



DOI: <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i3.1329>

Ciencias Técnicas y Aplicadas  
Artículo de investigación

*Optimización topológica de las manguetas delanteras y posteriores para un  
vehículo prototipo fórmula SAE*

*Topological optimization of front and rear stub axles for a SAE formula  
prototype vehicle*

*Otimização topológica de eixos dianteiros e traseiros para um veículo protótipo  
de fórmula SAE*

Celin Abad Padilla-Padilla<sup>I</sup>  
[celin.padilla@esPOCH.edu.ec](mailto:celin.padilla@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-2241-5421>

Edwin Rodolfo Pozo-Safla<sup>II</sup>  
[edwin.pozo@esPOCH.edu.ec](mailto:edwin.pozo@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-8931-3577>

Franklin Roberto Ballin-Juna<sup>III</sup>  
[franklin.ballin@esPOCH.edu.ec](mailto:franklin.ballin@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-8189-0997>

Diego Paul Herrera-Santamaría<sup>IV</sup>  
[diego.herrera@esPOCH.edu.ec](mailto:diego.herrera@esPOCH.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-7309-0030>

\***Recibido:** 23 de mayo de 2020 \***Aceptado:** 12 de junio de 2020 \***Publicado:** 27 de julio de 2020

- I. Magíster en Diseño Mecánico Mención en Fabricación de Autopartes de Vehículos, Máster en Ingeniería de Vehículos Híbridos y Eléctricos, Ingeniero Automotriz, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de Investigación SAPIA, Chimborazo, Ecuador.
- II. Magíster en Diseño, Producción y automatización industrial, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Grupo de Investigación GIEBI, Chimborazo, Ecuador.
- III. Ingeniero Automotriz, Investigador Independiente, Riobamba, Ecuador.
- IV. Ingeniero Automotriz, Investigador Independiente, Riobamba, Ecuador.

## Resumen

A través de ingeniería inversa se pudo re-diseñar las manguetas originales con el objetivo de reducir el peso y mejorar sus características, este proceso se lo realizó mediante software CAD para el modelado, CAE para la optimización topológica y validación de resultados, en la fabricación de las nuevas manguetas se empleó el proceso de fundición con aleación de aluminio 7075-T6. El rediseño de las manguetas se inició mediante el análisis de la pieza original, obteniendo parámetros geométricos para el nuevo modelo. La optimización simulación de las nuevas manguetas se utilizó el ANSYS Workbench y con ello una reducción de material innecesario de las nuevas manguetas delantera y posterior en un 70%, que representa un factor de diseño en 3,22 y 5,16 respectivamente. Para la fabricación se empezó por la manufactura en impresión 3D del diseño final, y realizar los moldes en arena verde, la fundición de aluminio se hizo en un horno de crisol, llevándolo a una temperatura de calentamiento promedio de 910°C, para realizar la aleación de metales como: Cromo, Cobre, Magnesio, Zinc y en pequeños porcentajes de hierro, silicio, titanio y otros metales, obteniendo así las manguetas. Como resultado final se obtiene una reducción del peso en las manguetas en un 53% menor que las originales. Se concluye que se puede obtener piezas pequeñas, resistentes mediante una aleación apropiada y a un costo de producción moderadamente económico.

**Palabras claves:** Fórmula SAE; ingeniería inversa; re-diseño; manguetas; optimización topológica.

## Abstract

Through reverse engineering, it was possible to re-design the original spindles with the aim of reducing weight and improving their characteristics, this process was carried out using CAD software for modeling, CAE for topological optimization and validation of results, in manufacturing of the new spindles, the 7075-T6 aluminum alloy casting process was used. The re-design of the stub axles was started by analyzing the original part, obtaining geometric parameters for the new model. The simulation optimization of the new stub axles was used with the ANSYS Workbench and with it a reduction of unnecessary material of the new front and rear stub axles by 70%, which represents a design factor of 3.22 and 5.16 respectively. For the manufacturing, we started by manufacturing 3D printing of the final design, and making the molds in green sand, the

aluminum casting was done in a crucible furnace, bringing it to an average heating temperature of 910°C, to carry out the alloy of metals such as: Chrome, Copper, Magnesium, Zinc and in small percentages of iron, silicon, titanium and other metals, thus obtaining the stub axles. As a final result, a reduction in the weight of the knuckles is obtained by 53% less than the original ones. It is concluded that small, strong parts can be obtained by means of an appropriate alloy and at a moderately economic cost of production.

