

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA APLICADO A VEHÍCULO DE TRACCIÓN HUMANA  
(VTH).

JOSE MANUEL BERROCAL HERNANDEZ  
SORAYA DE HOYOS CARRILLO

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA  
2022

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA APLICADO A VEHÍCULO DE TRACCIÓN HUMANA  
(VTH).

JOSE MANUEL BERROCAL HERNANDEZ  
SORAYA DE HOYOS CARRILLO

Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO MECÁNICO

Asesor  
RAFAEL DAVID GÓMEZ  
Ingeniero mecánico

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA  
ESCUELA DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA  
INGENIERÍA MECÁNICA  
MONTERÍA  
2022

## **ABSTRACT**

In the following degree work, a study is carried out on the topological optimization applied to the structure of a human traction vehicle (VTH), based on the parameters established for the design analysis. Thus, seeking to achieve an optimal structure that fulfills the purpose of supporting loads by having the least amount of mass possible.

## **AGRADECIMIENTO**

Agradecidos principalmente con Dios por todas las oportunidades presentadas para lograr este objetivo tan importante en nuestra vida como estudiantes, por nuestros familiares y amigos que siempre han sido el motor, ese impulso para seguir adelante, también por el apoyo recibido de la universidad, maestros y compañeros, los cuales estuvieron siempre con nosotros en este proceso... y a las personas que ya no nos acompañan en esta vida terrenal, espero estén orgullosos desde el cielo.

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>ABSTRACT .....</b>	<b>6</b>
<b>AGRADECIMIENTO .....</b>	<b>7</b>
<b>TABLA DE CONTENIDOS.....</b>	<b>8</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>1</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Planteamiento del problema.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Justificación. ....</b>	<b>2</b>
<b>CAPÍTULO 2.....</b>	<b>4</b>
<b>OBJETIVOS.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1 Objetivo general. ....</b>	<b>4</b>
<b>2.2 Objetivos específicos: .....</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 3.....</b>	<b>5</b>
<b>3.1 Esfuerzo normal. ....</b>	<b>5</b>
<b>3.2 Esfuerzo cortante.....</b>	<b>5</b>
<b>3.3 Esfuerzos bajo condiciones generales de carga. ....</b>	<b>7</b>
<b>3.4 Deformación de elementos sometidas a carga axial. ....</b>	<b>7</b>

<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO 5.....</b>	<b>22</b>
<b>METODOLOGÍA .....</b>	<b>22</b>
<b>5.1 Construcción de función objetivo, parámetro de diseño y condiciones de frontera.....</b>	<b>22</b>
<b>5.2 Optimización topológica. ....</b>	<b>24</b>
<b>5.2 Generación y selección de alternativas. ....</b>	<b>24</b>
<b>CAPÍTULO 6.....</b>	<b>26</b>
<b>RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>26</b>
<b>CAPÍTULO.....</b>	<b>56</b>
<b>Conclusiones y recomendaciones. ....</b>	<b>69</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>74</b>

# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

### 1.1 Planteamiento del problema.

La optimización topológica es un método por el cual se mejora la estructura del material dentro de un espacio de diseño dado limitado por condiciones de frontera, que busca mejorar el desempeño del objeto de estudio. Lo que mejora la optimización es la capacidad de construir objetos, estructuras que sean estables y resistan más que las convencionales, minimizando la cantidad de material, el costo de producción, la cantidad de energía, y aumentando la resistencia a los esfuerzos aplicados.

Desde los años 90 se ha venido intensificando el estudio de este tipo de procesos por el cual se maximizan los beneficios que puede ofrecer, en el principio se tenían que realizar arduos estudios, realizar experimentos por tanteo-falla, tener en cuenta parámetros ambientales, limitantes de diseño, las cuales dificultaban y hacían que fuera un trabajo extenuante. En la actualidad todo esto ha evolucionado con el uso y actualización de ayuda de paquetes de software donde la tarea se vuelve mucho más fácil solamente con un buen computador y el software, modelando y simular a qué condiciones será expuesto el objeto en este caso un vehículo de tracción humana, el paso más difícil es definir a qué objeto se le realizará el estudio, lo demás son factores que el diseñador crea pertinentes de hacer a creencia suya. El volumen la masa son propiedades extensivas de la materia las cuales caracterizan a un cuerpo, pero no quiere decir que si un cuerpo tiene más masa volumen sea el más adecuado para que cumpla con la tarea que se necesita, es decir, que resista a los factores a lo

que se le está sometiendo.

La facultad de ingeniería mecánica de la Universidad Pontificia Bolivariana se ha integrado a la actividad de competencias de vehículos de tracción humana desde 2014, donde se da muestra del diseño, la creatividad, las nuevas ideas, las nuevas formas de implementar la capacidad a través del conocimiento que se ha adquirido en el programa. En el 2018 la sede de este concurso fue en la ciudad de Medellín donde se dieron a conocer nuevas alternativas de mejora para estos vehículos de los cuales formó parte la optimización topológica. Por lo tanto, se tiene como objeto de estudio un vehículo de tracción humana, que posee una estructura de considerable resistencia, pero con masa excedente que dificulta un óptimo desempeño en relación peso/resistencia y no deja sacarle todo el provecho que tiene para ofrecer, cómo ser más ligero, aerodinámico, de estructura más compacta, menos robusto. El problema principal es la cantidad de materia que no es necesaria para que su estructura resista las cargas a las que son sometidos este tipo de vehículos.

¿Será posible realizar la optimización topológica al actual diseño de VTH que se encuentra en la Universidad Pontificia Bolivariana, de tal forma que se mantenga una relación R/W y la estructura soporte las cargas impuestas?

## **1.2 Justificación.**

La presente propuesta de trabajo de grado tiene como objetivo realizar mejoras al diseño del VTH de la Universidad Pontificia Bolivariana, bajo optimización topológica para evaluar la obtención de una estructura más liviana y así obtener beneficios al modificar la estructura del vehículo. La optimización topológica es un método que se basa en el estudio del análisis mecánico o estructural, que lo que



busca es disminuir el peso y al mismo tiempo mantener las propiedades mecánicas del objeto de estudio, es decir, se requiere que sea lo más ligero posible sin comprometer la resistencia, ya que se mantendrá la misma resistencia del modelo y se disminuirá la cantidad de masa que no aporta un alto grado de función (resistencia a la tensión o compresión) en la estructura y estabilidad del vehículo. También se mejora el costo de producción que al ser menos material que se va a tratar se tendrá un menor gasto de energía. Se minimizará el tiempo de producción, al ser de forma más Slim será de más fácil manejar para operar y sencillo de generar. Al momento de la generación del diseño de realizar pequeños arreglos como la de trasladar el punto de equilibrio a la ubicación óptima para mejor el giro en curvas o paso de obstáculos. En este sentido se propone el uso de herramientas computacionales (SolidWorks 2020®, ANSYS 19.2®), para el diseño del VTH se hará uso de la Optimización Topológica para evaluar la obtención de una estructura más liviana que las propuestas en concursos anteriores. para potenciar la competitividad, y al mismo tiempo garantizar que cumple los requerimientos del concurso nacional de VTH.

Se hace uso de esta técnica por su factibilidad en el campo estructural y de análisis de estos, ya que se puede reprocesar las estructuras generadas, la técnica es de conveniencia por tener como objetivo principal el aligeramiento. La relación R/W será el principal objetivo que maneja este análisis en la estructura de VTH, lo cual dará menos gasto energético por parte del piloto y mejor sensación de comodidad en cuanto a la actividad física, así que con esto podrá realizar mayores recorridos con la misma energía, que con un peso que equivaldría al volumen ocupado según la densidad del material que se utilice en dicha estructura.

## **CAPÍTULO 2**

### **OBJETIVOS.**

#### **2.1 Objetivo general.**

Desarrollar la optimización Topológica de la estructura de un VTH para mejorar su relación resistencia/peso garantizando que cumpla con los requerimientos básicos de resistencia y estabilidad de la estructura.

#### **2.2 Objetivos específicos:**

Construir una función objetivo en términos de los parámetros de diseño y de las condiciones de frontera del modelo de acuerdo con las restricciones dimensionales del VTH.

Generar la optimización topológica para la estructura a partir de las condiciones de frontera utilizando los softwares SolidWorks 2020®, ANSYS 19.2®

Realizar 3 estructuras diferentes a partir de la herramienta de optimización topológica, seleccionando la que cumplan con los parámetros de diseño requeridos a partir del criterio de Von Mises.

## CAPÍTULO 3

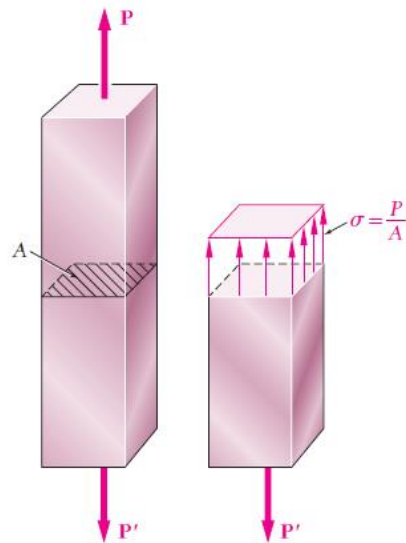
### MARCO TEÓRICO.

#### 3.1 Esfuerzo normal.

El esfuerzo generado por una fuerza axial sobre un área perpendicular se le llama esfuerzo normal y se simboliza con  $\sigma$  (sigma). Entonces, es esfuerzo se obtiene al dividir una fuerza P entre un área A.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 1}$$

Se utilizará un signo positivo para indicar un esfuerzo de tensión y negativo si es compresión.



*Tabla 1. Esquema de un elemento sometido a un esfuerzo.(BEER et al., 2018)*

#### 3.2 Esfuerzo cortante.

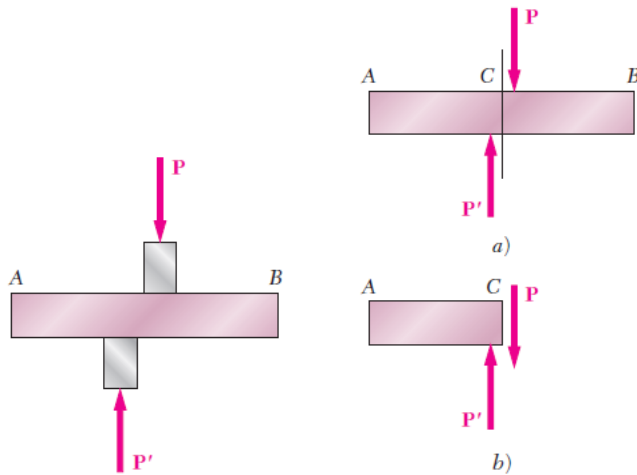
El esfuerzo cortante es aquel donde el área de aplicación es paralela a la

fuerza que está incidiendo sobre esta, lo que quiere este tipo de fuerza es generar un corte para dividir la zona de actuación. Se representa el esfuerzo cortante con la letra griega  $\tau$  (tau), se escribe:

$$\tau_{prom} = \frac{P}{A} \quad \text{Ecuación 2}$$

Debe enfatizarse que el valor obtenido es un valor promedio para el esfuerzo cortante sobre toda la sección. Al contrario de lo dicho con anterioridad para los esfuerzos normales, en este caso no puede suponerse que la distribución de los esfuerzos cortantes a través de una sección sea uniforme. El valor real  $\tau$  del esfuerzo cortante varía de cero en la superficie del elemento hasta un valor máximo  $\tau_{m\acute{a}x.}$  que puede ser mucho mayor que el valor promedio,  $\tau_{Prom.}$  (BEER et al., 2018)

$$\tau_{prom} = \frac{P}{A} = \frac{F}{A} \quad \text{Ecuación 3}$$



**Tabla 2.** Esquema de un elemento sometido a un esfuerzo cortante. (BEER et al., 2018)

### 3.3 Esfuerzos bajo condiciones generales de carga.

La condición de carga no siempre es de manera ideal, es decir, axial o cortante, también pueden existir los dos al mismo tiempo o varios. Esto se deberá a las condiciones que estén expuestas como las de carga, apoyo, o por su diseño. A continuación, se muestra de forma esquemática como esto pasa. En la imagen a) se presenta un objeto cualquiera que está expuesto a varias cargas al mismo tiempo. En el b) y c) se muestra como al tomar un elemento se puede ver como estas fuerzas se pueden describir en cortantes y normales. En la figura d) se muestra el objeto discretizado, es un diferencial del cuerpo del objeto original este puede ser un pequeño grado de todos los que los compone, entonces al realizar un estudio sobre este se pueden ver la manera de como las fuerzas originales se pueden generar otras en este ya que este puede estar en coordenadas donde varias fuerzas lo afecten.

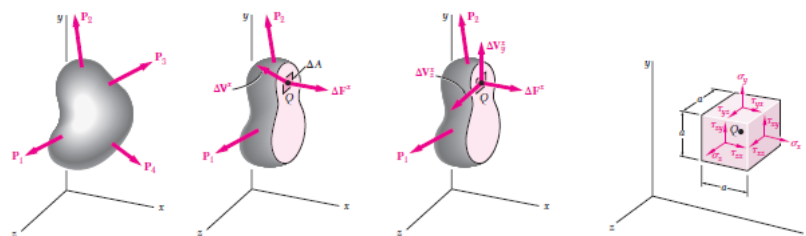


Tabla 3.

3a)

3b)

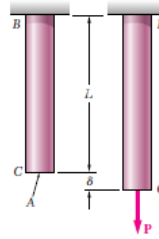
3c)

3d)

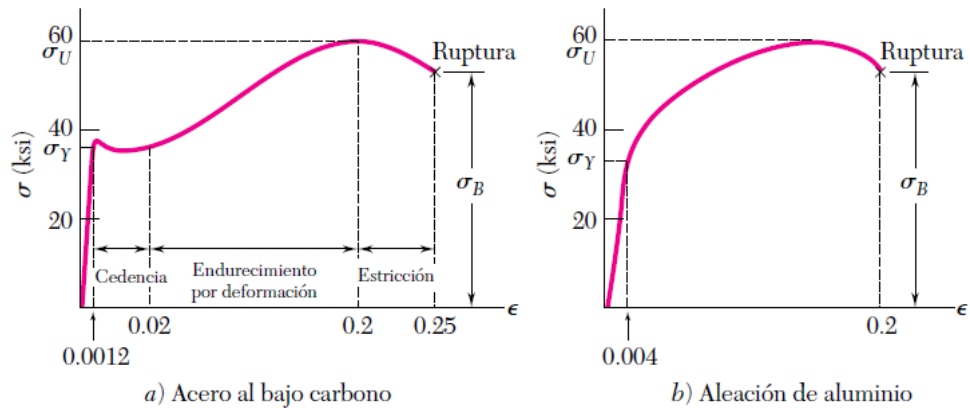
(BEER et al., 2018)

### 3.4 Deformación de elementos sometidas a carga axial.

Se tiene como objeto de estudio una varilla de material homogénea BC con una longitud  $L$  y sección transversal uniforme de área  $A$  sujeta a una carga axial centrada  $P$  como en la siguiente figura:



**Tabla 4.** esquematización de deformación.(BEER et al., 2018)



**Tabla 5.** Esquematización del diagrama de esfuerzo Vs módulo de Young.(BEER et al., 2018)

### 3.5 Definición de optimización topológica

La Optimización topológica es una técnica de análisis estructural, esta técnica estudia el comportamiento mecánico del cuerpo o estructura. Su principal objetivo es el aligeramiento estructural manteniendo el comportamiento mecánico el objeto de estudio. Todo esto con el fin de usar menos masa que no es relevante para la funcionalidad del cuerpo, con esto reduciendo energía y dinero.

### 3.6 Tipos de optimización topológica

Optimización paramétrica: esta trata de discretizar estructura ya establecidas como cerchas para encontrar las dimensiones optimas de las variables, como lo son: longitudes, espesores, radio, área transversal, longitud.

Optimización de forma: esta categoría busca cambiar la forma de su dominio sin modificar su forma, sin quitar parte de su masa interna, solo trabajando con los contornos interiores y exteriores, para controlar la geometría del diseño.

Optimización topológica de estructuras continuas: Esta optimización es la que busca que un objeto de dominio continuo busque la mejor forma respecto a sus cargas y esfuerzo a los que está sometido. Es la optimización que se llevara a cabo en este estudio.

Optimización topológica de estructuras discretas: se divide en optimización topológica de estructura de malla continua y optimización topológica de estructuras discretas.

Optimización topológica de estructura de malla continua se basa de un dominio continuo discretizado por barras rígidas que poseen un espacio entre ellas cuya solución es obtenida por la teoría de la elasticidad.

Optimización topológica de estructuras discretas en esta se encuentra un dominio de varios puntos distribuidos y que estos se pueden juntar, la mejor solución Óptima sería numérica.

### **3.7 Procedimiento para la optimización topológica**

3.7.1. Definir el dominio cuanto más grande sea este se podrá garantizar una mejor solución ya que no se está limitando el estudio del objetivo, pues un dominio pequeño está limitando las soluciones. El dominio está ligado de manera muy correlacionada con las cargas aplicas y con las condiciones de contorno.

3.7.2. discretización de los elementos del objeto de estudio.

3.7.3. Generar el estudio del algoritmo de optimización topológica, que

comienza a analizar el dominio iterativamente calculando las conexiones por medio de las reacciones que tiene los nodos de los elementos discretizados y ver que partes son la que no son necesarias que para que el objeto de estudio lleve a cabo su función.

3.7.4. Interpretación del resultado obtenido, para confirmar si el resultado es tal como se predijo o hay que mejorar algunos aspectos en cuanto a discretización(malla) u otros.

3.7.5. Verificación del resultado por medio de algún software y de elementos finitos (en este caso ANSYS) y por último la fabricación del objeto.

El objetivo de optimización topológica es buscar la elasticidad lineal y encontrar la distribución de solidos que minimice el cumplimiento de la menor cantidad de masa posible para mantener las propiedades mecánicas requeridas.

Una forma estándar de relacionar la rigidez del elemento con la variable de diseño del ment es el enfoque SIMP (Solid Isotropic Material con penalización). Modulo de elasticidad definido como:

$$E(\mu) = \mu^T E_0 \text{Ecuación 4}$$

Dnde  $E_0$  es el módulo de Young de material sólido,  $\rho$  es la densidad relativa del elemento y  $g$  es un parámetro de penalización(generalmente se introduce  $g = 3$  para favorecer soluciones discretas de el problema continuo

$$E(\mu) = E_{rad} + \mu^\pi (E_0 - E_{woal}) \text{Ecuación 5}$$

*where  $0 < E_{void} < E_0$*

$$\left. \begin{aligned} K(\mu) &= K_{wad} + \mu^\mu (K_0 - K_{veal}) \\ G(\mu) &= G_{rad} + \mu^\pi (G_0 - G_{wud}) \end{aligned} \right\} \text{Ecuación 6}$$

$$\left. \begin{aligned} K(\mu) &= K_{val} = K_0 \\ G(\mu) &= G_{va1} + (1 - \mu^T)(G_0 - G_{read}) \end{aligned} \right\} \text{Ecuación 7}$$

$$\left. \begin{aligned} K(\mu) &= \mu^T K_0 + (1 - \mu^\pi) K_{\Omega i=1} \\ G(\mu) &= G_{vad} + (1 - \mu^T)(G_0 - G_{woal}) \end{aligned} \right\} \text{Ecuación 8}$$

$$\left. \begin{aligned} K(\mu) &= \mu^T K_0 + (1 - \mu^\pi) K_{n-1} \\ G(\mu) &= G_{vad} + (1 - \mu^\pi)(G_0 - G_{woal}) \end{aligned} \right\} \text{Ecuación 9}$$

$$\left. \begin{aligned} K(\mu_1, \mu_2) &= K_{void} + \mu_1^\eta [\mu_2^\eta K_{fluid} + (1 - \mu_2^\eta) K_0 - K_{void}] \\ G(\mu_1, \mu_2) &= G_{void} + \mu_1^\eta (1 - \mu_2^\eta)(G_0 - G_{void}) \\ \rho(\mu_1, \mu_2) &= \rho_{void} + \mu_1 [\mu_2 \rho_{fluid} + (1 - \mu_2) \rho_0 - \rho_{void}] \end{aligned} \right\} \text{Ecuación 10}$$

$$E(\mu) = E_{void} + \frac{\mu(E_0 - E_{void})}{1 + q(1 - \mu)} \text{Ecuación 11}$$



$$\left. \begin{aligned}
K(\mu_1, \mu_2) &= K_{void} + \frac{\mu_1}{1+q(1-\mu_1)} \left[ K_0 - K_{void} + \frac{\mu_2}{1+q(1-\mu_2)} (K_{fluid} - K_0) \right] \\
G(\mu_1, \mu_2) &= G_{void} + \frac{\mu_1(1-\mu_2)}{(1+q(1-\mu_1))(1+q\mu_2)} (G_0 - G_{void}) \\
\rho(\mu_1, \mu_2) &= \rho_{void} + \mu_1[\rho_0 - \rho_{void}] + \mu_2(\rho_{fluid} - \rho_0)
\end{aligned} \right\} \text{Ecuación 12}$$

$$W = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} d\Omega \text{Ecuación 13}$$

$$\left. \begin{aligned}
\min_{\mu_1, \mu_2}: & W(\mu_1, \mu_2), \\
\text{s.t.}: & \text{Equilibrium (7) and (8),} \\
& \int_{\Omega} \mu_1(1-\mu_2) d\Omega / \int_{\Omega} d\Omega \leq f_0 \\
& \int_{\Omega} \mu_1 \mu_2 d\Omega / \int_{\Omega} d\Omega \geq f_{fluid} \\
& 0 \leq \mu_1 \leq 1, 0 \leq \mu_2 \leq 1
\end{aligned} \right\} \text{Ecuación 14}$$

## CAPÍTULO 4

### MARCO REFERENCIAL.

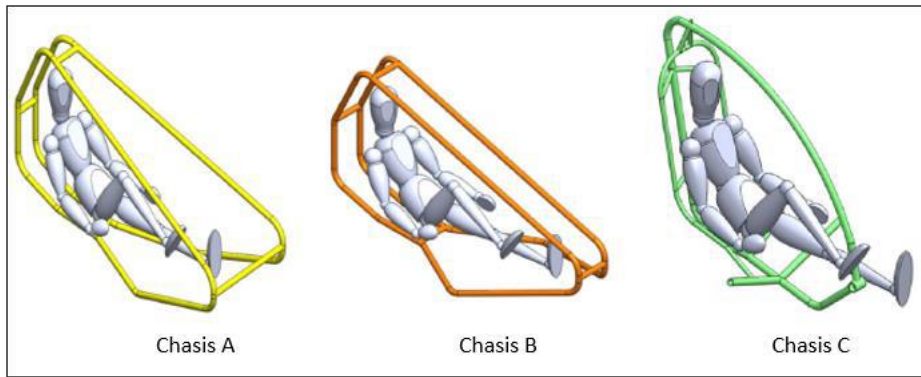
La optimización topológica es utilizada para mejorar los diseños en cuanto a la relación R/w teniendo en cuenta a las condiciones que va a estar expuesto el objeto. El caso de estudio de tesis de maestría “Bi-directional Evolutionary Topology Optimization of Compliant Mechanisms Design using a Multi-criteria Approach” de ingeniería mecánica. Claudia Pérez Madrid en el 2007 en la Universidade Estadual De Campinas, realizó un estudio para maximizar el desplazamiento de salida del mecanismo compatible sin más consideraciones. Esto lo realizó utilizando el método Homogenization Method, Level set-Method Method, SIMP method, BESO method. utilizando métodos numéricos. los resultados que el estudio obtuvo terminan desconectados de las topologías y problemas de convergencia. Para solucionar este problema era fundamental no solo considerar la flexibilidad del mecanismo para maximizar el desplazamiento de salida, pero también la rigidez del sistema que es necesario para soportar cargas externas. De esta forma, dos funciones objetivo con diferentes condiciones de carga se incluyen en la formulación del problema, un "diseño de mecanismo" que toma cuenta de los requisitos cinemáticos y un "diseño de estructura" para los requisitos estructurales. La importancia de incluir una condición estructural es que garantiza la convergencia de la función objetivo y Evite también la presencia de bisagras flexibles. (Pérez Madrid, 2007)

