

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE MATRIZ CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

Trabajo de titulación previo a la obtención del Título de Ingeniero

Mecánico Automotriz

“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE VOLANTE PARA UN
VEHÍCULO TIPO FÓRMULA SAE MEDIANTE TÉCNICAS DE
OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL”

Autor:

Jaime Andrés Picón Mejía

Director:

M.I. Jonatan Pozo Palacios

Cuenca, mayo 2016

CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Jaime Andrés Picón Mejía declaro que este trabajo de grado, es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ninguna calificación profesional y está realizado en base al proceso establecido por la Carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Cuenca.

Cuenca, 6 de mayo del 2016



.....
Jaime Andrés Picón Mejía

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS

A través de la presente declaración cedo mi derecho de propiedad intelectual correspondiente a este proyecto técnico a la Universidad Politécnica Salesiana, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y normativa institucional vigente.

Cuenca, 6 de mayo del 2016



.....
Jaime Andrés Picón Mejía

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN
SUSCRITO POR EL TUTOR**

Certifico que este proyecto técnico ***“DISEÑO DE UN PROTOTIPO DE VOLANTE PARA UN VEHÍCULO TIPO FÓRMULA SAE MEDIANTE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN ESTRUCTURAL”***, realizado por el estudiante: Jaime Andrés Picón Mejía fue dirigido por mi persona.

Cuenca, 6 de mayo del 2016



.....
M.I. Jonatan Pozo Palacios

DEDICATORIA

Este proyecto técnico va dedicado a toda mi familia y a mi esposa Tamara Jackeline, en especial a mis padres Jaime Enrique e Hilda Rosario, ellos hicieron lo posible y con mucho sacrificio me ayudaron a cumplir esta meta.

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a Dios, fue quien me dio la salud, sabiduría y fortaleza en momentos difíciles de mi carrera.

Al M.I. Jonatan Pozo quien fue tutor de este proyecto técnico, con paciencia y voluntad compartió todos sus conocimientos para fortalecer aún más el desarrollo de este trabajo de grado.

Finalmente agradezco a mis padres, ellos me enseñaron que con mucho sacrificio se consigue lo que uno se propone, fueron y seguirán siendo mi ejemplo a seguir.

RESUMEN

En este proyecto técnico se presenta una metodología para el diseño y construcción de un prototipo de volante de dirección, aplicando técnicas de optimización estructural considerando procesos de manufactura aditiva.

Se requiere un volante para el monoplaza mucho más ligero que los convencionales, además debe tener características específicas de diseño que ayuden al piloto durante toda la competición. También es necesario que el prototipo del volante de dirección cumpla con todos los parámetros establecidos en la reglamentación de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE).

En la actualidad existen varias herramientas computacionales utilizadas en ingeniería, que de alguna manera pueden ser utilizadas para diseñar el prototipo del volante de dirección. Al combinar las técnicas de diseño con optimización estructural considerando los procesos de manufactura aditiva, se reducirá al máximo el peso del prototipo y será posible construir cualquier geometría compleja que tenga el diseño.

Para desarrollar este proyecto técnico se inicia con una metodología investigativa teórica, es decir, se recopilan datos realizando un estudio y análisis a la información de artículos, tesis, informes técnicos, etc., que tengan información acerca de los sistemas de dirección para vehículos tipo fórmula SAE.

Consecutivamente se aplica una metodología experimental mediante un software para llegar a obtener un diseño que cumpla con los parámetros requeridos. En el diseño inicial del prototipo de volante de dirección se utiliza un software de diseño CAD (SolidWorks), mientras que para emplear las técnicas de optimización estructural se maneja un software CAE (HyperWorks).

Posteriormente se realiza un análisis estático de la geometría para luego definir los parámetros necesarios de optimización. Además para la construcción del prototipo se describe brevemente el proceso de manufactura aditiva (impresión 3D).

Como resultado final de este proyecto técnico se obtuvo un prototipo ligero con características específicas de diseño y construcción de acuerdo a las necesidades del piloto.

ABSTRACT

In this technical project, a methodology is presented for the design and construction of a prototype steering wheel, using structural optimization techniques considering additive manufacturing processes.

A steering wheel is required for a single-seater car much lighter than conventional ones; this element should also have specific design features that help the pilot throughout the competition. It is also necessary that the steering wheel prototype meets all parameters established in the regulations of the Society of Automotive Engineers (SAE).

At present there are several computational tools used in engineering that somehow can be used to design the prototype of the steering wheel. By combining the techniques of structural optimization with additive manufacturing processes, the maximum weight of the prototype will be reduced and it will be possible to build any complex geometry that the design presents.

This technical project starts with a theoretical research methodology, where data is collected conducting a study and analysis of scientific papers, engineering theses, technical reports, etc., that have information about steering systems for such vehicles.

Consecutively an experimental methodology is applied using software to get a design that meets the required parameters. In the initial design of the prototype steering wheel, CAD software (SolidWorks) is used, while for working with structural optimization techniques CAE (HyperWorks) software is handled.

Subsequently a static structural analysis is performed to then define the necessary parameters for optimization. In addition to building the prototype, a brief theoretical research on additive manufacturing process is described.

As a final result of this technical project, a light steering wheel prototype with specific design and construction parameters according to the needs of the pilot was obtained.

INDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	1
2. PROBLEMA.....	2
3. OBJETIVOS	2
3.1 Objetivo General:	2
3.2 Objetivos Específicos:	2
4. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS	3
4.1 La competencia Fórmula SAE	3
4.2 Innovación en la competencia Fórmula SAE	4
4.3 Configuración y partes del sistema de dirección FSAE	4
4.3.1 Volante de dirección	4
4.3.2 Mecanismo de liberación	5
4.3.3 Columna de dirección	6
4.3.4 Acople de dirección.....	7
4.3.5 Cremallera	7
4.3.6 Brazos de dirección	8
4.3.7 Manguetas	8
4.4 Reglamento Fórmula SAE.....	9
4.4.1 Reglas del chasis en general	9
4.5 Manufactura de Prototipos	10
4.5.1 Definición de prototipo	10
4.5.2 Manufactura aditiva/sustractiva	10
4.5.3 Prototipado rápido	11
4.6 Optimización en el diseño	12
4.7 Optimización estructural “SO”	13
4.7.1 Optimización estructural topológica	15
4.7.2 Optimización estructural de tamaño.....	15

4.7.3	Optimización estructural de forma.....	15
4.8	Estado del arte en la fabricación de componentes mecánicos para vehículos FSAE y empresas automotrices mediante manufactura aditiva/sustractiva.	16
5.	MARCO METODOLÓGICO.....	20
5.1	Metodología de diseño	20
5.2	Aplicación de la metodología de diseño.....	21
5.2.1	Identificación de la necesidad	21
5.2.2	Investigación preliminar.....	22
5.2.3	Planteamiento de objetivos	22
5.2.4	Especificaciones de desempeño	22
5.2.5	Generación de ideas e invención.....	24
5.2.6	Diseño del prototipo de volante de dirección mediante técnicas de optimización estructural.....	26
5.2.7	Geometría CAD	27
5.2.8	Zona de diseño y no diseño del prototipo	28
5.2.9	Mallado de la geometría mediante elementos finitos.....	30
5.2.10	Material utilizado para el diseño y construcción del prototipo	32
5.2.11	Cargas aplicadas a la geometría	33
5.2.12	Restricciones en la geometría	41
5.2.13	Configuración de la optimización por topología.....	41
6.	RESULTADOS	44
6.1	Modelado la geometría optimizada	51
6.2	Análisis de la geometría final	53
6.3	Comparación entre la masa inicial y final de la geometría del prototipo	55
6.4	Construcción del prototipo	56
7.	CONCLUSIONES	60
8.	RECOMENDACIONES.....	62
9.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

10.	ANEXOS	67
	ANEXO I.....	67
	ANEXO II	69
	ANEXO III.....	70
	ANEXO IV.....	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. 1 Monoplaza FSAE “UPS Racing Team”	3
Figura 1. 2 Configuración y partes de sistema de dirección de un FSAE	4
Figura 1. 3 Volante de dirección de un FSAE - steering Wheel	5
Figura 1. 4 Mecanismos de desconexión rápida-Quick disconnect mechanisms	6
Figura 1. 5 Columna de dirección de un FSAE - steering column	6
Figura 1. 6 Acople de dirección o junta universal - Universal joint	7
Figura 1. 7 Cremallera de dirección de un FSAE	7
Figura 1. 8 Brazos de dirección de un FSAE - steering arms	8
Figura 1. 9 Mangueta de un FSAE	9
Figura 1. 10 Posición del volante en un FSAE	10
Figura 1. 11 Impresión 3D elementos mecanicos	11
Figura 1. 12 Impresión en tres dimensiones de un multiple	12
Figura 1. 13 Impresión en tres dimensiones de un prototipo para el interior de un vehículo	12
Figura 1. 14 Optimización estructural de un soporte “OS”	13
Figura 1. 15 Tipos de optimización estructural “OS”	14
Figura 1. 16 Prototipo del volante de dirección del monoplaza.....	16
Figura 1. 17 Modelo CAD del volante de dirección del monoplaza	17
Figura 1. 18 Sistema de admisión de aire del FSAE de la CSUST	17
Figura 1. 19 Volante de dirección del FSAE de la CSUST	18
Figura 1. 20 Volante de dirección del Ford GT	18
Figura 1. 21 Parte de la bomba de agua del BMW group	19
Figura 1. 22 Vehículo Strati fabricado mediante impresión 3D	20
 Figura 2. 1 Metodología de diseño	 21
Figura 2. 2 Posición de los antebrazos respecto al volante	23
Figura 2. 3 Proceso de optimización topológica	26
Figura 2. 4 Modelo de la geometría CAD del prototipo (vista frontal)	27
Figura 2. 5 Modelo de la geometría CAD del prototipo (perspectiva)	28
Figura 2. 6 Topología 3D de la geometría en Hypermesh	29
Figura 2. 7 Topología 3D de la geometría con superficies de partición	29
Figura 2. 8 Geometría del solido dividido en zona de diseño y no diseño	30

Figura 2. 9 Resultado del análisis de convergencia	31
Figura 2. 10 Detalle del mallado con tetraedros de la parte central de la geometría	32
Figura 2. 11 Detalle del mallado con tetraedros de la parte central de la geometría ocultando el solido	32
Figura 2. 12 Diagrama de cuerpo libre del monoplaza UPS Racing Team	34
Figura 2. 13 Diagrama de cuerpo libre de un neumático	37
Figura 2. 14 Fuerzas generadas en el neumático	38
Figura 2. 15 Relación de esfuerzos a transmitir en un mecanismo de dirección	39
Figura 2. 16 Posición de fuerzas sobre la geometría en Hypermesh	40
Figura 2. 17 Telaraña creada en zona de no diseño	41
Figura 2. 18 Restricciones de la geometría	41
Figura 2. 19 Tamaño mínimo de miembro	43
Figura 2. 20 Restricción de simetría	43
Figura 3. 1 Geometría inicial del prototipo.....	44
Figura 3. 2 Optimización de la primera geometría del prototipo con “current value” de 0.5.....	45
Figura 3. 3 Optimización de la primera geometría del prototipo con “current value” de 0.5, sin elementos de densidad 0	45
Figura 3. 4 Geometría editada para establecer el perímetro exterior	46
Figura 3. 5 Superficies creadas para establecer el perímetro exterior	46
Figura 3. 6 Geometría del prototipo del volante de dirección previo al análisis estático.....	47
Figura 3. 7 Resultado del análisis estático	47
Figura 3. 8 Desplazamiento de la geometría durante el análisis estático.....	47
Figura 3. 9 Optimización topológica de la geometría con fracción de volumen descendente	48
Figura 3. 10 Iteraciones en la optimización topológica del prototipo de volante de dirección.....	50
Figura 3. 11 Iteración 24 en la optimización topológica con “current value” de 0.43	51
Figura 3. 12 Resultados de la optimización topológica exportados con una extensión STL a SolidWorks.....	51

Figura 3. 13 Modelado de la geometría optimizada en base a resultados de HyperMesh.....	52
Figura 3. 14 Geometría optimizada sometida a un análisis estructural	53
Figura 3. 15 Resultados del análisis estructural de la geometría optimizada (12mm de espesor zona de diseño).....	54
Figura 3. 16 Análisis estructural de la geometría final del prototipo (8mm de espesor zona de diseño).....	55
Figura 3. 17 Masa de la geometría inicial	55
Figura 3. 18 Masa de la geometría final.....	56
Figura 3. 19 Construcción del prototipo con 25% de densidad de material	57
Figura 3. 20 Primer intento de construcción del prototipo	58
Figura 3. 21 Impresión 3D del prototipo.....	58
Figura 3. 22 Resultado final de la impresión 3D del prototipo.....	58
Figura 3. 23 Peso del prototipo optimizado	58
Figura 3. 24 Peso del volante de dirección del monoplaza UPS Racing Team	59
Figura 3. 25 Prototipo con el acople de conexión/desconexión rápida.....	59
Figura 3. 26 Prototipo impreso mediante FDM montado en el monoplaza de UPS Racing Team	59

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Propuesta de solución para mecanismo de liberación.....	24
Tabla 2. Matriz de decisión para la selección del mecanismo de liberación	24
Tabla 3. Propuesta de solución para el material a utilizar en el diseño y construcción	25
Tabla 4. Matriz de decisión para la selección del material	25
Tabla 5. Análisis de convergencia (tamaño de malla)	31
Tabla 6. Propiedades del plástico ABS	33
Tabla 7. Características de optimización topológica.....	42

1. INTRODUCCIÓN

Debido a que el equipo UPS Racing Team de la Universidad Politécnica Salesiana busca innovar y reducir masa del monoplace, nace la necesidad de diseñar y construir un prototipo de volante más ligero para un vehículo fórmula SAE.

El uso de programas computacionales ha tomado lugar con fuerza en la ingeniería para el diseño de elementos mecánicos, de esta manera el avance tecnológico contribuirá a la obtención de un prototipo ligero sin perjudicar la resistencia estructural de la geometría final.

Este proyecto técnico se presenta de la siguiente manera:

La fundamentación teórica describe brevemente a la competición y al sistema de dirección para vehículos tipo fórmula SAE. Además presenta parte del reglamento correspondiente al volante de dirección, establecido por la Sociedad de Ingenieros Automotrices (2016 Formula SAE Rules).

También se hace referencia a manufactura de prototipos (procesos aditivos y/o sustractivos) y a los diferentes tipos de optimización estructural. Finalmente se describe el estado del arte, abarcando información acerca de elementos mecánicos fabricados mediante impresión 3D.

El marco metodológico se refiere netamente al diseño del prototipo, aplicando optimización estructural topológica a la geometría por medio del software HyperMesh. Además se proponen consideraciones de los parámetros necesarios antes de aplicar esta técnica de optimización. Posteriormente, se establece una metodología para realizar un diseño que garantice resultados satisfactorios para el piloto y que estén dentro de rangos aceptables.

Finalmente se presentan los resultados del prototipo del volante de dirección con su respectivo análisis estructural, comparación entre masa inicial y final, etc.

2. PROBLEMA

Se requiere un volante ligero que tenga características específicas de diseño que ayuden al piloto durante toda la competición, además es necesario que el prototipo del volante de dirección cumpla con todos los parámetros establecidos en el reglamento de la Sociedad de Ingenieros Automotrices (SAE).

Este proyecto técnico se desarrolla para el Grupo de Investigación en Ingeniería de Transporte GIIT, de la carrera de Ingeniería Mecánica Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana, a través de la línea de investigación de Diseño Mecánico Automotriz, el mismo que servirá de guía para diseños futuros; de esta manera el UPS Racing Team podrá optimizar tiempo para diseñar o adquirir el volante para el nuevo monoplaza.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo General:

- Diseñar un prototipo de volante para un vehículo tipo fórmula SAE mediante técnicas de optimización estructural.

3.2 Objetivos Específicos:

- Fundamentar teóricamente el sistema de dirección para vehículos tipo fórmula SAE.
- Diseñar el prototipo del volante de dirección mediante técnicas de optimización estructural.
- Construir el prototipo del volante de dirección.

4. REVISIÓN DE LA LITERATURA O FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 La competencia Fórmula SAE

En 1978 se discutió sobre una variante en el evento del Mini Baja; en este evento se destacaba el diseño del chasis, pero muchos estudiantes querían trabajar en los motores también. Desde ese entonces la reglamentación inicial tuvo variantes que permitieron a los estudiantes intervenir en otros sistemas, de esta manera se logró tener mayor aceptación por parte de otros equipos; y así es como en el año 1979 se logra el inicio de la primera competición llamada Fórmula SAE. [1]

Fórmula SAE lleva a los estudiantes fuera del aula de clase y les permite aplicar la teoría en la vida real, abarcando la investigación, diseño, fabricación, pruebas, desarrollo, comercialización, administración y finanzas, es decir todos los aspectos que engloban a la industria automotriz.



Figura 1. 1 Monoplaza FSAE “UPS Racing Team” [2]

Esta competencia de diseño es organizada por la SAE Internacional para estudiantes de Ingeniería. El resultado final debe ser un monoplaza que cumpla con todas las especificaciones de diseño, construcción y rendimiento que exige la sociedad de Ingenieros Automotrices - Society of Automotive Engineers (SAE). [3]

En la reglamentación existen muy pocas restricciones para el diseño general del vehículo monoplaza, por lo que los equipos tienen la flexibilidad y la libertad de expresar su creatividad e imaginación en sus diseños.

