. Part 2. Qualification and case study. A.F Naudé, J.A Snyman.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0307904X0200121X>
  8. Control of a new low-cost semi-active vehicle suspension system using artificial neural networks. Mostafa Ghoniem, Taher Awad, Ossama Mokhiamar.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1110016820303380>
  9. Ride Comfort-Road Holding Trade-off Improvement of Full Vehicle Active Suspension System by Interval Type-2 Fuzzy Control. Meral Özarslan Yatak, Fatih Şahin.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509862034235X>
  10. Optimization of suspension system and sensitivity analysis for improvement of stability in a midsize heavy vehicle. Emre Sert, Pinar Boyraz.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2215098616312587>
  11. , . (NaN, undefined NaN). . Retrieved from <http://www.catec.aero/es/materiales-y-procesos/l%C3%ADnea-de-investigaci%C3%B3n/optimizaci%C3%B3n-topol%C3%B3gica>
  12. Gillespie, T.D. (1992) Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE, Warrendale.  
<https://doi.org/10.4271/R-114>
  13. Bendsøe, M.P., Sigmund, O. (2004). Topology optimization by distribution of isotropic material. In: Topology Optimization. Springer, Berlin, Heidelberg.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05086-6_1)
  14. Sigmund, O. and Maute, K. (2013) Topology Optimization Approaches—A Comparative Review. Structural Multidisciplinary Optimization, 48, 1031-1055.  
<http://dx.doi.org/10.1007/s00158-013-0978-6>