En el trabajo de grado “diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia UNINDES 2011” realizado por Franklin Julián Patiño

molina genero un diseño de VTH teniendo en cuenta la transmisión de potencia, suspensión, los ángulos de compensación, frenos, dirección entre otros elementos. Entre los aspectos que más se destacan son el diseño del marco ya todos los elementos que conforman el vehículo deben estar adecuados a este para que brinde las mejores ventajas competitivas, que permita sacar provecho como a la transmisión de potencia y a la maniobrabilidad. Entre las características más importantes del marco están la rigidez y el peso, ya que un triciclo más ligero permite una mejor eficiencia energética por parte del usuario, otra característica es la flexión, contraria a la rigidez esta es indeseada en la mayoría de los casos ya que a altas velocidades y en curvas puede generar inestabilidad, a parte de estos también se encuentra la ergonomía, el costo, la manufactura. El diseño se generó a partir de una distribución espacial aproximada de algunos elementos principales como las ruedas y la silla, luego de eso se utilizó los softwares SolidWorks para generar los modelos como cuerpos de líneas y exportarlos a ANSYS desde donde se realizó los procesamientos de los modelos y terminado a escoger uno según los parámetros de diseño. Para el diseño él da unas recomendaciones que lo ayudaron en la construcción como los son: realizar una búsqueda amplia sobre este tipo de estudios, plantear estructuras simples con pocos elementos y pocos dobleces, evitando así la menor soldadura posible. (Patiño Molina, 2012)



**Tabla 6.** Estimación de mediadas para el espacio de diseño. (Patiño Molina, 2012).



**Tabla 7.** Diseños propuestos y generados en base a los parámetros de diseño. (Patiño Molina, 2012)

	Esfuerzos Combinados (Mpa)	Deformación (mm)	Peso (gr)
Chasis A	74.243	13.189	9128.68
Chasis B	72.710	13.413	8920.99
Chasis C	99.001	6.342	7862.68

**Tabla 1.** Resultado de las simulaciones realizadas a las estructuras echas en ANSYS. (Patiño Molina, 2012)

El trabajo de grado “diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH) para desplazamiento sobre el Rio Sinú y rutas pavimentadas de la ciudad de montería” de Aguirre Rojano Harold Darío y Pinedo Fuentes Sebastián Manuel donde a través de su investigación generaron un este vehículo de tracción humana capaz de desplazarse longitudinalmente a favor de la corriente sobre el río Sinú y de una

margen a otra, así mismo capaz de desplazarse por rutas pavimentadas. Este es un vehículo que cuenta con un sistema de 3 llantas para desplazarse de manera terrestre y una plataforma en la parte inferior que sirve para mantenerse a flote y transitar por medios acuáticos. Al final de todo se realizaron pruebas para su validación donde alcanzó la velocidad máxima estipulada de 20 km/h en el recorrido sobre las rutas pavimentadas. En el desplazamiento sobre el agua fue capaz de cruzar de una orilla a otra sobre la superficie del río Sinú con un ángulo de desviación de  $41.9^\circ$  y desplazarse a favor de la corriente sin que se hundiera o se volcara. (Aguirre Rojano & Pinedo Fuentes, 2017)

En el trabajo de grado “Análisis estructural de un vehículo de tracción humana para la competencia local de vehículos de tracción humana Antioquia 2018 realizado por Sebastián Bustamante Ospina y Sebastián Vélez García” donde se realizó el diseño y construcción de la jaula antivuelco que el reglamento de un concurso le exige, en el cual hace uso de ANSYS como software principal para la verificación de fracturas y detectar los posibles fallas en la estructura, donde primero se realizó un diseño donde el piloto tuviera la mayor seguridad posible al tener un accidente de volcamiento, se procedió con estudio de diferentes metales y condiciones de frontera a los cuales estará sometido, de todo el estudio se concluyó los materiales de los con los cuales se puede obtener un rendimiento óptimo en cuanto al esfuerzo de Von Mises y desplazamiento. (Vélez Garcia & Bustamante Ospina, 2018)

“En el departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Norte se realizó el proyecto de construir de Vehículo de Tracción Humana” En un principio se

establecieron ciertos parámetros y normas que se debían seguir antes y durante la realización del vehículo, dentro de las cuales encontrábamos que se debía cumplir con un presupuesto de no más de \$500.000, el VTH debía ser liviano (no más de 30 kilogramos), ser lo más veloz posible, también novedoso (de autoría del grupo), competitivo y eficiente (con el menor coeficiente de arrastre posible) & lo más importante, debía ser impulsado totalmente por fuerza humana (sin motores, sistemas precargados de almacenamiento de energía, etc.). Lo primero que se buscó fue la forma de poder aprovechar al máximo la potencia que es capaz de entregar el conductor de nuestro vehículo y a partir de ello poderle impartir una velocidad competitiva al mismo. Esto se logró con la implementación del doble tren de transmisión de potencia. Aunque este sistema de transmisión brinda una excelente velocidad se quiso ganar ventaja en las curvas por lo que se decidió implementar el sistema de dirección trasero el cual nos propone un radio de giro lo suficientemente cerrado como para cumplir su objetivo. Después de toda la revisión y validación del diseño se llega a la conclusión que la estructura posee dos zonas críticas de importante consideración la primera de ellas es la zona donde se acoplan las llantas delanteras al chasis y la segunda es la estructura que soporta el peso del conductor con todo se pueden hacer mejoras para llegar a un diseño de disminuya en mayor parte los esfuerzos principales (Conrado Et Al., 2014)

En el trabajo de grado “Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana (VTH) tipo triciclo, como alternativa al transporte urbano en la ciudad de Bogotá” de Cristhian Javier Fajardo Cabanzo y Sebastián Viera Arévalo donde se realizó el diseño y la construcción de un VTH tipo triciclo que sea funcional para un

ciclo de rutas de la ciudad de Bogotá y que represente una alternativa viable al transporte convencional en recorridos que cubran alrededor de los 12km, en el cual hacen uso del software NX 12 para hacer las simulaciones y determinar los puntos críticos del diseño, todo este estudio fue basado en la distribución espacial de los elementos principales como las ruedas y la silla, teniendo en cuenta la ergonomía. (Valencia, 2012)

En el año 2014, el semillero de energías renovables del programa de Tecnología Mecánica desarrolló un vehículo solar de pruebas haciendo uso de software CAD, este estaba constituido por un sistema fotovoltaico y por un motor eléctrico acoplado directamente a la rueda por algunos problemas que tenía este se le realizó mejoras como: diseñar y seleccionar los componentes para mejorar el sistema de dirección, adecuando un sistema de potencia auxiliar para tomar detalles en los sistemas de potencia y dirección. Una vez terminada las mejoras se hicieron pruebas de funcionamiento del vehículo en terrenos con diferentes pendientes para comprobar las relaciones de máxima velocidad y máximo torque, mediante estas pruebas se determinó que la velocidad promedio del vehículo en terrenos planos con la relación de máxima velocidad fue de 40 km/h y que el vehículo es capaz de subir pendientes hasta con el 11 % de inclinación con la transmisión de máximo torque desde velocidad cero partiendo desde velocidad cero. (Sandoval Hernández & Guevara Rojas, 2015)

En el Artículo “Diseño conceptual, formal y funcional de un vehículo de tracción humana como propuesta de movilidad urbana” del Sena, se realizó el diseño

conceptual de un VTH usando software para analizar su comportamiento y para generar un diseño moderno, aerodinámico con un toque deportivo y futurista por su estilo, se escogió como principal material de la cabina la fibra de carbono al final se halló que el vehículo debe adaptarse ergonómicamente al usuario, comunicar claramente un mensaje eco sustentable, garantizar menores costos de mantenimiento y funcionamiento comparado con el sistema transporte masivo actual, y evitar estilos de vida sedentarios. (Medrano et al., 2016)

En el trabajo de grado de “Optimización topológica en el diseño de elementos estructurales mecánicos” de Carlos Alberto Meza Valencia se realizó la optimización topológica, basados en la función objetivo de solucionar numéricamente el problema por medio de algoritmos iterativos que minimizan o maximizan esta función, buscando con esto distribuir el material en el dominio para encontrar la estructura correcta, disponiendo desde un inicio de la información de condiciones de carga y las restricciones (apoyos), todo este análisis se realizó bajo el esfuerzo de Von-Mises, donde su criterio final fue de 95.118Mpa y un factor de seguridad óptimo de 2.62. (Arevalo, 2019)

Es de primera importancia enfocar nuestros esfuerzos en brindar al usuario el vehículo más seguro posible, sin comprometer otras funciones e incluso contrarrestar las deficiencias con sistemas inteligentes. En el artículo “Topological optimization of automotive structures under impact using robust design” analizan más a fondo esta situación, ya que su trabajo se centra en la optimización de la región colapsable de un chasis ligero con el fin de proporcionar la máxima cantidad de energía absorbida, a



través de minimizar la influencia de factores externos, como ángulos de impacto, que ocurren comúnmente en accidentes de tráfico cotidianos. Por lo que el vehículo, en especial su chasis, se desvía desde el estado perfecto de impacto frontal, que se considera comúnmente en el análisis de resistencia a los choques. Creando así una metodología de optimización para su uso en chasis ligero, sin comprometer la funcionalidad y centrándose en su rendimiento durante imperfecciones colisiones, predominantemente que involucran asistidas por computadora Diseño (CAD), Ingeniería asistida por computadora (CAE) y técnicas de diseño robusto.(Gardea & Valenzuela, 2015)

En el artículo “HUMAN POWERED VEHICLE DESIGN: A CHALLENGE FOR ENGINEERING EDUCATION” se refieren a que las competiciones centradas en la movilidad terrestre como SAE Formula Student, Shell Eco Marathon y World Solar Challenge buscan involucrarse en proyectos emocionantes y prácticos con una serie de efectos positivos en su trayectoria educativa para desarrollar habilidades para el trabajo en equipo, afrontar todos los aspectos del diseño del producto como esbozar, dibujar, simular, elegir materiales y procesos, teniendo en cuenta todo el montaje y el papel específico de cada pieza, lidiar con la resolución de problemas mientras se pasa del diseño fase a la fase de producción y prueba, donde, en el 99% de casos descubrirán algunos errores e Incrementar la motivación por el autoaprendizaje para contribuir activamente al proyecto.(Baldissera & Delprete, 2014)

En la investigación de Nested Topology Optimization Methodology for Designing Two-Wheel ChassisUno se dice que “los mayores desafíos en la industria

automotriz es reducir continuamente el peso y el costo del material, mientras se mantienen las mismas características funcionales. El concepto de aligeramiento mediante algoritmos de optimización se ha vuelto vital en la última década teniendo un impacto significativo en la industria automotriz especialmente con el aumento en el número de procesos de fabricación utilizados para desarrollar piezas, como mecanizado, forjado, estampación y técnicas de fabricación aditiva. Especialmente con la revolución de la fabricación aditiva (AM), las posibilidades que dio a conocer y la libertad de diseño que permitió, los métodos de optimización han demostrado ser una herramienta poderosa para los diseñadores que conducen a resultados muy interesantes y estructuras óptimas. Sin embargo, la topología solo se ocupa del cumplimiento de ciertas restricciones que están relacionadas con los requisitos estructurales del chasis y la capacidad de fabricación del chasis e ignora los parámetros del diseño del vehículo, como el posicionamiento de los componentes, la distribución dinámica del peso del vehículo, etc. En el estudio actual se propone un nuevo marco de optimización de topología estructural anidado con el objetivo de superar este obstáculo, facilitar el proceso de diseño y reducir significativamente el tiempo. La optimización de la topología se inicia a partir de un volumen de material acotado, que representa el espacio de diseño para el proceso. La adopción de una geometría lo más simple posible es muy importante para lograr una malla regular de alta calidad".(Stefanos et al., 2019).

En el artículo *A Design Strategy Based on Topology Optimization Techniques for an Additive Manufactured High Performance Engine Piston* Trata sobre el uso del método AM para generar alternativas de procesado mediante su uso, ya que esta

técnica tiene como base el uso de optimización topológica y es de mayor utilidad porque se puede definir con precisión donde va a ir la masa depositada, en este caso es el uso de deposición para la construcción de un pistón y que este al final de las pruebas demostró su aplicabilidad de la metodología y del trazado geométrico y distribución de espesores de la estructura. (Barbieri et al., 2017)

Es este artículo *Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method* se habla sobre el uso óptimo de elementos estructurales basados en la variación de límites que al final da como resultado un diseño topológico equivalente al inicial, para esto la estructura debe estar discretizada por una malla para que se pueda procesar, consiste en calcular la distribución óptima en el espacio de un material anisotrópico que se construye introduciendo un mínimo de pequeños orificios distribuidos periódicamente en un material homogéneo e isotrópico dado. Los resultados computacionales se presentan y comparan con los resultados obtenidos por variaciones de límites. (Bendsøe & Kikuchi, n.d.)

## CAPÍTULO 5

### METODOLOGÍA

La metodología realizada en este trabajo tiene un enfoque correlacional y explicativo, ya que se está dando la relación causa efecto que se genera por la optimización topológica en la estructura del Vehículo de Tracción Humana con respecto a su análisis en los criterios de diseño bajo esfuerzo deformación. Esta metodología se realizará en la secuencia de los siguientes pasos:

#### **5.1 Construcción de función objetivo, parámetro de diseño y condiciones de frontera.**

La metodología seguida para el diseño de un vehículo de tracción humana será científico-computacional para la cual se realizará con base en conocimientos del área de optimización topológica y resistencia. En esta se tendrá como función objetivo la relación peso/resistencia, ya que es la mejor condición que se ajusta a las condiciones de servicio, de frontera y de esfuerzo. Existen otras funciones objetivo como la de controlar el desplazamiento que pueda tener la estructura una vez se le generen esfuerzos, pero eso no es lo que se quiere hacer énfasis, se desea poder tener la cantidad de materia necesaria para que la estructura sea lo más liviana posible. Las condiciones de frontera en las que se basará la investigación serán:

Más liviano, donde el esfuerzo por el peso de la estructura y del piloto sea el menor posible y que el cambio de velocidades beneficie lo mejor posible en el rendimiento por el trabajo hecho.

Menos robusto, al optimizar la estructura por la función objetivo se eliminará la cantidad de masa que no es necesaria, ya que el volumen es una propiedad de la materia entre menos se tenga menos volumen habrá y se tendrá una apariencia más delgada.

Ergonómica, por otra parte, la implementación del confort, donde tiene como objetivo este parámetro es aumentar la seguridad, el bienestar de cómo se sienta el piloto, la postura de que no vaya a acarrear problemas a futuro y la eficacia en el rendimiento que se tenga al momento de hacer uso del vehículo.

De fácil manufactura, esto optimizará la cantidad de energía necesaria para la construcción del prototipo escogido, que no sea más de la necesaria. Que las partes sean fáciles de generar donde no se tengan que usar herramientas especiales de uso especializado, o materiales de difícil acceso y/o costo elevado.

De sencillo mantenimiento, esto quiere decir, que cualquier persona con el conocimiento básico de herramientas de uso común (físicas y/o computacionales) sea capaz de observar, analizar y realizar un mantenimiento a las partes desgastadas, de ajuste, de lubricación, de tensión entre otras.

## **5.2 Optimización topológica.**

Se hará uso de paquetes de software como SolidWorks 2020® y ANSYS 19.2®, donde se realizarán diferentes mallas a los tres diseños a realizar, hasta que no haya un cambio de variables tan notorio. Se han venido adelantando simulaciones con formas básicas como barras de perfil cuadrado y circular, donde se empieza por escoger el objeto al cual se le realizará el estudio. Después se procede a realizar la simulación bajo cargas estáticas como lo son: las cargas permanentes que se deben al propio peso de la estructura que en este caso variará dependiendo del material (densidad, metal) que sea seleccionado para generar la geometría y las cargas accidentales son generadas por las condiciones a las que será expuesto el objeto como condiciones climáticas, peso del piloto, mobiliario, resistencia al viento, es decir, cargas que pueden variar según el entorno. En este caso la principal carga sobre la cual se tendrá control es la del peso del piloto que oscila cerca de los 85 kg, ya que es el promedio de peso que puede llegar a tener el conductor. A través de estas cargas se podrán observar cuáles son las partes más críticas, es decir, el volumen que presentan mayor deformación, mayores esfuerzos y las que tienen menos valor funcional, que son las que se desean eliminar, ya que al no cumplir una función relevante son un obstáculo para el objetivo que se quieren lograr. Se prosigue con la generación de una malla que discretiza mediante un algoritmo precargado que tiene el software con el fin de caracterizar el vínculo que tienen los elementos que han sido caracterizados en pequeñas zonas del 3D.

## **5.2 Generación y selección de alternativas.**

Una vez tenido una visualización de lo que se realizará y con el estudio de

herramientas de cómputo (SolidWorks 2020®, ANSYS 19.2®), se generarán 3 diseños diferentes con base en la función objetivo y en los parámetros de diseño, a los cuales se les simulará en condición de análisis estático y topológico, observando así su comportamiento expuesto a condiciones de carga y esfuerzo expuestas por el software, de cómo se comporta el material, que tan factible será la manufactura de la estructura, que tanto se puede mejorar la estructura en cuanto al comportamiento de los factores y a la cantidad de materia, si todavía se puede seguir retirando y con eso ha llegado a un óptimo cambio se tendrá en cuenta la comodidad para el piloto para ofrecer el mejor confort con que se pueda contar, se tendrá en cuenta el esfuerzo generado por el peso para disminuirlo lo mejor posible, para que la mayor parte de la fuerza generada no sea para mover el carro sino para aumentar de velocidad . Por último, se escogerá al prototipo que se comporta mejor con las condiciones de servicio propuestas y escogiendo al diseño ganador. Esto se evaluará bajos los criterios de la

Diseño/ Característica Rango calificación (1-5)	Ergonomía	Manufactura	R/W	Total
Diseño 1	3	4	3	10
Diseño 2	4	4	3	11
Diseño 3	2	3	4	9

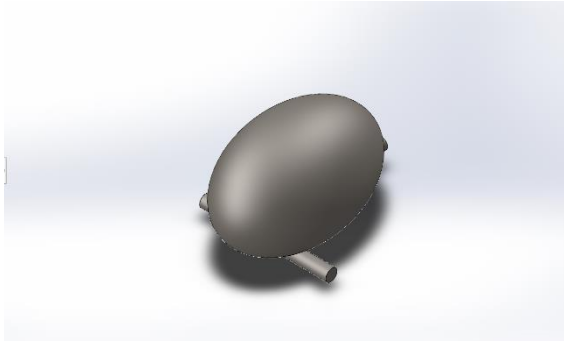
**Tabla 2.** Criterios de selección de diseño.

*Nota: Los criterios para seleccionar el diseño que mejor se comporte según el discernimiento que se le han otorgado. El rango de puntaje va desde 1 hasta 5 según su comportamiento en la característica que se evalúa.*

## CAPÍTULO 6

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

#### Evidencias del proceso



*Tabla 8. Iteración #1 del primer diseño propuesto.*



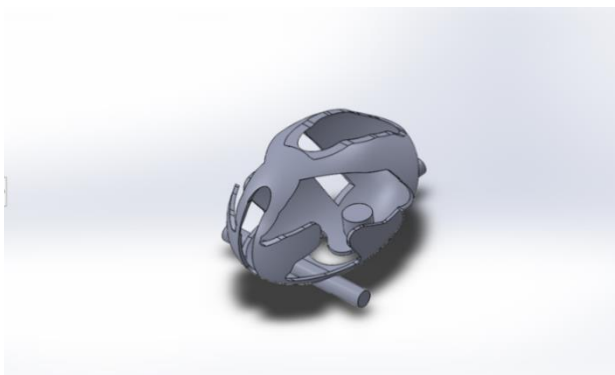
*Tabla 11. Iteración #2 del primer diseño propuesto.*



*Tabla 9. Iteración #2 del primer diseño propuesto.*



*Tabla 12. Iteración #1 del segundo diseño propuesto.*

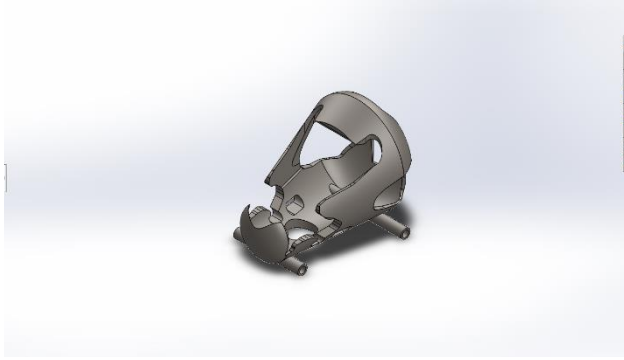


*Tabla 10. Iteración #3 del primer diseño propuesto.*



*Tabla 13. Iteración #2 del segundo diseño propuesto.*





**Tabla 14.** Iteración #3 del segundo diseño propuesto.



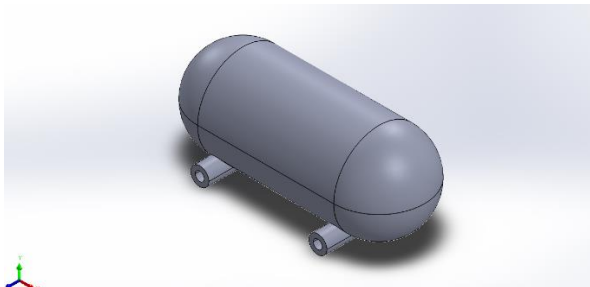
**Tabla 18.** Iteración #3 del tercer diseño propuesto



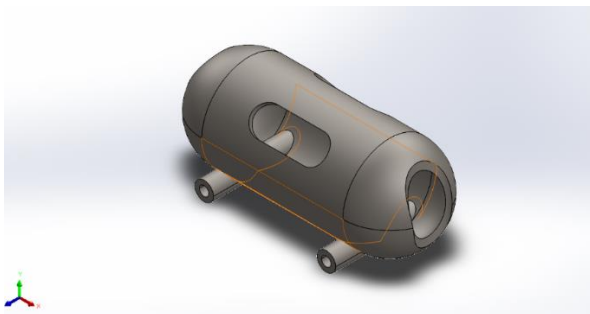
**Tabla 15.** Iteración #4 del segundo diseño propuesto.



**Tabla 19.** Iteración #3 del tercer diseño propuesto.



 **Tabla 16.** Iteración #1 del tercer diseño propuesto.



 **Tabla 17.** Iteración #2 del tercer diseño propuesto.

Para este proceso de optimización topológica del VTH se realizaron tres diferentes diseños para analizar su estructura basados en el análisis comparativo de reacciones desarrolladas en el programa de ANSYS. Comenzamos con una figura de óvalo (*Ilustración 8*) donde se le aplicó una fuerza, debido a esta carga y a las simulaciones realizadas se refleja el material innecesario para este proceso, el cual es extraído (*Ilustración 11*). Por consiguiente, se hace una estructura cónica (*Ilustración 12*) para el análisis estructural de otra figura geométricas, donde percibimos buenos resultados ante las cargas y buenas simulaciones de material (*Ilustración 13*), se sigue con las iteraciones para evaluar su comportamiento (*Ilustración 14*), en la cual se muestra una buena reacción a las simulaciones con las diferentes cargas, donde el resultado de estos análisis se refleja de manera satisfactoria (*Ilustración 15*). Por último, se realiza una figura de tubo con las puntas cóncavas (*Ilustración 16*), a la cual se le realizan dos iteraciones, pero el resultado no es el esperado debido a la figura propuesta (*Ilustración 19*).