El desafío en general para todos los equipos, es el de construir un vehículo que pueda competir con éxito acatando la reglamentación de la SAE.

4.2 Innovación en la competencia Fórmula SAE

La Fórmula SAE estándar desde al año 2010 ha tratado de incluir monoplazas eléctricos en esta competición, con el fin de promover el uso de nueva tecnología para estos vehículos. Por esta razón en la actualidad se ha organizado eventos como el “**Formula Hybrid**” y el “**Formula SAE Electric**”; de alguna manera motivando a los equipos a ir a la par con el desarrollo tecnológico del campo automotriz.

4.3 Configuración y partes del sistema de dirección FSAE



Figura 1. 2 Configuración y partes de sistema de dirección de un FSAE [4]

4.3.1 Volante de dirección [5]

El propósito del volante de dirección es transmitir una fuerza tangencial a la columna de dirección con la mayor precisión posible. Este elemento está ubicado dentro del

cockpit con una geometría dada según el estudio que se realizará para lograr el mejor posicionamiento del piloto en el monoplaza.

Una característica importante que debe tener el volante de un monoplaza Fórmula SAE es la ergonomía. Al diseñar o adquirir este elemento es necesario tomar en cuenta principios ergonómicos en tres áreas: diámetro de agarre, diámetro del volante y el material.

El diámetro de agarre es donde el piloto coloca sus manos para maniobrar el monoplaza, mientras que el diámetro del volante determina la disposición con la que se puede maniobrar el vehículo. El material debe ser seleccionado en base al confort del piloto; de esta manera se desea reducir la fatiga durante la competición.



Figura 1. 3 Volante de dirección de un FSAE - steering Wheel [6]

4.3.2 Mecanismo de liberación

El mecanismo de liberación o desconexión rápida del volante de un Fórmula SAE debe ser de un fácil accionamiento. La finalidad de este mecanismo es la de acoplar o desacoplar el volante con la columna de dirección en cuestión de fracciones de segundos; pero cuando estos elementos estén acoplados deben estar 100% seguros.

Existe una gran variedad de estos mecanismos, y la selección depende del diseño que tenga el sistema de dirección. Generalmente estos vehículos utilizan mecanismos de liberación accionados mediante tornillos pasantes y bolas de acero.

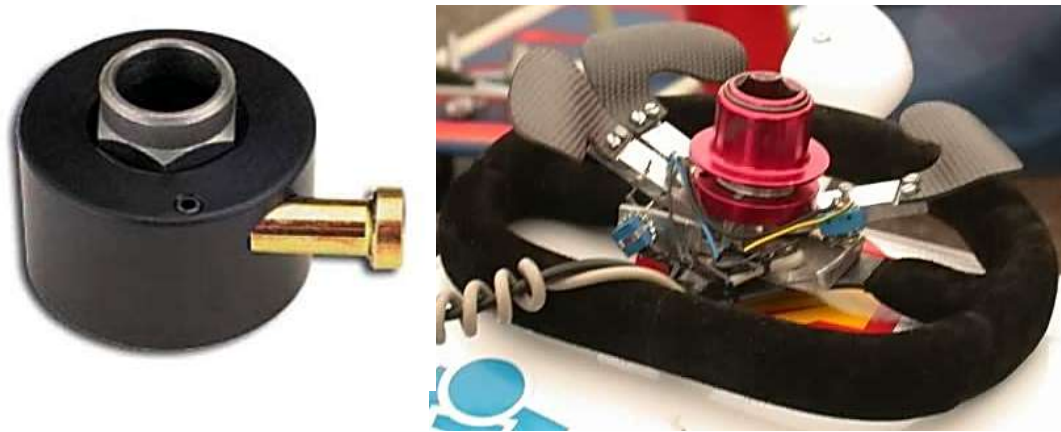


Figura 1. 4 Mecanismos de desconexión rápida-Quick disconnect [6]
mechanisms

4.3.3 Columna de dirección

Es un eje articulado o no (depende del diseño de monoplaça) que une el volante con el mecanismo del sistema de dirección. La columna de dirección está sometida a esfuerzos de torsión y compresión generadas por el giro del volante y el movimiento del vehículo. [5]

En un monoplaça SAE como en cualquier vehículo, la columna de dirección se encarga de transmitir el par generado por el piloto en el volante hacia la cremallera de dirección.



Figura 1. 5 Columna de dirección de un FSAE - steering column [6]

4.3.4 Acople de dirección

El acople de dirección o llamadas también uniones universales tienen la finalidad de unir dos elementos cambiando el ángulo de conexión entre estos si es necesario, manteniendo siempre la comunicación del par que se genera en el volante de dirección.



Figura 1. 6 Acople de dirección o junta universal - Universal joint [7]

4.3.5 Cremallera

Generalmente en los Fórmula SAE se utiliza una cremallera que tenga un movimiento transversal respecto al vehículo; esta se acciona mediante un piñón que es solidario al acople y a la columna de dirección.

Este elemento recibe el par generado en el volante de dirección por el piloto, a través de la columna de dirección, y transmite el movimiento hacia los demás elementos que conforman este sistema.



Figura 1. 7 Cremallera de dirección de un FSAE [6]

4.3.6 Brazos de dirección

Los brazos de dirección son elementos intermediarios que tienen la función de transmitir el movimiento generado en la cremallera hasta las manguetas del vehículo monoplace SAE. Estos componentes deben estar diseñados para soportar esfuerzos generados por movimientos bruscos en las ruedas a través de las manguetas de dirección.



Figura 1. 8 Brazos de dirección de un FSAE - steering arms [8]

4.3.7 Manguetas

Las manguetas de un vehículo fórmula SAE, son componentes transcendentales y que sirven de enlace entre elementos del sistema de dirección y la suspensión del monoplace.

Estos elementos generalmente forman un solo conjunto con la mordaza de freno. Además tienen centros de rueda que sirve de acople para el tren de fuerza motriz que acciona las ruedas traseras. [9]



Figura 1. 9 Mangueta de un FSAE [8]

4.4 Reglamento Fórmula SAE

Antes de diseñar el prototipo de volante es necesario conocer de manera clara la reglamentación que establece la Sociedad de Ingenieros Automotrices. Además de conocer las especificaciones para el diseño o adquisición de un volante, también se deben tomar en cuenta otros parámetros que intervienen en el sistema de dirección.

El reglamento de la Fórmula SAE 2015 estará en vigencia durante las competencias del 2015 y 2016, sin embargo si los organizadores y el comité de reglamento FSAE tienen la necesidad de realizar cambios, ellos tienen la autoridad para hacerlo. [10]

Parte del reglamento que se muestra a continuación fue seleccionado del “**2016 Fórmula SAE Rules**” y traducido al español.

4.4.1 Reglas del chasis en general [10]

- **T6.5 Dirección**

T6.5.3 Juego libre en la dirección se limita a siete grados (7°) totales, medidos en el volante.

T6.5.4 El volante debe estar conectado a la columna mediante una desconexión rápida. El conductor debe ser capaz de operar la desconexión rápida mientras está en la posición normal de conducción con los guantes puestos.

T6.5.6 El volante debe tener un perímetro continuo que sea casi circular o casi ovalado. El perfil del perímetro exterior puede tener algunas secciones rectas, pero no secciones cóncavas. “H”.

T6.5.7 En cualquier posición angular, la parte superior del volante no debe ser mayor que la parte superior del aro frontal. Ver figura 1.10.

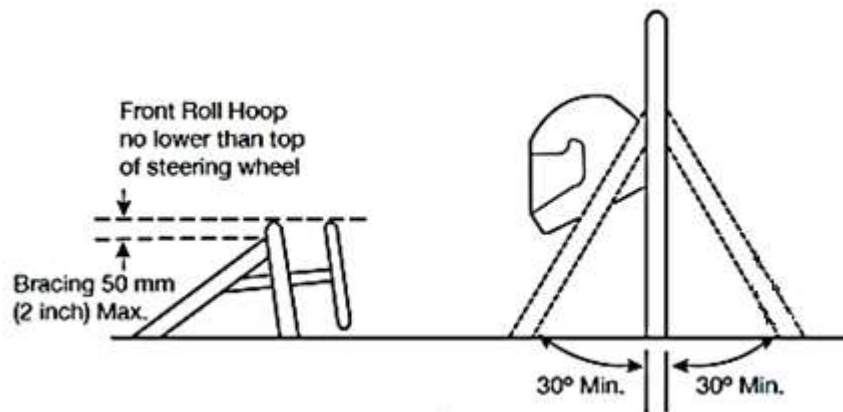


Figura 1. 10 Posición del volante en un FSAE [10]

4.5 Manufactura de Prototipos

4.5.1 Definición de prototipo

Un prototipo es una aproximación o la primera representación del producto final. Que sometido a pruebas reales y a un proceso de diseño mediante iteraciones se logrará obtener un elemento final con calidad, y que cumpla con todos los parámetros establecidos de diseño.

4.5.2 Manufactura aditiva/sustractiva

La manufactura aditiva/sustractiva (additive manufacturing/subtractive manufacturing), son procesos en donde se manipula el material a escala micrométrica; adicionando material por capas o sustrayéndolo por medio de sistematizaciones repetidas, de tal forma que al final de este proceso se logre obtener un elemento sólido. [11]

4.5.3 Prototipado rápido

En 1987 nació el sistema de prototipado rápido, con la introducción de la tecnología de estereolitografía. El prototipado rápido es conocido también como impresión 3D, es un conjunto de métodos para fabricar prototipos de ingeniería diseñados en un software CAD en un tiempo mínimo de construcción.

Los métodos más conocidos son: modelado por deposición fundida (FDM), fabricación por haz de electrones (EBF3), Sinterizado selectivo por láser (SLS), estereolitografía (SLA), etc.



Figura 1. 11 Impresión 3D elementos mecanicos [12]

Como se ha mencionado anteriormente el prototipado rápido es capaz de fabricar modelos 3D en cuestión de horas, pero esto depende del tipo de máquina que se utilice, del tamaño y forma de la pieza.

Dentro del ámbito automotriz, la empresa británica 3TRPD imprimió una caja de cambios para vehículos de carrera en 3D. Esta caja de cambios es un 30% más ligera que las convencionales, además tiene un acabado interior perfeccionado que permite cambios de marcha más rápidos. [13]

El prototipado rápido se clasifica con base en la forma del material inicial: basado en líquidos, basado en sólidos, basado en polvos. Para la construcción del prototipo de volante se utilizará la impresión 3D mediante plástico ABS.

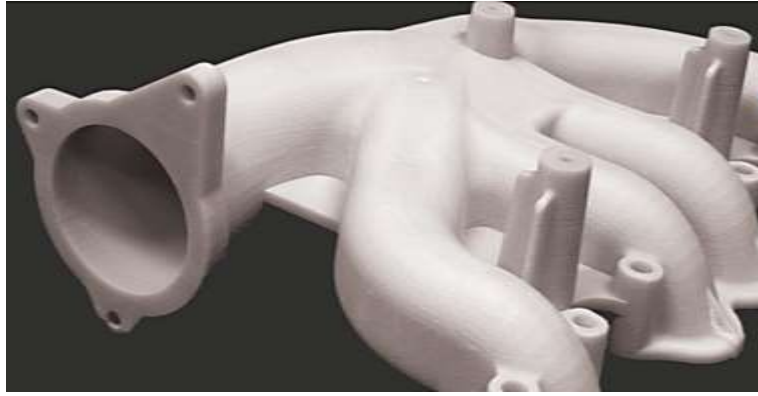


Figura 1. 12 Impresión en tres dimensiones de un multiple [12]



Figura 1. 13 Impresión en tres dimensiones de un prototipo para el interior de un vehículo [14]

4.6 Optimización en el diseño

Antes de la aparición de software de análisis y diseño; para crear o diseñar un elemento era necesario únicamente tener experiencia. Al paso del tiempo y con la evolución de la tecnología computacional se crearon herramientas que permiten a los diseñadores optimizar y perfeccionar cada vez más sus diseños.

Durante algunos años en diferentes áreas de ingeniería, se han creado técnicas, teorías, y métodos de optimización, que de alguna manera fusionadas con el avance tecnológico logran resolver problemas complejos, alcanzando soluciones que se aproximan a las óptimas.

De esta manera se ha logrado incrementar el uso de técnicas de optimización durante el proceso de diseño, que están descritas a continuación.

4.7 Optimización estructural “SO”

“La optimización estructural es una fusión de las áreas de ingeniería, matemáticas, ciencia y tecnología que tienen como objetivo llevar a cabo la mejor función de una estructura, como pueden ser un puente, un vehículo espacial o simplemente un elemento mecánico” [15]

La optimización estructural (structural optimization), es un campo amplio de análisis conformado por distintos métodos, que son utilizados básicamente para obtener un resultado óptimo de diseño y consecutivamente determinar cuál es el mejor diseño posible. Estos métodos son utilizados ampliamente en la industria automotriz, energética, aeronáutica, etc.

Las ventajas que tiene la optimización estructural en general son:

- Proceso de diseño rápido.
- Elementos con menor peso.
- Innovación en los diseños.

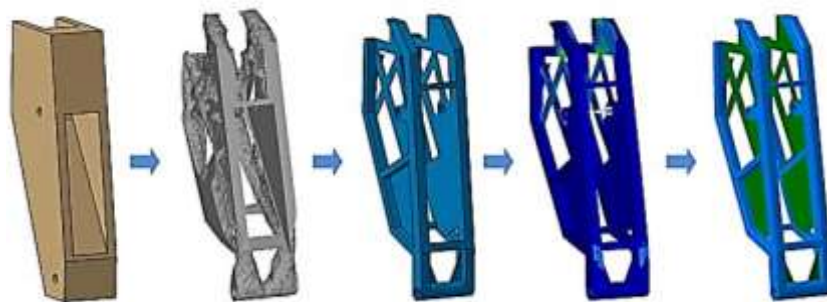


Figura 1. 14 Optimización estructural de un soporte “OS” [16]

Para llevar a cabo la optimización de cualquier elemento es necesario seguir un proceso que contiene tres componentes principales, que son:

- **Objetivo:** Es el propósito de la optimización.

- **Restricciones:** Se define el comportamiento admisible del elemento dentro del sistema.
- **Variables:** Son parámetros de diseño; estos deben ser modificados para conseguir la mejor de varias configuraciones posibles.

Los diferentes métodos de optimización estructural varían de acuerdo a las variables que se utilizan en el diseño. Estas variables (densidad de los elementos, propiedades de los elementos estructurales, topología de la estructura) están constituidas como el origen de la optimización estructural topológica, de tamaño y de forma respectivamente. Véase figura 1.15. [17].

Por lo tanto las variables de diseño que pueden ser continuas o discretas, son consideradas como límites que controlan la forma de la estructura a la que se va a optimizar.

Las variables continuas toman un determinado valor que pertenece al rango de variación en una región; no siendo así con las variables discretas, estas solamente toman valores estrictos.

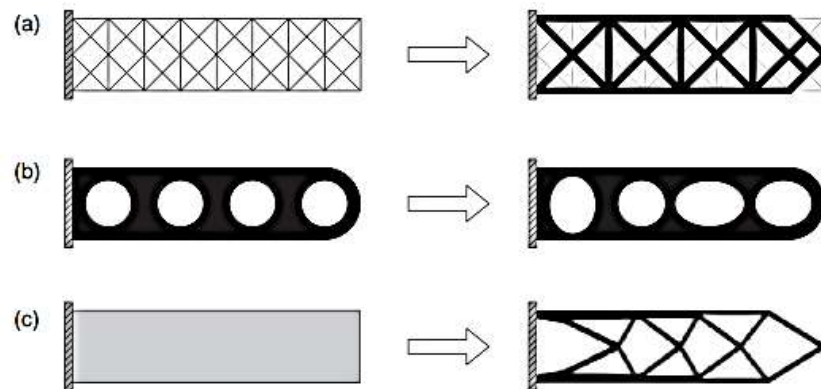


Figura 1. 15 Tipos de optimización estructural “OS” [18]

- Optimización estructural de tamaño (a)
- Optimización estructural de forma (b)
- Optimización estructural topológica (c)

4.7.1 Optimización estructural topológica

La optimización estructural topológica es un método cuyo objetivo es distribuir el material en el dominio de una manera óptima, tomando en cuenta las condiciones de carga y restricciones. Las restricciones son los límites que toman los valores de las variables de diseño.

En este método la optimización se inicia modificando el dominio inicial donde se desarrolla la estructura, es decir se crean concavidades mediante supresión de elementos en puntos estratégicos de acuerdo al diseño del elemento.

4.7.2 Optimización estructural de tamaño

La optimización estructural de tamaño determina las medidas óptimas de la sección transversal que compone a la estructura, pudiendo ser al área o espesor del elemento a optimizar.

En este método las variables de diseño son limitadas y de alguna manera se facilita la optimización en comparación con otros métodos. Las variables de diseño están seriamente relacionadas con las propiedades geométricas de la sección transversal de la estructura.

4.7.3 Optimización estructural de forma

Este método determina la forma óptima de cualquier estructura que tenga una topología fija, tratando de minimizar el peso del elemento a optimizar. Las variables de diseño utilizadas en este método están relacionadas directamente a la forma de la estructura, es decir, estas variables permiten redefinir la geometría inicial de la estructura.

4.8 Estado del arte en la fabricación de componentes mecánicos para vehículos FSAE y empresas automotrices mediante manufactura aditiva/sustractiva.

La tendencia durante estos últimos años es diseñar y construir elementos mecánicos con mejores características de diseño y mucho más eficientes en el menor tiempo posible.