**Keywords:** SAE Formula; reverse engineering; re-design; stub axles topological optimization.

## Resumo

Através da engenharia reversa, foi possível redesenhar os eixos originais com o objetivo de reduzir o peso e melhorar suas características. Esse processo foi realizado com o software CAD para modelagem, CAE para otimização topológica e validação de resultados, na fabricação dos novos eixos, foi utilizado o processo de fundição em liga de alumínio 7075-T6. O redesenho dos eixos de topo foi iniciado analisando a peça original, obtendo parâmetros geométricos para o novo modelo. A otimização da simulação dos novos eixos de topo foi usada com o ANSYS Workbench e, com isso, uma redução de material desnecessário dos novos eixos de topo dianteiros e traseiros em 70%, o que representa um fator de projeto de 3,22 e 5,16, respectivamente. Para a fabricação, começamos fabricando a impressão 3D do projeto final e, fazendo os moldes em areia verde, a fundição de alumínio foi feita em um forno de cadinho, levando-o a uma temperatura média de aquecimento de 910°C, para realizar a ligas de metais como: Cromo, Cobre, Magnésio, Zinco e em pequenas porcentagens de ferro, silício, titânio e outros metais, obtendo assim os eixos de topo. Como resultado final, uma redução no peso das articulações é obtida em 53% menos que as originais. Conclui-se que peças pequenas e fortes podem ser obtidas por meio de uma liga apropriada e a um custo de produção moderadamente econômico.

**Palavras-Chave:** Fórmula SAE; Engenharia reversa; redesenhar; eixos de topo otimização topológica.

## Introducción

La manufactura de las manguetas en el diseño original del vehículo Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz, está realizada de manera tradicional mediante uniones no desmontables en láminas de Acero A36 para tener la forma final, este procedimiento de construcción no es tan viable, ya que no se consideró el incremento de peso de las manguetas, al ser un elemento importante de contacto entre los neumáticos con los sistemas de suspensión, dirección y frenado. (Albán Guerrero, 2016)

El problema a solucionar es el elevado peso que tiene las manguetas delanteras y posteriores de 4.5lb c/u, que representa un perjuicio para el rendimiento del vehículo. Con el re-diseño del nuevo modelo de manguetas en CAD, más la aplicación de un proceso de manufactura con material liviano, es tratar de obtener piezas ligeras y resistentes. (Albán Guerrero, 2016)

Según (Kalpakjian, 2002) dice: “El diseño del producto es una actividad crítica porque se ha estimado que de 70 a 80% del costo de desarrollo del producto y su manufactura, queda determinado por las decisiones tomadas en las etapas iniciales del diseño”.

Motivo que la Fórmula SAE reta a los estudiantes universitarios de pregrado y posgrado a diseñar, fabricar y competir con pequeños autos de carreras tipo fórmula. Estos autos deberán pasar una serie de eventos estáticos y dinámicos, que incluyen inspección técnica, costo, presentación, diseño de ingeniería, pruebas de rendimiento. (Formula SAE, 2019)

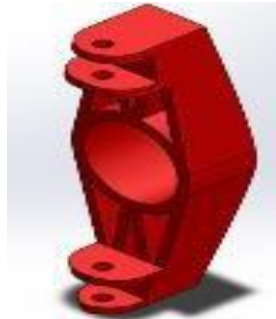
Con el desarrollo del presente proyecto se mostrará que se puede realizar mejoras para fabricar partes y piezas automotrices, a la vez formar parte del cambio de la matriz productiva en la innovación y calidad de productos que ayuden a la economía de un país que depende mucho de las importaciones, además de evitar el riesgo de desempleo. Donde se necesita combinar conocimientos adquiridos en las aulas durante la formación académica con la práctica, para poder obtener un producto final en material ligero y resistente, en este caso las manguetas del prototipo de Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz. (Villena Izurieta, 2015)

## Mangueta de una Fórmula SAE

Las manguetas son piezas mecánicas que forman parte entre neumáticos con la suspensión, la dirección y freno, fabricadas en acero o aleaciones lo que les permite soportar fuerzas longitudinales y verticales al paso por una pista de competencia. De acuerdo a la Figura 1, la mangueta tiene la tarea de alojar el disco de freno y la mordaza, los brazos de suspensión superior

e inferior, varillaje de la dirección, centros de rueda que a su vez contiene un rodamiento y la junta homocinética lo que le permite conectar el tren de fuerza motriz para el giro en las ruedas posteriores. (Albán Guerrero, 2016)

**Figura 1.** Mangueta F-SAE ya construida



### **Funciones de las manguetas**

Para los vehículos de competencia el diseño de las manguetas se basa en desempeño de las principales funciones geométricas: (Mejía González, 2015)

- ★ Proporcionar albergue adecuado para el cojinete de rueda.
- ★ Resistir la fuerza de rotación alrededor del eje, proveniente desde la superficie de contacto del neumático, producido por la tracción y frenado a la que se somete.
- ★ Resistir fuerzas alineantes que provoca la geometría de la suspensión en la superficie de contacto del neumático.
- ★ Soportar los momentos de flexión generado por el vehículo al paso por una curva.
- ★ Soportar las fuerzas que genera el amortiguador y el muelle, por estar unidas al varillaje de accionamiento.
- ★ Ser rígida para soportar torsión en dirección vertical y para transmitir con precisión la dirección de las ruedas y las reacciones de la dirección.
- ★ Ser robusta que permita resistir los daños por contactos menores con objetos en pista, entre ellos bordillos, desniveles, etc.