#### TABLA MODELO 1-FUTURISTA

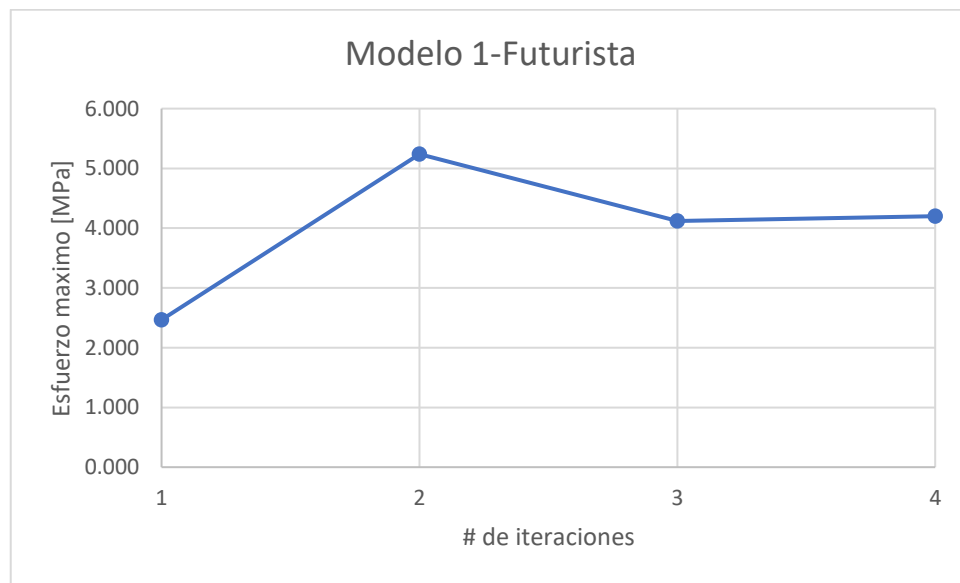
Se realizan dos iteraciones en ANSYS para el modelo futurista (*Ilustración 2*) sosteniendo una aplicación de 1KN gravitacional, esta carga se aplica a la geometría en general, para someterla a condiciones donde se puede eliminar rápidamente el exceso de masa no necesario, el  $\sigma_{\text{máx}}$  A36 de 250MPa

y un factor de seguridad de 3 (*tabla 3*), donde se demuestra que al aplicar esta fuerza en la estructura, se eleva su deformación en cada simulación por lo que la masa [g],  $\sigma_{\text{máx}}$  generado van reduciendo.

Modelo 1-Futurista										
Ensayo	Modelo	Masa [g]	Peso [KN]	$\sigma_{\text{promedio A36}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{max generados}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{max}}$ [mm]	Carga usada	Tipo	Volumen [m3]	
1	1	7284556	71	250	2,466	1,3,E-05	3000 N	Aceleracion [m/s]	0,93	
2	1	3205278	31	250	5,238	4,5,E-02	10000Nj- 5000Nk	Aceleracion [m/s]	0,79	
3	1	625385	6	250	4,118	3,6,E-05	10000Nj- 5000Nk	Puntual	0,63	
4	1	512148	5	250	4,199	3,8,E-05	10000Nj- 5000Nk	Puntual	0,51	

**Tabla 3.** Resultados de ensayos del modelo 1.

**Nota:** Los valores de carga (*tabla 1*) fueron valores utilizados para discriminar de manera rápida las partes de materia que no cumplen un objetivo de esfuerzo de carga, no tiene un sentido específico, son valores tomados a ensayo y error.



**Gráfico 1.** Esfuerzo máximo vs # de iteraciones.

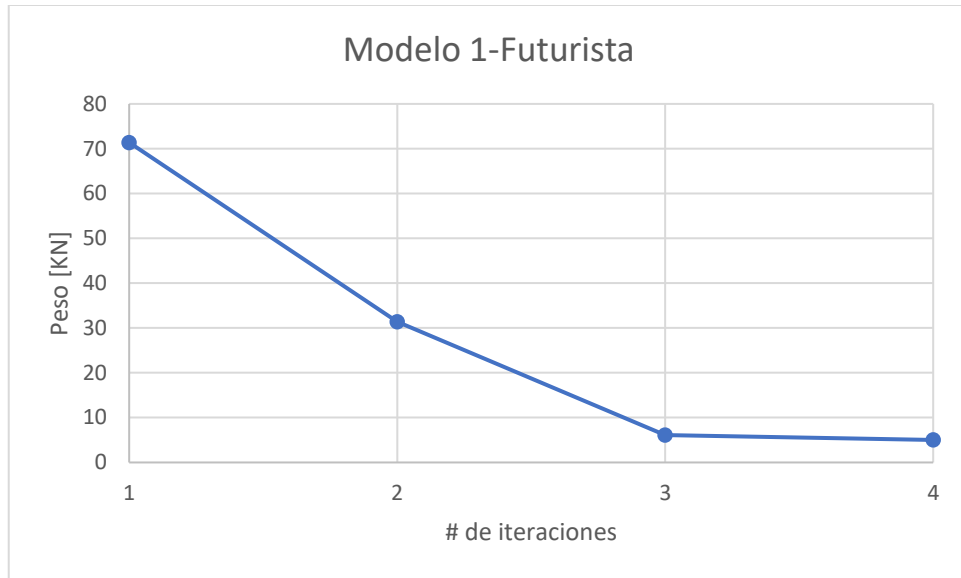


Gráfico 2. Peso vs # de iteraciones.

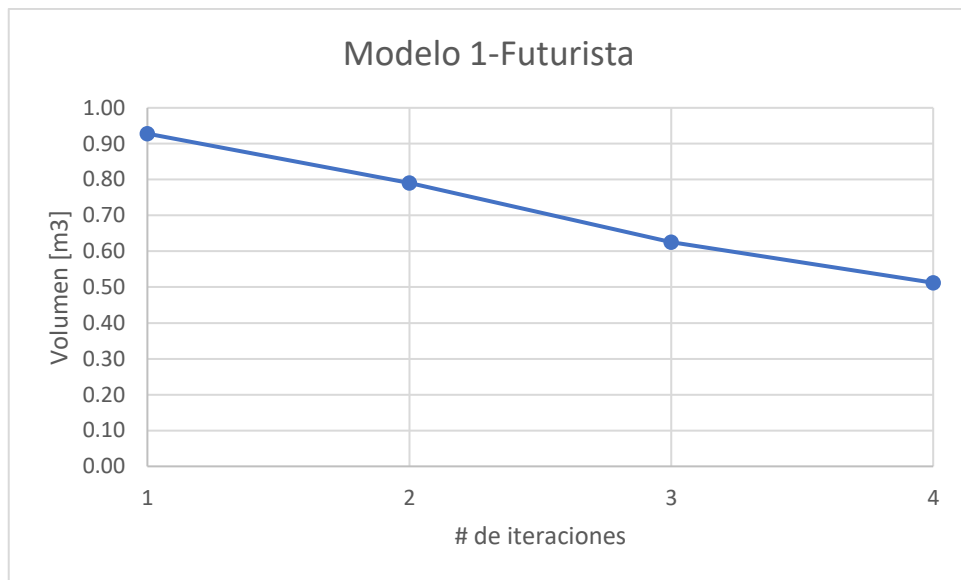
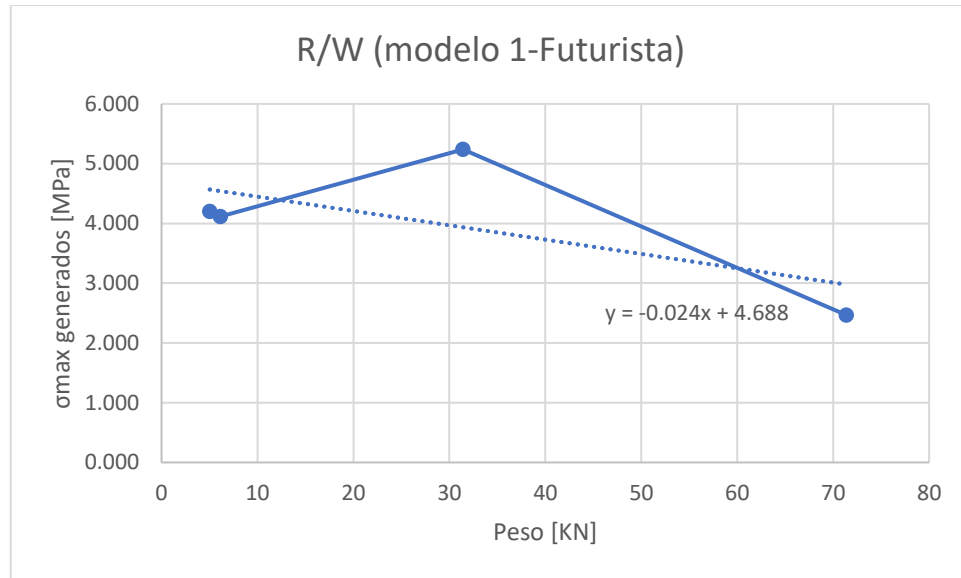
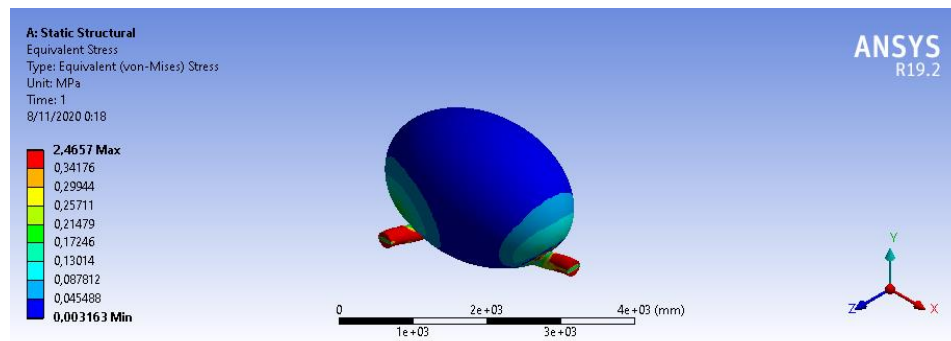


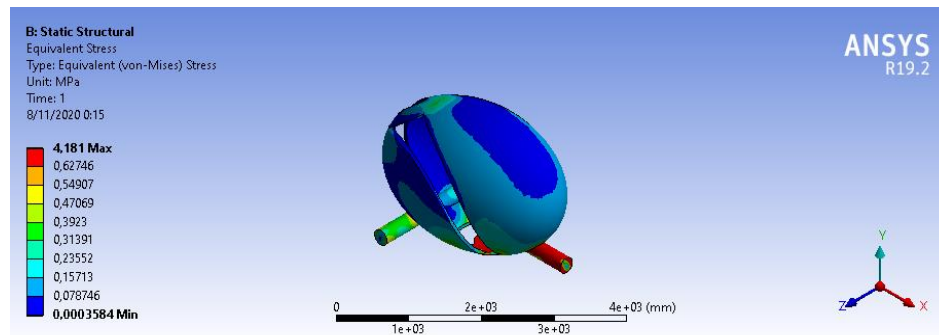
Gráfico 3. Volumen vs # de iteraciones.



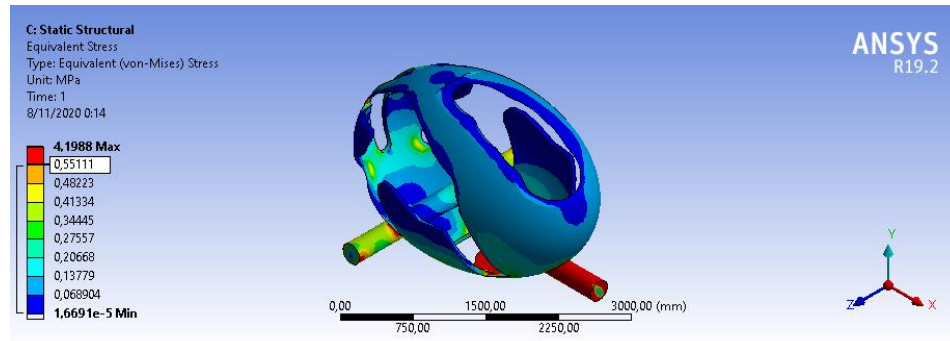
*Gráfico 4. Esfuerzo máximo vs peso.*



*Ilustración 17. Primera simulación de esfuerzo diseño 1.*



*Ilustración 18. Segunda simulación de esfuerzo diseño 1.*



**Ilustración 19.** Tercera simulación de esfuerzo diseño 1.

En la ilustración 17 se puede evidenciar el análisis de esfuerzo aplicado a la primera geometría primitiva propuesta, en la cual las zonas azul fuerte tienden a reflejar el esfuerzo mínimo de esta estructura, por tanto, se realiza una segunda iteración (*ilustración 18*), luego de haber retirado masa de ésta para así poder continuar con el análisis de concentración de esfuerzo en el diseño, el cual se sigue analizando a medida que el software arroja los esfuerzos mínimos (*ilustración 19*).

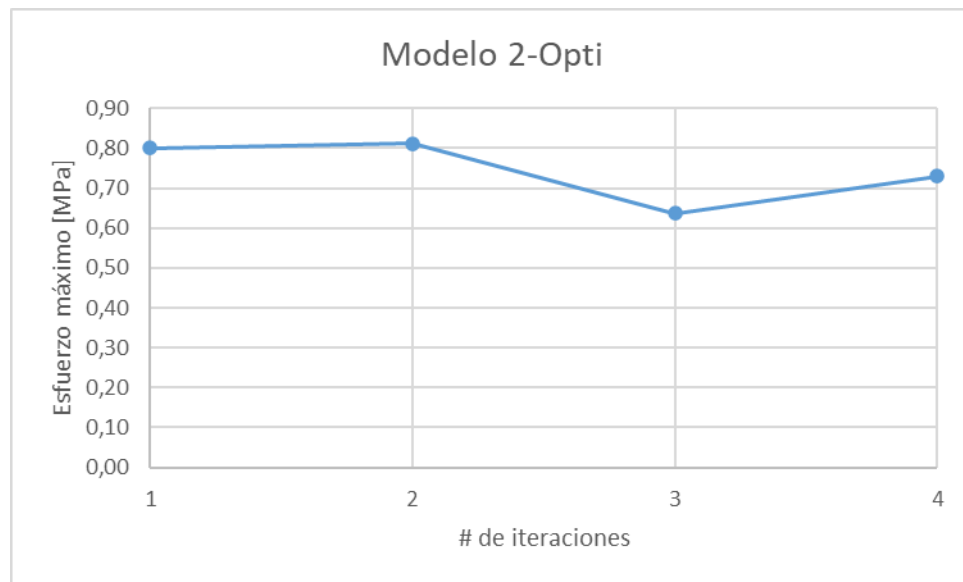
#### TABLAS MODELO 2-OPTI

Al momento de seleccionar la estructura final \*2\* (*ilustración 6*) para la realización de optimización topológica del VTH basados en el diseño más práctico fisionómicamente, se realizan 4 simulaciones (*tabla 2*) en ANSYS, manteniendo en estas el  $\sigma_{\text{máx}}$  A36 de 250MPa y un factor de seguridad de 3, donde, en las primeras dos iteraciones se aplica una fuerza de 1KN gravitacional, en la tercera iteración una fuerza de 5 KN en el área de las silla para simular el peso del conductor, por consiguiente, se realiza una cuarta iteración en la que se aplica una fuerza de 10 KN, conociendo que se inició

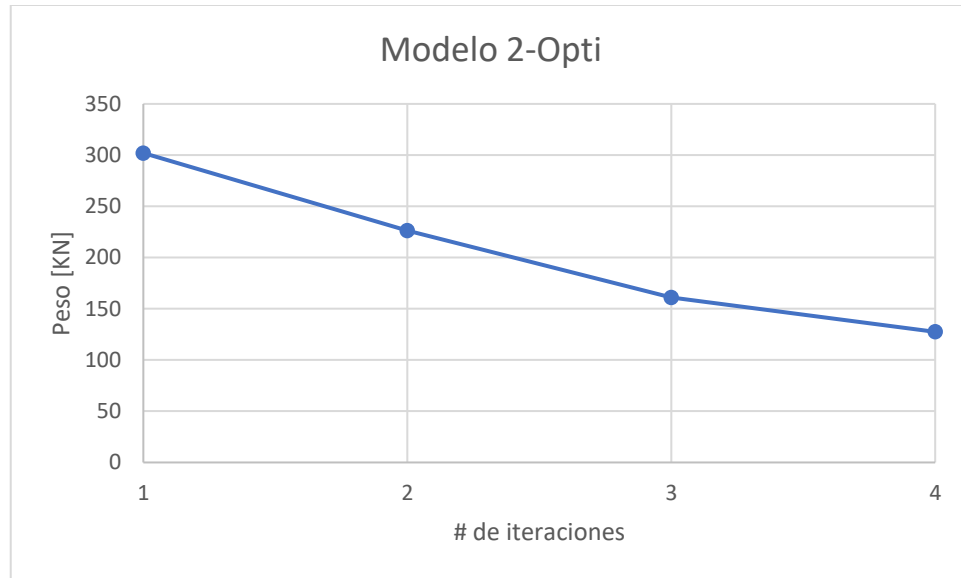
con una masa de 1000 g, donde se pudo notar la reducción del 42% del volumen primitivo de la estructura, por ende, la reducción de peso [N] y masa [g] en cada una de las iteraciones.

Modelo 2-Opti								
Ensayo	Modelo	Masa [g]	Peso [N]	$\sigma_{\text{promedio A36}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{max generados}}$ [MPa]	Carga usada	Tipo	Volumen [m3]
1	2	30822221	302	250	0,80	3000 N	Aceleracion [m/s]	3,93
2	2	23097393	226	250	0,81	10000Ni- 5000Nj	Puntual	2,95
3	2	16444319	161	250	0,64	10000Ni - 5000Nj	Puntual	2,09
4	2	13010436	128	250	0,73	10000Ni- 5000Nj	Puntual	1,66

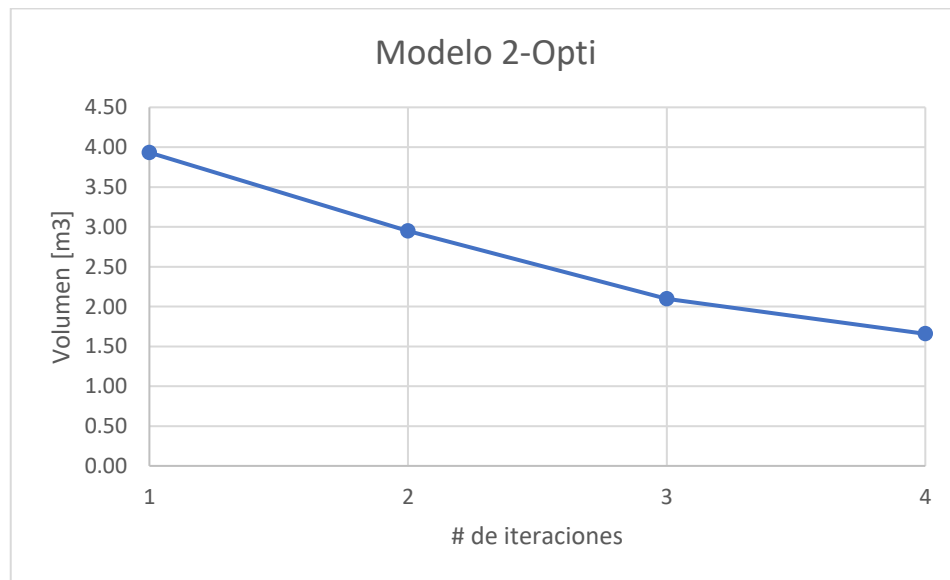
**Tabla 20.** características estructurales del diseño #2.



**Ilustración 20.** Esfuerzo máximo vs # de iteraciones.

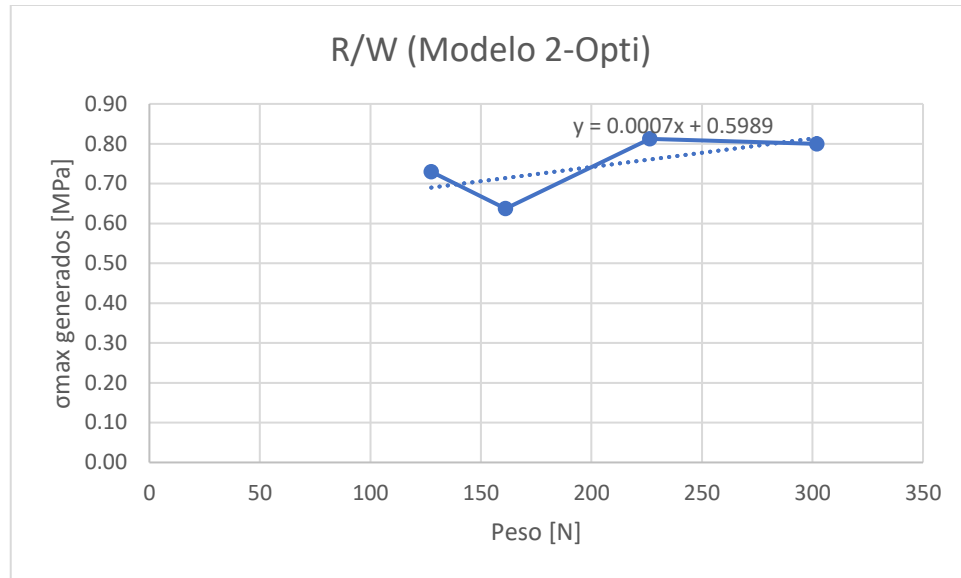


*Ilustración 21. Peso vs # de iteraciones.*

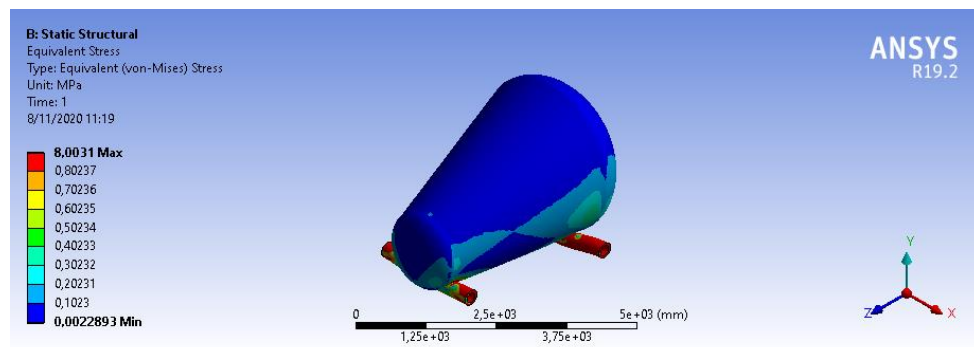


*Ilustración 22. Volumen vs # de iteraciones.*

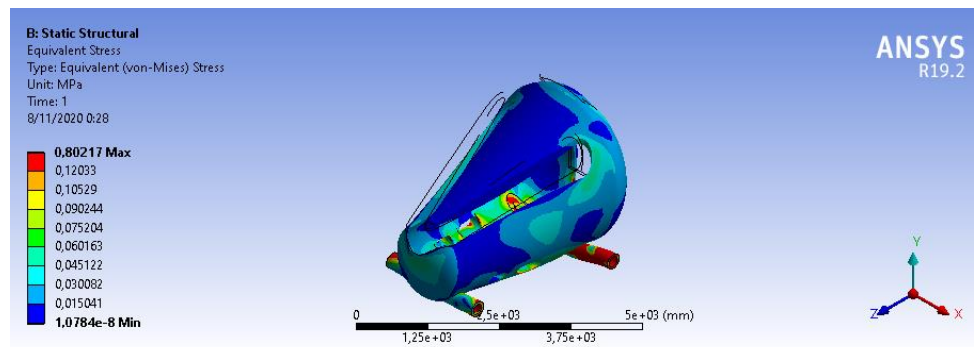




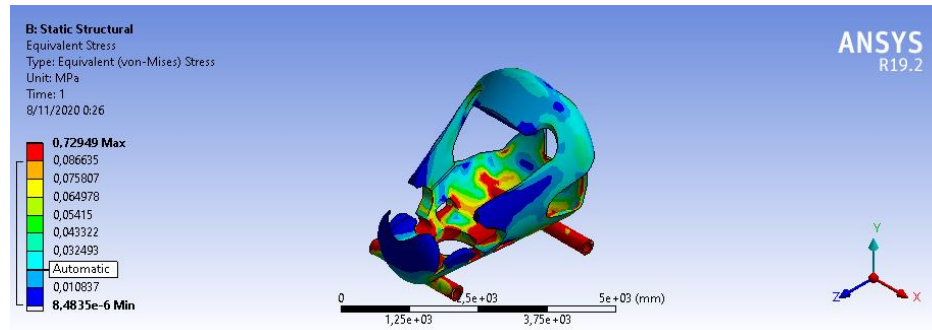
*Ilustración 23. Esfuerzo máximo vs peso.*