El desarrollo del área automotriz abarca también a los vehículos monoplace FSAE; los equipos que ingresan a esta competencia tratan de superar la participación realizada anteriormente, optimizando sus diseños y buscando nuevas formas de fabricar elementos que componen al monoplace.

En lo que se refiere a la optimización del diseño, existen muchos software para obtener el diseño que se desea. Pero actualmente la tendencia en lo que se refiere a la construcción de elementos mecánicos es la impresión 3D; permitiendo mayor flexibilidad de manufactura en tiempos reducidos y con costos bajos dependiendo del elemento.

- El monoplace Fórmula Student Cantabria, de la Universidad de Cantabria de España implementó la impresión 3D en la manufactura del volante de dirección de su vehículo.



Figura 1. 16 Prototipo del volante de dirección del monoplace [19]



Figura 1. 17 Modelo CAD del volante de dirección del monoplaza [19]

- Estudiantes de la escuela de automóviles y de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Changsha Ciencia y Tecnología (CSUST) de China, presentaron un monoplaza en la Fórmula Student of China (FSC) con elementos impresos en 3D.

Trataron de reducir masa en elementos como el volante de dirección y el sistema de admisión de aire utilizando la tecnología de impresión 3D.



Figura 1. 18 Sistema de admisión de aire del FSAE de la [20]
CSUST



Figura 1. 19 Volante de dirección del FSAE de la CSUST [20]

- Para el Ford GT los diseñadores e ingenieros de esta empresa utilizaron técnicas de impresión 3D para crear el volante de este vehículo, además de tener las especificaciones estándar adicionaron controles de conducción y el mando para el cambio de velocidades del vehículo, similar a los volantes de los fórmula 1.

Esta técnica permitió al equipo de trabajo probar rápidamente una gran variedad de opciones reduciendo significativamente el tiempo de desarrollo.



Figura 1. 20 Volante de dirección del Ford GT [21]

- El grupo BMW con la experiencia que tiene en la aplicación de esta técnica, no solamente produce partes de sus vehículos sino que también en el 2014 presento una herramienta ergonómica impresa en 3D para el ensamble de sus vehículos.

Durante algunos años BMW ha incorporado en sus vehículos de carreras DTM bombas de agua fabricadas mediante técnicas de impresión 3D. La última bomba de agua con estas características fue instalada en este último año. Este elemento es de alta precisión y está sometido a elevadas condiciones de funcionamiento, de tal manera que consta de una aleación de aluminio, producida mediante fabricación aditiva de partes metálicas. [22]



Figura 1. 21 Parte de la bomba de agua del BMW group [22]

- El proyecto “Strati” consiguió el primer premio en el concurso 3D Printed Car Desing. Este fue el primer vehículo construido mediante impresión 3D que funciona.

No todos los componentes del Strati son impresos, pero el chasis, la carrocería y el interior del vehículo fueron construidos mediante esta técnica. Este vehículo tiene un motor eléctrico que alcanza una velocidad máxima de 80Km/h y su autonomía llega a los 200 Kilómetros.



Figura 1. 22 Vehículo Strati fabricado mediante impresión 3D [23]

5. MARCO METODOLÓGICO

5.1 Metodología de diseño

Para diseñar cualquier elemento y llegar a obtener una solución viable es importante establecer una metodología de diseño. Robert Norton propuso dicho proceso en diez pasos, obteniendo excelentes resultados en el diseño de ingeniería en más de cuarenta años.

A continuación se muestra el proceso o metodología de diseño: [24]

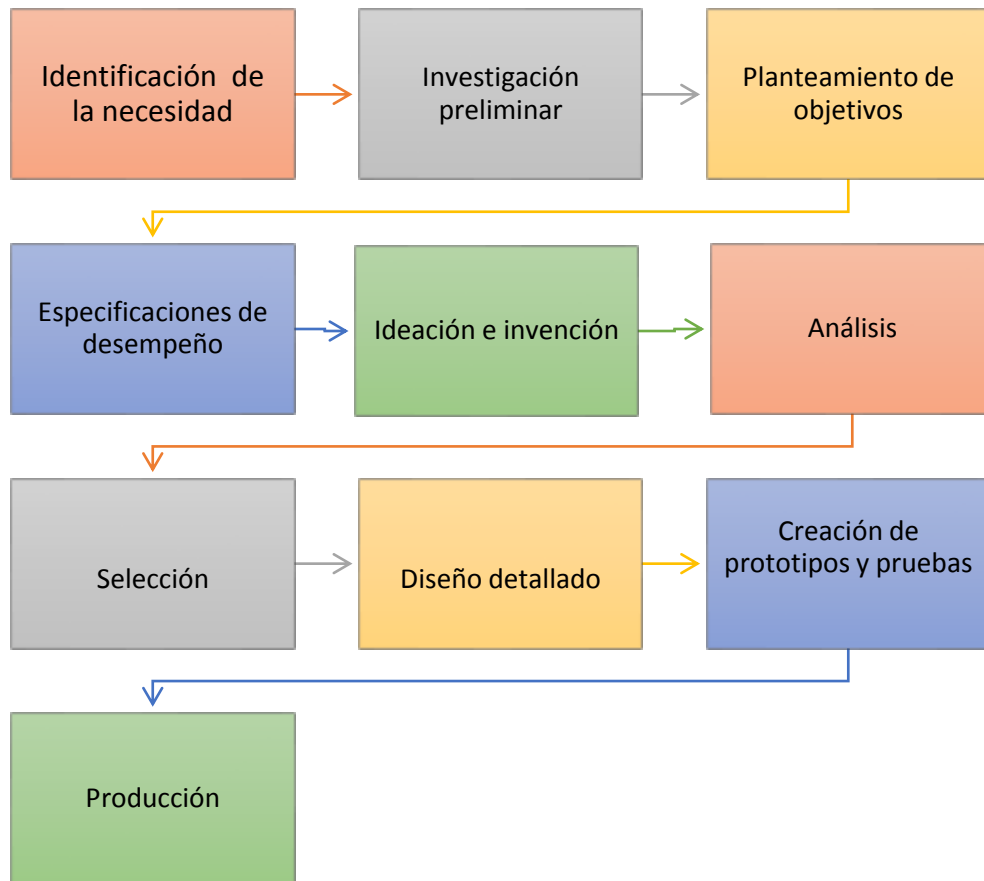


Figura 2. 1 Metodología de diseño

La metodología descrita anteriormente no es un proceso lineal sino iterativo; es decir que se puede retomar un estado previo para establecer otras ideas que ayuden a solucionar problemas que se presenten en cada paso.

5.2 Aplicación de la metodología de diseño

Durante la etapa de diseño del prototipo del volante de dirección para el vehículo Fórmula SAE, se utilizará la metodología o el proceso de diseño propuesto por Robert Norton descrito anteriormente.

5.2.1 Identificación de la necesidad

“Se requiere diseñar y construir un prototipo del volante de dirección para un monoplaza FSAE”

5.2.2 Investigación preliminar

Para conocer información actual sobre aspectos de diseño y construcción de prototipos de volantes de dirección, es necesario realizar una investigación del estado del arte, como se mostró en la revisión de los fundamentos teóricos.

5.2.3 Planteamiento de objetivos

El objetivo principal es diseñar un prototipo del volante de dirección para un monoplaza FSAE. Este elemento debe tener especificaciones de diseño que cumplan con el reglamento establecido en cada competición. En este caso el diseño debe regirse a la reglamentación de la Sociedad de Ingenieros Automotrices - Society of Automotive Engineers, (SAE).

5.2.4 Especificaciones de desempeño

El diseño del prototipo de volante debe cumplir con ciertos parámetros, que indican lo que el sistema debe hacer; estos son:

Forma y posición:

- El volante debe tener un perímetro continuo que sea casi circular o casi ovalado. El perfil del perímetro exterior puede tener algunas secciones rectas, pero no secciones cóncavas, es decir en forma de “H”.
- En cualquier posición angular, la parte superior del volante no debe ser mayor que la superficie del aro frontal del monoplaza.

Desmontaje fácil:

- El volante debe estar conectado a la columna de dirección mediante una desconexión rápida. El conductor debe ser capaz de operar este mecanismo mientras está en la posición normal de conducción con los guantes puestos.

Seguridad:

- El juego libre en el sistema de dirección se limita a siete grados (7°) totales, medidos en el volante.

Ergonomía:

- La altura del volante respecto a las piernas del piloto debe maximizarse para garantizar la ergonomía a la hora de la conducción, pero cumpliendo con la parte T6.5.7 del reglamento de la SAE.
- La distancia entre el volante y el aro frontal del monoplaza debe estar establecido de tal manera que exista un juego libre cuando este acoplado.
- El ángulo óptimo de los antebrazos del piloto respecto al volante debe ser mayor a 90° para minimizar la fatiga muscular. Véase figura 2.2 [5]

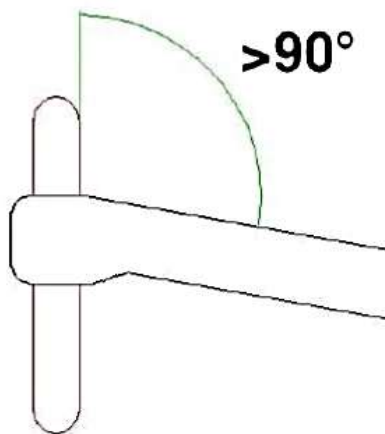


Figura 2. 2 Posición de los antebrazos respecto al volante [5]

Peso:

Dentro del reglamento no hay especificación alguna respecto al peso del volante. Depende de cada diseño y como se haya optimizado para obtener uno con el menor peso admisible, de tal manera que se logre aligerar masas del monoplaza.

5.2.5 Generación de ideas e invención

Para satisfacer las especificaciones de desempeño es necesario generar ideas y proponer soluciones factibles para el diseño, como se muestra a continuación:

Propuesta de solución para el mecanismo de liberación del prototipo del volante:

Tabla 1. Propuesta de solución para mecanismo de liberación

Propuesta de solución	Mecanismo de engranaje	Mecanismo por tornillo pasante
		

Tabla 2. Matriz de decisión para la selección del mecanismo de liberación

	Costo	Desempeño	Disponibilidad	Peso	Rango
Factor de ponderación	0.20	0.40	0.25	0.15	1.0
Mecanismo de engranaje	7 1.4	9 3.6	8 2.0	5 0.75	7.75
Mecanismo por tornillo pasante	5 1.0	8 3.2	8 2.0	4 0.6	6.8

El mecanismo de engranaje es el más factible para el prototipo de volante. El desempeño de este es mucho más eficiente a la hora del acople y desacople con la columna de dirección. El peso también es otro punto a favor, ya que este es mucho más liviano y posee un mecanismo sencillo y practico.

Propuesta de solución para el material del prototipo:

El material que se utilizará para el diseño y la fabricación del prototipo del volante de dirección, debe tener características mecánicas que satisfagan las necesidades de la geometría, a continuación se muestran dichos materiales:

Tabla 3. *Propuesta de solución para el material a utilizar en el diseño y construcción*

<i>Propuesta de solución</i>	<i>Plástico ABS</i>	<i>Poliamida (PA)</i>
		

Tabla 4. *Matriz de decisión para la selección del material*

	<i>Costo</i>	<i>Características mecánicas</i>	<i>Disponibilidad</i>	<i>Tecnología disponible</i>	<i>Rango</i>
<i>Factor de ponderación</i>	0.25	0.35	0.15	0.25	1.0
<i>Plástico ABS</i>	8 2.0	9 3.15	4 0.6	7 1.75	7.5

<i>Poliamida</i>	$\frac{6}{1.5}$	$\frac{7}{2.45}$	$\frac{4}{0.6}$	$\frac{7}{1.75}$	6.3
------------------	-----------------	------------------	-----------------	------------------	------------

Se establece que el plástico ABS es el material adecuado. Este material tiene características mecánicas que superan en algunos aspectos a la poliamida y que son significativos a la hora del diseño y construcción del prototipo. Siendo este material mucho más rígido y resistente al calor que la poliamida.

5.2.6 Diseño del prototipo de volante de dirección mediante técnicas de optimización estructural

En esta fase se desarrollará las siguientes partes de la metodología de diseño de manera iterativa: ideación e invención descrita en el punto anterior, análisis, selección y diseño detallado.

Para el diseño del prototipo se utiliza la optimización topológica. Es necesario generar una metodología de optimización que garantice obtener resultados satisfactorios, ya que de esto depende obtener una geometría que se encuentre dentro del rango aceptable. A continuación se establece una serie de pasos a seguir:

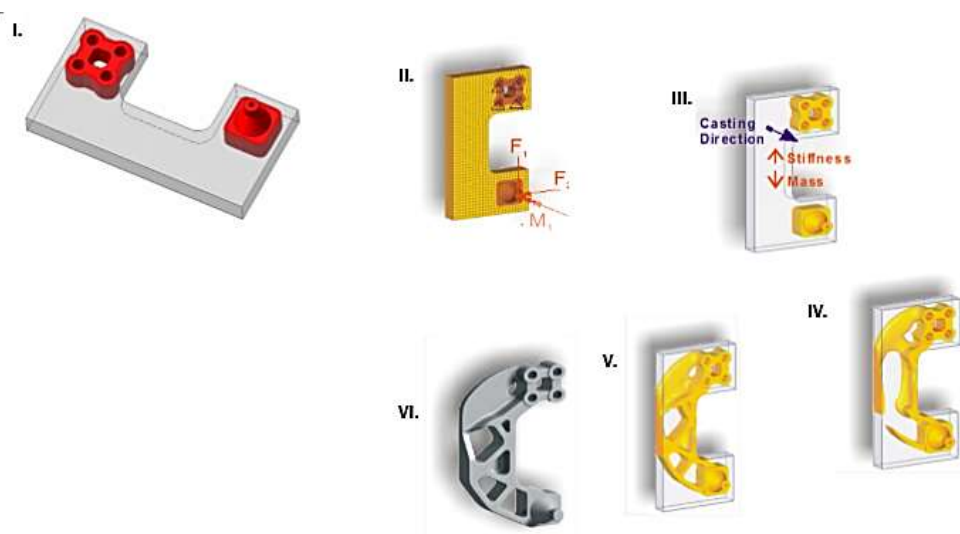


Figura 2. 3 Proceso de optimización topológica [25]

1. Modelado CAD del prototipo del volante de dirección.
2. Importar la geometría CAD (Computer Aided Design) al software CAE (Computer Aided Engineering).
3. Definir la zona de diseño y no diseño del prototipo.
4. Realizar el mallado mediante elementos finitos.
5. Definir el material y propiedades de los elementos.
6. Establecer restricciones y cargas en el modelado.
7. Definir variables de diseño, función objetivo, restricciones, respuestas.
8. Realizar la optimización topológica.
9. Interpretar los resultados.
10. Modelar la geometría optimizada.
11. Analizar y confirmar que funciona.

5.2.7 Geometría CAD

Para modelar el prototipo se utilizó el software SolidWorks 2015. Es necesario dibujar un sólido sobredimensionado ya que es la optimización topológica la que nos da la forma final de la geometría.

Las agarraderas del prototipo como se verá posteriormente es una zona de no diseño, es decir no será optimizada. Las medidas fueron establecidas de acuerdo a puntos ergonómicos y a volantes estándar utilizados para vehículos FSAE. Además las dimensiones de la parte central de la geometría fueron determinadas de acuerdo al mecanismo de liberación seleccionado anteriormente.



Figura 2. 4 Modelo de la geometría CAD del prototipo (vista frontal)

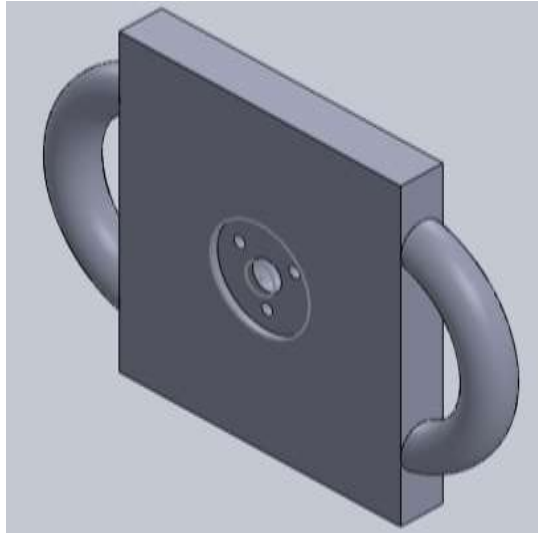


Figura 2. 5 Modelo de la geometría CAD del prototipo (perspectiva)

La geometría anterior fue una de las primeras que se utilizaron para establecer la optimización topológica. Como se mencionó anteriormente este es un proceso iterativo, y fue necesario rediseñar cada una de las geometrías desde SolidWorks después de cada optimización hasta obtener una que satisfaga a los objetivos planteados. Además de que el prototipo cumpla con el reglamento establecido por la SAE debe ser estético.

5.2.8 Zona de diseño y no diseño del prototipo

Antes de empezar a definir zonas de diseño y no diseño es necesario importar la geometría desde SolidWorks hasta HyperMesh, para ello es necesario guardar el modelo CAD con una extensión IGES y posteriormente importar al software CAE.