## Componentes del sistema de suspensión

Entre los principales componentes que tiene un sistema de suspensión de un Vehículo Fórmula SAE, ver figura 2, están: (Arellano Villacres & Taday Yupanqui, 2016)

- ★ Brazos de suspensión
- ★ Resortes
- ★ Frecuencia de oscilación
- ★ Amortiguadores
- ★ Rockers
- ★ Rótulas
- ★ Manguetas

**Figura 2.** Componentes del sistema de suspensión



## Metodología

La metodología de diseño permite seguir un proceso ordenado sobre el tema de estudio para alcanzar resultados viables. Se inicia de acuerdo al procedimiento de la figura 3, con la identificación de la necesidad del problema, el levantamiento de información necesaria mediante la revisión de las principales fuentes bibliográficas y normativa de la Fórmula SAE 2020, las especificaciones de desempeño para el nuevo diseño, generación de propuesta y evaluación, modelo preliminar, para culminar con el re-diseño y construcción de la mangueta final.

**Figura 3.** Proceso de diseño de un prototipo



### Identificación de la necesidad

En la propuesta original de las manguetas que tiene el vehículo Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz, su fabricación es de manera tradicional, donde se utiliza láminas de acero A36 para dar la forma final, por ende, se busca mejorar a través de un nuevo diseño y mediante un proceso de fabricación en material liviano el cual permita ser resistente con un mínimo peso. (Arellano Villacres & Taday Yupanqui, 2016)

Para esto se necesita realizar un re-diseño de las cuatro manguetas; dos delanteras y dos posteriores, conservando los mismos puntos de anclaje.

**Figura 4.** Manguetas originales



### **Levantamiento de información**

En la revisión bibliográfica referente a manguetas se analiza algunas metodologías que permitan realizar el diseño y fabricación de la nueva propuesta, además hay ejemplos en base al estado del arte sobre diferentes trabajos realizados de manguetas para mono-plazas que han participado en distintas competiciones de circuitos y en el Reglamento de Fórmula SAE 2020 se especifican artículos que deben cumplir las manguetas para ser ensambladas en el vehículo. (Formula SAE, 2019)

### **Especificación de desempeño**

Las manguetas deben tener la capacidad suficiente para soportar el efecto de los neumáticos con la calzada y de las principales fuerzas que se generan en los sistemas de suspensión, dirección y frenado: (Mejía González, 2015)

### **Características que debe desempeñar las manguetas delanteras**

- ★ Transmitir las maniobras realizadas por el conductor a través de los brazos de dirección sobre los neumáticos.
- ★ Conectar los brazos de suspensión con sus respectivos puntos de anclaje.
- ★ Fijación de la posición de montaje de las mordazas de freno con el disco de freno.
- ★ Albergar la ubicación para el rodamiento.
- ★ Facilidad de montaje y desmontaje

### **Características que debe desempeñar las manguetas posteriores**

- ★ Conectar los brazos de suspensión superior e inferior con sus respectivos puntos de anclaje.
- ★ Albergar la ubicación para el rodamiento ya se acople la junta homocinética.

### **Generación de propuestas y evaluación**

La importancia que tiene las manguetas dentro de un vehículo de Fórmula SAE, justifica que sea necesario realizar un nuevo diseño, donde se evalué los valores de las fuerzas a las que están sometidas.

### **Optimización de topología**

La optimización de la topología es una práctica de ingeniería bien establecida que permite optimizar el diseño partiendo de un modelo existente (Reddy K., Maranan, Simpson, Palmer, &

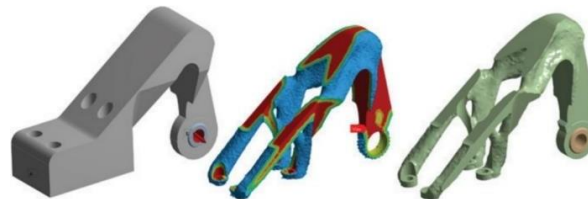


Dickman, 2016), especialmente para maximizar o minimizar alguna característica deseada (dominio de diseño); con el fin de obtener en lo posible el menor peso para asegurar una rigidez y resistencia adecuada. Lo que implica tener piezas mecánicas con un bajo costo en relación a material y el menor consumo de combustible para vehículos de competición. (Franco, 2015)

Con el avance de las tecnologías de fabricación aditiva (AM), la técnica de fabricación tradicional pasaron a presentar limitaciones en su producción, lo que ha permitido a la optimización topológica (OT) convertirse en una herramienta de diseño ingenieril mucho más eficaz (Bianchi, Governi, & Marzola, 2019), y en el campo de investigación aplica áreas como matemáticas, la mecánica y la ciencia computacional, tanto es así, que su aplicación está en la industria aeroespacial, automotriz, obras civiles y uno de ellos el de la salud, en especial las micros y nanotecnologías para el desarrollo de mecanismos flexibles (Franco, 2015).