*Ilustración 24. Primera simulación de esfuerzo diseño 2.*



*Ilustración 25. Segunda simulación de esfuerzo diseño 2.*



**Ilustración 26.** Tercera simulación de esfuerzo diseño 2.

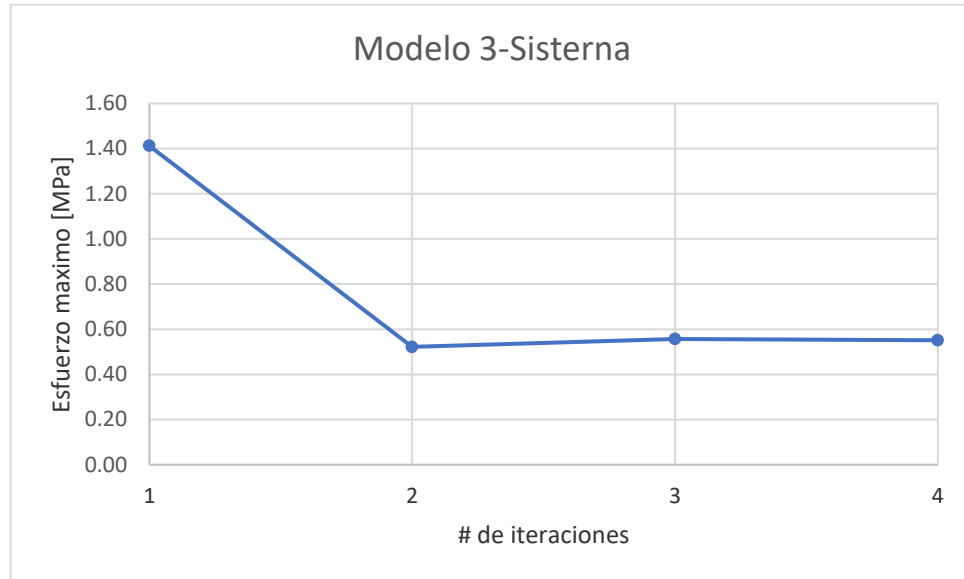
En el análisis estructural del diseño primitivo del segundo modelo propuesto se puede evidenciar como al ser sometido a cargas, este reacciona demostrando sus esfuerzos mínimos (*Ilustración 24*) donde refleja la masa sobrante para dicha estructura, por lo que al ser retirada esta, se sigue iterando en base a la nueva estructura arrojada, donde se analiza el comportamiento de los esfuerzos para seguir estudiando la estructura (*Ilustración 25*), en la última iteración propuesta se denota el resultado del análisis de esfuerzo (*Ilustración 26*)

#### TABLA MODELO 3-SISTERNA

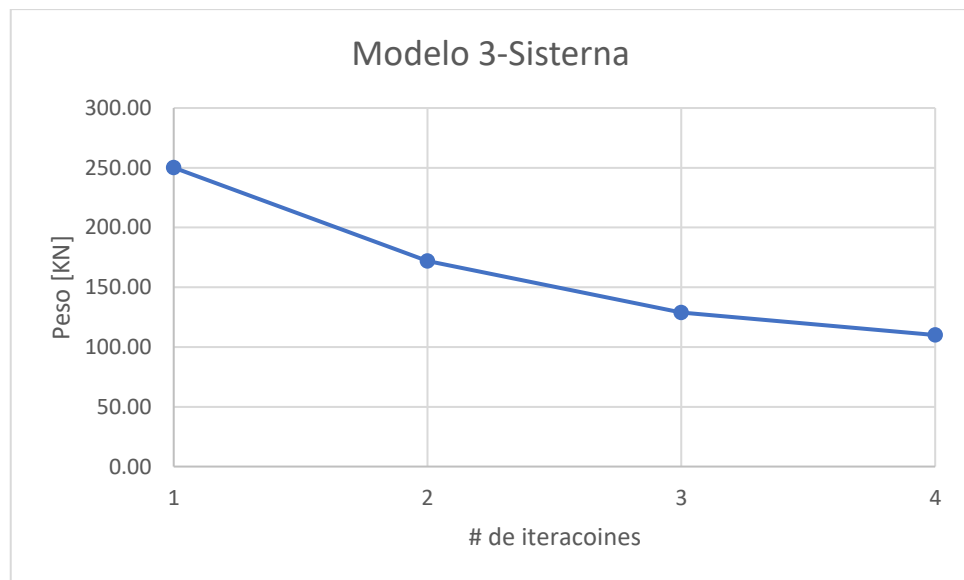
Para el modelo sistema (*Ilustración 7*) se hace un análisis de dos simulaciones, reflejando los resultados de la aplicación de una fuerza de 1KN gravitacional, manteniendo el  $\sigma_{\text{máx}}$  A36 de 250MPa y un factor de seguridad de 3. Donde se muestra una reducción del porcentaje de masa [g] (*tabla 3*), debido a que, por cada iteración, habrá reducción de material.

Modelo 3-Sistema										
Ensayo	Modelo	Masa [g]	Peso [KN]	$\sigma_{\text{promedio A36}}$ [MPa]	$\sigma_{\text{max generados}}$ [MPa]	$\epsilon_{\text{max}}$ [mm]	Carga usada	Tipo	Volumen [m3]	
1	3	25521003	250,11	250	1,41	8,8,E-06	3000	Aceleracion [m/s]	3,251	
2	3	17550547	172,00	250	0,52	4,1,E-06	10000Nj- 5000Nk	Puntual	2,236	
3	3	13165891	129,03	250	0,56	4,4,E-06	10000Nj- 5000Nk	Puntual	1,317	
4	3	11227676	110,03	250	0,55	5,0,E-06	10000Nj- 5000Nk	Puntual	1,430	

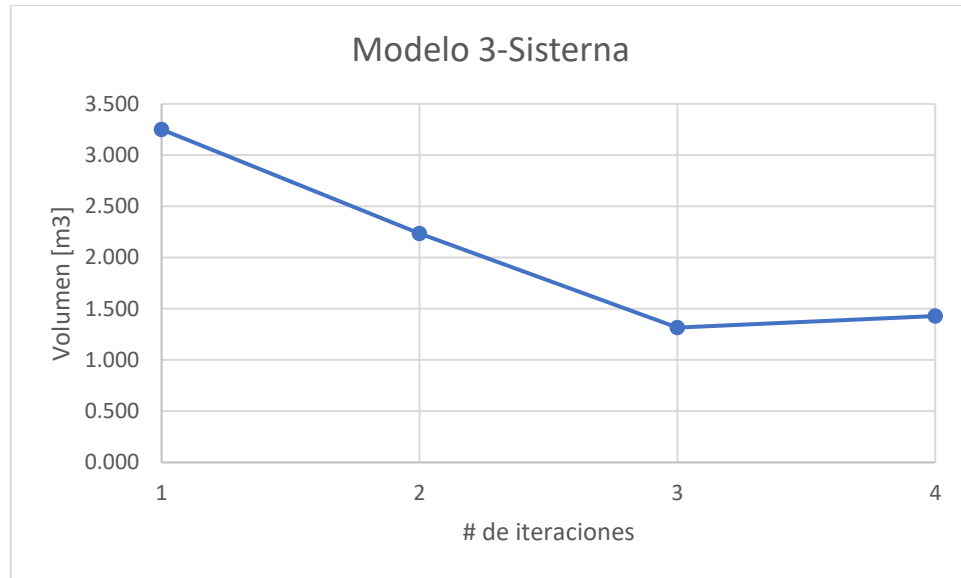
**Tabla 21.** características estructurales del diseño #3.



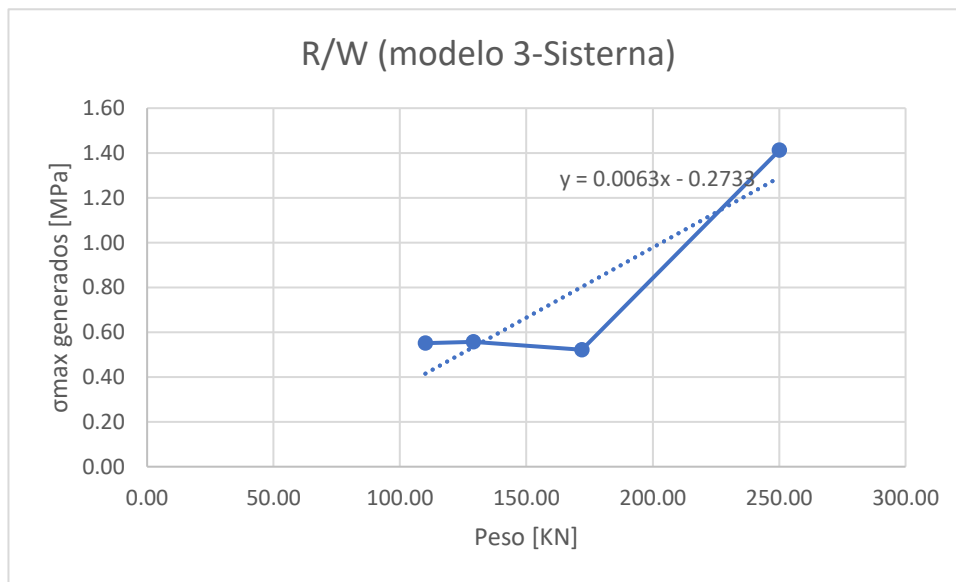
**Ilustración 27.** Esfuerzo máximo vs # de iteraciones.



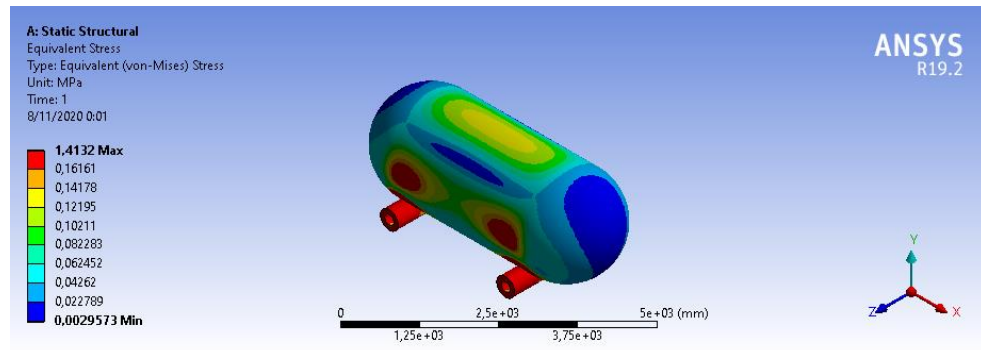
**Ilustración 28.** Peso vs # de iteraciones.



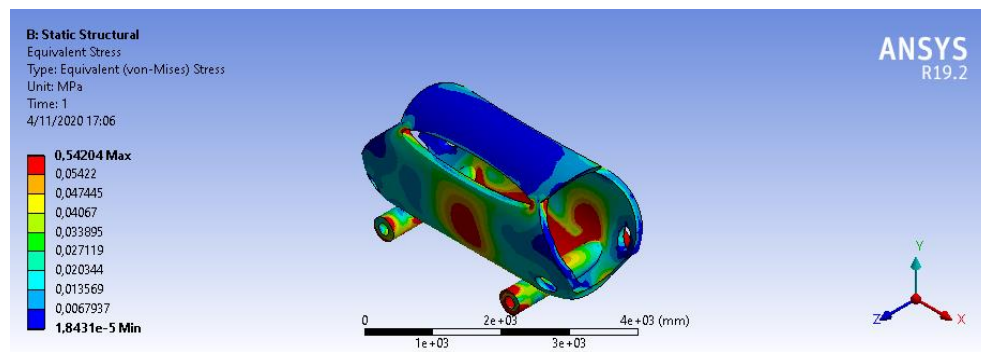
***Ilustración 29. Volumen vs # de iteraciones***



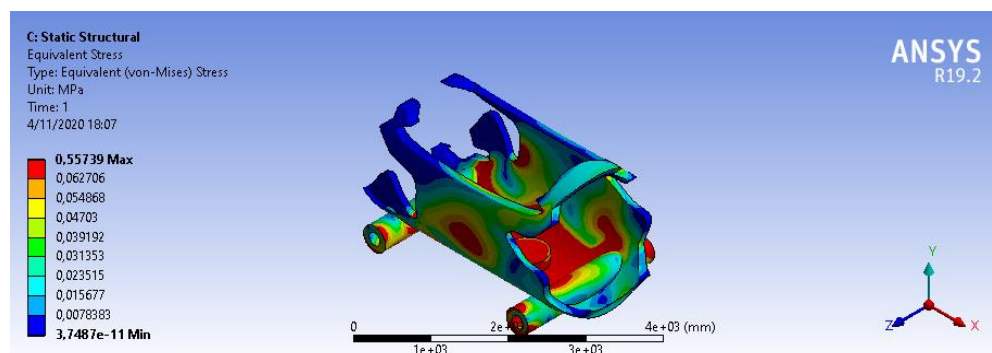
***Ilustración 30. Esfuerzo máximo vs peso.***



*Ilustración 31. Primera simulación de esfuerzo diseño 3.*



*Ilustración 32. Segunda simulación de esfuerzo diseño 3.*



*Ilustración 33. Tercera simulación de esfuerzo diseño 3.*

Las ilustraciones son el resultado de las simulaciones de carga en el diseño propuesto, por esto para el tercer diseño propuesto (*Ilustración 31*) se

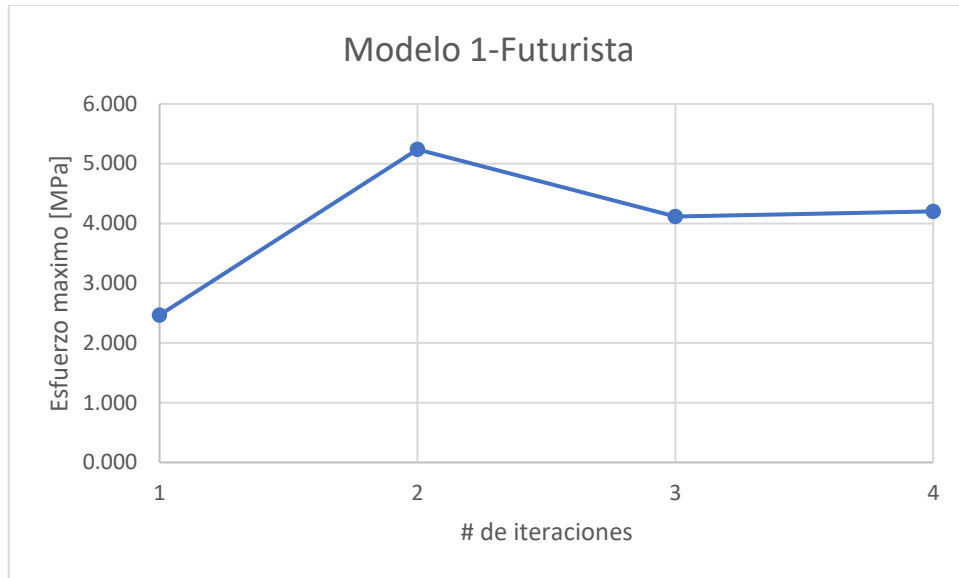
analiza para ver cómo reaccionan sus esfuerzos en la estructura, por esto, en la segunda iteración (*Ilustración 32*) se reflejan los resultados que estuvieron expuestos esta geometría, generando así zonas donde se refleja que hay mayor y menor concentración de esfuerzos y con base a esto se pudo retirar material en la zona donde estos son menores (*Ilustración 33*).

### TABLA MODELO 1-FUTURISTA

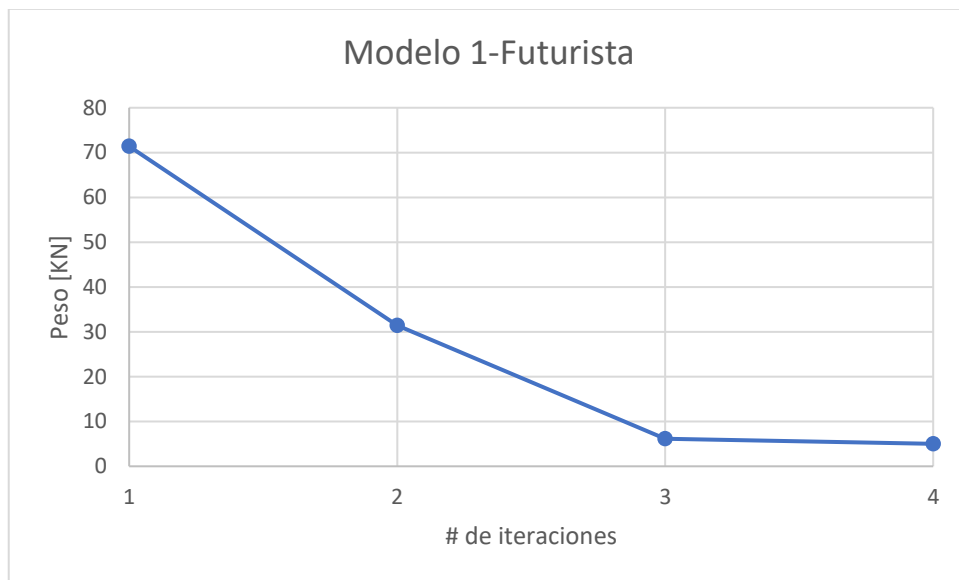
Se realizan dos iteraciones en ANSYS para el modelo futurista (*Ilustración 2*) sosteniendo una aplicación de 1KN gravitacional, el  $\sigma_{m\acute{a}x}$  A36 de 250MPa y un factor de seguridad de 3 (*tabla 1*), donde se demuestra que al aplicar esta fuerza en la estructura, se eleva su deformación en cada simulación por lo que la masa [g],  $\sigma_{m\acute{a}x}$  *generado* van reduciendo.

Modelo 1-Futurista									
Ensayo	Modelo	Masa [g]	Peso [KN]	$\sigma_{promedio\ A36}$ [MPa]	$\sigma_{max}$ generados [MPa]	$\epsilon_{max}$ [mm]	Carga usada	Tipo	Volumen [m3]
1	1	7284556	71	250	2,466	1,3,E-05	3000 N	Aceleracion [m/s]	0,93
2	1	3205278	31	250	5,238	4,5,E-02	10000Nj- 5000Nk	Aceleracion [m/s]	0,79
3	1	625385	6	250	4,118	3,6,E-05	10000Nj- 5000Nk	Puntual	0,63
4	1	512148	5	250	4,199	3,8,E-05	10000Nj- 5000Nk	Puntual	0,51

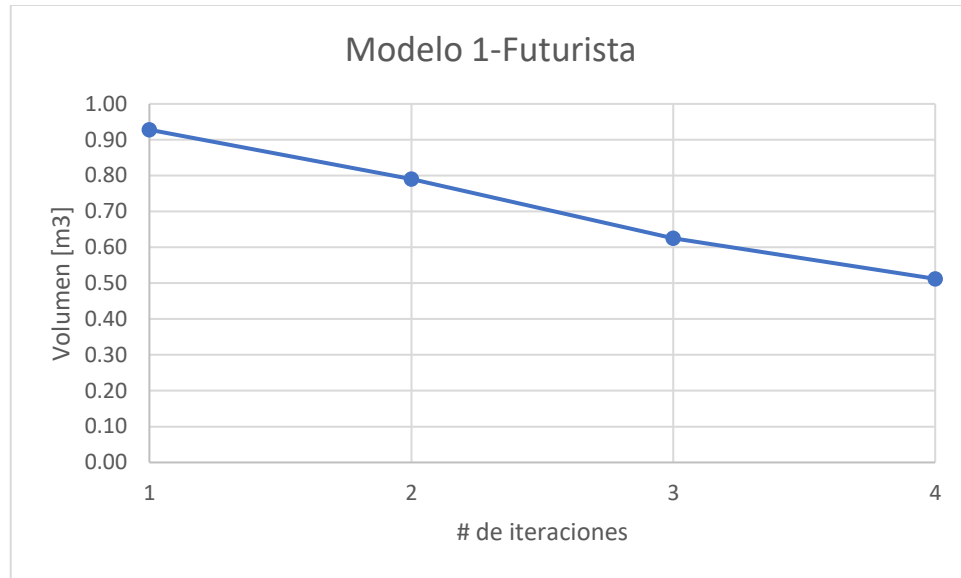
**Tabla 22.** Resultados de ensayos del modelo 1.



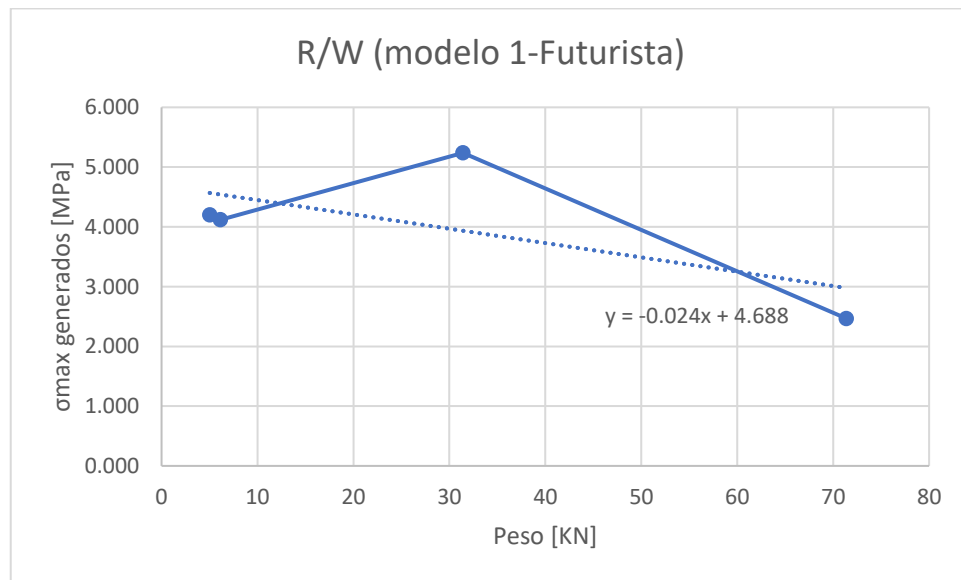
**Tabla 23.** Esfuerzo máximo vs # de iteraciones.