Para determinar posibles errores en la geometría se analizó la topología 3D del sólido, si el modelo no tiene ningún error se observa todas las líneas del elemento de color verde, como se muestra a continuación:

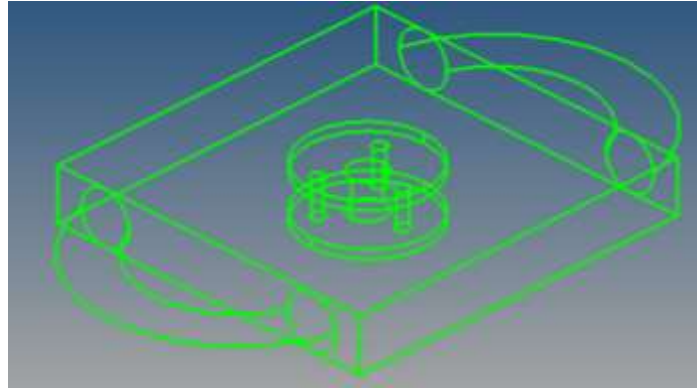


Figura 2. 6 Topología 3D de la geometría en Hypermesh

Si hay líneas rojas dentro de la geometría posiblemente ocasionada por uniones defectuosas, líneas y superficies repetidas, etc., es necesario redibujar la geometría desde el software CAD. Estos errores producen problemas durante el mallado.

Seguidamente parte de la geometría fue sometida a superficies de partición, esto es necesario ya que de otra forma no podría dividir en zonas de diseño y no diseño, ya que es un elemento sólido. Cuando están creadas estas superficies se denotan por líneas amarillas claramente visibles dentro de la geometría. Ver figura 2.7.

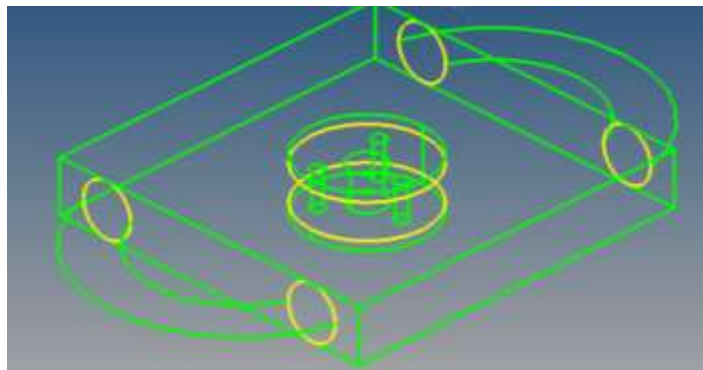


Figura 2. 7 Topología 3D de la geometría con superficies de partición

Finalmente se genera una zona de diseño y no diseño organizando los elementos del sólido. El comando “organize” es el encargado de realizar este proceso. Las agarraderas y la parte central de la geometría fueron establecidas como una zona de no diseño, mientras que la superficie sobrante como una zona de diseño. Ver figura 2.8.

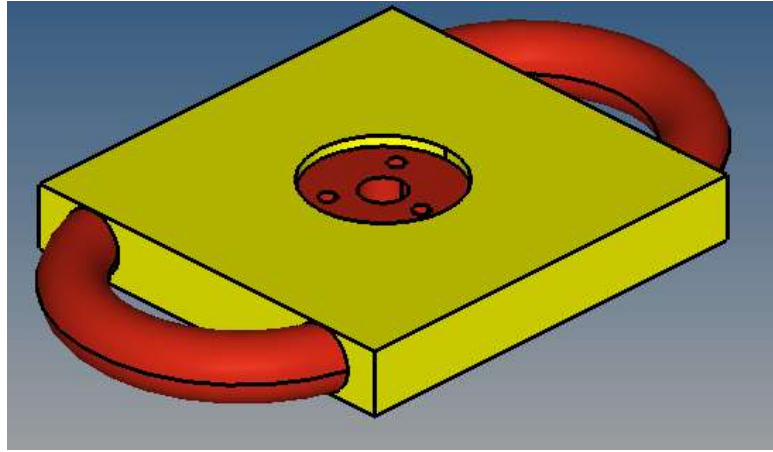


Figura 2. 8 Geometría del solido dividido en zona de diseño y no diseño

5.2.9 Mallado de la geometría mediante elementos finitos

Para obtener un mallado optimo, el tamaño de los elementos que conforman la malla deben ser seleccionados luego de un análisis de convergencia, este proceso es iterativo, es decir se repite el mismo proceso pero con distintos tamaños de los elementos.

El software posee algunos tipos de elementos finitos, el uso de estos depende netamente del tipo de geometría que se vaya a mallar, es decir si es más o menos compleja. En la actualidad no existe una diferencia significativa entre los elementos hexaédricos y tetraédricos que son los más utilizados en Hypermesh, los dos tienen características específicas que determinan un mallado preciso.

Se utilizaron elementos tetraédricos para mallar la geometría. Como resultado del análisis de convergencia se concluyó que el tamaño de cada elemento de malla fuera de 3mm. Para secciones dentro de la geometría en donde existen curvaturas y circunferencias se utilizó el comando “curvature” con ángulos de 30° y “proximity” con (2-4) mm para el mallado. A continuación se presenta el análisis de convergencia:

Tabla 5. Análisis de convergencia (tamaño de malla)

ANÁLISIS DE CONVERGENCIA	
Tamaño de elemento (mm)	Esfuerzo (MPa)
3	0,9616
4	0,9656
6	0,9588
8	0,7871
10	0,4265

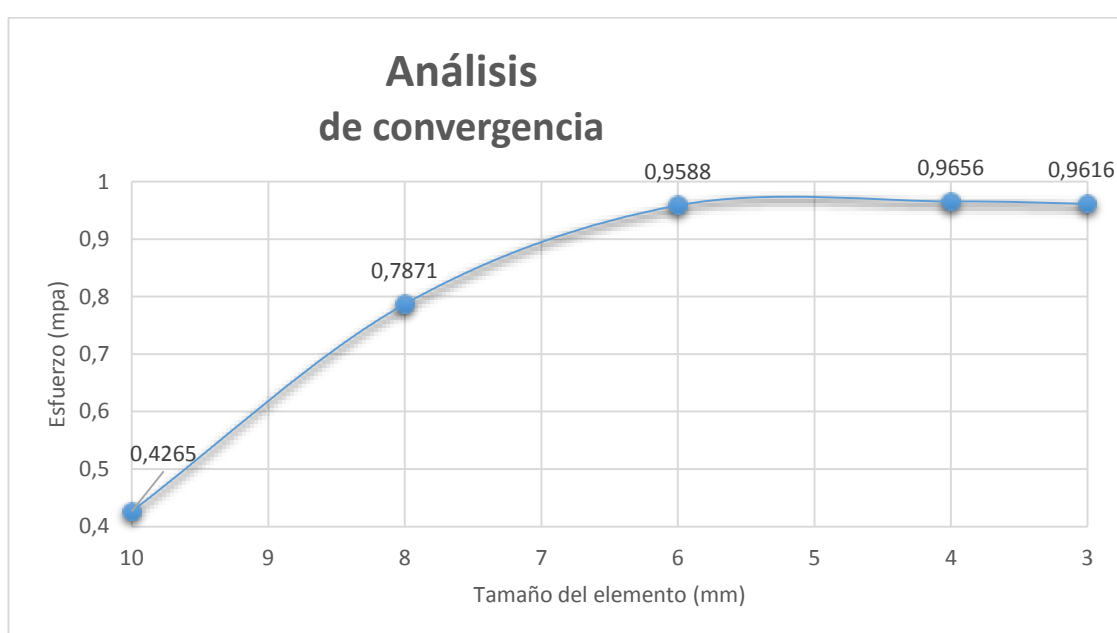


Figura 2. 9 Resultado del análisis de convergencia

La diferencia entre esfuerzos (MPa) debe ser de un 5% para determinar el tamaño correcto de los elementos de malla. En este caso la diferencia entre la malla de (3-4) mm fue de 0.41%, es decir, se encuentra dentro del rango que se sugiere.

El tamaño de los elementos de malla fue establecido en 3mm, como se mencionó anteriormente. La geometría del prototipo se malló con un total de 129,223 elementos tipo tetra.

Finalmente se analizó y reviso la calidad de los elementos finitos de la geometría, obteniendo como resultado una malla que satisface las necesidades de la estructura, dando paso a un análisis estático correcto.

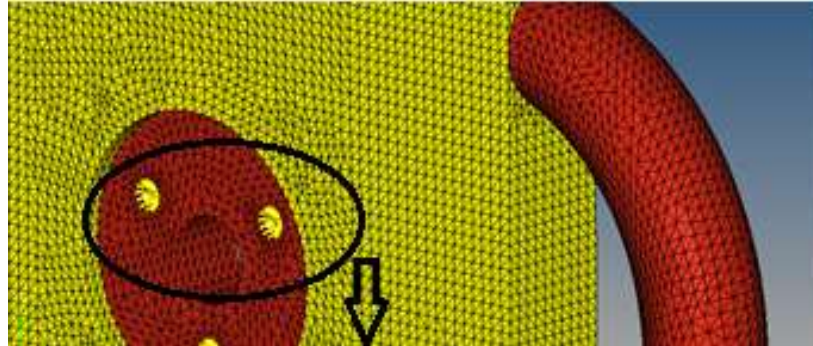


Figura 2. 10 Detalle del mallado con tetraedros de la parte central de la geometría

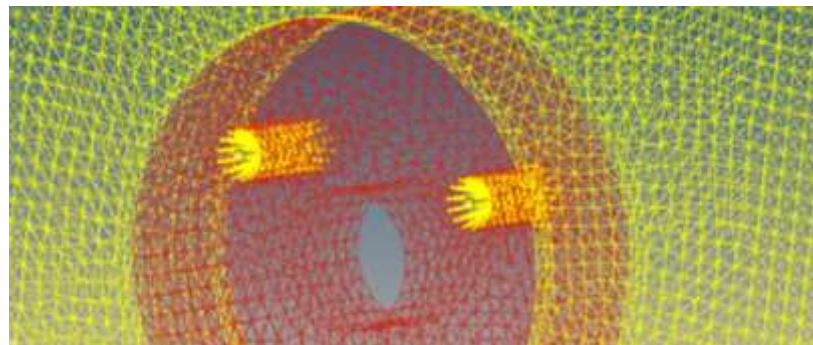


Figura 2. 11 Detalle del mallado con tetraedros de la parte central de la geometría ocultando el sólido

5.2.10 Material utilizado para el diseño y construcción del prototipo

Se utilizará plástico ABS para el análisis y construcción del prototipo del volante de dirección. El ABS es un polímero amorfo; el modelo matemático de este material es isotrópico. Hyperworks aún no considera modelos matemáticos de materiales que consideren todas las variables existentes en la impresión 3D de un componente.

Para el diseño del primer prototipo se consideró al plástico ABS como un material de características isotrópicas. Se requiere un análisis más detallado de las propiedades del material en función de las características de impresión 3D, ya que dependiendo de los parámetros de impresión el comportamiento del material se vuelve ortotrópico o anisotrópico; debido a esto se sugiere realizar a futuro este trabajo en una nueva iteración de diseño del volante.

Este material generalmente es utilizado para la fabricación de elementos mediante impresión 3D, ya que tiene algunas ventajas respecto a la poliamida.

Una de las ventajas del plástico ABS sobre la PLA es que los objetos impresos en 3D son rígidos y menos quebradizos, además de tener una excelente resistencia a altas temperaturas. Existe una gran variedad de colores para este plástico, sin tener diferencias entre sí de sus propiedades. Además este material permite una impresión en 3D de alta calidad, incluso en partes complejas de la geometría.

Para garantizar que el resultado del análisis estático sea el correcto, es necesario prestar atención a las unidades de las propiedades del material (tabla 6), ya que en el software no están establecidas, a continuación se muestran las necesarias para el análisis.

Tabla 6. Propiedades del plástico ABS

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad (ρ)	1.04×10^{-9}	Ton/mm ³
Módulo de Young (E)	1700	Mpa
Coeficiente de Poisson (ν)	0.33	-----
Esfuerzo de cedencia (A)	32	Mpa

5.2.11 Cargas aplicadas a la geometría

El volante de dirección del monoplaza está sometido a dos tipos de fuerzas. El par necesario para girar la dirección y a fuerzas axiales. Cuando el vehículo está en pista el par es muy pequeño, por esta razón se realizó los cálculos de manera estática, es ahí donde se puede calcular el valor más alto aplicado al volante de dirección.

La primera parte del cálculo está determinada en base a datos del equipo UPS Racing Team, de esta manera se establece la desaceleración del monoplaza para posteriormente calcular la transferencia de cargas longitudinales.

- **Desaceleración del monoplaza [26]**

La ecuación que determina la desaceleración de un cuerpo es la siguiente:

$$-a = \frac{v_f - v_i}{t} \quad (2.1)$$

Donde:

Vf: Velocidad final=0Km/h

Vi: Velocidad inicial=115km/h=31.94m/s

t: Tiempo=3seg.

$$-a = -10.64 \frac{m}{s^2}$$

$$-a = -1.085 G$$

- **Transferencia de masa longitudinal [26]**

Para determinar la transferencia de masa longitudinal del monoplaza, se toma como referencia las ecuaciones propuestas por William F. Milliken and Douglas L. Milliken, “RACE CAR VEHICLE DYNAMICS”, que son:

$$\Delta f_x = \frac{h \cdot m \cdot (\pm a)}{l_t} \quad (2.2)$$

Donde:

$\Delta f(a,b)$ = Incremento de la carga en las ruedas delanteras o posteriores debido al cambio de momento generado por la desaceleración del monoplaza

l_t = Longitud total entre las ruedas

h = Altura del centro de gravedad medido desde el piso

m = Masa del monoplaza (Kg)

$(\pm a)$ = Aceleración/desaceleración

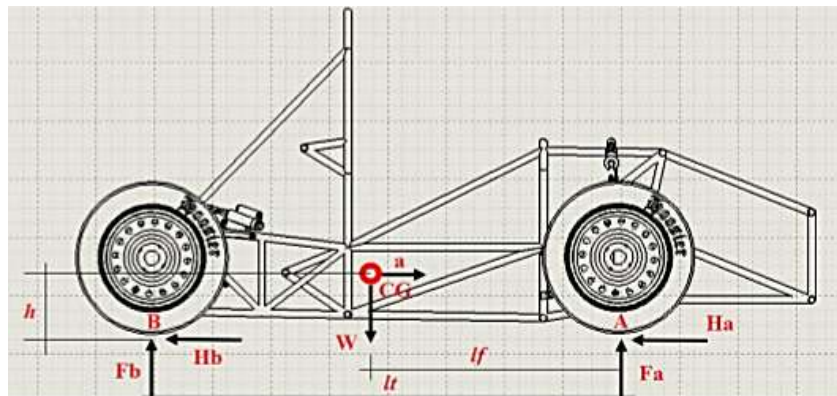


Figura 2. 12 Diagrama de cuerpo libre del monoplaza UPS Racing Team [27]

Donde:

$l_t = \text{Batalla} = 1.6\text{m}$

$l_f = \text{Distancia del eje delantero al CG} = 0.72\text{m}$

$h = \text{Altura del CG} = 0.323\text{m}$

$m = \text{Masa total del monoplaza} = (\text{vehículo } 297\text{Kg}) + (\text{conductor } 60\text{Kg}) = 357\text{Kg}$

$$\Delta f a = 766.81 \text{ N}$$

- **Carga total vertical del monoplaza [26]**

$$\begin{aligned} \text{Carga total vertical} &= \text{Peso del vehiculo} + \\ &\text{Transferencia de masa longitudinal} \end{aligned} \quad (2.3)$$

$$\text{Carga total vertical} = 3502.17 \text{ N} + 766.81 \text{ N}$$

$$\text{Carga total vertical} = 4268.98 \text{ N}$$

- **Calculo de reacciones y fuerzas de fricción de cada rueda [26]**

Es necesario un D.C.L en donde estén involucradas las fuerzas y distancias necesarias para aplicar las ecuaciones de la segunda ley de Newton:

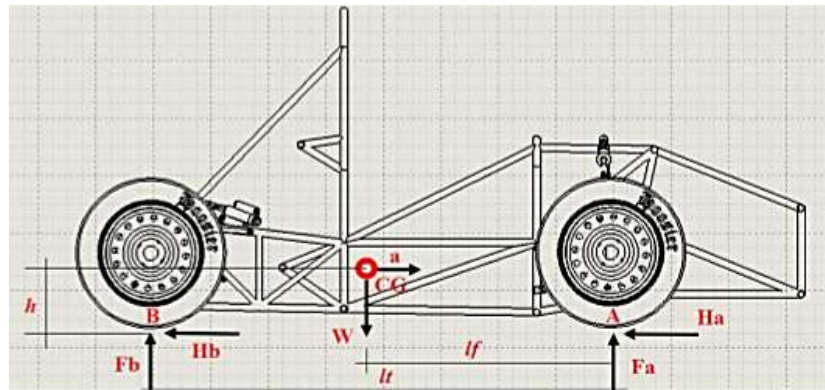


Figura 2.12 Diagrama de cuerpo libre del monoplaza UPS Racing Team [27]

$$\sum f_x = m * a \quad (2.4)$$

$$\sum f_y = m * a \quad (2.5)$$

$$H_a + H_b = m * (\pm a)$$

$$F_a + F_b = w * g$$

$$\curvearrowright + \sum MA = I \quad (2.6)$$

$$Fb * lt + W * a * Hc + W * g * lf = \frac{4Ir * a}{r \sin}$$

Despejando Fb se obtiene:

$$Fb = \frac{\frac{4Ir * a}{r \sin} - W * a * Hc + W * g * lf}{lt}$$

$$Fb = 840.38 \text{ N}$$

Donde:

Fa=Normal en el punto A

Fb=Normal en el punto B

Ha=Fuerza de fricción en el punto A

Hb=Fuerza de fricción el punto B

M= Masa total del monoplaza “vehículo + conductor” = 357Kg

(±a)= Desaceleración máxima

g= Gravedad = 9.81m/s²

lt= Batalla = 1.6m

lf= Distancia del CG al eje delantero = 0.72m

h= Hc = Altura del CG medido desde el piso = 0.323m

rdin= Radio dinámico = 0.23m

Ir= Inercia de la rueda = 0.27Kg*m²

μ= Coeficiente de fricción = 1.6

$$\sum fy = m * a \quad (2.7)$$

$$Fa + Fb = w * g$$

$$Fa = w * g - Fb$$

$$Fa = 2661.79 \text{ N}$$

Fuerza de fricción en A:

$$Ha = \mu * Fa \quad (2.8)$$

$$Ha = (1.6) * (2661.79)$$

$$Ha = 4258.86 \text{ N}$$

$$Hb = \mu * Fb \quad (2.9)$$

$$Hb = (1.6) * (840.38)$$

$$Hb = 1344.60 \text{ N}$$

- **Calculo de la fuerza necesaria para girar los neumáticos [28]**

Es necesario un D.C.L del neumático delantero como se muestra a continuación:

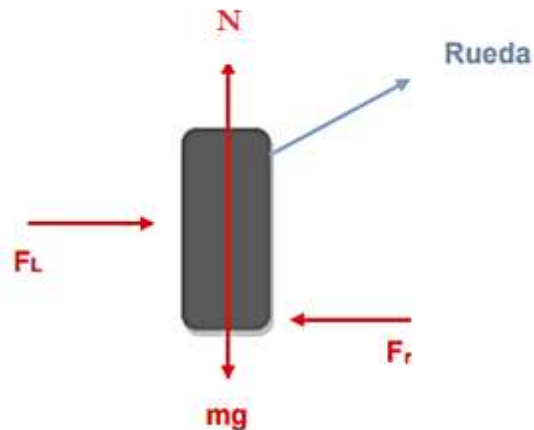


Figura 2. 13 Diagrama de cuerpo libre de un neumático [28]

Donde:

Fl: Fuerza lateral

Fr: Fuerza de fricción

mg: Peso

N: Es la normal

Como se puede observar en los gráficos siguientes el neumático está apoyado en el suelo no solamente en un punto sino en una superficie, por esta razón la fuerza de fricción está representada de la siguiente manera.