Una de las técnicas más aplicadas para la solución de la optimización topológica está el método de elementos finitos por el proceso que se da a la variable de optimización que puede ser de tipo discreta o continua. Para la variable de optimización discreta se sobresale los métodos ESO (Optimización Estructural Evolutiva) y BESO (Optimización estructural evolutiva bi-direccional), denominados hard-kill, que tiene la función de quitar material innecesario del dominio de diseño. (Uarac P., Cendoya H., & Sanhueza O., 2015)

**Figura 5.** Proceso de optimización topológica de un diseño preliminar



## Material

Es importante saber que el material a elegir debe soportar los esfuerzos a los que se encuentra sometida la mangueta durante el funcionamiento del vehículo Fórmula SAE.

De manera que es fundamental controlar la tensión del material mediante software, el módulo elástico del material deberá ser mayor al obtenido en el software.

El material a utilizar es el Aluminio 7075 T6, que entre sus características se destaca ser ligero y utilizable en la industria aeroespacial, en la elaboración de piezas automotrices. En el proceso de fabricación de la mangueta está el mecanizado y la fundición, siendo este último el que empelara para este proyecto a través de la aleación del Al 7075.

### **Fabricación**

Para el proceso de fabricación se optará por el método idóneo, uno que ayude a generar la mangueta en su totalidad, esto quiere decir sin la unión de varias piezas soldadas y acabados rústicos, debido al proceso de fabricación se ha estudiado algunos parámetros como el mecanizado y la fundición. Para realizar la fabricación de la pieza por mecanizado se debe considerar ciertos factores como:

- ★ El material a trabajar depende mucho su dureza, maquinabilidad y tipo de viruta producida.
- ★ El tipo de refrigerante ya que en función con el material mejora las condiciones de corte.
- ★ La máquina debe ser lo más precisa y eficaz para el desprendimiento de viruta.
- ★ Las herramientas a utilizar para el corte en función al material, geometría de la herramienta y calidad.

Para realizar la fabricación de la pieza por fundición tradicional se debe considerar ciertos criterios como:

- ★ El material a fundir debe alcanzar las especificaciones necesarias para el uso propuesto.
- ★ Los moldes a construir para las manguetas deben tener acabados buenos para eludir el mecanizado.
- ★ Al realizar la fabricación por fundición reducimos tiempo y esfuerzo en fabricación.

### **Resultados y Discusión**

#### **Fuerzas que actúan sobre la mangueta delantera y posterior**

Para el cálculo de las fuerzas que actúa en las manguetas durante el movimiento del vehículo, se considera algunos datos obtenidos en los análisis previos referente al chasis, transmisión y los sistemas: de suspensión, dirección y frenado del vehículo Fórmula SAE ESPOCH, así como los datos que proporciona en el Reglamento de Fórmula SAE 2020 para el desarrollo del proyecto.

Entre las fuerzas más importantes que afectan a las manguetas del vehículo esta la transferencia de pesos bajo condiciones de frenado, aceleración o el recorrido por curvas, además de la fuerza que

ejerce la barra de dirección para girar la rueda cuando entra en una curva, más la fuerza de frenado sobre el disco de freno. (Granell, 2018)

### Fuerzas en la mangueta delantera

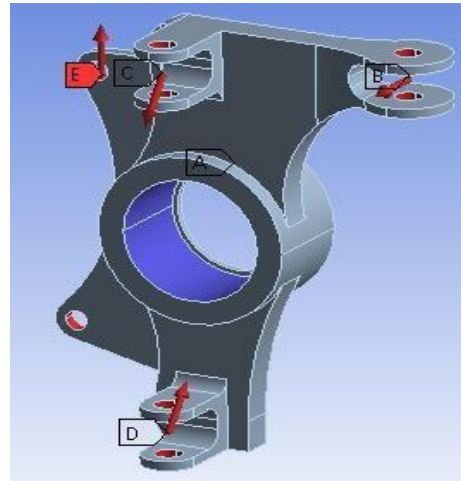
Resultados de las cargas necesarias a la que está sometida la mangueta delantera, mismas que están expresadas en la tabla 1.

**Tabla 1.** Valor de las cargas finales para la mangueta delantera

| Mangueta Delantera |  |           |
|--------------------|--|-----------|
| Nomenclatura       | Detalle                                    | Valor     |
| Fa                 | Fuerza normal durante el frenado           | 2714.94 N |
| Fpd                | Fuerza de frenado en la pinza delantera    | 2986.43 N |
| $F_e$              | Fuerza normal durante recorrido por curva  | 3345.01 N |
| Ho                 | Fuerza lateral durante recorrido por curva | 3617.93 N |
| $f_{yf}$           | Fuerza en la junta de dirección            | 445.08 N  |

En la figura 6 se indica la aplicación de las principales fuerzas que actúan sobre los soportes de la mangueta delantera, la sección B representa la fuerza en la junta de dirección con un valor de 445.08 N en dirección Z, la sección C y D las fuerzas normal y lateral durante el recorrido por una curva más la normal durante el frenado con un valor de 3345.01 N para la dirección Y1, 3617.93 N para la dirección Z, 2714.94 N dividida para los dos ejes con un valor de 1357.17 N en dirección Y2 respectivamente, la sección E con la fuerza de frenado en la pinza delantera con un valor 2986.43 N en dirección tangente a la rueda.