**Tabla 24.** Peso vs # de iteraciones.

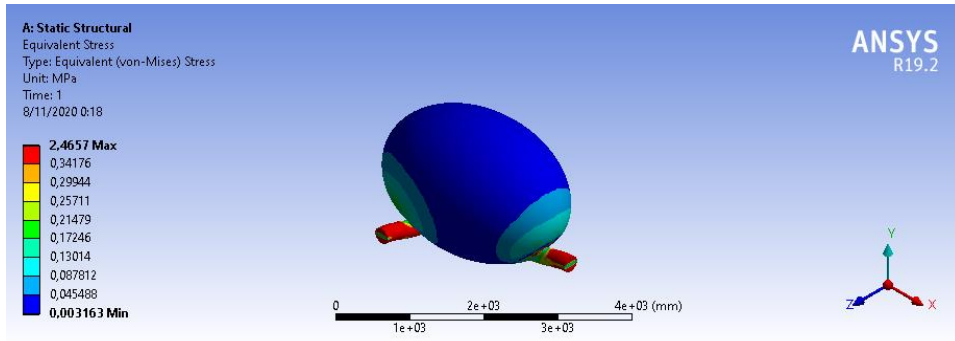


**Tabla 25.** Volumen vs # de iteraciones.

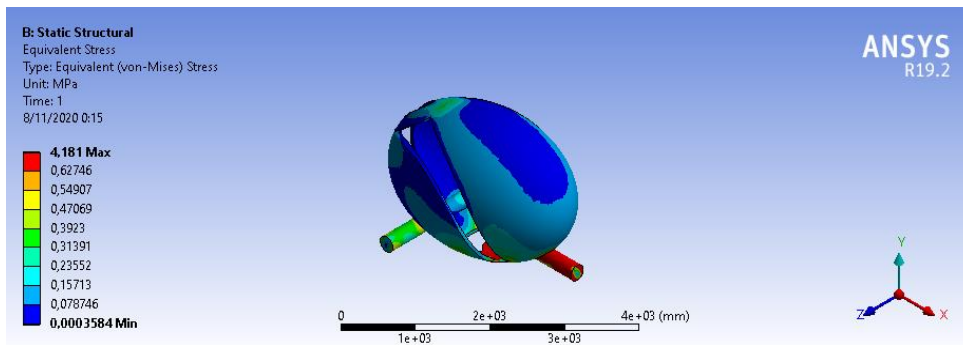


**Tabla 26.** Esfuerzo máximo vs peso.

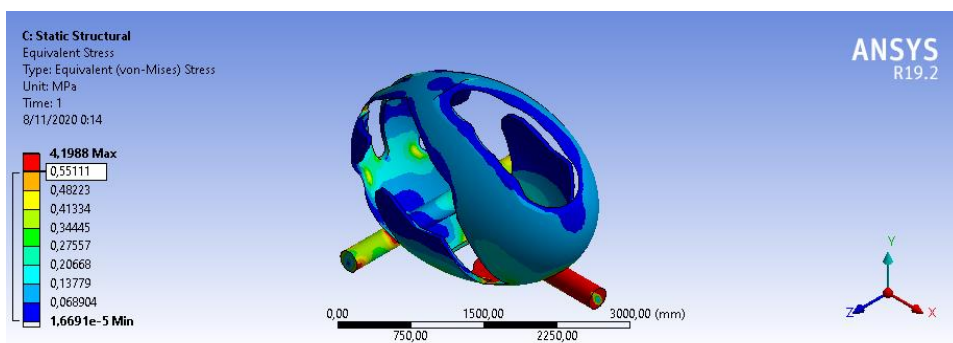




*Ilustración 17. Primera simulación de esfuerzo diseño 1.*



*Ilustración 18. Segunda simulación de esfuerzo diseño 1.*



*Ilustración 19. Tercera simulación de esfuerzo diseño 1.*

En la *ilustración 17* se puede evidenciar el análisis de esfuerzo aplicado a la primera geometría primitiva propuesta, en la cual las zonas azul fuerte tienden a reflejar el esfuerzo mínimo de esta estructura, por tanto, se realiza una segunda iteración (*ilustración 18*), luego de haber retirado masa de ésta para así poder

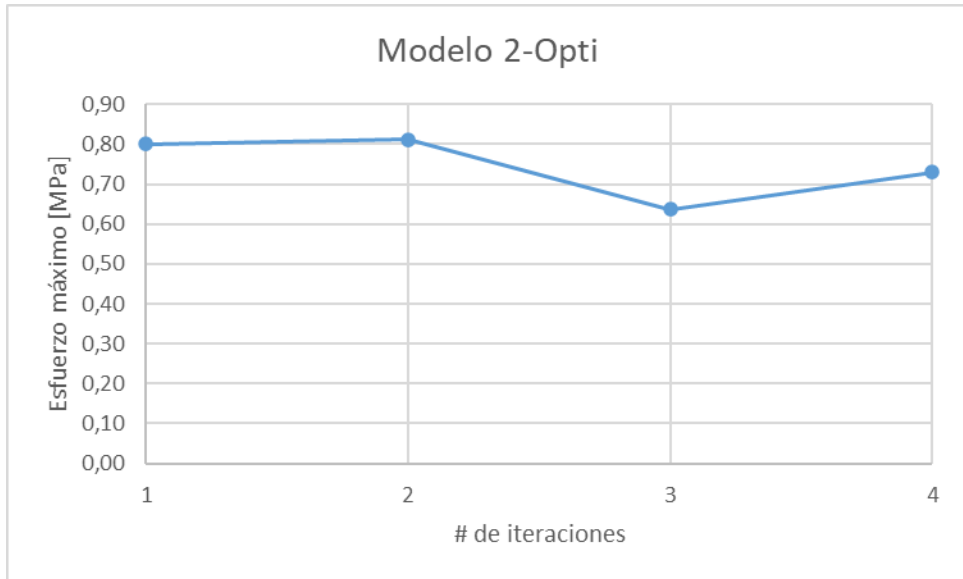
continuar con el análisis de concentración de esfuerzo en el diseño, el cual se sigue analizando a medida que el software arroja los esfuerzos mínimos (*ilustración 19*).

#### TABLAS MODELO 2-OPTI

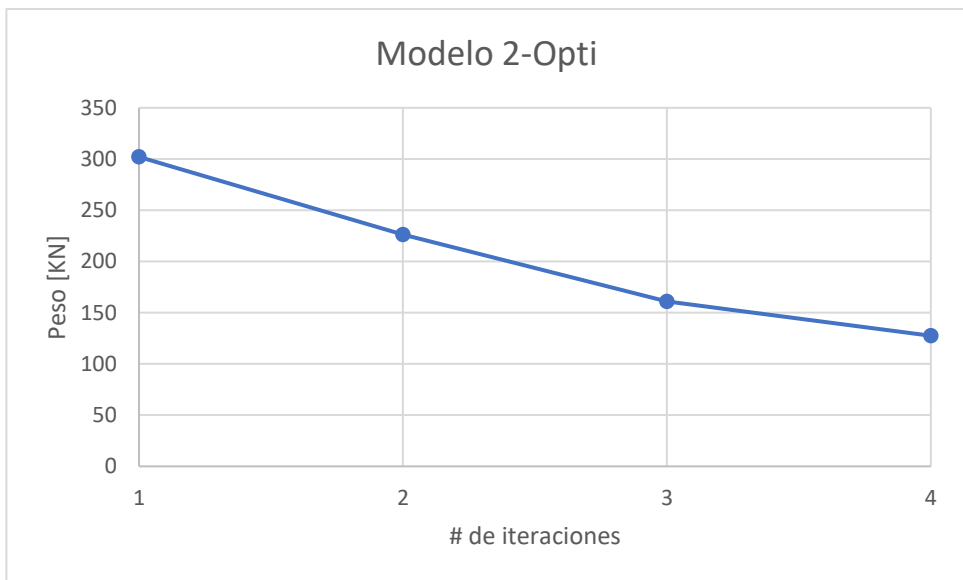
Al momento de seleccionar la estructura final \*2\* (*ilustración 6*) para la realización de optimización topológica del VTH basados en el diseño más práctico fisionómicamente, se realizan 4 simulaciones (*tabla 2*) en ANSYS, manteniendo en estas el  $\sigma_{m\acute{a}x}$  A36 de 250MPa y un factor de seguridad de 3, donde, en las primeras dos iteraciones se aplica una fuerza de 1KN gravitacional, en la tercera iteración una fuerza de 5 KN en el área de las silla para simular el peso del conductor, por consiguiente, se realiza una cuarta iteración en la que se aplica una fuerza de 10 KN, conociendo que se inició con una masa de 1000 g, donde se pudo notar la reducción del 42% del volumen primitivo de la estructura, por ende, la reducción de peso [N] y masa [g] en cada una de las iteraciones.

Modelo 2-Opti								
Ensayo	Modelo	Masa [g]	Peso [N]	$\sigma_{promedio}$ A36 [MPa]	$\sigma_{max}$ generados [MPa]	Carga usada	Tipo	Volumen [m3]
1	2	30822221	302	250	0,80	3000 N	Aceleracion [m/s]	3,93
2	2	23097393	226	250	0,81	10000Ni- 5000Nj	Puntual	2,95
3	2	16444319	161	250	0,64	10000Ni - 5000Nj	Puntual	2,09
4	2	13010436	128	250	0,73	10000Ni- 5000Nj	Puntual	1,66

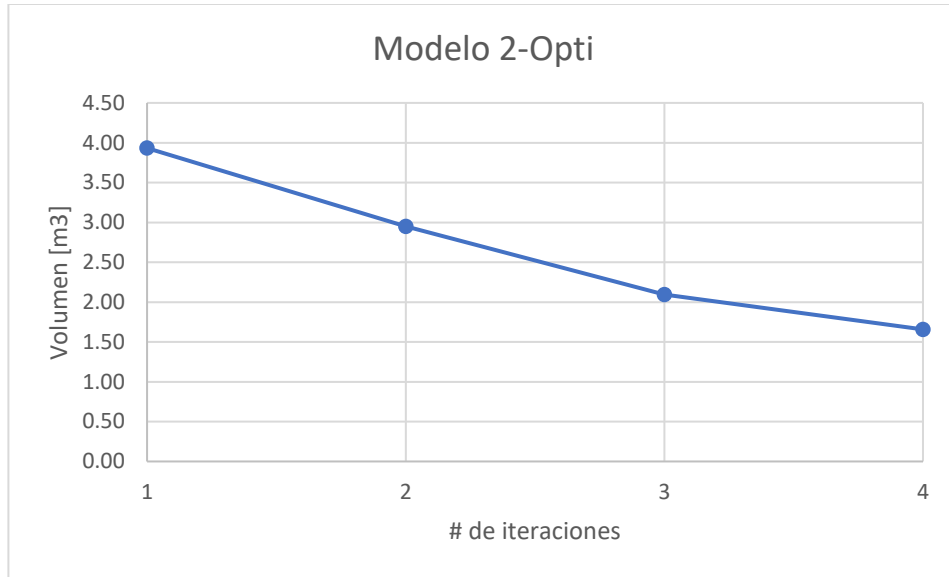
**Tabla 27.** características estructurales del diseño #2.



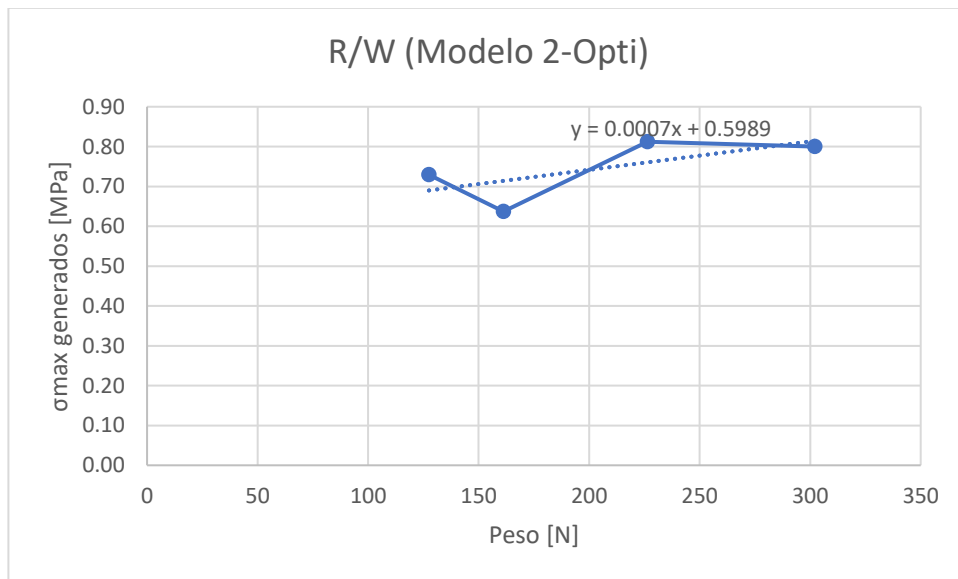
**Ilustración 20.** Esfuerzo máximo vs # de iteraciones.



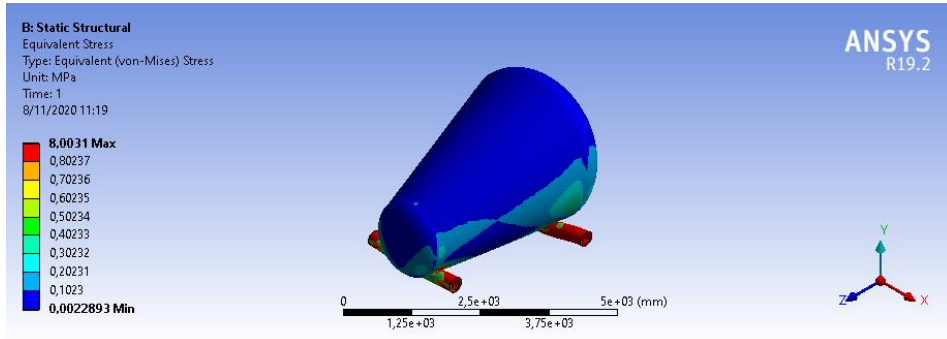
**Ilustración 21.** Peso vs # de iteraciones.



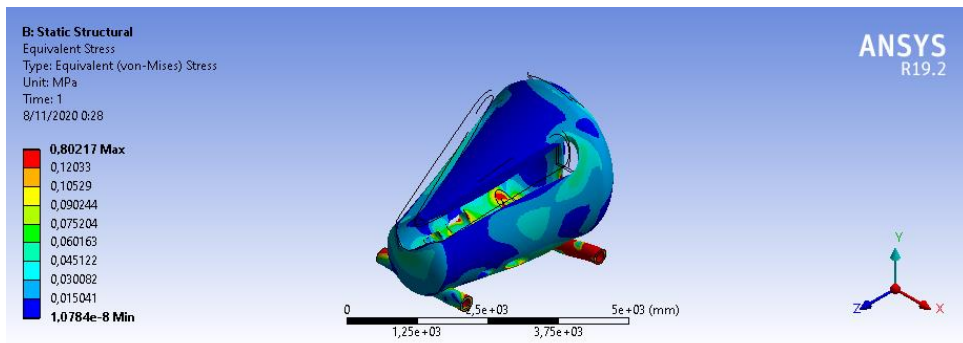
**Ilustración 22.** Volumen vs # de iteraciones.



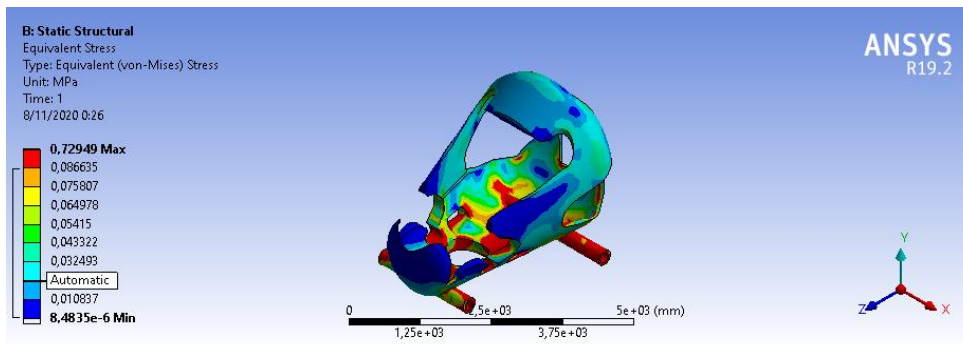
**Ilustración 23.** Esfuerzo máximo vs peso.



*Ilustración 24. Primera simulación de esfuerzo diseño 2.*



*Ilustración 25. Segunda simulación de esfuerzo diseño 2.*



*Ilustración 26. Tercera simulación de esfuerzo diseño 2.*

En el análisis estructural del diseño primitivo del segundo modelo propuesto se puede evidenciar como al ser sometido a cargas, este reacciona demostrando sus esfuerzos mínimos (*Ilustración 24*) donde refleja la masa sobrante para dicha estructura, por lo que al ser retirada esta se sigue iterando en base a la nueva

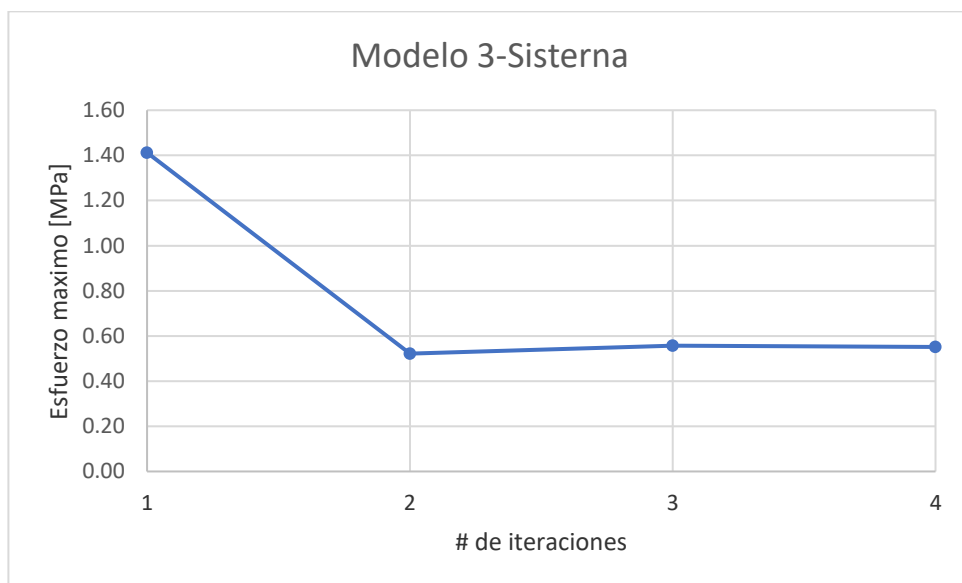
estructura arrojada, donde se analiza el comportamiento de los esfuerzos para seguir estudiando la estructura (*Ilustración 25*), en la última iteración propuesta se denota el resultado del análisis de esfuerzo (*Ilustración 26*)

### TABLA MODELO 3-SISTERNA

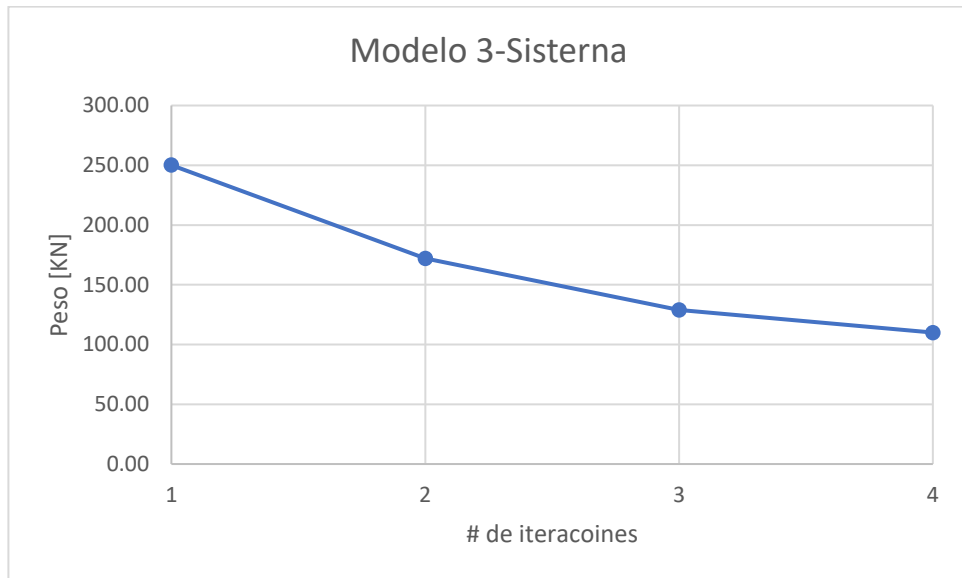
Para el modelo sistema (*ilustración 7*) se hace un análisis de dos simulaciones, reflejando los resultados de la aplicación de una fuerza de 1KN gravitacional, manteniendo el  $\sigma_{m\acute{a}x}$  A36 de 250MPa y un factor de seguridad de 3. Donde se muestra una reducción del porcentaje de masa [g] (*tabla 3*), debido a que, por cada iteración, habrá reducción de material.

Modelo 3-Sisterna									
Ensayo	Modelo	Masa [g]	Peso [KN]	$\sigma_{promedio}$ A36 [MPa]	$\sigma_{max}$ generados [MPa]	$\epsilon_{max}$ [mm]	Carga usada	Tipo	Volumen [m3]
1	3	25521003	250,11	250	1,41	8,8,E-06	3000	Aceleracion [m/s]	3,251
2	3	17550547	172,00	250	0,52	4,1,E-06	10000Nj- 5000Nk	Puntual	2,236
3	3	13165891	129,03	250	0,56	4,4,E-06	10000Nj- 5000Nk	Puntual	1,317
4	3	11227676	110,03	250	0,55	5,0,E-06	10000Nj- 5000Nk	Puntual	1,430

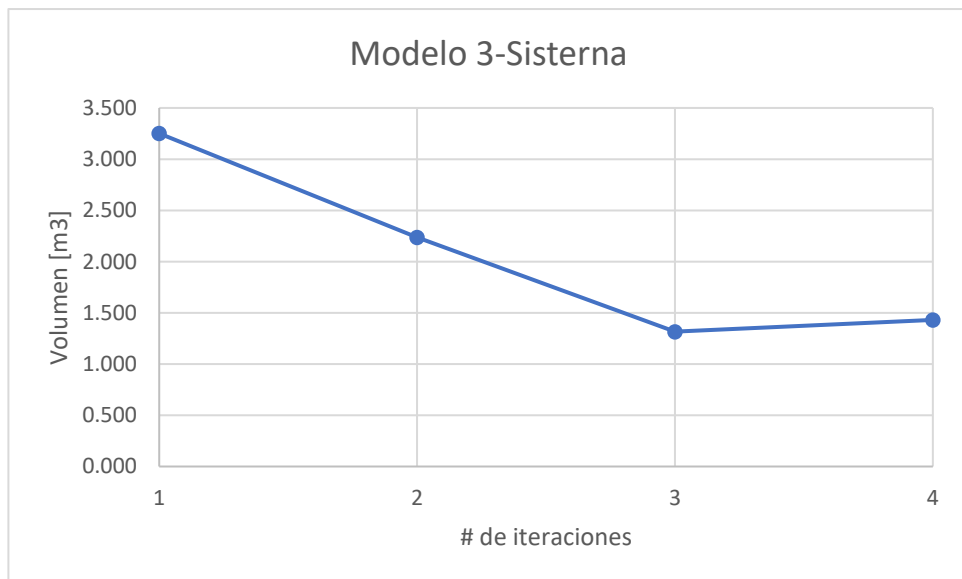
**Tabla 28.** características estructurales del diseño #3.



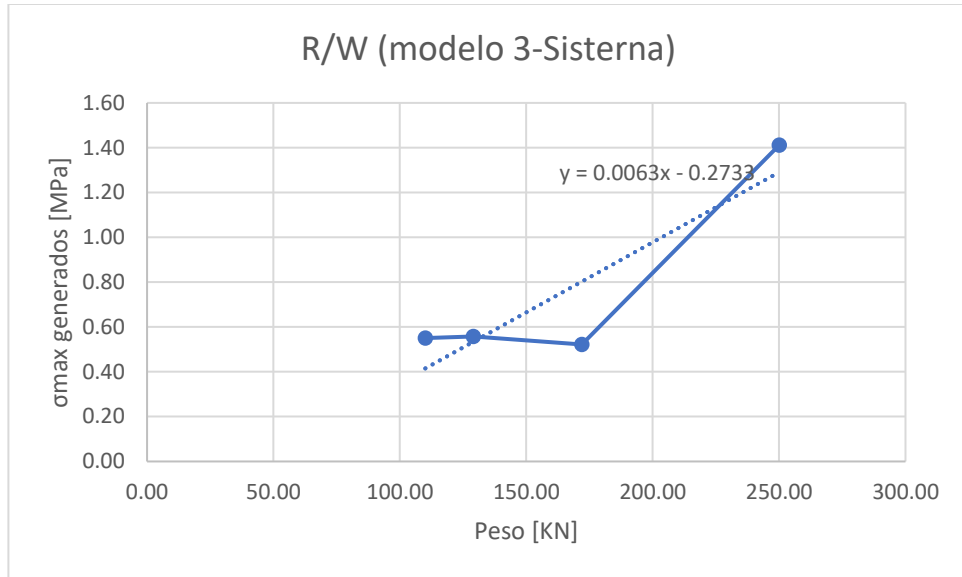
**Ilustración 27.** Esfuerzo máximo vs # de iteraciones.