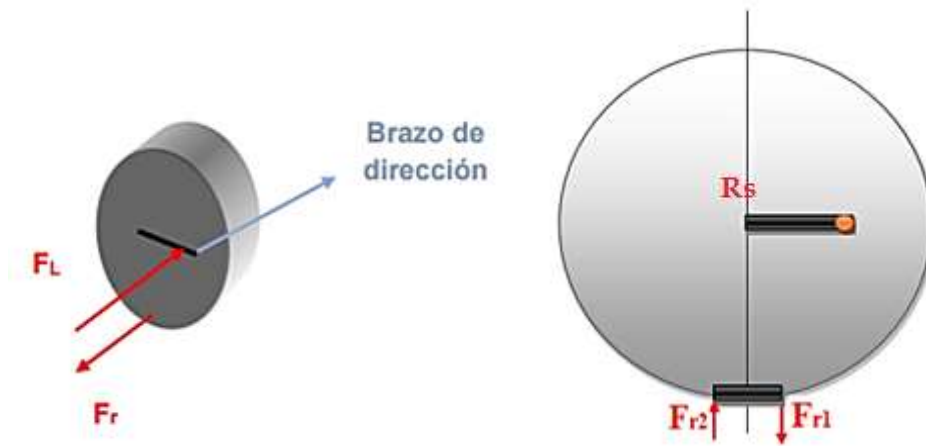


Figura 2. 14 Fuerzas generadas en el neumático [28]

El punto anaranjado en la figura 2.14 representa el lugar en donde se aplica la fuerza lateral necesaria para girar las ruedas. El rectángulo inferior representa la superficie de contacto entre el piso y el neumático, Fr1 y Fr2 son las fuerzas de fricción que se generan al girar las ruedas, entonces:

$$Fr1 = Fr2 = Fr \quad (2.10)$$

$$r1 = r2 = r \quad (2.11)$$

$$\sum Fx = 0 \quad (2.12)$$

$$FL - Fr = 0$$

$$\sum Fy = 0 \quad (2.13)$$

$$N - m * g = 0$$

Tenemos que:

$$FL = Fr = Ha \quad (2.14)$$

$$Ha = 4258.86 \text{ N}$$

Cada rueda:

$$\frac{Ha}{2} = 2129.43 \text{ N}$$

Calculamos el par aplicado al piñón de la cremallera del monoplaça:

$$T = FL * r \text{ piñón} \quad (2.15)$$

$$T = 2129.43 * 0.0175$$

$$T = 37.28 \text{ N.m}$$

Para determinar cuál es la fuerza necesaria que se aplica en el volante, se tomó como referencia la relación que está propuesta en el libro “Tecnología de Automoción” de Ángel Sanz Gonzales [29]:

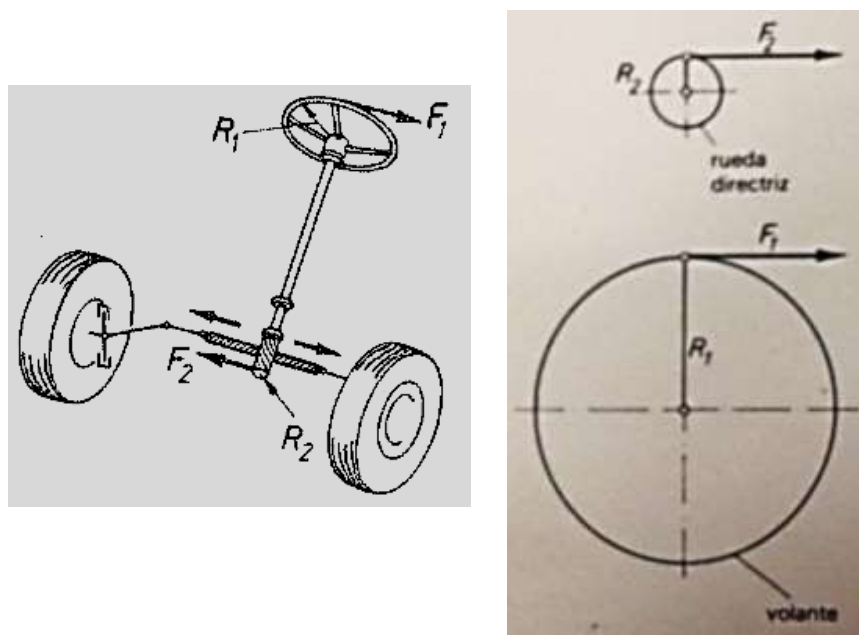


Figura 2. 15 Relación de esfuerzos a transmitir en un mecanismo de dirección [29]

$$F1 * R1 = F2 * R2 \quad (2.16)$$

$$\frac{F1}{F2} = \frac{R2}{R1}$$

Entonces:

$$T = F1 * R1 \quad (2.17)$$

$$F1 = \frac{T}{R1}$$

Donde:

T= Par aplicado al piñón de la cremallera

R1= Radio del volante de dirección = 0.14m.

F= Fuerza necesaria para girar el volante de dirección

$$F1 = \frac{37.28 \text{ N.m}}{0.14 \text{ m}}$$

$$F1 = 266.29 \text{ N}$$

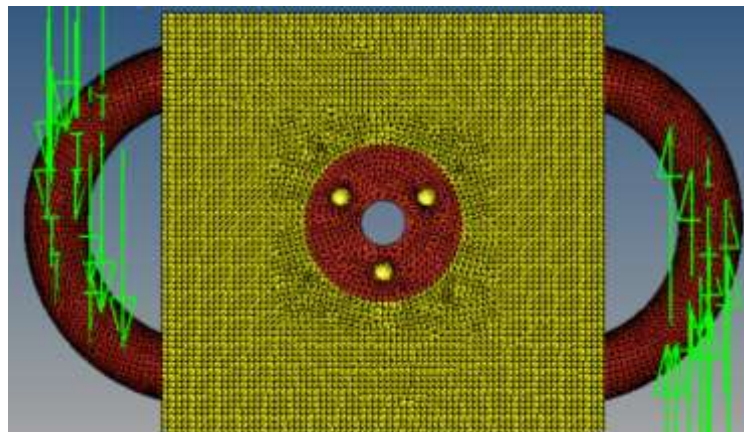


Figura 2. 16 Posición de fuerzas sobre la geometría en Hypermesh

Para colocar esta fuerza en el software es necesario dividirla para el número de nodos total que se ha seleccionado. Fueron 1884 nodos en total para cada lado, estas fuerzas fueron colocadas de manera que simule el movimiento del volante.

El volante está sometido a fuerzas axiales que son pequeñas, ya que al momento de acelerar o frenar el monoplaza el piloto es detenido por el cinturón de seguridad y

no por el volante. A pesar de esto se hizo una prueba experimental con dinamómetros, y obtuvimos como resultado una fuerza de 66.88 N.

5.2.12 Restricciones en la geometría

Finalmente las restricciones están consideradas solamente en tres puntos, específicamente donde se encuentra el desacople rápido del prototipo de volante. Se realizó una telaraña que relacione todos los puntos de malla, para poder establecer un nodo central y aplicar la restricción.

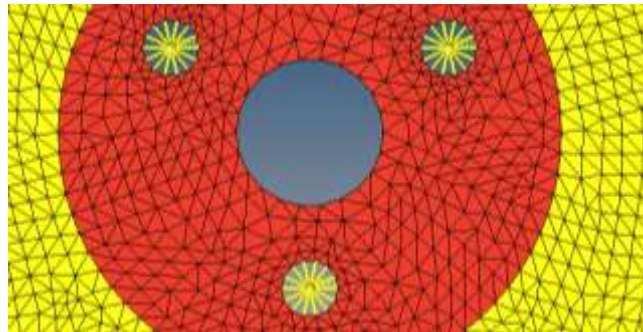


Figura 2. 17 Telaraña creada en zona de no diseño

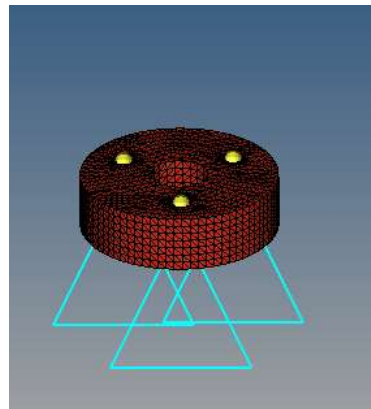


Figura 2. 18 Restricciones de la geometría

5.2.13 Configuración de la optimización por topología

Para plantear la optimización topológica y configurar el software es necesario establecer variables de diseño, la función objetivo, restricciones y respuestas; como se muestra a continuación:

Tabla 7. Características de optimización topológica

Variables de diseño	-Densidad de los elementos de malla
Función objetivo	-Prototipo rígido (compliance mínimo).
Restricciones	-Tamaño mínimo de miembro (10mm). -Simetría. -Restricción de esfuerzo máximo.
Respuestas	-Fracción de volumen. -Compliance.

Variables de diseño

La densidad de todos los elementos que conforman la malla es considerada como variable de diseño.

Función objetivo

Para el diseño del prototipo la función objetivo es maximizar la rigidez, es decir que, como resultado final se pretende tener un prototipo rígido. Esta característica es inversamente proporcional al compliance, por esta razón, hay que configurar el software aplicando un compliance mínimo.

Restricciones

Para obtener una optimización topológica tolerable es necesario que se establezcan restricciones.

Para considerar el tamaño mínimo de miembro se establece que, éste debe tener aproximadamente tres veces más el tamaño de cada elemento de la malla, de esta manera se estableció una medida de 10mm.

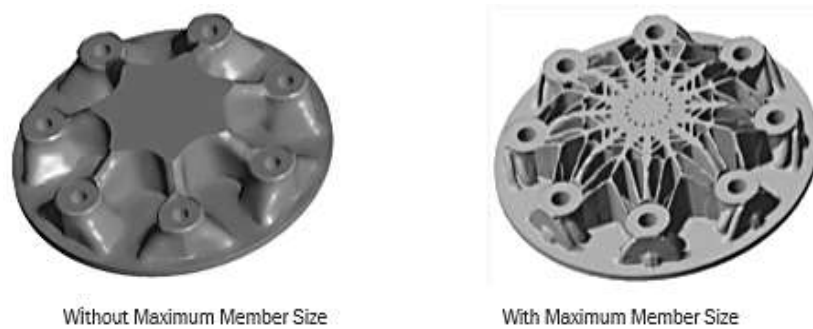


Figura 2. 19 *Tamaño mínimo de miembro [25]*

La restricción de simetría permite que el software optimice de una manera que exista un equilibrio en la geometría, este depende del plano en el que se aplique esta restricción. Estos pueden ser de 1,2 o 3 planos. Ver figura 2.21

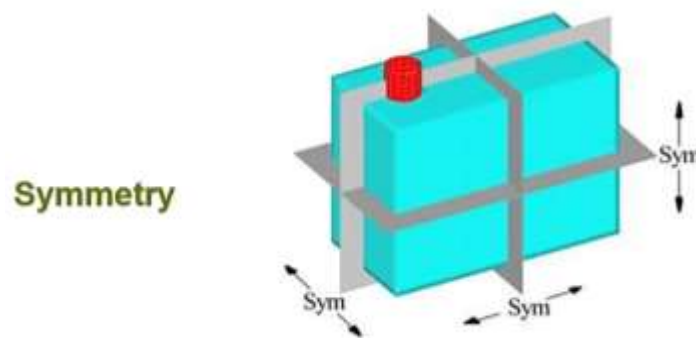


Figura 2. 20 *Restricción de simetría [25]*

Respuestas

El resultado de un análisis mediante elementos finitos sirve para analizar el comportamiento de una estructura.

Se consideró la fracción de volumen como una respuesta debido a que esta considera solamente el espacio de diseño para calcular las iteraciones.

6. RESULTADOS

Como se había mencionado anteriormente se realizaron varios diseños para obtener un prototipo que esté dentro del rango y parámetros establecidos en este proyecto técnico.

En la primera geometría se obtuvo un prototipo cuya estructura estaba conformada por secciones rectas y cóncavas (Ver figura 3.2), es decir no estaba establecido el perímetro del volante de dirección.

El prototipo del volante final debe tener un perímetro continuo que sea casi circular u ovalado. El perímetro exterior puede tener secciones rectas pero no cóncavas.

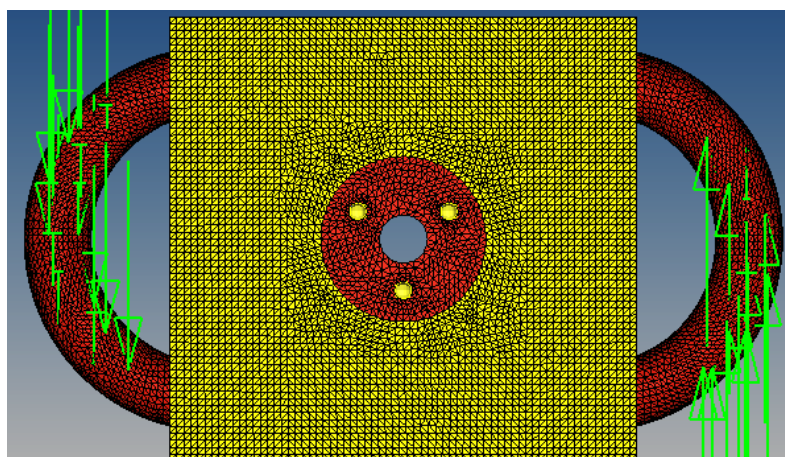


Figura 3. 1 Geometría inicial del prototipo

Esta optimización terminó con 36 iteraciones, es decir el software llegó a la convergencia de solución. Generalmente son 70 o menos iteraciones, esto depende de que tan compleja sea la geometría a optimizar.

El color rojo de la zona de diseño en la figura 3.2 delimita a los elementos con una densidad de 1, es decir en donde se genera el mayor esfuerzo soportado por la geometría. De manera contraria el color azul muestra a los elementos con una densidad de 0, los mismos que no son estructuralmente importantes dentro de la geometría. Además existen elementos con densidades que se encuentran en un punto medio, es decir entre 0 y 1. Estos elementos están determinados por un color verde y deben ser tomados en cuenta dentro del diseño final.

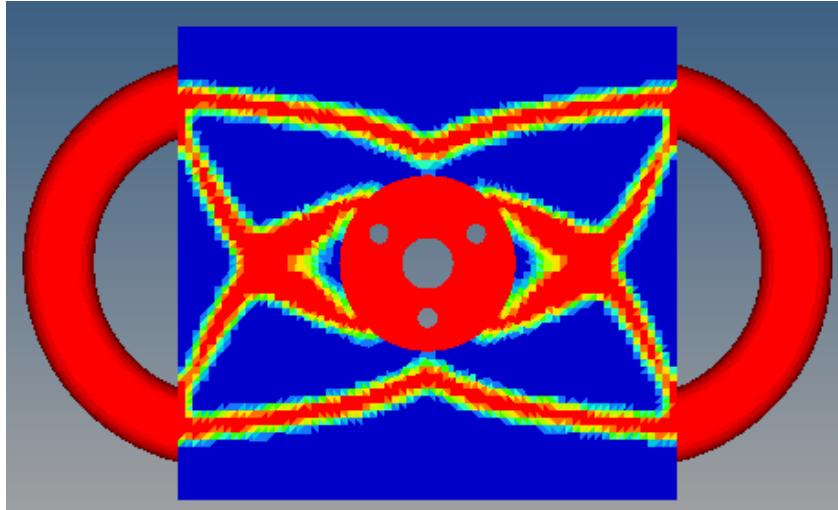


Figura 3. 2 Optimización de la primera geometría del prototipo con “current value” de 0.5

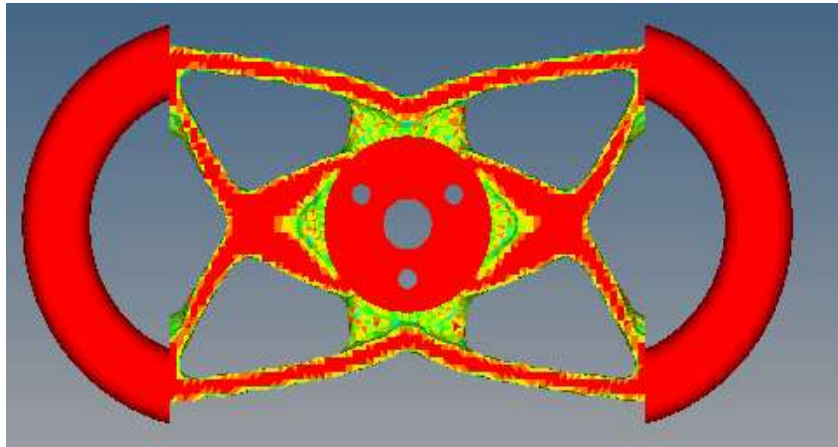


Figura 3. 3 Optimización de la primera geometría del prototipo con “current value” de 0.5, sin elementos de densidad 0

La geometría que se muestra en la figura 3.3, no cumple con el reglamento establecido por la SAE. Es necesario editar la geometría desde el software CAD para establecer un perímetro exterior que sea continuo en la estructura. Una vez establecida la nueva geometría se procede con la misma metodología descrita anteriormente para obtener el resultado.

En la figura 3.4 se observa que el perímetro exterior de la geometría ya está establecido. En el programa CAD se utilizaron líneas de partición para segmentar las porciones necesarias. Finalmente se importa al programa CAE y se crea una

superficie con “Spline/Filler” para posteriormente poder partir y dividir la geometría. Ver figura 3.4.



Figura 3. 4 Geometría editada para establecer el perímetro exterior

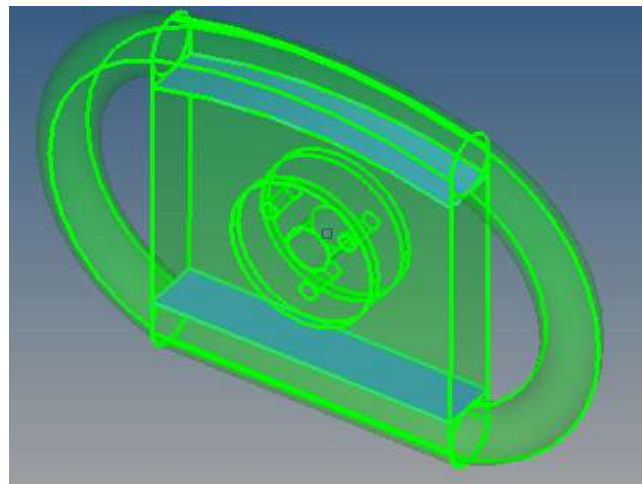


Figura 3. 5 Superficies creadas para establecer el perímetro exterior

En la figura 3.6 se muestra la nueva geometría, mallada, con las fuerzas respectivas y restricciones, previo al análisis estático en HyperMesh.

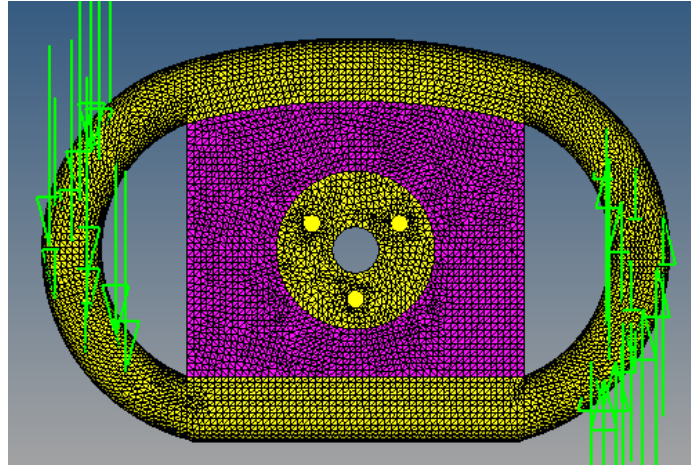


Figura 3. 6 Geometría del prototipo del volante de dirección previo al análisis estático

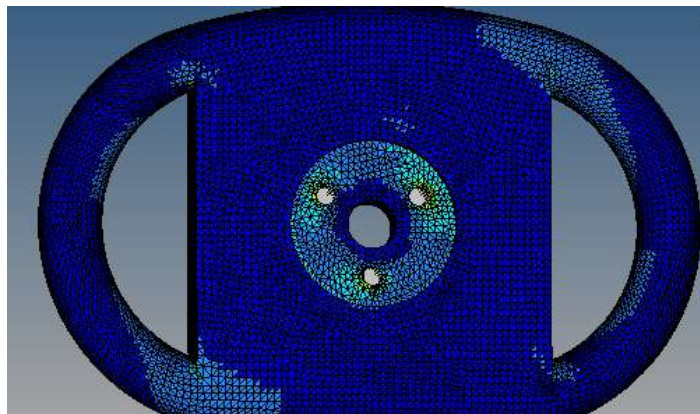


Figura 3. 7 Resultado del análisis estático

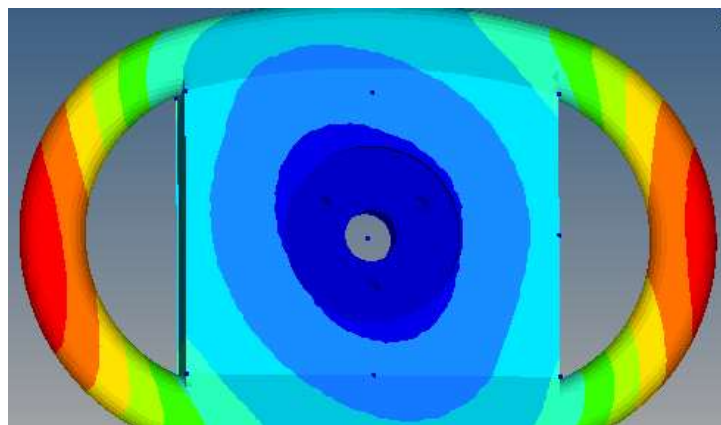
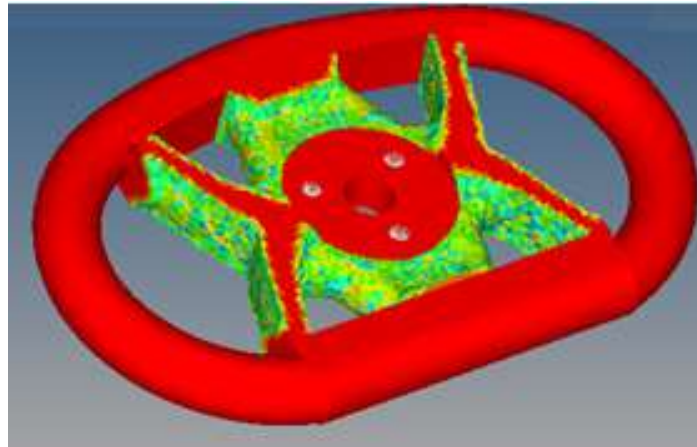
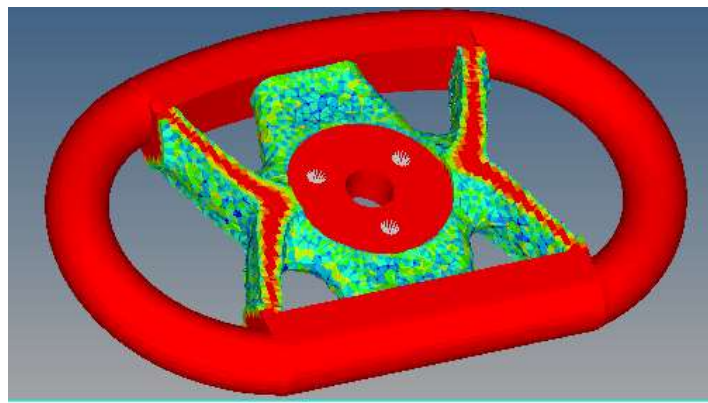


Figura 3. 8 Desplazamiento de la geometría durante el análisis estático

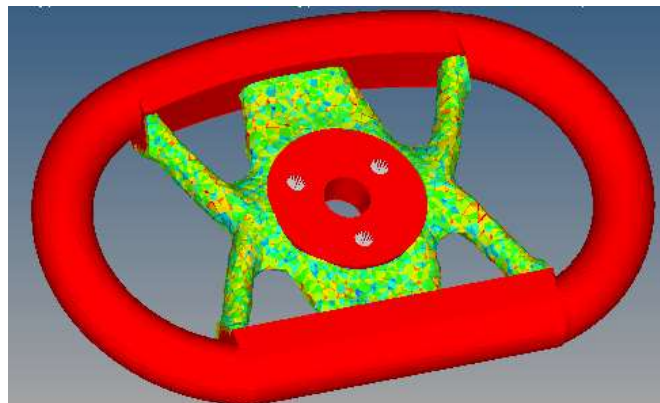
Para obtener la mejor geometría fue necesario realizar varias optimizaciones por topología, se varió la fracción de volumen de manera descendente tomando como punto inicial 0.5 hasta 0.3. Ver figura 3.9.



a)



b)



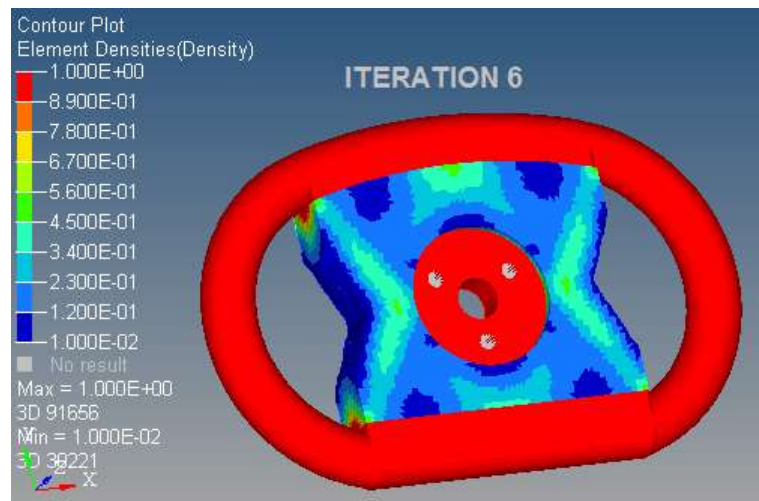
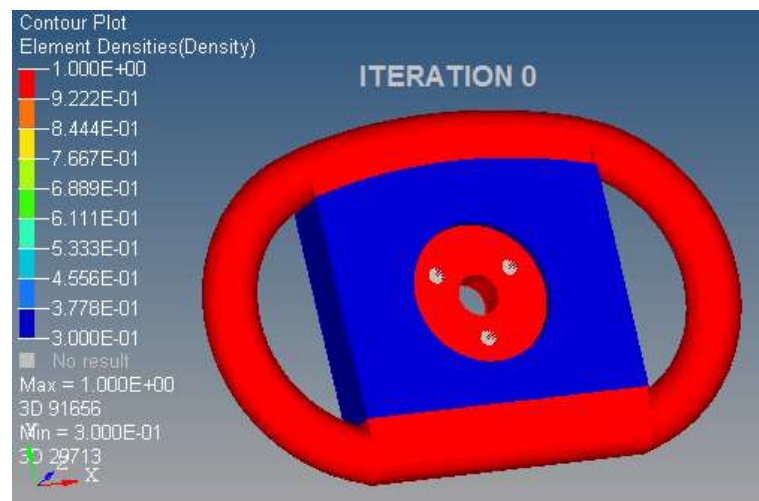
c)

Figura 3. 9 Optimización topológica de la geometría con fracción de volumen descendente

- a) Geometría con fracción de masa de 0.5
- b) Geometría con fracción de masa de 0.4
- c) Geometría con fracción de masa de 0.3

Finalmente se seleccionó una fracción de volumen con 0.3. En la figura 3.10 se presentan varias iteraciones de solución para obtener la optimización final de la geometría del prototipo del volante de dirección.

A partir de un “current value” superior a 0.01 en todas las iteraciones se empieza a establecer formas de trayectoria de carga en toda la zona de diseño de la geometría. A medida que se llega a la convergencia de solución se puede visualizar cambios menores en la estructura final.



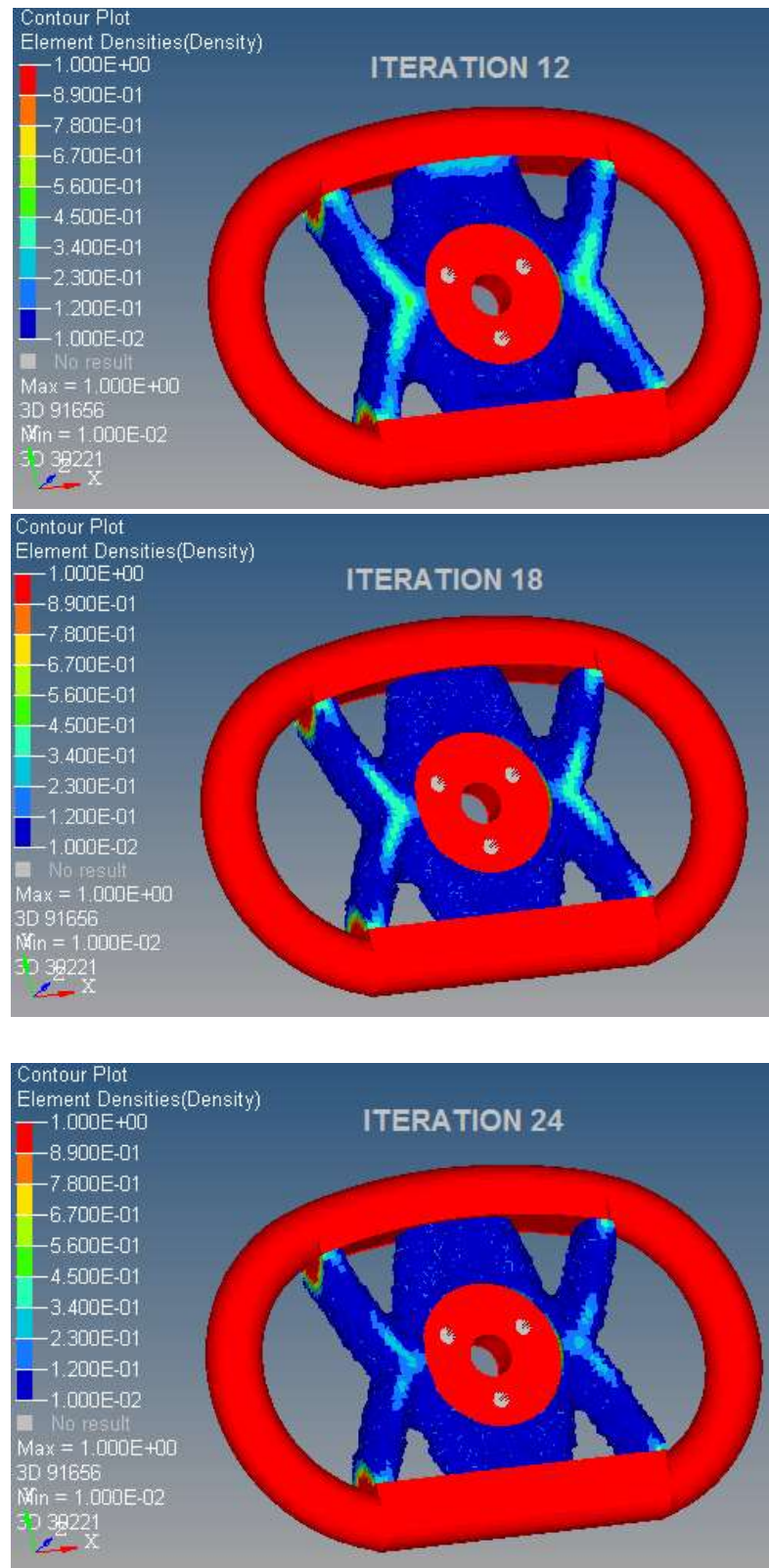


Figura 3. 10 Iteraciones en la optimización topológica del prototipo de volante de dirección

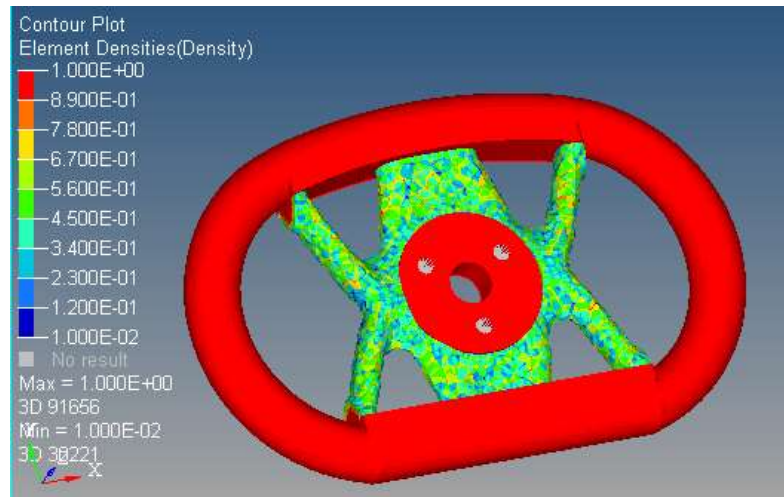


Figura 3. 11 Iteración 24 en la optimización topológica con “current value” de 0.43

6.1 Modelado la geometría optimizada

Para continuar con el proceso de diseño es necesario exportar la geometría optimizada del software CAE al software CAD. Este proceso se realiza con una extensión STL “estereolitografía” a SolidWorks, véase figura 3.12.

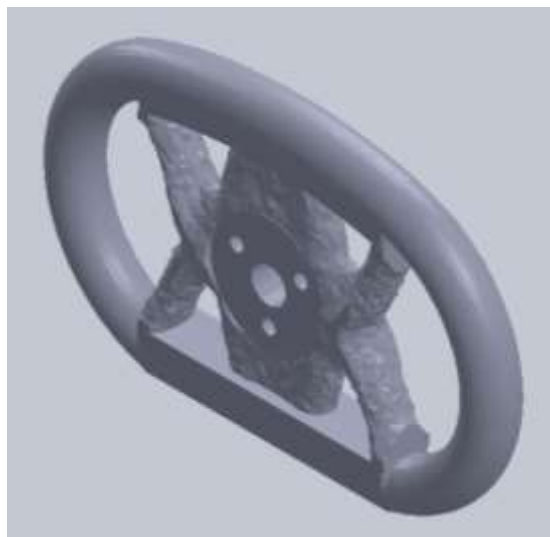
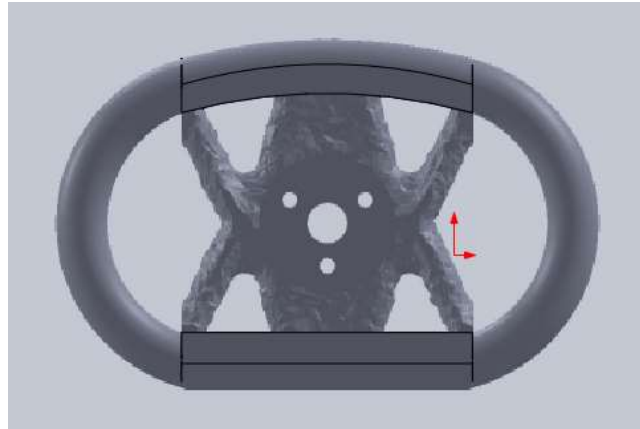


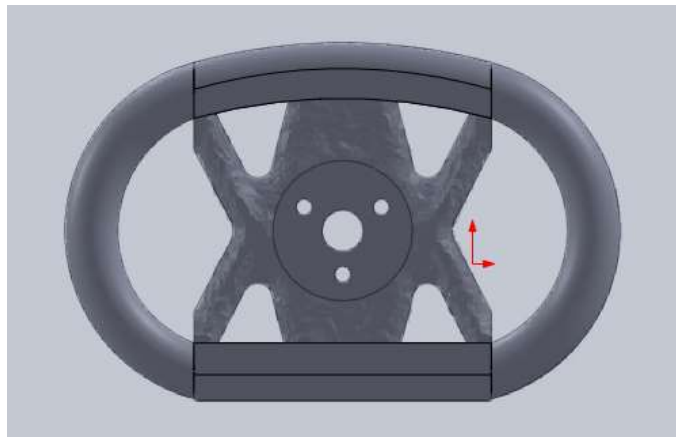
Figura 3. 12 Resultados de la optimización topológica exportados con una extensión STL a SolidWorks

Se utilizó herramientas de croquizar para seguir las trayectorias de cargas en los resultados obtenidos durante la optimización por topología, véase figura 3.13.

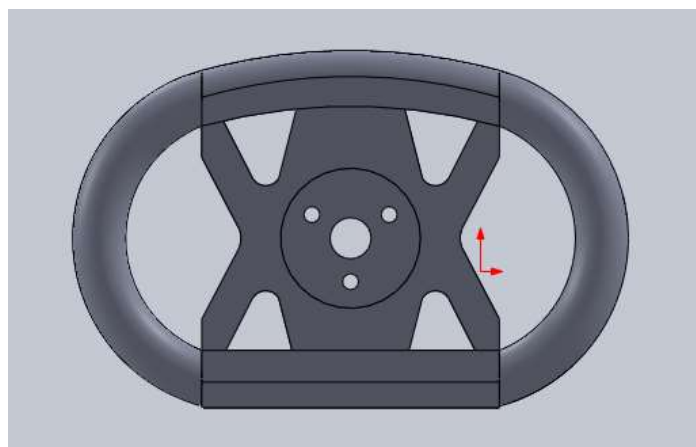
Como los resultados fueron simétricos, solamente fue necesario redibujar la mitad de la geometría.



a)



b)



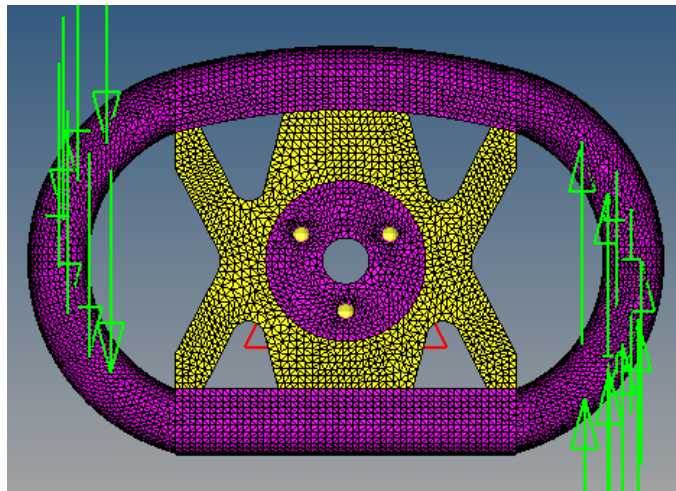
c)

Figura 3. 13 Modelado de la geometría optimizada en base a resultados de HyperMesh

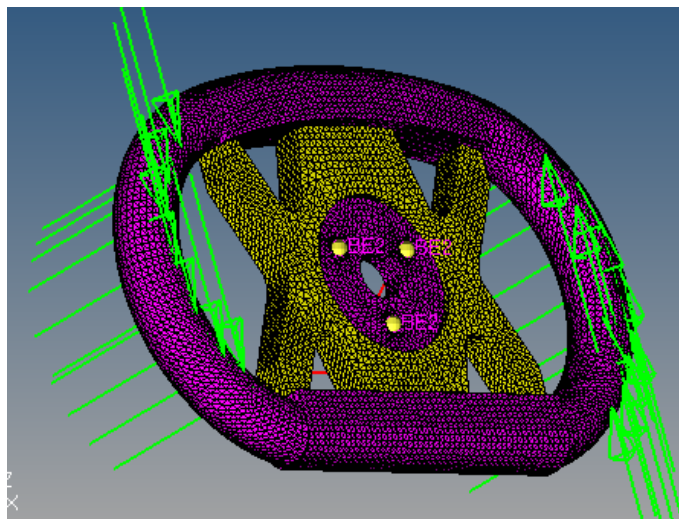
- a) Resultados de la optimización topológica
- b) Aplicación de la herramienta de croquizar, transparencia 50%
- c) Geometría redibujada, herramienta de croquizar con transparencia 0%

6.2 Análisis de la geometría final

Finalmente se realiza un análisis estructural al modelado final (figura 3.13 “c”). A partir del análisis de estos resultados puede ser necesario o no realizar cambios en la zona optimizada de la estructura, esto depende de las consideraciones del diseñador.



a)



b)

Figura 3. 14 Geometría optimizada sometida a un análisis estructural

- a) Vista frontal de la geometría optimizada
- b) Vista en perspectiva de la geometría optimizada

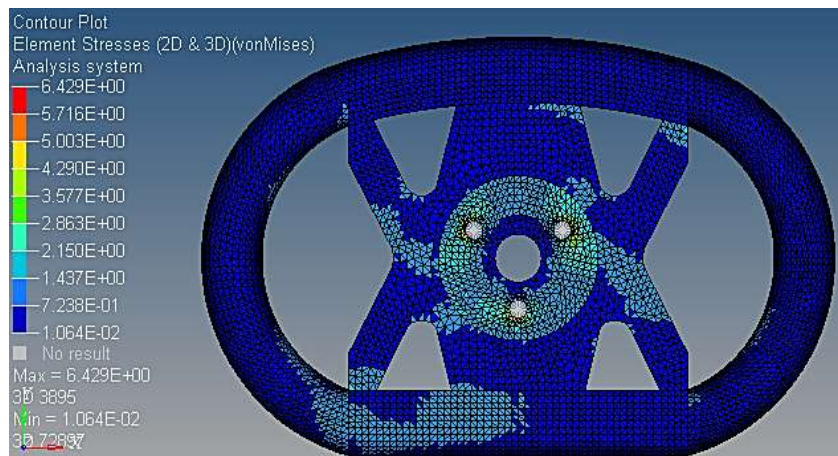


Figura 3. 15 Resultados del análisis estructural de la geometría optimizada (12mm de espesor zona de diseño)

La zona de diseño de la figura 3.15 tiene un espesor de 12mm, luego del análisis se determinó que esta parte de la estructura estaba sobredimensionada para los valores de esfuerzos producidos allí. Por esta razón se editó una vez más a la geometría en el software CAD, estableciéndose en 8mm de espesor a esta zona, para finalmente realizar un último análisis estructural.

Se determinó a esta geometría como la estructura final de diseño (figura 3.16), ya que los esfuerzos máximos que están presentes en el prototipo son inferiores al esfuerzo permisible del mismo “21.33 Mpa”.

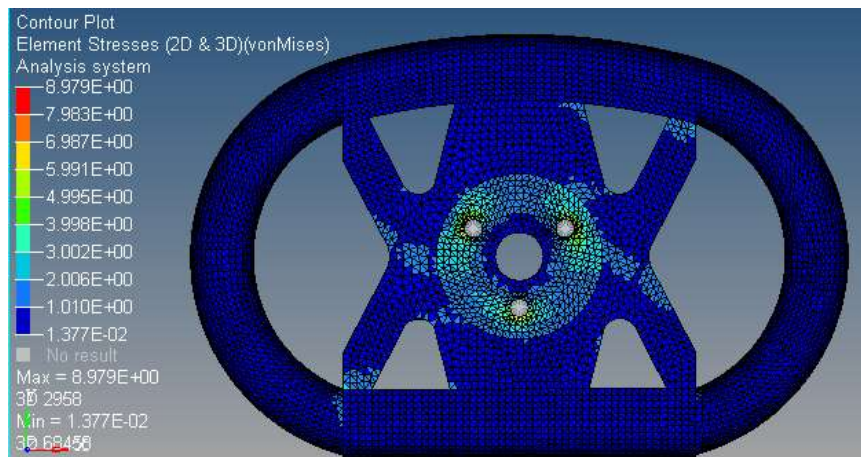


Figura 3. 16 Análisis estructural de la geometría final del prototipo (8mm de espesor zona de diseño)

6.3 Comparación entre la masa inicial y final de la geometría del prototipo

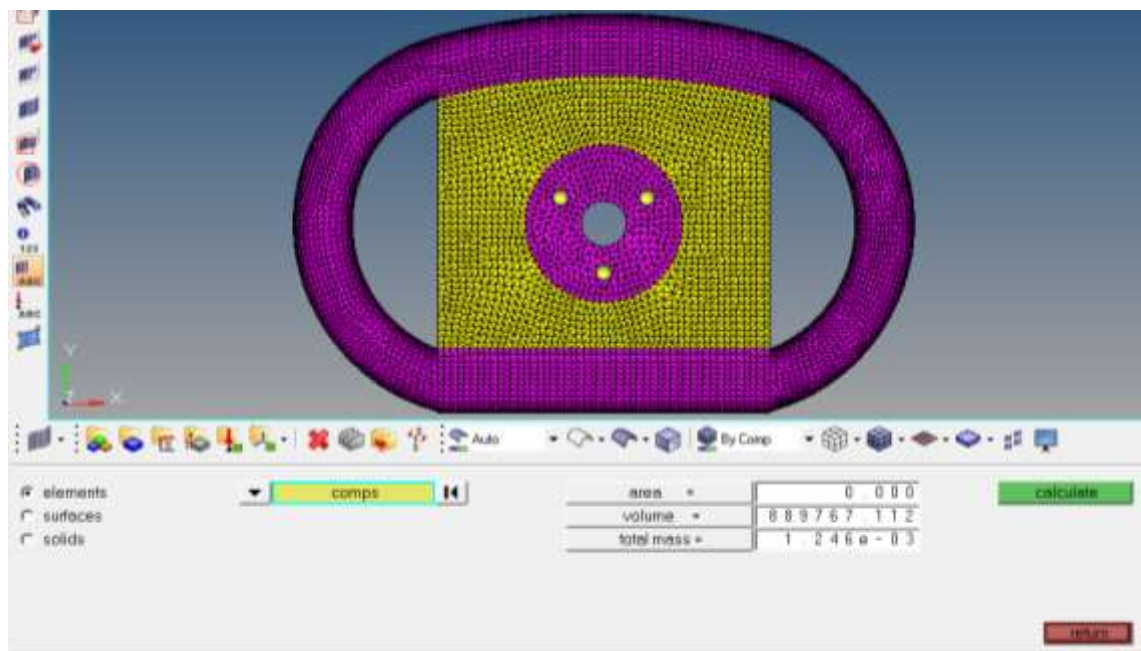


Figura 3. 17 Masa de la geometría inicial

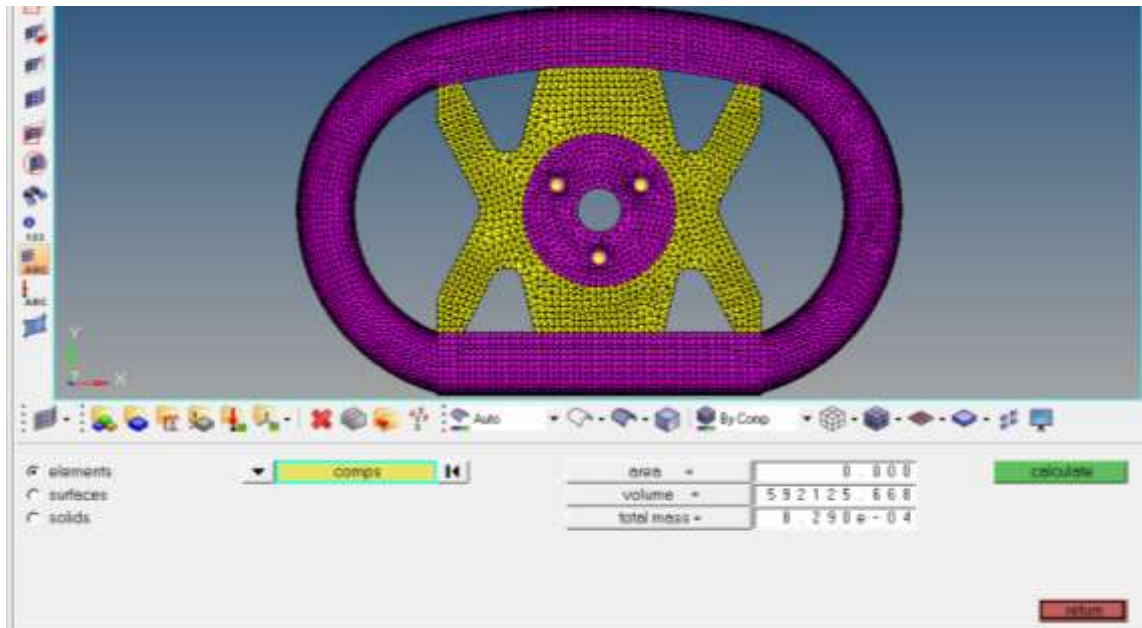


Figura 3. 18 Masa de la geometría final

6.4 Construcción del prototipo

El prototipo del volante de dirección fue construido con manufactura aditiva, mediante la técnica FDM (modelado por deposición fundida). FDM es una tecnología de fabricación por adición, donde el prototipo es creado mediante la intercalación de capas sucesivas de material, como se mencionó en el apartado 4.5.2 de la sección de revisión de la literatura o fundamentos teóricos. El material generalmente es un filamento plástico o metálico que se somete a su temperatura de fusión para que posteriormente la pieza pueda ser construida con hilos muy finos de material que se solidifican de manera instantánea.

El tiempo final para obtener un sólido construido mediante esta técnica, depende estrictamente de la densidad con la que se va a fabricar así como también de la forma del elemento, es decir si es más o menos compleja.