**Figura 6.** Fuerzas en la mangueta delantera



### Fuerzas en la mangueta posterior

En la mangueta posterior se reemplaza la fuerza de la junta de dirección, debido a que en el eje posterior no posee el efecto (guía) del sistema de dirección, para esta fuerza ( $F_{yf}$ ) se reemplaza por la fuerza ( $F_{yr}$ ) que tiene el trabajo de evitar que los neumáticos posteriores cambien de dirección, manteniendo en un solo sentido de rotación y compartido con la junta homocinética.

En la tabla 2 se presenta los resultados de las principales cargas que actúan sobre mangueta posterior:

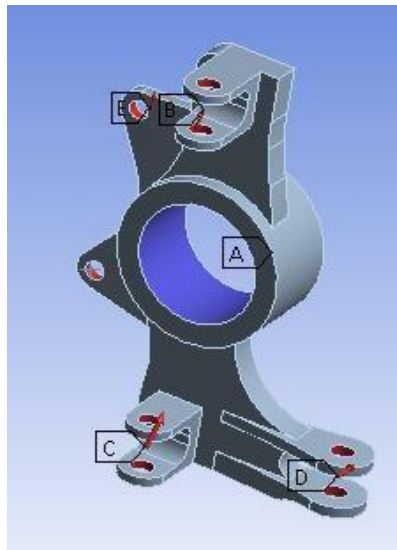
**Tabla 2.** Valor de las cargas finales para su análisis e interpretación de resultados

| Mangueta Posterior |  |           |
|--------------------|--|-----------|
| Nomenclatura       | Detalle                                    | Valor     |
| Fpp                | Fuerza de frenado en la pinza posterior    | 852.97 N  |
| $F_o$              | Fuerza normal durante recorrido por curva  | 3345.01 N |
| Ho                 | Fuerza lateral durante recorrido por curva | 3617.93 N |
| $F_{yr}$           | Fuerza del tope en la base inferior        | 370.43 N  |

En la siguiente figura 7, siguiendo con el mismo criterio de la mangueta delantera se describe las fuerzas que actúan sobre los soportes, la sección D representa la fuerza del tope en la base inferior

con un valor de 370.43 N en dirección Z, la sección B y C las fuerzas normal y lateral durante el recorrido por una curva con un valor de 3345.01 N para la dirección Y1, 3617.93 N para la dirección Z respectivamente, la sección E con la fuerza de frenado en la pinza posterior con un valor 852.97 N en dirección tangente a la rueda.

**Figura 7.** Fuerzas en la mangueta posterior



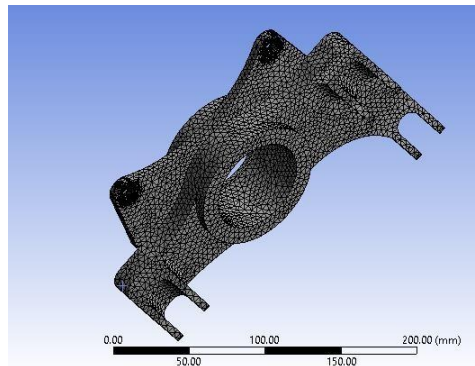
### Proceso de Optimización Topológica

Para realizar la optimización topológica, el primer paso es exportar el diseño realizado en SolidWorks en archivo STEP (.stp), formato que permite el intercambio de datos tridimensionales, la optimización se lo realiza en el programa computacional ANSYS Workbench.

### Optimización mangueta delantera

Con la geometría importada procedemos a establecer condiciones para el proceso de optimización: En el mallado, el software divide a la geometría en una “red de elementos y nodos que discretizan una región” (Budynas & Nisbett, 2012), para la mangueta delantera se insertó un Sizing, que permite establecer un tamaño de elementos para toda la geometría, para lo cual se aplicó de 3mm y un Refinement, para las zonas más críticas donde van aplicadas las cargas (Figura 8), con un nivel de 2mm en las arista vivas (Granell, 2018)