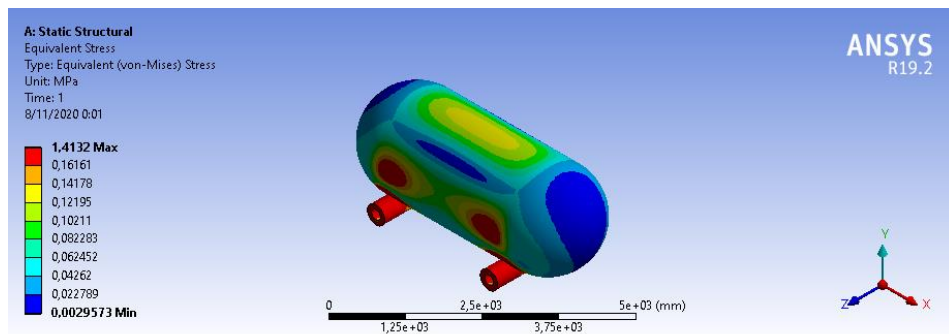
**Ilustración 28.** *Peso vs # de iteraciones.*



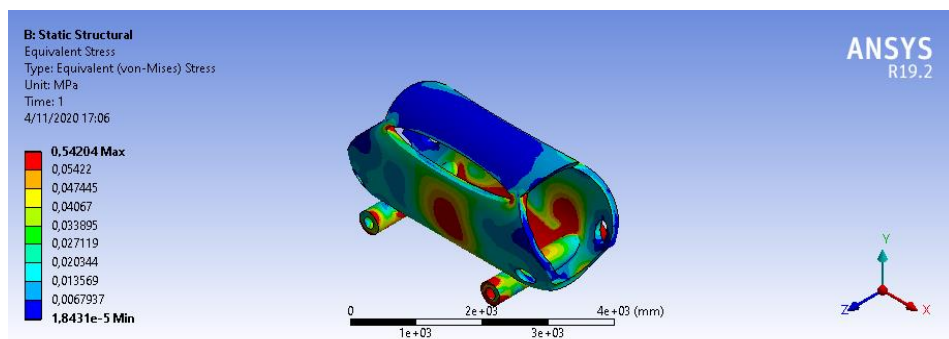
**Ilustración 29.** *Volumen vs # de iteraciones.*



**Ilustración 30.** Esfuerzo máximo vs peso.

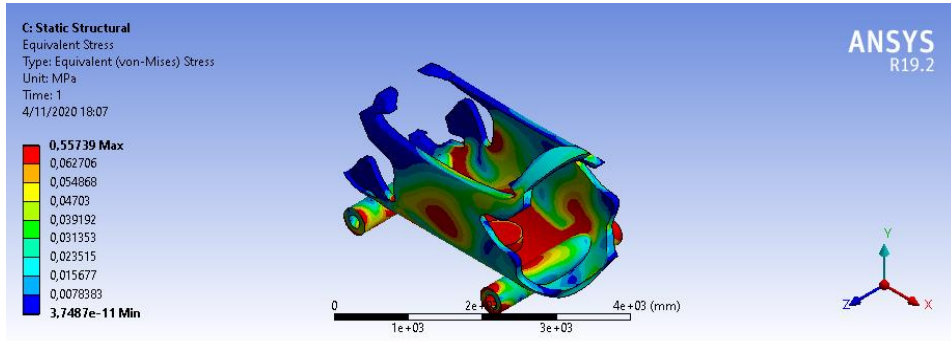


**Ilustración 31.** Primera simulación de esfuerzo diseño 3.



**Ilustración 32.** Segunda simulación de esfuerzo diseño 3.





**Ilustración 33.** Tercera simulación de esfuerzo diseño 3.

Las ilustraciones son el resultado de las simulaciones de carga en el diseño propuesto, por esto para ello (*Ilustración 31*) se analiza cómo reaccionan sus esfuerzos en la estructura, por esto, en la segunda iteración (*Ilustración 32*) se reflejan los resultados que estuvieron expuestos esta geometría, generando así zonas donde se refleja que hay mayor y menor concentración de esfuerzos y con base a esto se pudo retirar material en la zona donde estos son menores (*Ilustración 33*).

#### Selección del Diseño

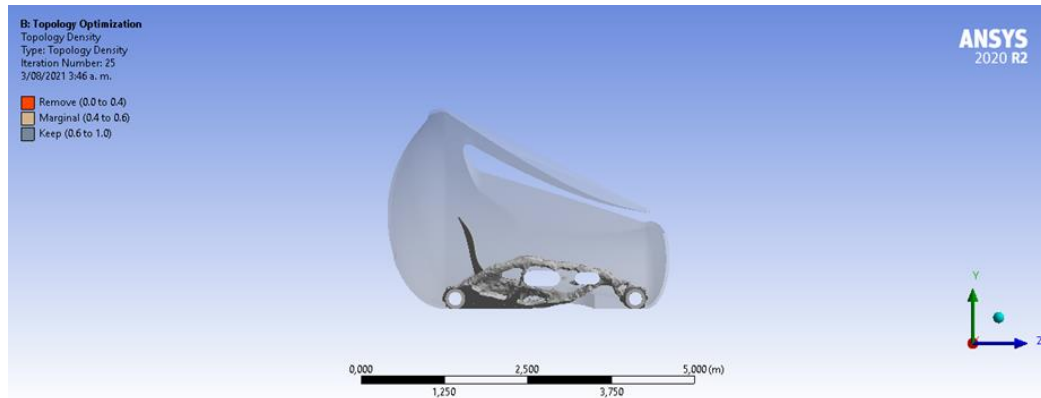
Característica- Rango calificación /Diseño	Ergonomía	Manufactura	R/W	Total
Diseño 1	3	4	3	10
Diseño 2	4	4	3	11
Diseño 3	2	3	4	9

**Tabla 29.** Selección del diseño optimo según características definidas.

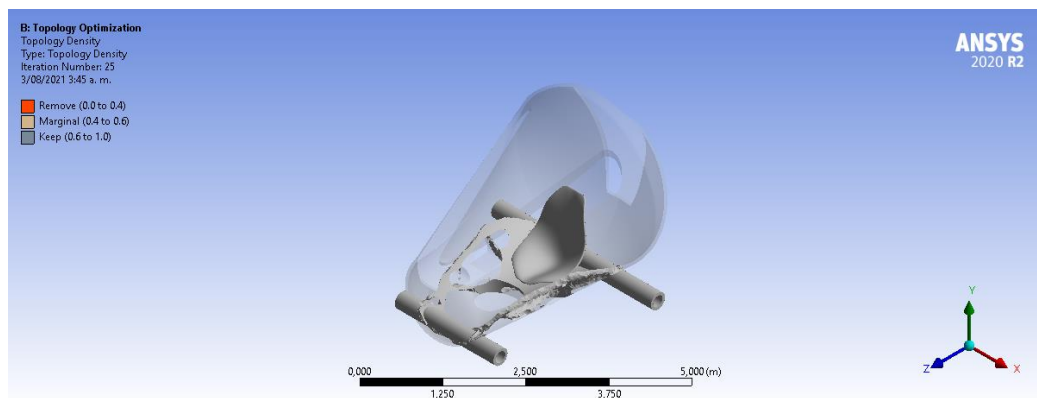
Luego de haber realizado las diferentes simulaciones de los tres diseños del

VTH, se realizó la simulación de las características de diseño (ver tabla 4) en la cual se evaluaron los diseños con una calificación de 1 a 5; donde la ergonomía del cuerpo humano se adaptó de mejor forma en el diseño 4, la manufactura en el diseño 1 y 2, debido a la estructura que se analizó y la resistencia R/W en el diseño 4. Luego de haber hecho estos análisis basados en los resultados de las iteraciones de los diseños, se llega a la conclusión que la estructura 2 es la que mejor puntaje tiene (11) al ser analizada bajo los criterios de diseño, por tanto, esta es la estructura elegida para realizar la selección de marco.

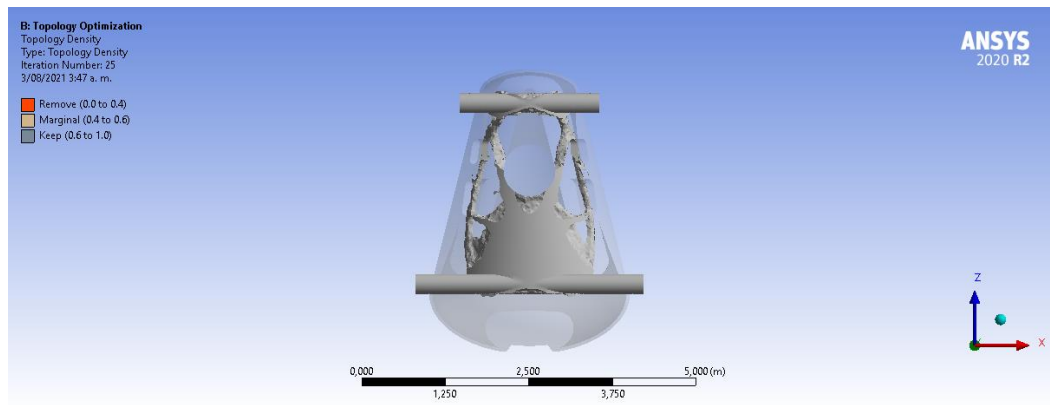
## optimización topológica basado en la selección del volumen primitivo



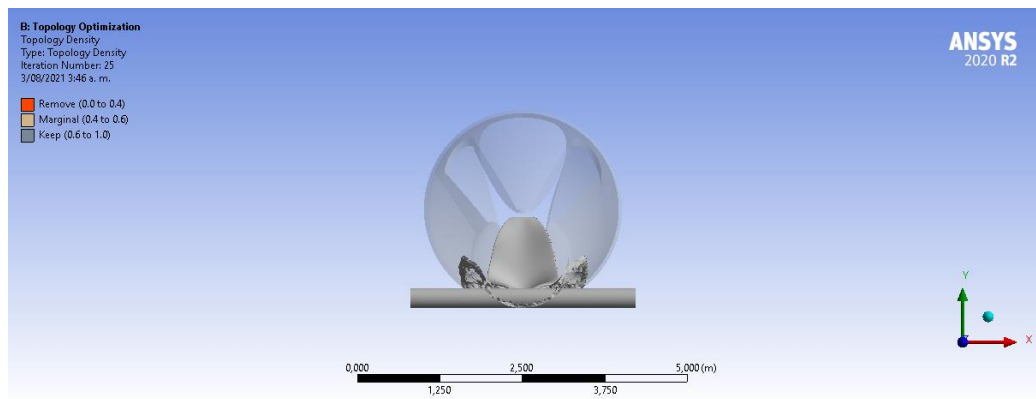
*Ilustración 34. Vista lateral de simulación de la optimización diseño 2.*



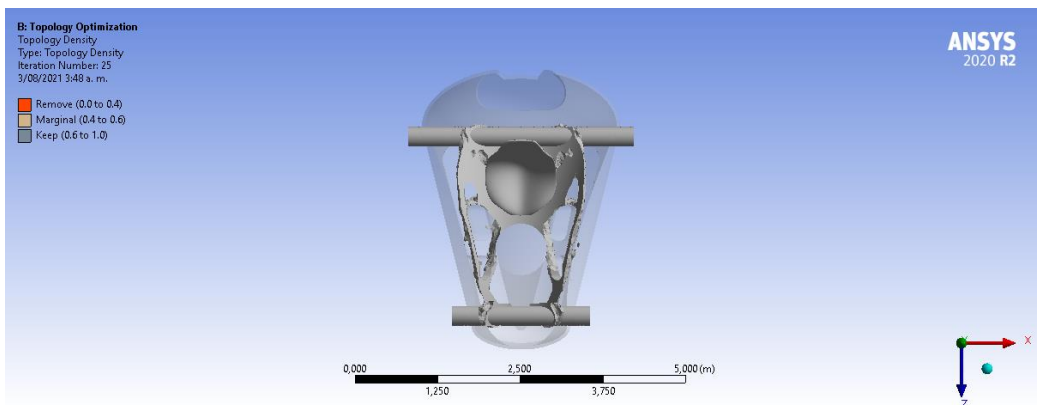
*Ilustración 35. Vista isométrica de simulación de la optimización diseño 2.*



*Ilustración 36. Vista inferior de simulación de la optimización diseño 2.*



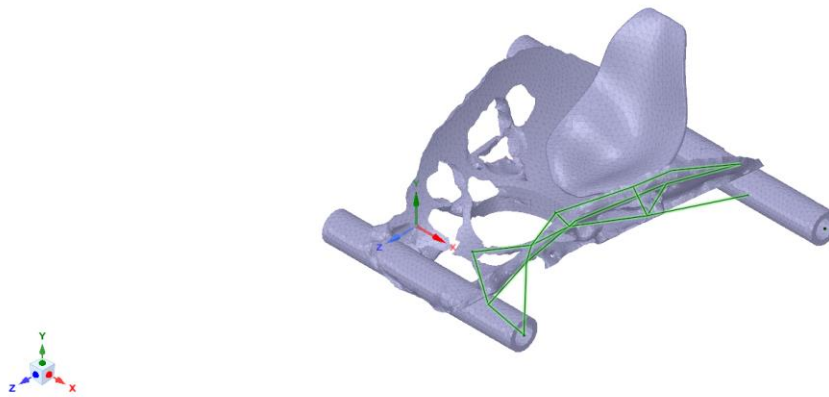
*Ilustración 36. Vista frontal de simulación de la optimización diseño 2.*



*Ilustración 37. Vista superior de simulación de la optimización diseño 2.*

Haga clic en un objeto. Haga doble clic para seleccionar un bucle de borde. Haga triple clic para seleccionar un sólido.

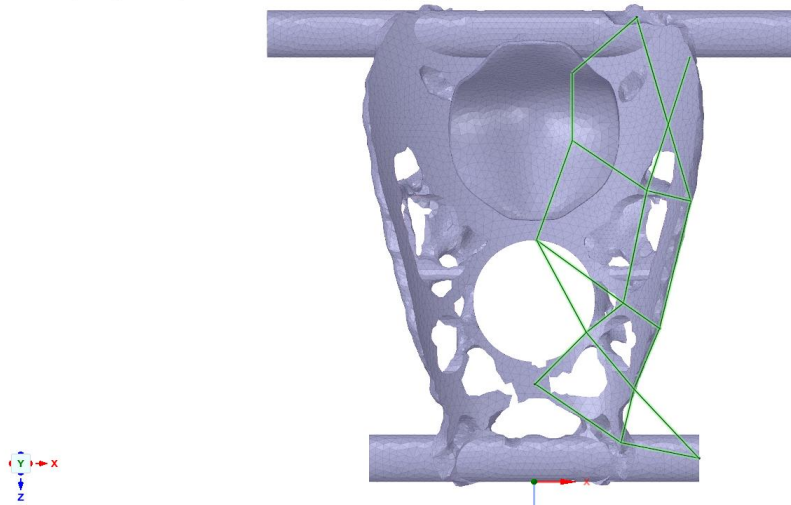
ANSYS  
2020 R2



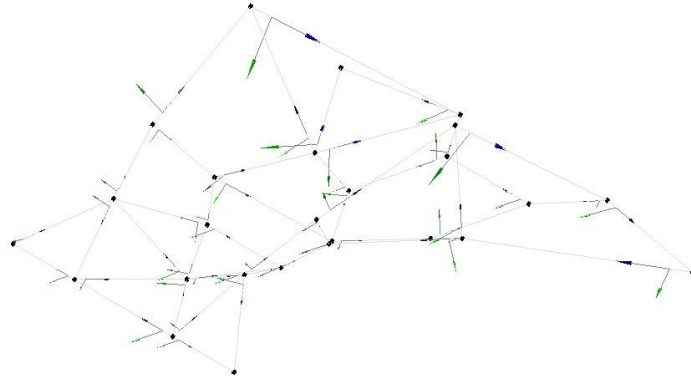
**Ilustración 38.** Vista isométrica perfilamiento de estructura.

Haga clic en un objeto. Haga doble clic para seleccionar un bucle de borde. Haga triple clic para seleccionar un sólido.

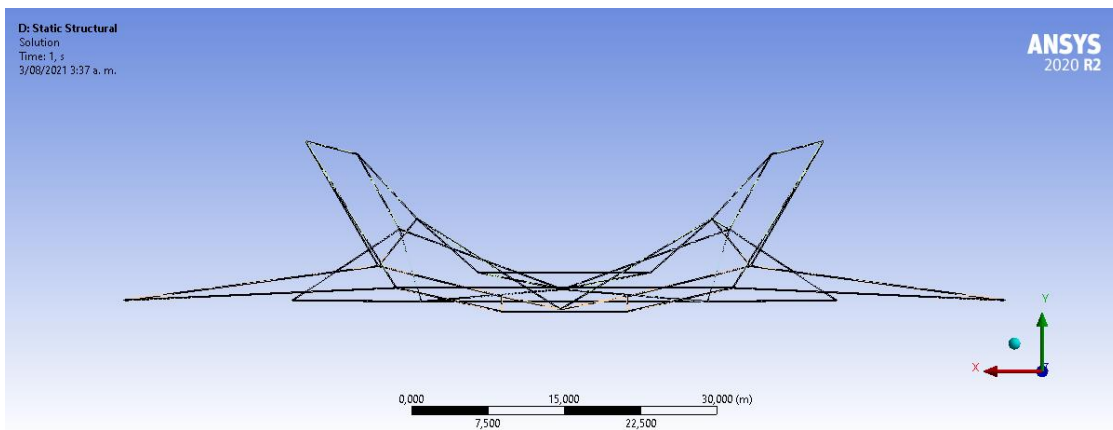
ANSYS  
2020 R2



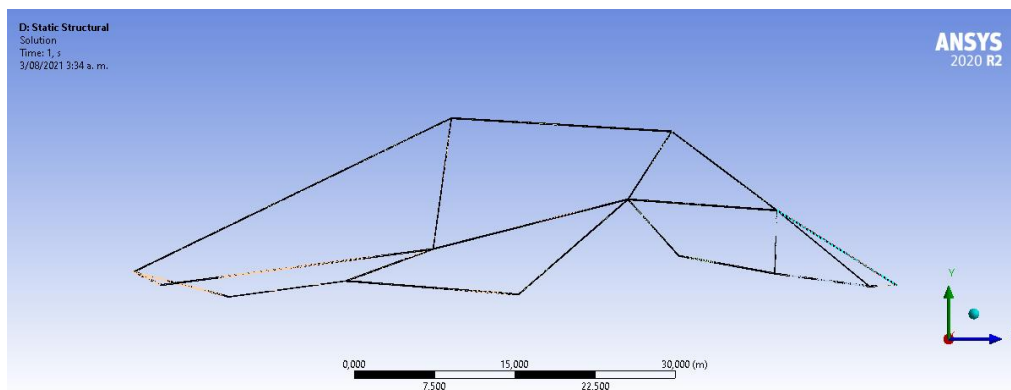
**Ilustración 39.** Vista superior perfilamiento de estructura.



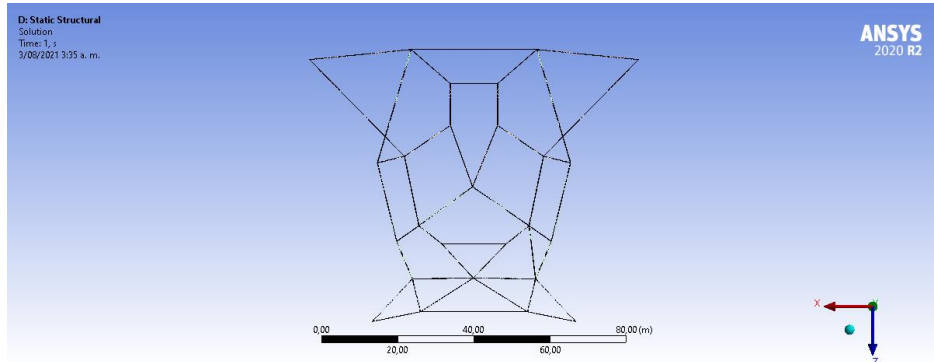
**Ilustración 40.** Vista isométrica del esquema de los puntos y las líneas para formar la estructura.



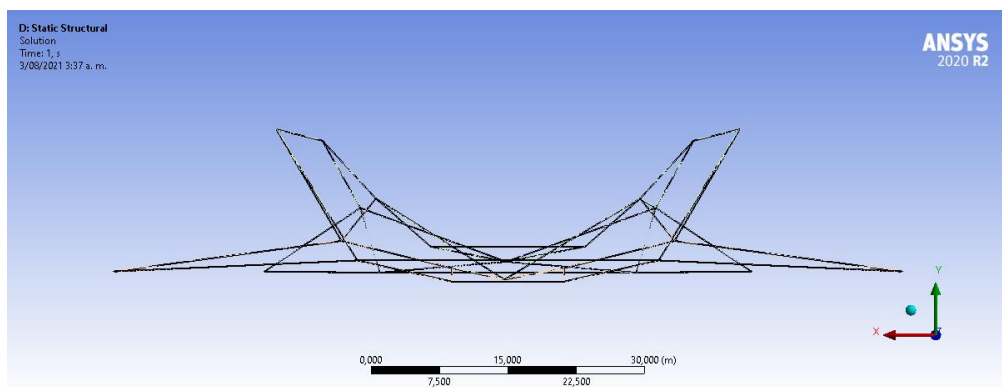
**Ilustración 41.** Vista frontal de la estructura del VTH.



**Ilustración 42.** Vista lateral de la estructura del VTH.



**Ilustración 43.** Vista superior de la estructura del VTH.



**Ilustración 42.** Vista posterior de la estructura del VTH.

De la ilustración 34 a la 37 se evidencia la optimización topológica donde se sustrajo la cantidad de masa que no suponía un objetivo dentro de las propiedades mecánicas de la estructura, a esto se le asignó las siguientes condiciones:

Condiciones	Magnitudes	
Masa tripulante	120	Kg
Aceleración	2	G
Fuerza Normal	2,3544	KN
Velocidad de giro	30	Km/h
Velocidad de giro	8,333333333	m/s
Radio de giro	6	m
Aceleración centrífuga	11,57407407	m/s <sup>2</sup>
Fuerza centrífuga	1,388888889	KN

**Tabla 5.** Condiciones de carga para la estructura en la optimización topológica.

Para dar inicio a los parámetros de diseños en barras, se realizó el estudio topológico respectivo de las coordenadas el diseño para evaluar su estructura tubular resultante, tal como se puede observar en las ilustraciones 38 y 39, en las líneas verdes, arrojando como resultado los puntos claves de las uniones de dicha geometría.

Siguiente a tener la optimización se prosiguió a encontrar los puntos y las ramas por donde se distribuye la masa que se cumplía con un objetivo mecánico, así encontrando coordenadas (ilustración 40) y uniendo estos para generar la estructura de las ilustraciones de la 41 a la 42 respectivamente. Así se dio la parte final del proceso de optimización, bosquejo y construcción de la estructura.



**B: Topology Optimization**  
Exclusion Region 2  
19/08/2021 5:49 p. m.

**A** Exclusion Region  
**B** Exclusion Region 2

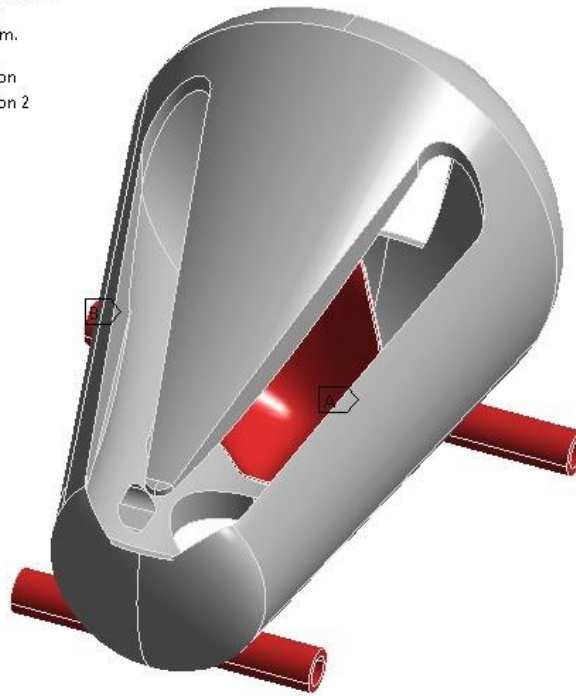


Tabla 30. Geometría del CAD donde se muestra la zona de exclusión donde no se aplica la optimización.

**B: Topology Optimization**  
Optimization Region  
Iteration Number: N/A  
19/08/2021 5:52 p. m.

**■** Design Region: Topology  
**■** Exclusion Region

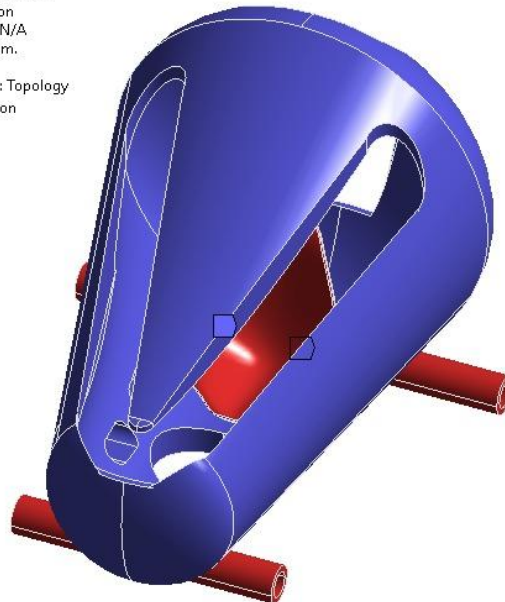


Tabla 31. . Se evidencia la zona de optimización y la de exclusión donde no se aplica el método.