El prototipo fue construido en la ciudad de Quito, en la empresa “3DLAB/CE FabLab” laboratorio de fabricación digital. El tiempo de impresión con un 25% de densidad del material fue de 49 horas con un costo total de 196 dólares. (Véase

figura 3.19) La impresión mediante FDM del primer prototipo del volante se realizó con una densidad de 25%. Esto fue debido a los altos costos de fabricación de un volante impreso con una densidad del 100% que se apegaría de mejor manera a los resultados de la simulación.



Figura 3. 19 Construcción del prototipo con 25% de densidad de material

Para poder construir cualquier elemento mediante técnicas de impresión 3D, es necesario tomar en consideración las prestaciones de la máquina, es decir, que la cuba o zona en donde se realiza la impresión tenga las dimensiones necesarias para que pueda calzar el elemento. De no ser así existen algunas opciones, como por ejemplo escalar el sólido o construirlo por partes, esto depende de la pieza a fabricar.

Es importante mencionar que la construcción del prototipo en un primer intento falló (véase figura 3.20) debido a la falta de soportes, ya que este sólido debía imprimirse de forma vertical y para ello fue necesario colocar soportes extras que eviten que el sólido este sometido a vibraciones dando paso a posibles fallas.



Figura 3. 20 Primer intento de construcción del prototipo

Finalmente terminada la impresión fue necesario pulir el prototipo, para retirar rebabas y dejar superficies lisas. Véase figuras 3.21 - 3.22.



Figura 3. 21 Impresión 3D del prototipo



Figura 3. 22 Resultado final de la impresión 3D del prototipo

En las figuras 3.23 y 3.24 se muestran el peso final del prototipo y del volante de dirección respectivamente.



Figura 3. 23 Peso del prototipo optimizado



Figura 3. 24 *Peso del volante de dirección del monoplaza UPS Racing Team*

El acople de conexión/desconexión está unido al prototipo mediante pernos de sujeción. Véase figura 3.25.



Figura 3. 25 *Prototipo con el acople de conexión/desconexión rápida*



Figura 3. 26 *Prototipo impreso mediante FDM montado en el monoplaza de UPS Racing Team*

7. CONCLUSIONES

Una vez finalizado el presente proyecto técnico se concluye lo siguiente:

- Los objetivos planteados en este proyecto técnico fueron cumplidos, se logró resolver el problema mediante una metodología de diseño que garantiza un resultado óptimo al final de este proceso. Los datos para realizar los cálculos fueron tomados del primer monoplaza que construyó el equipo UPS Racing Team.
- El reglamento de la Formula SAE establece restricciones para la adquisición o diseño de volantes de dirección en función de la seguridad del piloto. Sin embargo, la mayoría de equipos compran el volante y no existe mucha información disponible en relación con el diseño de este tipo de componentes.
- Para modificar la estructura principal de una geometría después de haber sido sometida a una optimización topológica, es necesario seguir estrictamente las trayectorias de carga. Si se lo hace de otra forma el resultado será diferente a la solución de dicha optimización.
- La optimización topológica es una técnica iterativa, es decir, es un proceso que en ocasiones los primeros resultados no son factibles, por lo tanto, es necesario realizar varios análisis y optimizaciones que concluirán finalmente con un resultado que cumpla los requerimientos propuestos para el diseño.
- Los parámetros que configuran a la optimización topológica en el software deben ser seleccionados de acuerdo a las necesidades del diseñador. Además hay que tomar en cuenta las unidades en las que se trabaja, HyperMesh posee cinco combinaciones de unidades.
- Mediante técnicas de impresión 3D es posible construir geometrías complejas que tengan los diseños. La densidad con la que se realiza esta

técnica depende básicamente de la utilidad que se le vaya a dar al elemento construido. De esta densidad también depende el tiempo y el costo de la impresión.

- En elementos impresos en tres dimensiones, el peso final depende estrictamente de la densidad con la que se construya. La densidad hace referencia al número de capas que aplica la maquina al momento de la impresión.
- Al construir el prototipo con el 25% de densidad debido a los altos costos, nos alejamos de los resultados obtenidos en la simulación, por lo que se sugiere estudiar a futuro los efectos de estos parámetros de impresión en el comportamiento estructural del prototipo. Además al montar el prototipo de volante en el fórmula SAE se puede observar que la geometría optimizada cumple con el reglamento establecido.

8. RECOMENDACIONES

- Realizar los análisis y simulaciones en una computadora que tenga excelente velocidad de procesamiento.

Como trabajo futuro se propone:

- Aplicar optimización topológica para el diseño de otros componentes del Fórmula SAE puesto que esta técnica permite reducir masa.
- Estudio detallado del comportamiento de las propiedades de materiales sometidos a una impresión 3D.
- Ensayos experimentales de tracción de elementos impresos en 3D con diferentes densidades.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] F. SAE, «students.sae.org,» [En línea]. Available: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/about.htm>. [Último acceso: 08 11 2015].
- [2] «www.jonatanpozo.info,» [En línea]. Available: <http://jonatanpozo.info/ups-racing-team/>. [Último acceso: 20 10 2015].
- [3] F. SAE, «students.sae.org,» [En línea]. Available: http://students.sae.org/cds/formulaseries/rules/2015-16_fsae_rules.pdf. [Último acceso: 11 11 2015].
- [4] G. Pillajo, «www.repositorio.educacionsuperior.gob.ec,» [En línea]. Available: <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/512/1/T-SENESCYT-0323.pdf>. [Último acceso: 20 10 2015].
- [5] M. Cantos, «www.iit.upcomillas.es,» [En línea]. Available: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/449badbade7b4.pdf>. [Último acceso: 08 11 2015].
- [6] University Of Sydney, «www.tunersgroup.com,» [En línea]. Available: http://www.tunersgroup.com/Cars/usyd_FSAE_2009.html. [Último acceso: 20 10 2015].
- [7] Borgerson, «www.borgeson.com,» [En línea]. Available: <http://www.borgeson.com/xcart/product.php?productid=65&cat=0&featured=Y>. [Último acceso: 20 11 2015].
- [8] Formula Student Germany, «www.formulastudent.de,» [En línea]. Available: www.formulastudent.de. [Último acceso: 25 10 2015].
- [9] D. Mejia , «www.dspace.ups.edu.ec,» [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7547/1/UPS-CT004482.pdf>. [Último acceso: 20 11 2015].
- [10] F. SAE Rules , «fsaeonline.com,» [En línea]. Available: <http://www.fsaeonline.com/content/2015-16%20FSAE%20Rules%20revision%20in%20progress%20kz%2083114.pdf>. [Último acceso: 12 11 2015].
- [11] «ctsimexico.files.wordpress.com,» [En línea]. Available: <https://ctsimexico.files.wordpress.com/2013/03/fabricacic3b3n-aditiva.pdf>. [Último acceso: 13 11 2015].
- [12] «www.3dprint.com,» [En línea]. Available: www.3dprint.com. [Último acceso: 02 11 2015].

- [13] «empresaiocupacio.gencat.cat,» [En línea]. Available: http://empresaiocupacio.gencat.cat/web/.content/19_-_industria/documents/economia_industrial/impressio3d_es.pdf. [Último acceso: 13 11 2015].
- [14] «www.technologytell.com,» [En línea]. Available: www.technologytell.com. [Último acceso: 02 11 2015].
- [15] M. Mestas , «www.ptolomeo.unam.mx,» [En línea]. Available: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/1213/Tesis.pdf?sequence=1>. [Último acceso: 14 11 2015].
- [16] G. Engineering, «www.gseengineering.com,» [En línea]. Available: <http://www.gseengineering.com/critical-solutions/structural-optimization>. [Último acceso: 29 11 2015].
- [17] S. Sánchez, Tesis Doctoral, «www.rinet.upv.es,» [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15409/tesisUPV3793.pdf?sequence=6>. [Último acceso: 14 11 2015].
- [18] C. Meza, «www.bdigital.uao.edu.co/,» [En línea]. Available: <http://bdigital.uao.edu.co/bitstream/10614/4209/1/TME01179.pdf>. [Último acceso: 22 11 2015].
- [19] Fórmula Student Cantabria, «fscantabria.es,» [En línea]. Available: <http://fscantabria.es/>. [Último acceso: 28 11 2015].
- [20] Imprint 3D, «www.imprint3d.es,» [En línea]. Available: <http://www.imprint3d.es/modelos3d/40-estudiantes-chinos-crean-coche-de-carreras-con-piezas-impresas-en-3d/>. [Último acceso: 28 11 2015].
- [21] «www.blogs.okdiario.com,» [En línea]. Available: <http://blogs.okdiario.com/motor/11407/construye-propio-coche-impresora-3d>. [Último acceso: 17 12 2015].
- [22] «www.arpem.com,» [En línea]. Available: <http://www.arpem.com/noticias/2015/coches/bmw/informacion/impresion-3d-1154866-n.html>. [Último acceso: 17 12 2015].
- [23] J. Valero, «www.hipertextual.com,» [En línea]. Available: <http://hipertextual.com/2014/10/strati-impresora>. [Último acceso: 30 12 2015].
- [24] R. L. Norton, Diseño de maquinaria, 5ta ed, Mexico: Mc Graw Hill Education, 2013.
- [25] H. Altair, «www.altairhyperworks.in,» [En línea]. Available: <http://www.altairhyperworks.in/edu/contest/aoc/2013/tutorials-and-downloads.html#.VwaGjfl97IU>. [Último acceso: 07 03 2016].

- [26] D. Mejia, «dspace.ups.edu.ec/,» [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7547/1/UPS-CT004482.pdf>. [Último acceso: 17 02 2016].
- [27] U. Racing Team, «<http://dspace.ups.edu.ec/>,» [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7547/1/UPS-CT004482.pdf>. [Último acceso: 17 02 2016].
- [28] F. Ruiz, «invenio2.unizar.es,» [En línea]. Available: <http://invenio2.unizar.es/record/31468/files/TAZ-TFG-2014-2526.pdf>. [Último acceso: 17 02 2016].
- [29] A. Sanz Gonzales, de *Tecnologia automocion* , Barcelona, Don Bosco, p. 132.
- [30] [En línea]. Available: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/449badbade7b4.pdf>. [Último acceso: 04 11 2015].
- [31] «[iit.upcomillas.es](http://www.iit.upcomillas.es/),» [En línea]. Available: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/449badbade7b4.pdf>. [Último acceso: 04 11 2015].
- [32] «[iit.upcomillas.es](http://www.iit.upcomillas.es/),» 04 11 2015. [En línea]. Available: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/449badbade7b4.pdf>. [Último acceso: 04 11 2015].
- [33] J. Cnatos, «[iit.upcomillas.es](http://www.iit.upcomillas.es/),» [En línea]. Available: <http://www.iit.upcomillas.es/pfc/resumenes/449badbade7b4.pdf>. [Último acceso: 04 11 2015].
- [34] C. Castro, «slideplyer.es,» [En línea]. Available: <http://slideplayer.es/slide/1645348/>. [Último acceso: 04 11 2015].
- [35] F. SAE, «fsaeonline.com,» [En línea]. Available: <http://www.fsaeonline.com/content/2015-16%20FSAE%20Rules%20revision%20in%20progress%20kz%2083114.pdf>. [Último acceso: 04 11 2015].
- [36] F. SAE, «students.sae.org,» [En línea]. Available: <http://students.sae.org/cds/formulaseries/hybrid/>. [Último acceso: 08 11 2015].
- [37] T. Pashley, «How to Build Motorcycle-engined Racing Cars,» Reino Unido, Veloce Publishing, 2012.
- [38] P. Pillajo, «repositorio.educacionsuperior.gob.ec,» [En línea]. Available: <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/512/1/T-SENESCYT-0323.pdf>. [Último acceso: 09 11 2015].
- [39] G. Mikell P., *Introduccion a los procesos de manufactura*, Mexico: Mc Graw Hill Educations, 2014.

- [40] U. Karl T., «Diseno y desarrollo de productos,» México, D. F., McGraw-Hill, 2013, p. 286.
- [41] S. Sanchez, TESIS DOCTORAL, «www.riunet.upv.es,» [En línea]. Available: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15409/tesisUPV3793.pdf?sequence=6>. [Último acceso: 17 11 2015].
- [42] «www.ciper.cl,» [En línea]. Available: <http://www.ciper.cl/repuestos/NISSAN/V-16/1993/>. [Último acceso: 25 10 2015].
- [43] «www.adlermexico.com.mx,» [En línea]. Available: www.adlermexico.com.mx. [Último acceso: 02 11 2015].
- [44] «www.bdigital.uao.edu.co,» [En línea]. Available: www.bdigital.uao.edu.co. [Último acceso: 02 11 2015].

10. ANEXOS

ANEXO I

Datasheet del plástico ABS utilizado para el diseño y construcción



Technical data sheet - ABS Extrafill

Product:	ABS Extrafill		
Diameters:	1,75 mm	or	2,85 mm (+/- 0,05 mm)
Lengths:	300 m	or	120 m
Weight:	> 0,75 kg		
Material:	Acrylonitrile butadiene styrene		
Color:	wide variety of colours according to the color range		

Information:

- High quality filaments with the trade name ABS Extrafill used for the FFF (also known as FDM) 3D printing technology.
- ABS filament is a polymer, which is ideal for the production of the first functional samples before serial production for functional prototyping, manufacturing tools, but also for the production of goods for everyday use.
- The advantage of this material is that it can be used in 3D printers easily, that it allows a high quality of printing even in tricky details and an excellent lamination of the printed object.
- ABS Extrafill is manufactured from material, which fulfill FDA requirements.
- Use of the ABS material in the food industry is dependent on the final product and responsibility for use on a processor ABS Extrafill. ABS is not intended for medical applications.
- Fillamentum guarantees high precision of filament dimension within the tolerance +/- 0,05 mm, which is strictly controlled throughout the production.



Properties of ABS filaments for 3D printing:

Specific Gravity (ASTM D1505):	1.04 g/cm ³
Ductility (ASTM D638):	22 %
Strength (ASTM D638):	36 MPa
Working temperature:	220 - 240 °C
Hot pad:	80 - 100 °C

Filaments ABS Extrafill for 3D printing are produced on the extrusion line with a continuous measurement of the outer diameter of 1,75 mm (or 2,85 mm).

Tolerance for diameters +/- 0,05 mm.

Package:

Filaments ABS Extrafill are wound on a plastic spool and packaged in a cardboard box. The box is marked by label, unless otherwise noted.

Total weight including packaging is 1 kg, the weight of filament is 0,75 kg.

In case of questions please contact us at the following address:

PARZLICH s.r.o.

Průmyslový areál TOMA a.s.

Budova 27a (Stema s.r.o.)

765 02 Otrokovice

Czech Republic

www.parzlich.cz | www.fillamentum.com

email: helpdesk@fillamentum.com | gsm: + 420 725 929 736

ANEXO II

Otras propiedades del plástico ABS

Property	Test method ISO	Test method DIN	Test condition	Unit	Value
MVI	1 133	-	220°Cx10kg	ml/10min	30
			50°C/hr;1kg	°C	99
Vicat softening Temp.	306	53 460	50°C/hr;5kg	°C	94
			120°C/hr;1kg	°C	101
			120°C/hr;5kg	°C	93
H.D.T/A	75	53 461	1,8 Mpa, unanneal	°C	74
			1,8 Mpa, unanneal	°C	94
Izod Impact Strenght	180/1A	-	Notched	KJ/m2	19
	180/1C	-	Unnotched	KJ/m2	-
Charpy Impact	179		Notched	KJ/m2	21
			Unnotched	KJ/m2	-
Impact Flexual Test	179/2C	53453	Notched	KJ/m2	16
	179/2D	53453	Unnotched	KJ/m2	-
Tensile Strenght			50mm/min,yield	Mpa	38
	527	53455	50mm/min,break	MPa	32
Tensile Elongation	527	53455	50mm/min	%	20
Flexural Stranght	178	53452	2mm/min	MPa	60
Flexural Modulus	178	53452	2mm/min	Gpa	1,9
Ball Identation Hardness	2039-1	53456	H358/30		94
Flammability	-	-		UL-94	1/16"HB
Mass Density	1183	53479-A	23°C	-	1,04

ANEXO III

Manejo de unidades en HyperWorks 12.0

Units

RADIOSS has no built-in unit system up to version 51. You may provide data in any consistent system you want.

To verify consistency, please check:

$$\text{Pressure} = \text{density} \times \text{length}^2 / \text{time}^2$$

Most popular units are (with steel examples):

Length	Time	Stress	Mass	Force	Energy	Density	Young's module	Gravity	Yield stress
m	s	Pa	kg	N	J	7.8e+03	2.1e+11	9.81e+00	2.06e+05
mm	ms	MPa	g	N	mJ	7.8e-03	2.1e+05	9.81e-03	2.06e+02
mm	ms	GPa	kg	KN	J	7.8e-06	2.1e+02	9.81e-03	2.06e-01
mm	s	MPa	Mg (ton)	N	mJ	7.8e-09	2.1e+05	9.81e+03	2.06e+02
cm	micros	Mbar	g	10 ^{^7} N	10 ^{^5} J	7.8e+00	2.1e+00	9.81e-10	2.06e-06

ANEXO IV
Configuración de unidades en el software HyperMesh

Propiedad	Valor	Unidad
Densidad (ρ)	1.04×10^{-9}	Ton/mm ³
Módulo de Young (E)	1700	Mpa
Coeficiente de Poisson (ν)	0.33	-----
Esfuerzo de cedencia (A)	32	Mpa
Fuerza radial	266.29	N
Fuerza axial	66.88	N