**Figura 8.** Mallado



### Aplicación de condiciones de contorno

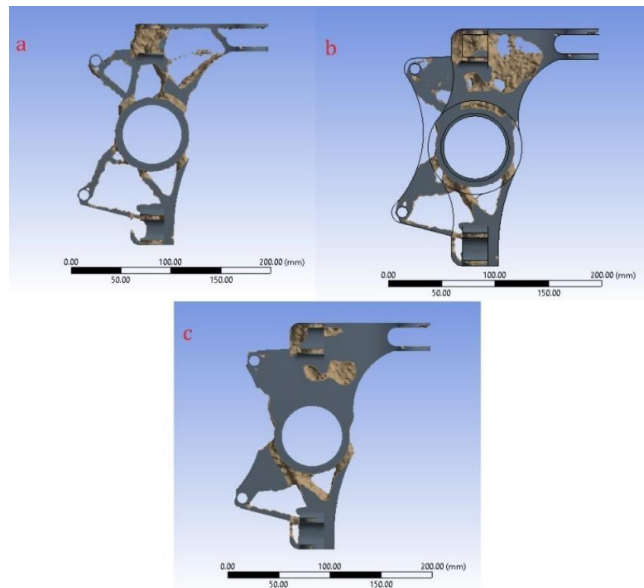
Para las condiciones de contorno se empieza por la aplicación de las cargas y restricciones que actúan en la mangueta, para el proceso de simulación se asigna un Cylindrical support en el soporte fijo para el rodamiento, se restringe los grados de libertad de la geometría con dos Displacement en la parte superior e inferior, las cargas se aplican en los soportes fijos para la suspensión superior e inferior, en el soporte para la dirección y para la posición de la mordaza de freno.

### Topología

Con todas las condiciones de contorno impuestas, se procede a realizar la optimización topológica mediante el módulo Topology Optimization, se definen parámetros que tiene como objetivo retirar masa innecesaria de acuerdo al porcentaje de selección sobre la región designada por el programa con número de interacciones.

Aplicando los parámetros, el software identifica la región a ser optimizada en Percent to Retain de 15%, 30% y 50% en la figura 9, proceso que se obtiene con un número de interacciones de 64 para el más mínimo valor de porcentaje, esto permite alcanzar el modelo para poder realizar la respectiva modificación.

**Figura 9.** Región removida por el programa es: a) 85%, b) 70% y c) 50% de masa

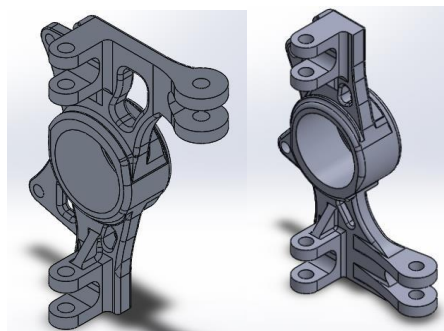


El mismo procedimiento se lo realizó para la mangueta posterior.

### Re-diseño de manguetas

En el software SolidWorks procedemos a abrir la figura ya hecha la topología para su re-diseño, en el re-diseño de las manguetas delantera y posterior (figura 10), se incrementa las medidas en las orejas de los soportes superior e inferior, además se añaden nervios en la base de los soportes para la suspensión, medidas que permitirán incrementar la seguridad.

**Figura 10.** Re-diseño de la mangueta delantera y posterior



### Análisis mediante elementos finitos de mangueta delantera

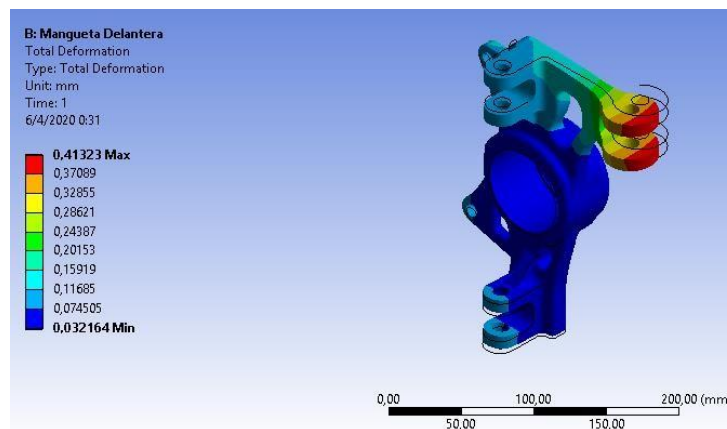
Asignado las condiciones de contorno y las principales fuerzas a la que va a estar sometida la mangueta durante condiciones de trabajo, por lo que los resultados a analizar son: Deformación

Total, Esfuerzo Equivalente de Von Mises y el Factor de Seguridad, con el propósito de verificar la eficiencia del modelo re-diseñado.

### Deformación total

Fenómeno que se presenta al momento que el vehículo recorrer por una curva o en al pasar por un obstáculo, donde muestra que en el soporte de la dirección tiene un valor máximo de desplazamiento de 0.41323mm y mínimo de 0.031961mm.

**Figura 11.** Resultado de Deformación Total

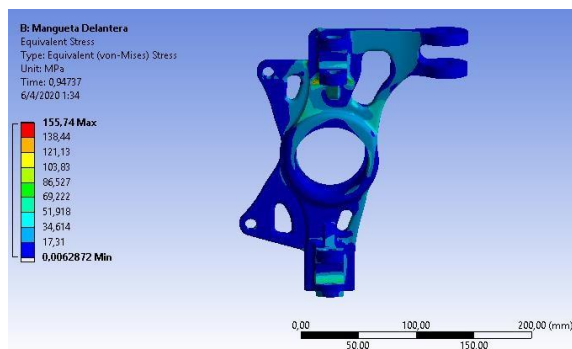


### Tensión Von Mises

La tensión máxima que se produce en el cuerpo de la mangueta es de 155.74 MPa, lo que determina que soporta de manera aceptable al efecto que producen las cargas y es inferior a la capacidad de resistencia a fatiga del material. Su concentración máxima está en la base de los soportes de la suspensión superior.

**Figura 12.** Análisis de Tensión de Equivalente de Von Mises

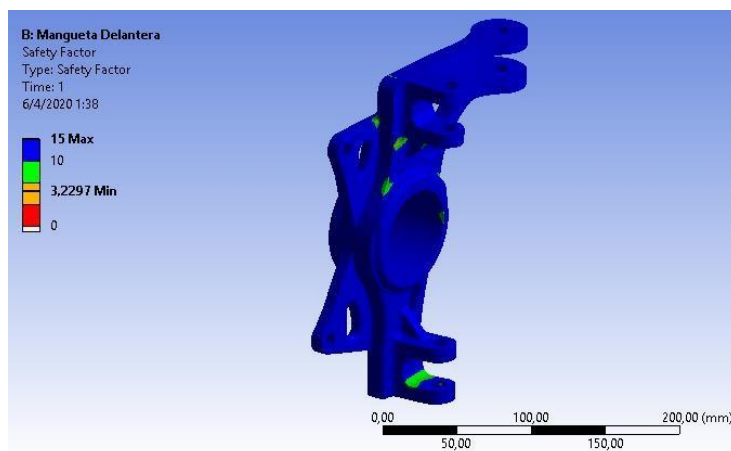




### Factor de seguridad

Al no superar el valor de limite resistencia a fatiga del del material y de acuerdo a la gráfica del esfuerzo equivalente de Von Mises, el factor de seguridad es de 3.22.

**Figura 13.** Factor de seguridad de la mangueta delantera



### Construcción del modelo

La fase de construcción de las manguetas se empieza por el prototipado rápido, proceso que nos permite fabricar y verificar las dimensiones del diseño realizado en CAD.

### Impresión 3D

Llamada también manufactura por adición, en donde para la fabricación de cualquier elemento se basa en un modelo digitalizado en un software tipo CAD como SolidWorks, posterior a esto para

llegar al elemento físico donde ubica progresivamente material de filamento en pequeñas capas, hasta terminar la impresión.

Se puede fabricar desde piezas simples, hasta prototipos de alta gama como partes de aeronaves, autos además en el campo de la medicina se lo utiliza para realizar maquetas de los órganos humanos.

En la figura 14 se puede apreciar los modelos impresos en filamento de color rojo, esto fue necesario para hacer el montaje de las mismas, en el vehículo y verificar que las tolerancias de las piezas re-diseñadas sean las exactas, y de esta forma descartar tolerancias erróneas en las piezas originales ahorrando costos y tiempos de producción, en el caso de que alguna tolerancia no fuera la correcta se modificaría en el software SolidWorks, y se volvería a imprimir hasta que sea la correcta, y una vez con las tolerancias correctas se manufacturaría las piezas originales.

**Figura 14.** Modelos impresos en filamento PLA



### **Manufactura de las manguetas**

Una vez obtenidas las impresiones respectivas de los modelos, y verificado que las tolerancias de las mismas son las correctas, su manufactura se lleva a cabo mediante el procedimiento que se describe a continuación:

### **Proceso mediante fundición en arena**

Unos de los métodos de manufactura tradicional es el proceso de fundición en arena (moldeo) que representa una ventaja a la hora de obtener piezas pequeñas, con este método se puede adquirir piezas de manera directa ya en su forma definitiva para tan solo dar un cierto acabado final.

La fundición en arena no siempre es una técnica perfecta, ya que en su gran mayoría presentan limitaciones a la hora de obtener una pieza como:

- ★ Porosidad
- ★ Mal acabado superficial
- ★ Tolerancias erróneas

El aluminio en estado líquido es vertido en el molde, posterior a esto se espera su solidificación total y por último son liberadas y mecanizadas hasta obtener piezas de calidad como se indica en la figura 15.

**Figura 15.** Manguetas finales para del F-SAE ESPOCH





### Análisis de resultados

A través de la ingeniería inversa se puede obtener un nuevo prototipo de manguetas, al ir realizando paso a paso el procedimiento de diseño, optimización, simulación y fabricación; procesos que permiten alcanzar los objetivos planteados. En la siguiente tabla se presenta una comparación de peso entre la mangueta original y el nuevo prototipo de mangueta para el vehículo de la Fórmula SAE de la Carrera de Ingeniería Automotriz.

**Tabla 3.** Tabla resumen de resultados

| Comparativa de peso de las manguetas del vehículo Fórmula SAE |           |                   |           |
|---|-----------|-------------------|-----------|
| Modelo antiguo (A)  | Peso (lb) | Nuevo modelo (N)  | Peso (lb) |
| Acero A36   | 4.5lb     | Aluminio 7075 -T6 | 2.40lb    |

Optimización topológica de las manguetas delanteras y posteriores para un vehículo prototipo fórmula SAE

|   |                                  |   |   |
|---|----------------------------------|---|---|
|    |                                  |   |   |
| <b>Análisis de Deformaciones y Esfuerzos por elementos finitos</b>  |                                  |   |   |
| <b>Elemento (A)</b>   | <b>Unidad</b>                    | <b>Elemento (N)</b>   | <b>Unidad</b>   |
| <p style="text-align: center;"><b>Mangueta:</b></p> <p style="text-align: center;">Deformación Total</p> <p style="text-align: center;">Esfuerzo de Von Mises</p> | <p>0.114mm</p> <p>104.45 MPa</p> | <p style="text-align: center;"><b>Mangueta Delantera:</b></p> <p style="text-align: center;">Deformación Total</p> <p style="text-align: center;">Esfuerzo de Von Mises</p> <p style="text-align: center;"><b>Mangueta Posterior:</b></p> <p style="text-align: center;">Deformación Total</p> <p style="text-align: center;">Esfuerzo de Von Mises</p> | <p>0.413 mm</p> <p>155.74 MPa</p> <p>0.108mm</p> <p>97.47 MPa</p> |

**Conclusiones**

Mediante la utilización de la ingeniería inversa de la mangueta original se procedió a su diseño en software CAD para llegar al diseño final de la nueva mangueta utilizando nuevas herramientas como la optimización topología permitió la reducción del material excedente del diseño final de la mangueta obteniendo así el diseño listo para su construcción.

La fabricación de la mangueta se la realizo con la obtención del aluminio 7075 mediante la fundición, utilizando criterios técnicos y diversos fundentes que ayudo en gran parte a obtener una pieza con un acabado superficial bueno.

En la prueba de peso de las manguetas se observó una reducción considerable obteniendo así un peso para la mangueta delantera de 2.4lb y para la posterior de 2.2lb cumpliendo así el propósito de este proyecto.

## Referencias

1. Albán Guerrero, C. D. (2016). Diseño y construcción de un sistema de dirección para un vehículo tipo fórmula para la Escuela de Ingeniería Automotriz. Tesis Pregrado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
2. Arellano Villacres, J. C., & Taday Yupanqui, E. F. (2016). Diseño y construcción de un sistema de suspensión para un vehículo tipo fórmula para la Escuela de Ingeniería Automotriz. Tesis de pregrado. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
3. Auquilla Ocampo, J. L., & Torres Romero, C. R. (2016). Diseño del sistema de suspensión de un vehículo monoplaza eléctrico Fórmula SAE. Trabajo de pregrado. Universidad Politécnica Salesiana.
4. Bianchi, M., Governi, L., & Marzola, A. (2019). Enfoque De Ingeniería Asistida Por Ordenador (Cae) Para La Optimización Topológica De La Estructura Soporte Para Un Exoesqueleto De Mano. 2019 DYNA.
5. Budynas, R., & Nisbett, J. (2012). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Mexico: McGraw-Hill Interamericana.
6. Castro Graziano, D. (2017). Modelo de suspensión de vehículo mono-plaza mediante ADAMS/CAR. Propuesta de mejoras. Trabajo de pregrado. Madrid: Universidad de Madrid.
7. Formula SAE. (2019). Formula SAE. Obtenido de <https://www.fsaeonline.com>
8. Franco, E. (2015). Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. Revista el hombre y la máquina, 71-78.
9. Granell, I. (2018). Diseño y fabricación de las manguetas del vehículo Formula SAE ICAI. Tesis de pregrado. Madrid: Universidad Pontificia Comillas.
10. Kalpakjian, R. S. (2002). Manufactura, ingeniería y tecnología. Mexico: Mexicana Reg.Num.1031.
11. Mejía González, D. S. (2015). Diseño de manguetas delanteras y posteriores de un vehículo monoplaza para la competición en la formula SAE. Tesis de pregrado. Universidad Politécnica Salesiana.
12. Reddy K., S., Maranan, V., Simpson, T., Palmer, T., & Dickman, C. (2016). Application of Topology Optimization and Design for Additive Manufacturing Guidelines on an Automotive

Component. ASME 2016 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference.

13. Uarac P., P., Cendoya H., P., & Sanhueza O., J. (2015). Optimización topológica bidireccional con esquema de penalización de material y restricciones de desplazamiento. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 75-84.
14. Villena Izurieta, N. P. (2015). El Ecuador y el proceso de cambio de la matriz productiva: consideraciones para el desarrollo y equilibrio de la balanza comercial. *Observatorio de la Economía Latinoamericana*.

©2020 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).