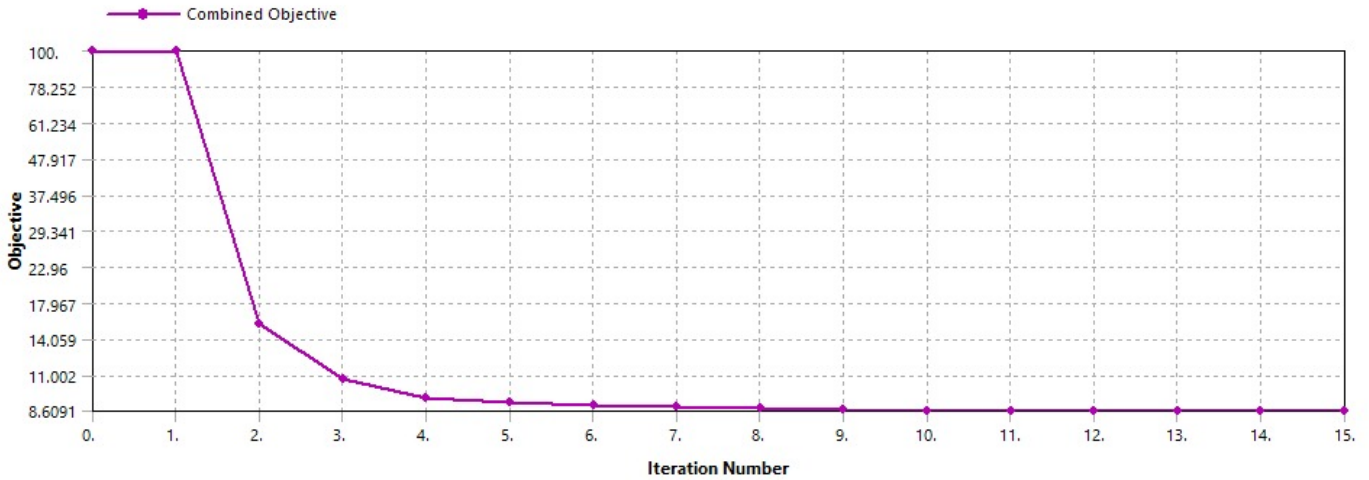


Tabla 32. Grafica de la iteración del objetivo de la optimización topológica.

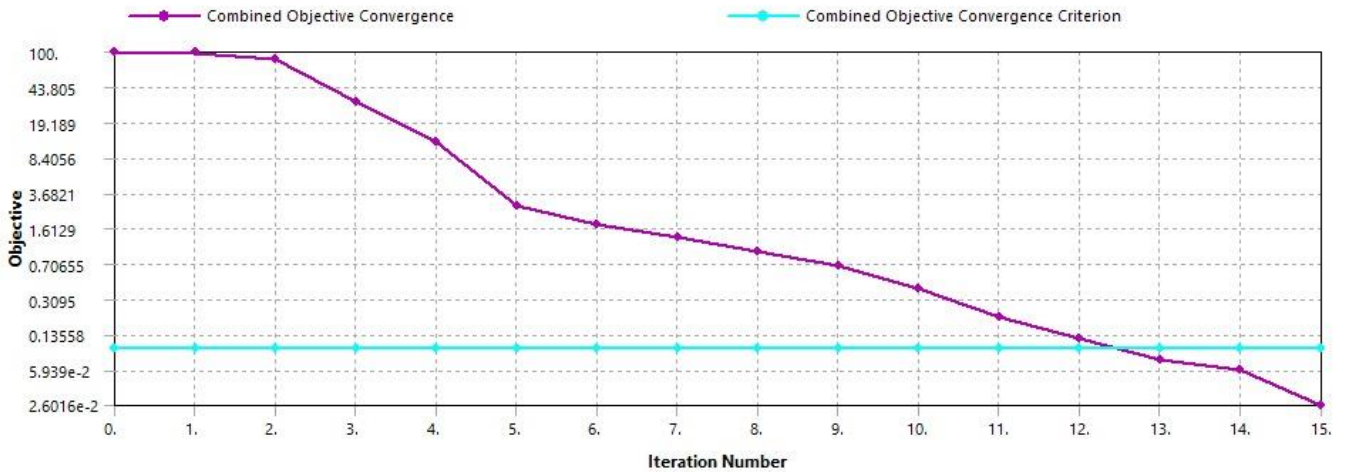


Tabla 33. Grafica del criterio de convergencia.

Se nota que en la ilustración 23 a partir de la segunda iteración hay un cambio notorio a que la función empieza a buscar un resultado de convergencia como se quiere ya que a partir las interacciones buscaran que el resultado siguiente a la otra generan un mejor resultado dando una masa menor y mostrando cual es la masa que está aportando resistencia a los esfuerzos que está expuesta la estructura. En la Ilustración 24 se nota que entre la iteración 12 y 14 el objetivo combinado de convergencia se cruza con el criterio que se le ha dado para tener los resultados que se requieren y así poner tener una estructura a las necesidades buscadas.

Object Name	CircularTube1	CircularTube2
State	Fully Defined	
<b>Definition</b>		
Type	CTUBE	
Import Type	Imported	
<b>Dimensions</b>		
Ri	12, mm	14, mm
Ro	15, mm	16, mm
<b>Physical Properties</b>		
Beam Section	CircularTube1	CircularTube2
A	254,46 mm <sup>2</sup>	188,49 mm <sup>2</sup>
Iyy	23472 mm <sup>2</sup> ·mm <sup>2</sup>	21297 mm <sup>2</sup> ·mm <sup>2</sup>
Izz	23472 mm <sup>2</sup> ·mm <sup>2</sup>	21297 mm <sup>2</sup> ·mm <sup>2</sup>

Tabla 34. Medidas de los perfiles de tubo utilizados para la estructura.

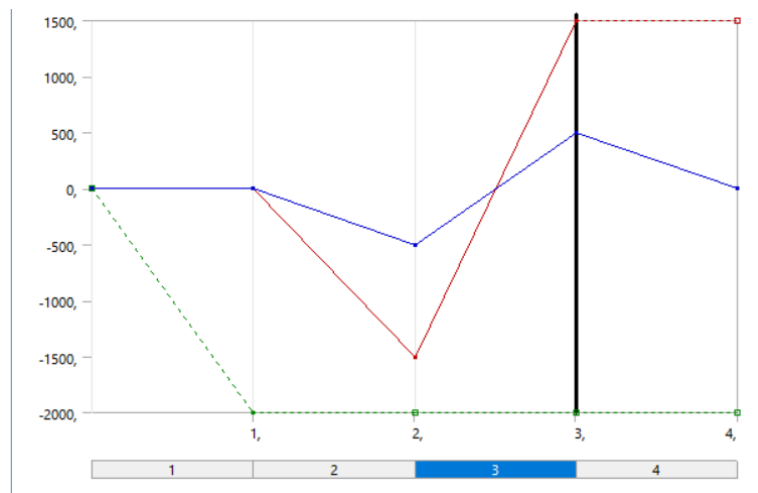


Tabla 35. Esquema de la dinámica de las fuerzas a las que se expuso la estructura en la iteración 3.

Steps	Time [s]	X [N]	Y [N]	Z [N]
1	0,	0,	= 0,	0,
	1,		-2000,	
2	2,	-1500,		-500,
3	3,	1500,	= -2000,	500,
4	4,	= 1500,		0,

Tabla 36. Magnitud de las fuerzas a las que la estructura fue sometida.

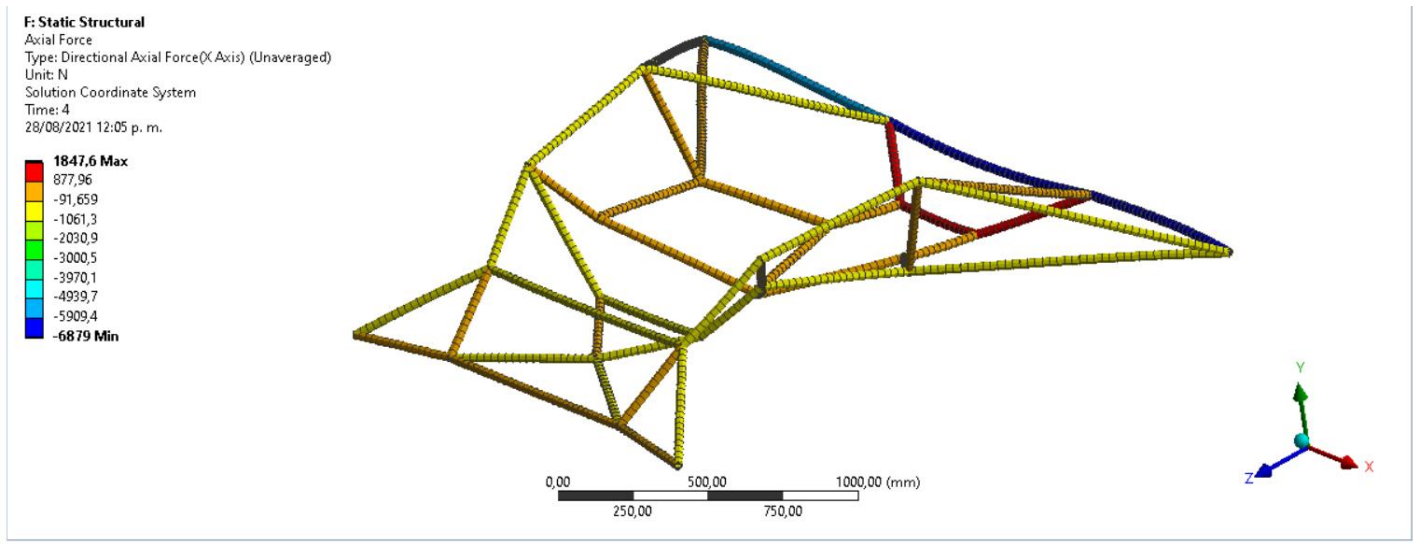


Tabla 37. Vista isométrica del estudio de fuerzas estáticas en la estructura.

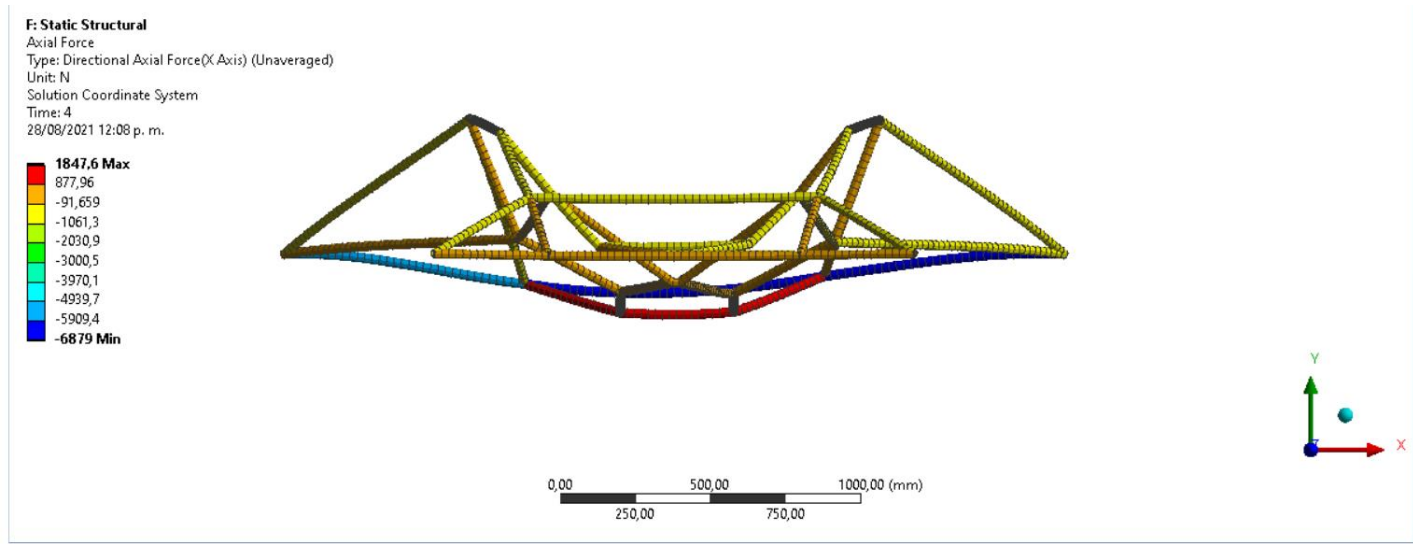


Tabla 38. Vista frontal del estudio de fuerzas estáticas en la estructura

**F: Static Structural**

Axial Force

Type: Directional Axial Force(X Axis) (Unaveraged)

Unit: N

Solution Coordinate System

Time: 4

28/08/2021 12:08 p. m.

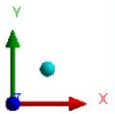
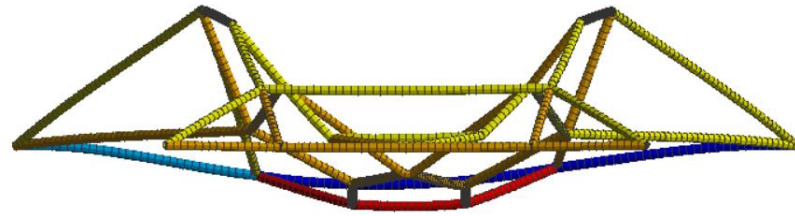
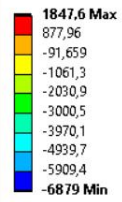


Tabla 39. Vista posterior del estudio de fuerzas estáticas en la estructura.

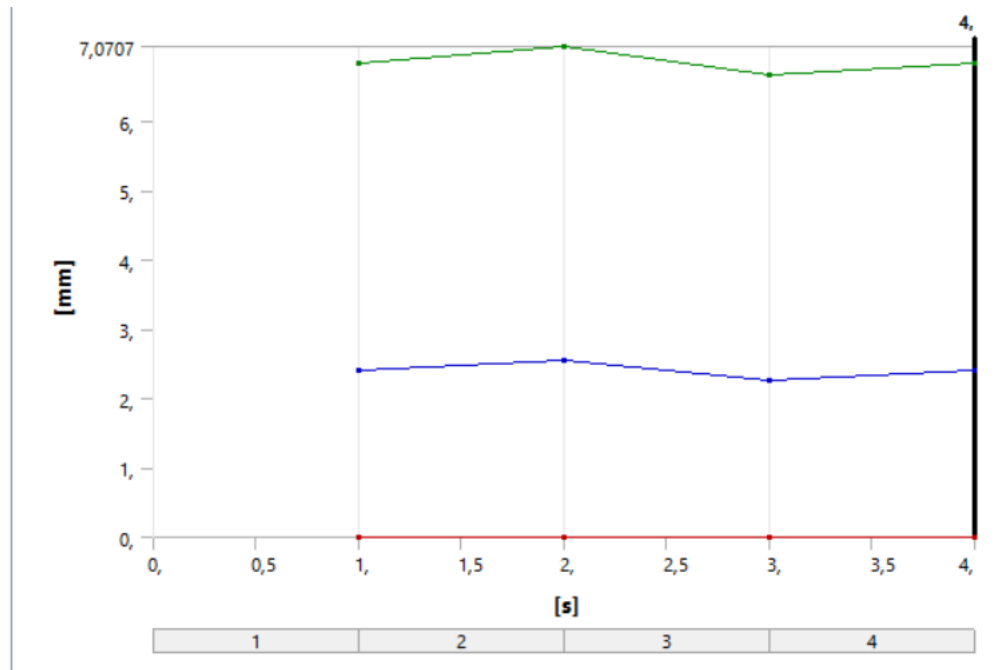


Tabla 40. Grafica de las deformación de la estructura.

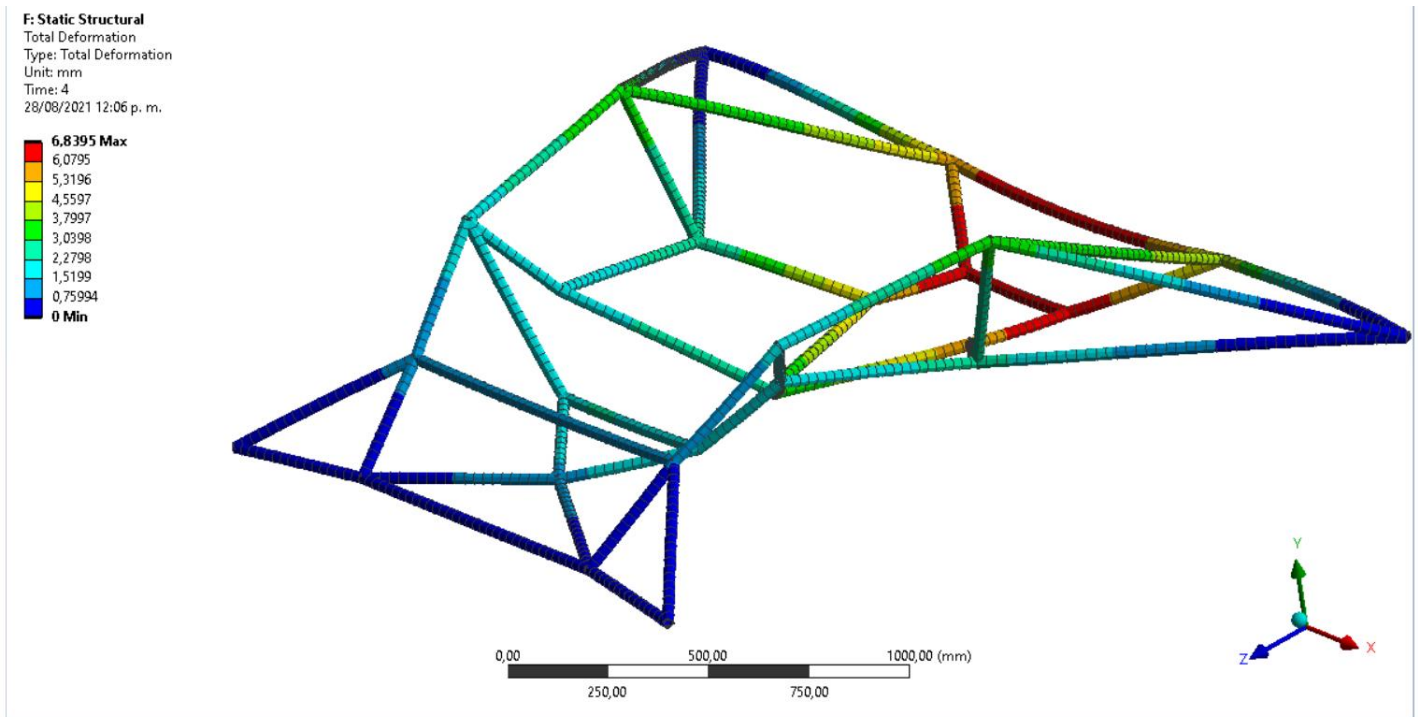


Tabla 41. Vista isométrica del estudio de deformación de la estructura.

Ilustración 55.

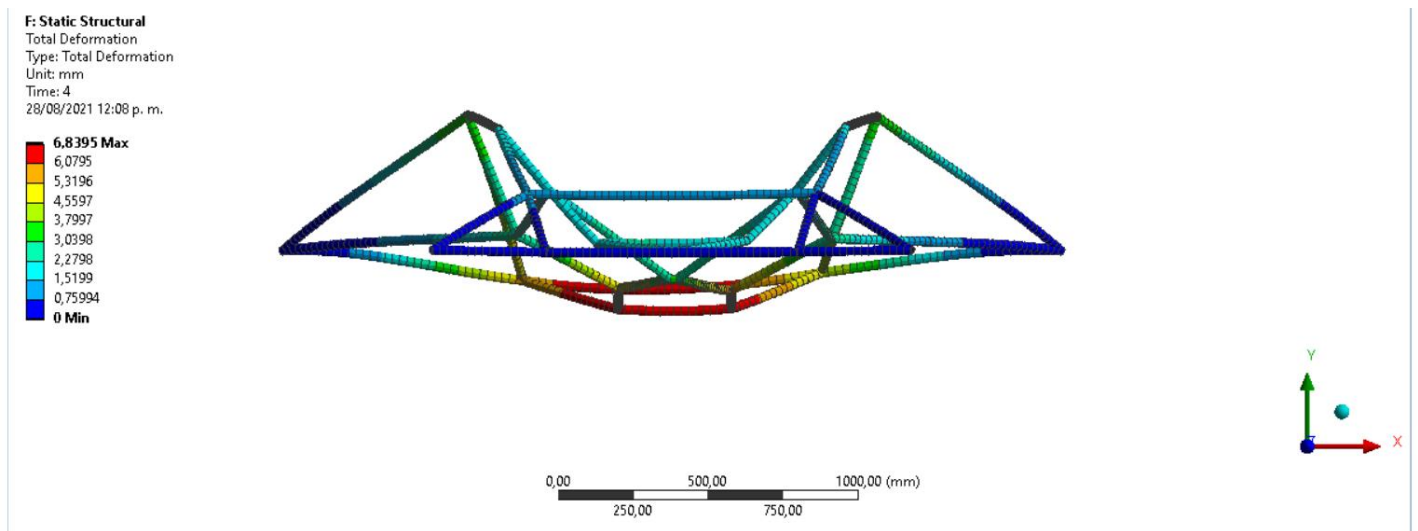


Tabla 42. Vista frontal del estudio de deformación de la estructura.

F: Static Structural  
 Total Deformation  
 Type: Total Deformation  
 Unit: mm  
 Time: 4  
 28/08/2021 12:10 p. m.

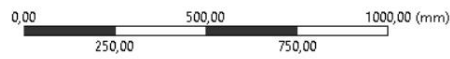
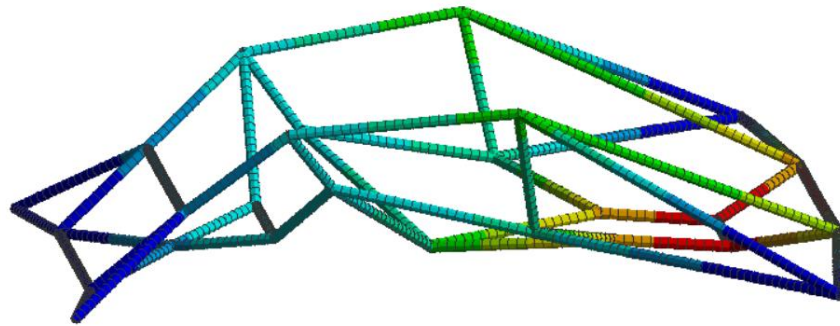
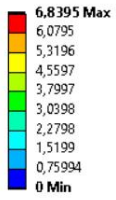


Tabla 43. Vista lateral del estudio de deformación de la estructura.

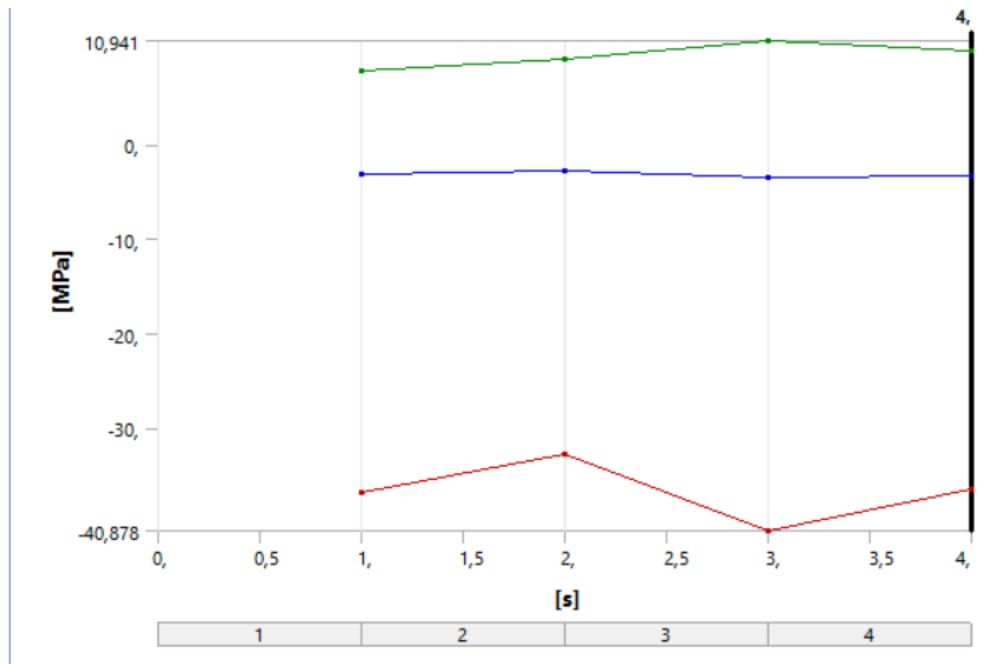


Tabla 44. Grafica de esfuerzo según las fuerzas aplicadas.

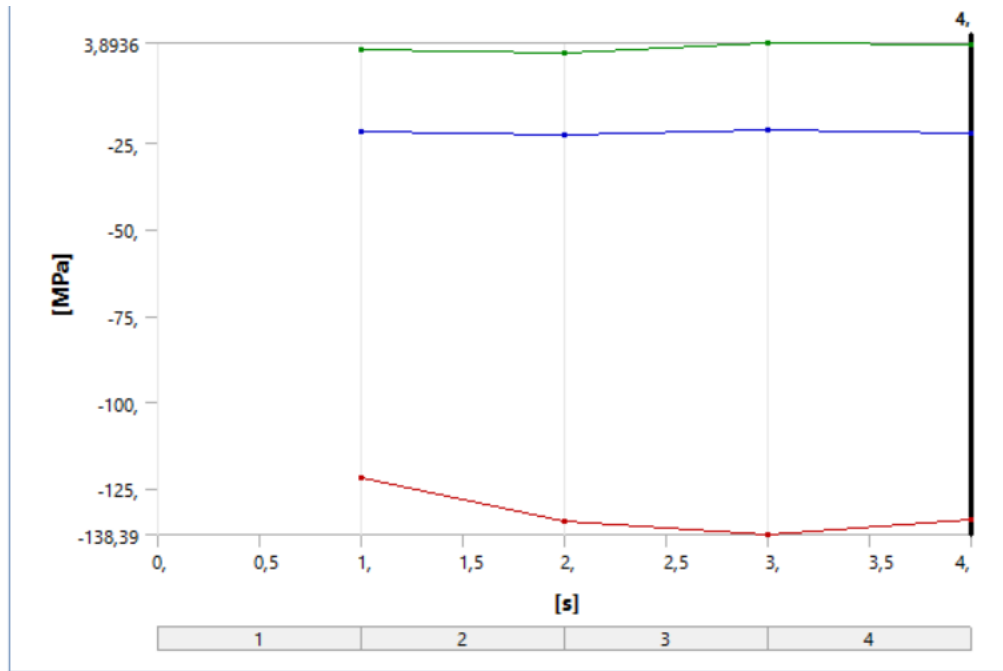


Tabla 45. Grafica de esfuerzo combinado de las fuerzas a las que se expuso la estructura.

Ilustración 59.

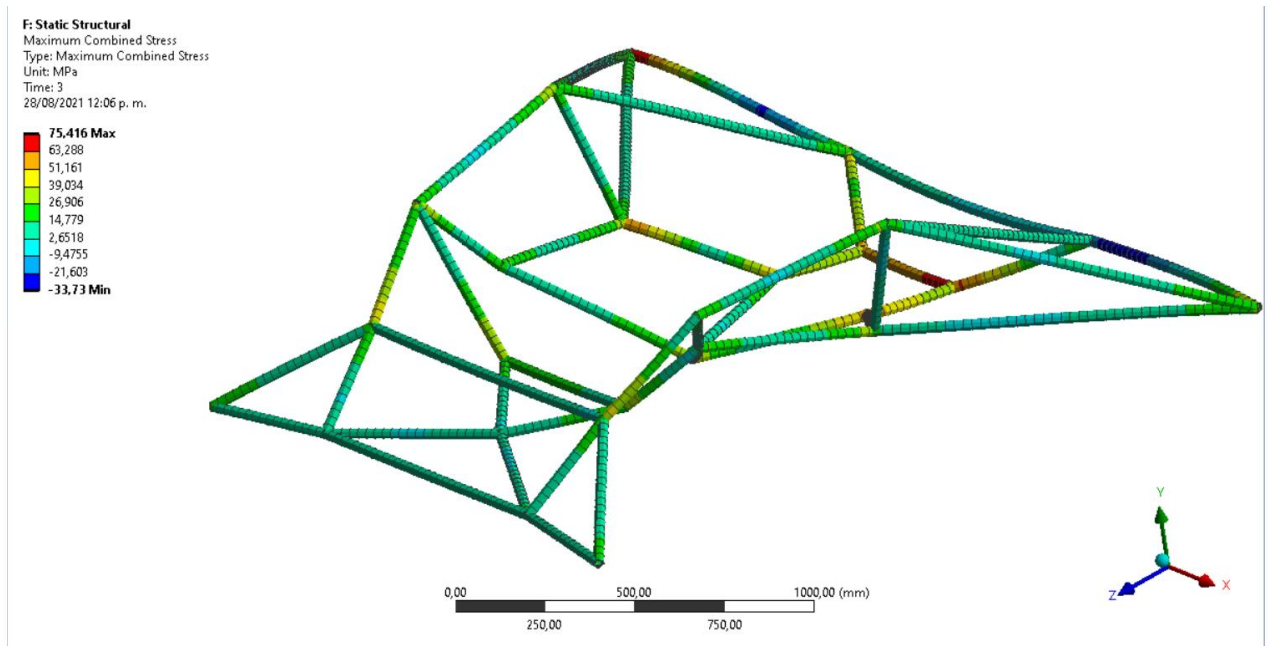


Tabla 46. Ilustración de las zonas de máximo esfuerzo combinado.



Alternating Stress MPa	Cycles	Mean Stress MPa
3999,	10,	0,
2827,	20,	0,
1896,	50,	0,
1413,	100,	0,
1069,	200,	0,
441,	2000,	0,
262,	10000	0,
214,	20000	0,
138,	1,e+005	0,
114,	2,e+005	0,
86,2	1,e+006	0,

Tabla 47. Ciclos de N° de esfuerzo vs ciclo.

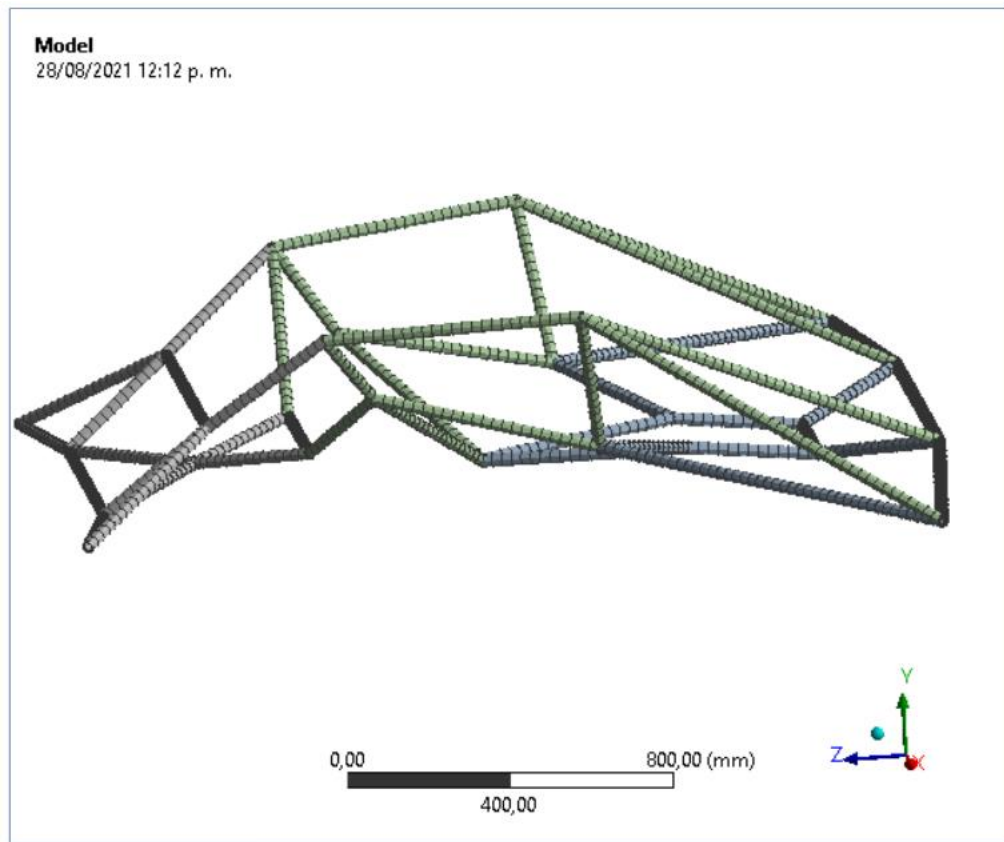


Tabla 48. Modelo generado a partir de acero estructural.

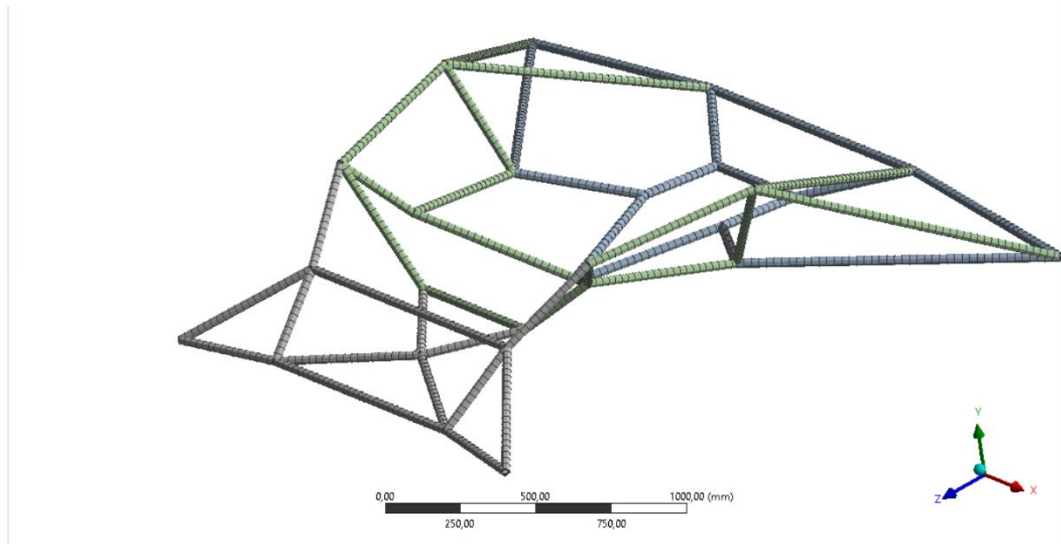


Tabla 49. Vista isométrica del diseño.

Se estableció un rango de masa a mantener entre 10% a 15% que es la masa que cumple con el objetivo de mantener resistente la estructura sin comprometer propiedades mecánicas, también en la caracterización de la estructura se dieron relaciones entre 1055 elemento y 2091 nodos, ya que esta da un resultado óptimo de lo busca y está dentro de la convergencia de la función objetivo. Según las cargas a las que está sometida la estructura se generaron estudios de esfuerzo principal, esfuerzo combinado y deformación para saber si esta tenía la capacidad de mantener sin tener un significado cambio en propiedades. La estructura cuenta con las medidas 2600 mm en X, 500 mm en Y y 2140 en Z,

## CAPÍTULO 7

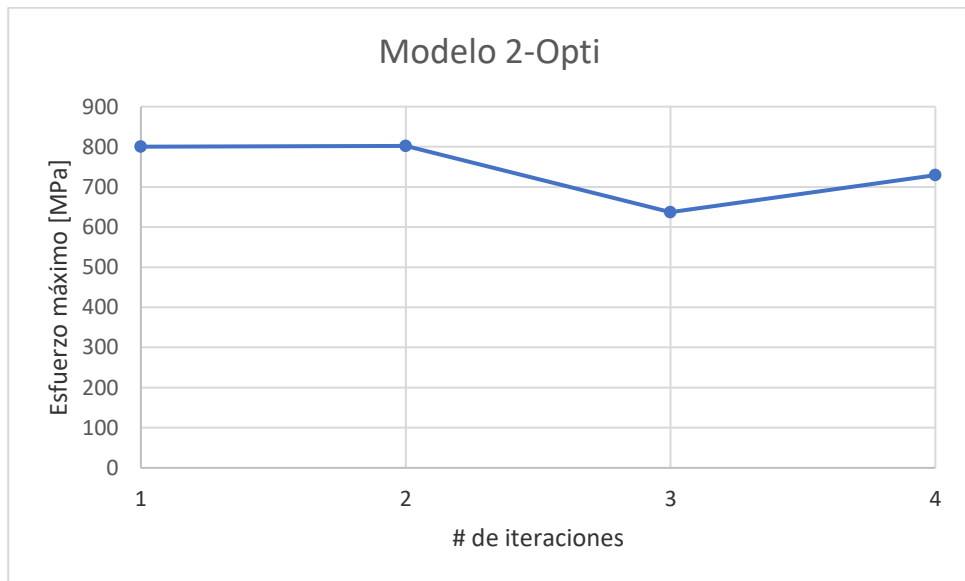
### Conclusiones y recomendaciones.

En el presente trabajo de grado basado en la realización de la Optimización Topológica del VTH de acuerdo con los estándares de resistencia y estabilidad de la estructura, se buscó potencializar su relación resistencia/peso, resaltando que se inició con tres (3) estructuras diferentes a partir de la herramienta de optimización topológica, seleccionando así la que cumpliera con los parámetros de diseño basados en el criterio de Von Mises. Conociendo que a través de tres (3) iteraciones se pudo reducir el 42% del volumen primitivo de la estructura seleccionada, logrando así una selección de marco para la estructura definitiva, es decir, ya no con un volumen primitivo (*ver gráfica. 17*) sino con materiales comerciales.

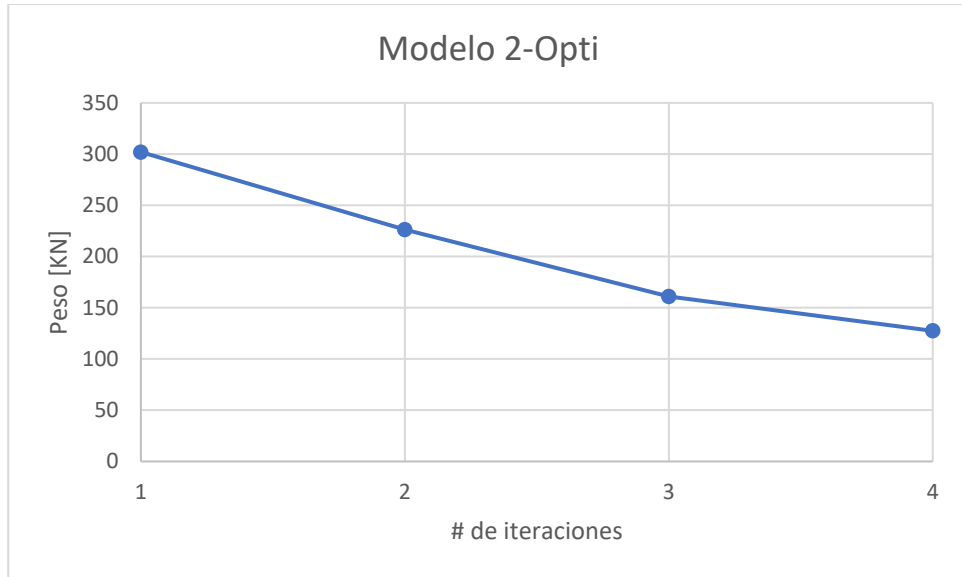
Para explicar de una forma más detallada los resultados obtenidos en los diferentes análisis se hicieron distintas comparaciones, tales como se muestra en la *gráfica x*, donde se demuestra que el volumen analizado se redujo entre cada iteración, demostrando así que, entre más iteraciones, más material será restado, todo esto gracias al análisis de fuerzas aplicados en la estructura. Por consiguiente, la relación peso vs número de iteraciones (*ver gráfica 18*) en la cual se expresa que por cada número de iteraciones hay una reducción del peso, donde todo esto va de la mano con la reducción de volumen producida eventualmente. Así mismo, se denota el esfuerzo de Von Mises centrado en la estructura (*ver gráfica 20*), basado en las cargas

aplicadas con el objetivo de reducir el esfuerzo y concentrarlo en puntos clave de la estructura.

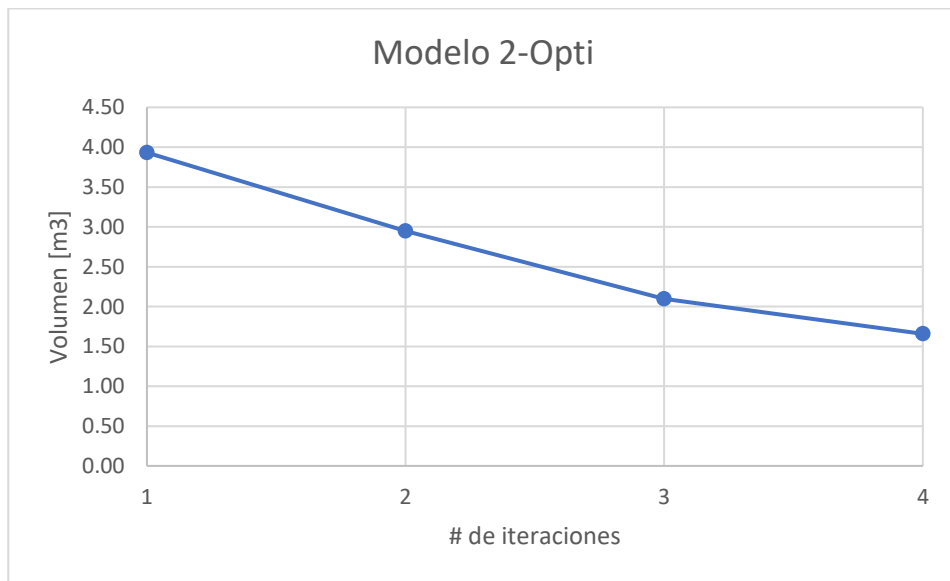
Cabe resaltar, que todo ese proceso analítico de la estructura del VTH es científico-computacional, ya que es un proceso que busca mejorar las condiciones de servicio, de frontera y esfuerzo, logrando así una estructura más liviana, menos robusta, de fácil manufactura y de sencillo mantenimiento.



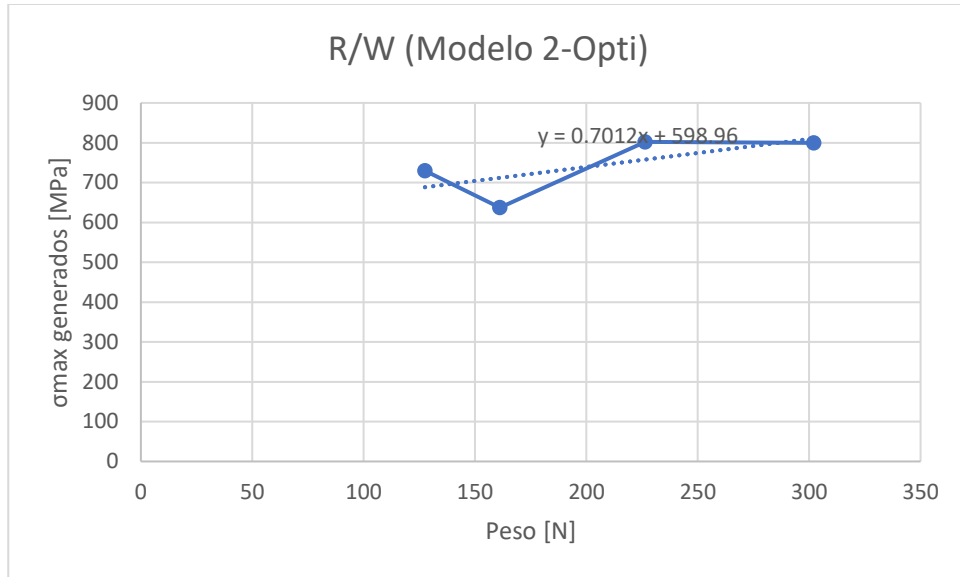
**Ilustración 34.** Esfuerzo máximo vs # de iteraciones.



**Ilustración 35.** Peso vs # de iteraciones.



**Ilustración 36.** Volumen vs # de iteraciones.



**Ilustración 37.** Esfuerzo máximo vs peso.

En este trabajo se implementó la técnica de optimización topológica a la solución del bosquejo de la estructura en cuando a sus condiciones de volumen y dominio, generando así una estructura de máxima rigidez para las cargas aplicadas. Se discutió el problema relevante que era probar si usando la optimización topológica sería una forma efectiva para generar una estructura. También se evidencio los efectos que tiene las condiciones de contorno en el objeto de estudio para que esta genere la geometría obtenida.

La optimización topológica mostro ser una herramienta útil para el diseño de elementos en este caso la estructura del VTH y también en el rediseño de elementos existentes. Se evidencio una reducción de material que no era necesario.

Actualmente se encentran en el mercado herramientas de cómputo muy avanzadas y capas de implementar la optimización topológica tales como SolidWorks y ANSYS, Matlab. Pero hay que tener en cuenta si es siempre la mejor forma de solucionar un problema ya que esto requiere sistema de cómputo donde a veces no se cuenta con ello.

Finalmente, se pude concluir que la optimización es un área de diseño que tiene un campo de investigación amplio. Como es una técnica de uso relativamente actual, siempre está saliendo nuevas investigación y resultados sorprendentes.



## BIBLIOGRAFÍA

- [1] AGUIRRE ROJANO, H. D., & PINEDO FUENTES, S. M. (2017). DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN VEHÍCULO DE TRACCIÓN HUMANA (VTH) PARA DESPLAZAMIENTO SOBRE EL RIO SINÚ Y RUTAS PAVIMENTADAS DE LA CIUDAD DE MONTERÍA. UNIVERSIDAD DE CÓRDOBA.
- [2] Baldissera, P., & Delprete, C. (2014). Human Powered Vehicle Design: A Challenge for Engineering Education. [https://www.researchgate.net/publication/287086416\\_Human\\_Powered\\_Vehicle\\_Design\\_A\\_Challenge\\_for\\_Engineering\\_Education](https://www.researchgate.net/publication/287086416_Human_Powered_Vehicle_Design_A_Challenge_for_Engineering_Education)
- [3] Barbieri, S. G., Giacomini, M., Mangeruga, V., & Mantovani, S. (2017). A Design Strategy Based on Topology Optimization Techniques for an Additive Manufactured High Performance Engine Piston. *ElSevier*, 641–649. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978917303682?via%3Dihub>
- [4] BEER, F. P., JOHNSTON JR, E. R., DEWOLF, J. T., & MAZUREK, D. F. (2018). MECÁNICA DE MATERIALES. In MacGraw Hill (Ed.), 2018 (5th ed.).
- [5] Bendsøe, M. P., & Kikuchi, N. (n.d.). Generating optimal topologies in structural design using a homogenization method. *ElSevier*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0045782588900862?via%3Dihub>
- [6] CONRADO, D., DIAZ, M., MARENCO, M., RAMIREZ, E., MOVILLA, G., CONSUEGRA, F., HERNANDEZ, P., & SANJUANELO, K. (2014). DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE PROPULSIÓN HUMANA Y DIRECCIÓN PARA VEHÍCULO SOLAR. UNIVERSIDAD DEL NORTE.
- [7] Gardea, A. M., & Valenzuela, J. C. M. (2015). Topological optimization of



automotive structures under impact using robust design. Taylor & Francis Online, 33–47.  
<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/16864360.2015.1077073>

- [8] Medrano, S., Rojas, J., Vera, C., Mejia, J., & Cely, J. (2016). Diseño conceptual , formal y funcional de un vehículo de tracción humana como propuesta de movilidad urbana.
  
- [9] Patiño Molina, F. J. (2012). Diseño y construcción de un vehículo de tracción humana para la competencia de UNIANDES 2011 [Universidad Pontificia Bolivariana]. In Biblioteca UPB BGA (Vol. 1). [http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital\\_22747.pdf](http://biblioteca.upbbga.edu.co/docs/digital_22747.pdf)
  
- [10] PEREZ MADRID, C. M. (2007). Bi-directional Evolutionary Topology Optimization of Compliant Mechanisms Design using a Multi-criteria Approach. UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS.
  
- [11] SANDOVAL HERNÁNDEZ, H. S., & GUEVARA ROJAS, B. (2015). DISEÑO, IMPLEMENTACIÓN Y ANÁLISIS DE SISTEMAS DE PROPULSIÓN HUMANA Y DIRECCIÓN PARA VEHÍCULO SOLAR [UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA]. <http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/cc2538.html>
  
- [12] Stefanos, M., Lagaros, N. D., & Elias, N. (2019). Nested Topology Optimization Methodology for Designing Two-Wheel Chassis. Built Environ. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fbuil.2019.00034/full>
  
- [13] Vélez Garcia, S., & Bustamante Ospina, S. (2018). Análisis estructural de un vehículo de tracción humana para la competencia local de vehículos de tracción humana Antioquia 2018. INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO.