



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE GUAYAQUIL  
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE LA MANGUETA DE DIRECCIÓN PARA  
UN KART DE LA CATEGORÍA KZ2**

Trabajo de titulación previo a la obtención del  
Título de Ingeniero Automotriz

AUTORES: JOSE ANDRES LALANGUI GALLEGOS

CHRIS GUSTAVO MATA IÑIGUEZ

TUTOR: Ing. MARY JOSEFINA VERGARA PAREDES. PhD

Guayaquil – Ecuador

2022

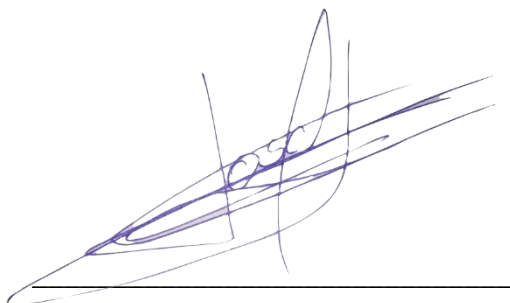
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, José Andrés Lalangui Gallegos con documento de identificación N° 1105975799 y Chris Gustavo Mata Iñiguez con documento de identificación N° 0930451398; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Guayaquil, 04 de marzo del año 2022

Atentamente,



José Andrés Lalangui Gallegos

1105975799



Chris Gustavo Mata Iñiguez

0930451398

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE  
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, José Andrés Lalangui Gallegos con documento de identificación No. 1105975799 y Chris Gustavo Mata Iñiguez con documento de identificación No. 0930451398, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Artículo académico: “Optimización topológica de la mangueta de dirección para un kart de la categoría KZ2” el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Automotriz, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 04 de marzo del año 2022

Atentamente,



José Andrés Lalangui Gallegos

1105975799



Chris Gustavo Mata Iñiguez

0930451398

**CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Yo, Mary Josefina Vergara Paredes de identificación N° 1757970247 docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE LA MANGUETA DE DIRECCIÓN PARA UN KART DE LA CATEGORÍA KZ2, realizado por José Andrés Lalangui Gallegos con documento de identificación N° 1105975799 y por Chris Gustavo Mata Ñiguez con documento de identificación N° 0930451398, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Artículo académico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 04 de marzo del año 2022

Atentamente,



---

Ing. Mary Josefina Vergara Paredes. PhD.

1757970247

## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a la memoria de mi padre que con su sabiduría impartida durante el tiempo que estuviste a mi lado me ayudo a formarme como persona. Además, a mí por ser esa persona perseverante que no se ha dejado vencer por cualquier obstáculo, además agradecer a todos que dieron parte de su tiempo para así adquirir conocimientos a base de su experiencia. **José L.**

Dedico este trabajo a todas las personas que a lo largo de mi vida contribuyeron con mi desarrollo personal, académico y profesional. **Chris Mata**

## AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi mamá por brindarme todo su apoyo, a mis familiares que estuvieron presentes para que así lograra. **Jose Lalangui**

Agradezco a mis padres por inculcarme que las metas iniciadas tienen que acabarse a mi madre por dar lo mejor de sí para mi formación desde pequeño y a mi padre por siempre esforzarse en todo, enseñándome que nunca hay que rendirse por más que el resultado parezca el peor. **Chris Mata**

## RESUMEN

Uno de los requerimientos de mayor interés en un vehículo monoplaza Kart KZ2 es asegurar que el sistema de dirección y suspensión funcionen embebidos para darle estabilidad y suavidad en la conducción del vehículo, asegurando el soporte de oscilaciones puras de las ruedas debido a las aceleraciones cuando se maniobra en las curvas más complicadas de una pista. Todos los karts utilizan una mangueta principal para poder efectuar el movimiento en el sistema de dirección, por lo que, éste controla directamente los límites de giro y los esfuerzos implicados. En la presente investigación, se plantea una propuesta de diseño de una mangueta acoplada al sistema de dirección y chasis, partiendo de un análisis dinámico multicuerpo con el CAE MSC.Adams para establecer las cargas transmitidas desde los pares cinemáticos hacia los eslabones, posteriormente, se usan métodos de optimización topológica y diseño generativo para la mejora de la pieza, terminando con un análisis de fatiga, debido a la naturaleza variante en el tiempo de las cargas. Para complementar dichos análisis, se propone el uso de GRANTA ANSYS para definir un material con altas prestaciones mecánicas, con el menor costo posible. Lo anterior, se desarrollará planteando un diseño de experimentos numérico que se materializará con el módulo de optimización topológica y diseño generativo que posee Autodesk Fusion 360, mediante el cual se extraerá el material en los puntos claves de menor esfuerzo, manteniendo la rigidez de la pieza. Obteniendo así un diseño final de la pieza con un peso menor a la inicial en 37.5%. Finalmente, para la validación numérica de las simulaciones desarrolladas con elementos finitos, se determinarán la convergencia hacia la solución de los campos tensionales en el diseño propuesto junto con el error cometido, considerando la mejor calidad posible de los elementos utilizados en la simulación.

**Palabras claves:** Kart KZ2, optimización topológica, diseño generativo, mangueta.

## ABSTRACT

One of the requirements of greatest interest in a single-seater KZ2 Kart is to ensure that the steering and suspension system work together to give stability and smoothness in the driving of the vehicle, ensuring the support of pure oscillations of the wheels due to accelerations when maneuvering in the most complicated curves of a track. All karts use a main stub axle to be able to carry out the movement in the steering system, therefore, it directly controls the turning limits and the efforts involved. In this research, a design proposal for a stub axle coupled to the steering system and chassis is proposed, starting from a multibody dynamic analysis with the MSC.Adams CAE to establish the loads transmitted from the kinematic pairs to the links, then, topological optimization and generative design methods are used for the improvement of the part, ending with a fatigue analysis, due to the time-varying nature of the loads. To complement these analyses, the use of GRANTA ANSYS is proposed to define a material with high mechanical performance at the lowest possible cost. This will be developed by proposing a numerical design of experiments that will be materialized with the topological optimization and generative design module that Autodesk Fusion 360 has, through which the material will be extracted at the key points of lower stress, maintaining the stiffness of the part. Thus, obtaining a final design of the part with a weight 37.5% less than the initial one. Finally, for the numerical validation of the simulations developed with finite elements, the convergence towards the solution of the stress fields in the proposed design will be determined together with the error committed, considering the best possible quality of the elements used in the simulation.

**Key words:** Kart KZ2, topological optimization, generative design, stub axle.



## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN .....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	2
3. METODOLOGÍA .....	5
4. IMPLEMENTACIÓN .....	6
4.1. Análisis de condiciones de funcionamiento .....	6
4.2. Dimensionamiento de la geometría .....	7
4.3. Preparación .....	7
4.3.1. Simulaciones de condiciones del trabajo .....	7
4.3.2. Determinación de cargas.....	8
5. DESARROLLO .....	9
5.1. Iteraciones con los materiales.....	9
5.2. Modificación de posiciones de trabajo .....	10
5.3. Diseño de experimentos con variables internas y externas .....	11
5.4. Análisis del diseño generativo.....	12
5.5. Análisis de optimización topológica.....	13
6. RESULTADOS Y DISCUSION.....	14
6.1. Validaciones estructurales .....	15
6.2. Costo computacional aparente.....	16
6.3. Diseño de experimentos con variables internas y externas .....	16
6.4. Propuesta final de Diseño de la Mangueta .....	18
7. CONCLUSIONES .....	19
8. RECOMENDACIONES .....	20
REFERENCIAS .....	21

## 1. INTRODUCCIÓN

Un kart es un vehículo monoplaza terrestre sin techo ni cabina, sin suspensiones y con o sin elementos de carrocería, con 4 ruedas no alineadas que están en contacto con el suelo, de las cuales las 2 delanteras controlan la dirección y las otras 2 traseras, unidas por un eje de una sola pieza, transmiten la potencia. Los Karts para competencia según la Comisión Internacional de Karting (CIK) se dividen en los siguientes grupos y categorías (FIA, 2017):

- Grupo 1: KZ1 y Superkart.
- Grupo 2: KZ2, OK y OK-Junior.
- Grupo 3: Mini.

Debido a que están prohibidos todos los dispositivos de suspensión, ya sean elásticos o con bisagras, así como los dispositivos de suspensión hidráulica, neumática o mecánica en todas las categorías de la CIK. El chasis y los demás componentes como la mangueta de los monoplazas está formado por tubos de acero que son rígidos y flexibles para compensar la ausencia de suspensión. Por ende, debe ajustarse a la función de suspensión y ser lo suficientemente duradero para absorber el impacto de las maniobras (Krishnamoorthi et al., 2020).

En el año 2012, en el laboratorio de ULBRA mediante elementos finitos se propuso el diseño y análisis estructural de la mangueta delantera ya que está sometida a varias cargas por lo que se analizó en tres situaciones distintas: en movimiento en recta, cuando realiza un giro y durante una situación de frenado. Con los resultados fue posible mejorar la geometría de la mangueta con el fin de tener una estructura resultante con niveles de tensión adecuados distribuidos sobre el material y una reducción de masa, evitando así una sobreestimación (Cervieri et al., 2012).

Los sistemas de suspensión y dirección de los vehículos garantizan la seguridad de conducción y maniobrabilidad de estos. Por lo que, el objetivo embebido en el diseño propuesto considera analizar la mangueta con cargas que se producen el kart durante la competencia para determinar las condiciones críticas de funcionamiento y evitar, si es el caso, la falla debido a la fatiga tomando en cuenta los materiales que son permitidos usar para la competencia de acuerdo con la norma ISO-4948 que pueden estar contenidos en el Granta ANSYS®.

## 2. REVISIÓN DE LITERATURA

Existe una constante necesidad de diseño e innovación y sobre todo solucionar los problemas con creatividad para poder remplazar los materiales y diseños clásicos de los sistemas teniendo como principal enfoque la relación esfuerzos-peso-rigidez, de hecho, al considerar el comportamiento de estas variables, también se puede aumentar la eficiencia de cualquier sistema mecánico de una forma indirecta. Así, es fácil verificar una cantidad de autores importante que han desarrollado mejoras en base al comportamiento mecánico de tales variables. Por lo que a continuación se presenta los avances significativos que se han ido desarrollando.

Vija-yarangan y Rajendran documentan que a las ballestas se les puede reducir hasta un 75% el peso sin que este afecte su funcionamiento (Rajendran & Vijayarangan, 2001). Para demostrar esto, Vijayarangan uso una matriz compuesta de metal y fabricó una mangueta para poder reemplazar al modelo convencional de acero, consiguiendo así una reducción del 55 % de su peso. Para validar estos resultados implemento un análisis experimental de fatiga de aproximadamente un millón de ciclos y pudo concluir que el material puede completamente reemplazar el convencional para poder conseguir mejores prestaciones y obtener una mejor relación esfuerzo vs peso. (Vijayarangan et al., 2013). Si nos enfocamos en la reducción de material se tiene que Dumbre demostró la técnica de análisis estructural para poder efectuar una reducción de masa de la mangueta en el orden de un 11 %. La reducción de peso es hecha usando OP-TISTRUCT® que es un software de optimización. Este concepto va más allá debido a la implementación de hyperworks con el nuevo software RADIOSS® donde se presenta como nueva alternativa para resolver problemas estructurales con cargas dinámicas. (Dumbre, 2014). También tenemos que Ameyabhusari rediseño y optimizó la mangueta pudiendo conseguir una reducción de peso en un orden de 62.78 % usando materiales convencionales (Bhusari et al., 2015).

Yadav identifica las zonas donde los esfuerzos son mayores considerando cargas cíclicas altas partiendo así de que se puede quitar las zonas no afectadas consiguiendo una reducción de peso de 5.64 % (Sanjay Yadav, Ravi Kumar Mishra, Varish Ansari, y Shyam Bihari Lal, 2016). Anitha propuso la optimización de la mangueta por medio de FEA, encontrando que éste se puede optimizar usando el compuesto S-glass epoxi y aleaciones

de aluminio, conservando el factor de seguridad en relación con los esfuerzos que son aplicados a la pieza (Anitha y Shankar, 2016).

Yadav identifica las zonas donde los esfuerzos son mayores, considerando cargas cíclicas altas partiendo, demostrando así que se puede quitar las zonas no afectadas con una reducción de peso de 5.64 % (Sanjay Yadav et al., 2016).

Lee et al, investigaron el impacto de los materiales en peso de las manguetas, optimizaron la rigidez y tenacidad de la estructura de los nudillos, teniendo en cuenta los factores de forma utilizando técnicas de krigging de interpolación. Los hallazgos sugirieron que el peso de la mangueta de A16082M disminuyó en un 60 % en comparación con el GCD450 normal (Kim et al., 2014). Shaisundaram rediseñaron una mangueta de dirección para minimizar el peso manteniendo el factor de seguridad para mejorar la eficiencia del motor. Concluyó que se puede aplicar a partes que son propensas a una mayor tensión que el factor de seguridad lo permita. El metal también se puede extraer de la parte inferior áreas de fatiga, reduciendo así potencialmente el peso de la pieza (Shaisundaram, 2018).

Evangelos, Tyflopoulos argumentaron que la identificación de los límites del diseño es el elemento clave que falta en las herramientas CAE actuales, así como la sensibilidad de la ubicación espacial de los componentes implicados y la configuración de su estructura de soporte. Se presenta un caso práctico sobre un ski, para apoyar la teoría y relacionar la propuesta con una aplicación práctica de la optimización topológica. El estudio destaca que el método más utilizado y aplicado comercialmente es el SIMP. El método ESO es también un método prometedor con muchos potenciales, pero todavía le falta el fondo matemático para las restricciones y cargas múltiples. Tanto SIMP como ESO dependen de los parámetros de diseño (CAD), la malla y las condiciones de contorno de las estructuras. Los obstáculos que se obtuvieron fueron que muchos enfoques de optimización de la topología siguen dependiendo de conjeturas iniciales. Todos los enfoques y prácticas de optimización topológica existentes consumen mucho tiempo y exigen un enorme esfuerzo computacional cuando tratan de abordar grandes modelos de construcción en 3D (Tyflopoulos et al., 2018).

En búsqueda de una solución que no tenga las limitaciones anteriormente descritas se propuso la implementación en el diseño de las redes neuronales generativas adversariales (GAN) estas se utilizan ampliamente para generar nuevas imágenes y datos mediante aprendizaje no supervisado. Existen ciertas limitaciones en la aplicación de las GANs

directamente a los diseños de productos. Requiere una gran cantidad de datos, produce calidad de los resultados no es uniforme y no garantiza el rendimiento de la ingeniería. Para resolver estos problemas, el estudio propuso un proceso de automatización del diseño mediante la combinación de GANs y optimización de la topológica. El proceso propuesto se ha aplicado al diseño de ruedas de automóviles y ha demostrado que un diseño estéticamente superior y técnicamente significativo puede desarrollarse automáticamente sin intervención humana. A medida que se desarrolla el algoritmo de Inteligencia artificial, se mejora el modelo generativo presentando la posibilidad de que las máquinas puedan ser diseñadores de productos. Se utilizó la optimización topológica para compensar inconvenientes de las restricciones en el diseño, se introdujo una automatización de diseño integrando procesos GANs y optimización de topológica. La metodología demostró que se puede producir diseños estéticos y técnicamente superiores (Evangelos Tyflopoulos, 2019).

Shuaib Shuaib analizó y modificó una mangueta, el autor realizó el estudio teniendo en cuenta el peso y el fallo que existe sobre la misma. La mangueta de dirección fue rediseñada según el resultado obtenido. Los hallazgos sugirieron que la mangueta rediseñada disminuye la concentración de tensión y mejora la eficiencia. Bajo la luz de la revisión anterior, se puede observar la importancia del diseño y optimización de la pieza que se propone en el presente estudio para satisfacer el creciente interés de obtener componentes de dirección-suspensión de alta resistencia y bajo costo en vehículos monopista de competencia tipo Karting (Shuaib et al., 2019).

Hoy en día, se disponen de un gran número de herramientas diferentes que apoyan a las primeras fases del diseño. En la última década se ha desarrollado un conjunto especializado de herramientas basadas en CAD, que apoyan el proceso de ideación generando diferentes alternativas de diseño según los criterios dados por el diseñador. Este artículo analiza dos tipos de herramientas: la optimización topológica y las herramientas de diseño generativo. Para investigar hasta qué punto estas herramientas son adecuadas para su uso en las primeras fases de diseño y como se complementan, se realizó un estudio sobre un caso industrial el cual es rediseñar la mangueta de un karting que cumpla con todas las restricciones de seguridad y de funcionamiento basado en diseño de experimentos numéricos y programas de simulación en ingeniería.

### 3. METODOLOGÍA

Este trabajo tiene un alcance exploratorio ya que la propuesta final es el diseño y validación de la mangueta del kart de competencia, validando no solo que esta tenga las dimensiones correctas y sea funcional si no mediante simulaciones ejecuciones de métodos, se obtuvo la pieza final que además considero las relaciones entre las variables de estudio propuestas.

Para el levantamiento de la geometría se utilizó Fusion 360 debido a su facilidad de comandos y adaptación a los cambios cuando ya está la pieza realizada, posterior a eso se procedió a determinar las cargas reales de la pieza someténdola a escenarios reales donde esta va a tener las mayores magnitudes de cargas en situaciones críticas por lo que tomamos como condición de operación las máximas cargas que se han determinado con el objetivo de poder validar el modelo. Al obtener las cargas se obtuvo las condiciones en las que se van a realizar los análisis de optimización topológica y las propuestas de diseño generativo que cumplan con las condiciones de operación en el CAE Autodesk Fusion, no obstante, al obtener los resultados de las diferentes iteraciones de la pieza, validan estructuralmente con el software Ansys Workbench con el fin de conocer todos los estados tensionales de la pieza mejorada y verificar su rigidez.

El diseño de investigación de este estudio se compuso de cuatro etapas, como se muestra en la Fig. 1, estas son: recolección, preparación, desarrollo y evaluación. En la primera etapa identifican las condiciones de trabajo de la pieza, entendiendo por esto las precargas y las cargas mixtas de funcionamiento de la pieza puesto que esta se ve comprometida por los sistemas de dirección y suspensión del vehículo.

Luego de la recolección de datos se elabora una propuesta de mejoras que se le pueden realizar a la pieza basándose en software CAE para obtener resultados preliminares, el estado de desarrollo de los resultados preliminares pasa a la validación estructural que tiene que satisfacer las demandas de funcionamiento de la pieza. Finalmente, todos los datos obtenidos de las diferentes iteraciones de mejoramiento de la pieza se proceden a realizar un diseño de experimentos para poder obtener las correlaciones que existen entre las variables internas y externas.

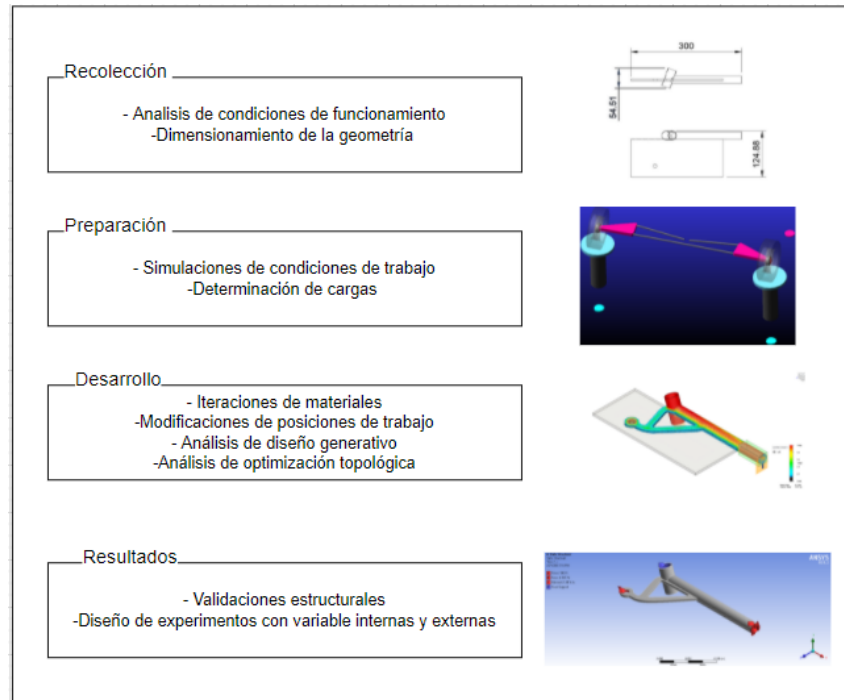


Fig 1. Fases de la metodología.

## 4. IMPLEMENTACIÓN

### 4.1. Análisis de condiciones de funcionamiento

La mangueta pertenece al sistema de dirección-suspensión de un kart, esta soporta cargas de funcionamiento variables debido la condición de operación la cual es crítica debido a que es una de las fallas más comunes presentes en los circuitos de karting (Krishnamoorthi et al., 2020).

Una representación de las cargas y desplazamientos activos en el funcionamiento del sistema, se muestran en la Fig. 2, en los cuales se puede apreciar de color amarillo el funcionamiento de la pieza como parte del sistema de dirección y de color verde se puede apreciar las restricciones existentes cuando este forma parte de los neumáticos que absorben las condiciones de la calzada donde se ejecutan los circuitos de competencia.

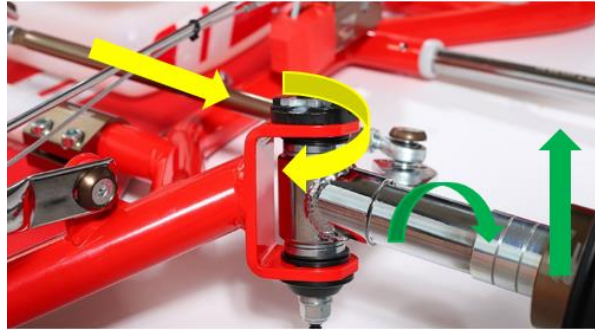


Fig 2. Análisis de condiciones de funcionamiento. Tomada de (TKART, 2022)

#### 4.2. Dimensionamiento de la geometría

Para el dimensionamiento de la mangueta, se consideró un modelo digital inicial propuesto por el estudiante Jose A. Calvache en un proyecto de estudio del mecanismo de suspensión y dirección de la Carrera de Ingeniería Automotriz sede Guayaquil. En éste, puede observarse el dimensionamiento 3D total de la pieza, según: 300 mm x 124.88 mm x 54.51 mm, como se lo puede apreciar en la Fig 3.

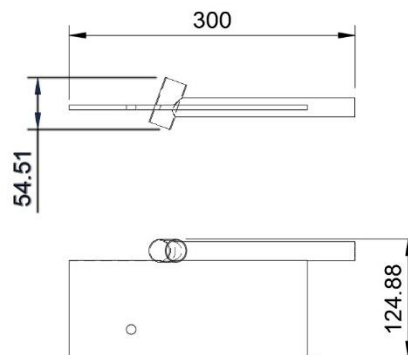


Fig 3. Dimensionamiento de la geometría.

Cabe recalcar que la pieza con la que se comenzó a realizar las siguientes fases de diseño cumple a cabalidad geométrica y espacialmente las restricciones de posicionamiento del vehículo.

#### 4.3. Preparación

##### 4.3.1. Simulaciones de condiciones del trabajo

Para las simulaciones de condiciones de trabajo se tomó las cargas y desplazamientos previamente expuestos y se generó simulaciones en el Software CAE MSC Adams con el fin de obtener el resultado más certero de cómo se comporta la pieza en condiciones de funcionamiento y críticas. La simulación



consto de generar el sistema por medio de proceso geométrico los cuales se puede entender como una analogía a los pares cinemáticos presentes en un el sistema debido a que estos tienen esfuerzos, desplazamientos o pertenecen a un cuerpo en específico como una barra.

#### 4.3.2. Determinación de cargas

La determinación de las cargas correspondientes del sistema se obtuvo con la correcta simulación que se puede observar en la Figura 4, la cual consta del sistema completo montado en cilindros de prueba que asemejan los desplazamientos que se va a tener en las condiciones de funcionamiento comunes.

La simulación desarrollada en Adams Car, permite probar un prototipo virtual funcional del sistema de suspensión-dirección que consta del armado de los posicionamientos globales de los componentes y las restricciones que estos presentan por su naturaleza de funcionamiento como restricciones fijas, rotación y traslación.

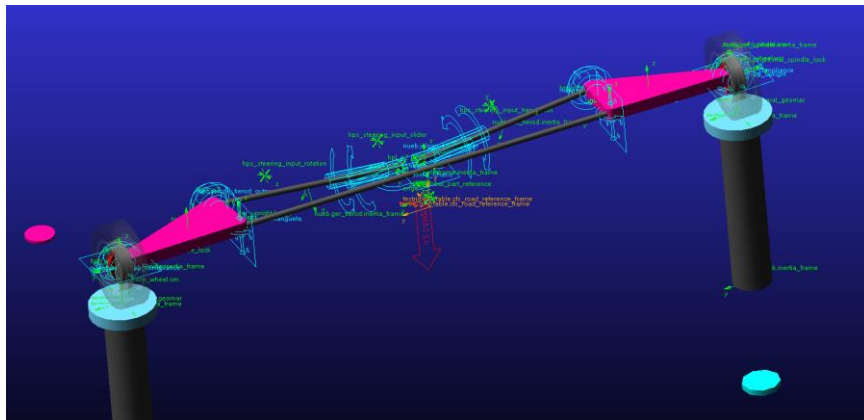


Fig 4. Simulación con restricciones en MSC Adams.

El modelo final se observa en la Fig. 5, en la cual se puede detallar la aproximación real a todo el sistema.

En este, no se tiene especificación de la geometría, que corresponde el siguiente paso a desarrollar, donde se aplicaran las distintas cargas encontradas con el fin materializar los distintos métodos propuestos en la investigación.

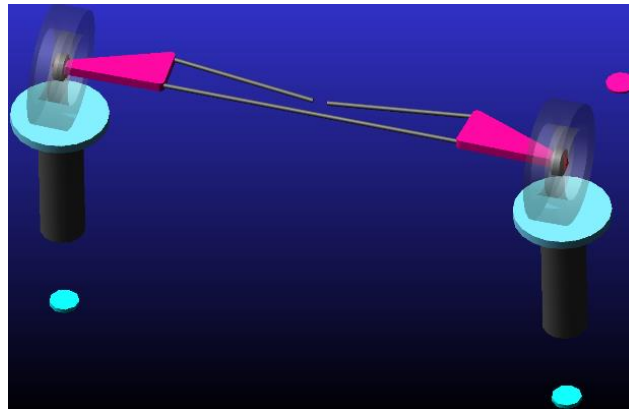


Fig 5. Simulación de vehículo con accionamientos cilíndricos.

## 5. DESARROLLO

### 5.1. Iteraciones con los materiales

Para la iteración de los materiales el estudio se valió de la base de datos Granta Edupack en la cual por medio de filtros puestos por el usuario como, esfuerzos máximos del material, costo y presencia en el mercado se escogió un rango de materiales. Se necesitó campos más específicos, por lo que se nos valió de la siguiente grafica en la Figura 4 que tenemos en el eje y tenemos cuanto soporta por tensión y por torsión por lo que el filtro aplicado da como resultado cual es el que tiene mejor resistencia, con una densidad menor. Estos materiales también cumplen con lo estipulado en la ISO 4948(ISO - ISO 4948-1:1982) como se muestra en la tabla 1 y se muestran en la Fig. 6.

Tabla 1. Características de la base de aceros para la norma.

<b>Características de la norma ISO 4948</b>		
<b>Resistencia mínima a la tracción</b>	690	N/mm <sup>2</sup>
<b>Mínimo límite elástico</b>	360	N/mm <sup>2</sup>
<b>Alargamiento mínimo</b>	26	%
<b>Contenido máximo de carbono</b>	0.1	%
<b>Contenido máximo de fósforo</b>	0.05	%
<b>Contenido máximo de azufre</b>	0.05	%
<b>Contenido máximo de nitrógeno</b>	0.007	%

- ☐ Dual phase steel, YS350, cold rolled
- ☐ Low alloy steel, SA-508 Grade 3, ...
- ☐ Stainless steel, duplex, UNS S446...
- ☐ Stainless steel, martensitic, 416S4...
- ☐ Stainless steel, martensitic, AISI 4...
- ☐ Stainless steel, martensitic, ASTM ...
- ☐ Stainless steel, martensitic, ASTM ...
- ☐ Stainless steel, martensitic, ASTM ...
- ☐ TRIP steel, YS400, cold rolled
- ☐ TRIP steel, YS450, cold rolled

Fig 6. Preselección de materiales en Ansys Granta Edupack.

La norma ISO 4348 hace referencia a los límites que se debe tener en los materiales. Con estos requisitos preliminares, se obtuvo el mejor material, la Figura 7 muestra que para los tres materiales la densidad es igual pero el factor que cambia resistencia máxima de tensión que pueden soportan.

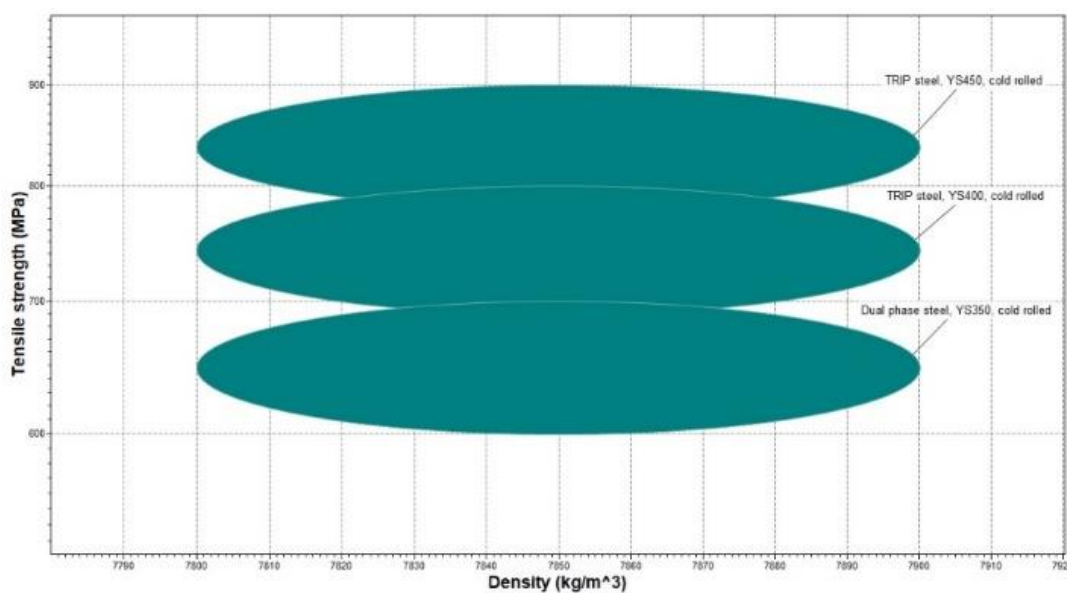


Fig 7. Selección final de materiales en Ansys Granta Edupack®.

Por lo cual, se tiene los mejores materiales para optar a la manufactura de la pieza y que son: Dual Phase Steel YS350, TRIP Steel YS400, TRIP Steel YS450. Los materiales seleccionados para iniciar el estudio son: Dual Phase Steel y TRIP STEEL YS450.

## 5.2. Modificación de posiciones de trabajo

Las condiciones de trabajo dejan un amplio espectro de las distintas configuraciones o formas que puede obtener la pieza en el sentido de conformación de esta y geo-posición dentro del kart. Por lo que para el análisis se consideró distintos ángulos de posición de contacto con el chasis, por lo que, se considera para el análisis de la pieza, variaciones de

70° a 110° con respecto al eje x, como se muestra en la Fig. 8. Los valores escogidos fueron tomados de distintas investigaciones a modelos de kart del mercado y de distintas competencias donde se observó una tendencia importante en este rango variación.

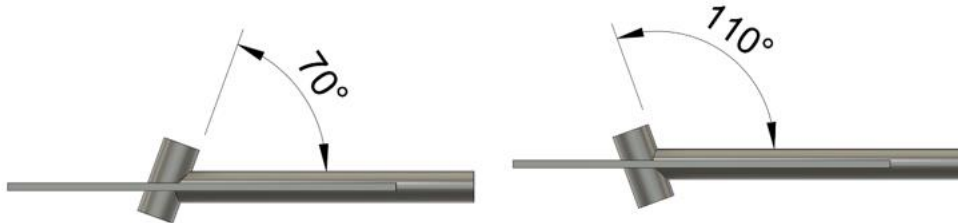


Fig 8. Piezas con un ángulo de 70° y 110° con respecto al eje x.

Se puede observar en la Fig 8, las posiciones con las que esta se va a conectar al chasis y a la rueda, el ángulo modificado que vemos es la conexión que va a existir con el chasis, está la tomamos como constante es decir que no vamos a aplicar ninguna metodología de reducción de material debido a que esta pieza es donde voy a tener la conexión principal de mi sistema.

### 5.3. Diseño de experimentos con variables internas y externas

El diseño de experimentos propuesto es una factorial completa de  $2^4$ , donde se analizan cuatro (4) variables de entrada con dos niveles de variación, como se describen en la tabla 2. Las variables de salida a estudiar son los asociados a la rigidez y resistencia, es decir, los desplazamientos como forma directa de cambio y el factor de seguridad ya que no existe uno normado para la pieza del kart como variable indirecta, además de servir de control puesto que es evidente el cambio de esta por el estado de esfuerzo al que está sometido el material.

Tabla 2. Variables de entrada del diseño de experimentos

Variables de entrada		
Variables	Mínimo	Máximo
<b>Angulo de inclinación</b>	70°	110°
<b>Metodología</b>	Diseño generativo	Optimización topológica
<b>Orden de elemento</b>	0	1
<b>Material</b>	Dual phase Steel	Trip Steel Y450

El ángulo de inclinación se refiere a la conexión que va a tener entre el chasis y la mangueta ya que dependiendo de este se va a distribuir las fuerzas y por ende la distribución de esfuerzos en la pieza. Además, la metodología aplicada realizara Mientras que, el tipo de orden de elemento para 0 es lineal mientras que para 1 es cuadrático estos tipos de elementos permiten aproximar mucho mejor la respuesta a una real.

Tabla 2. Tratamientos realizados para el experimento.

StdOrder	RunOrder	Angulo de inclinacion	Metodologia	Orden de elemento	Material
17	1	70	DG	0	Dual phase steel
12	2	110	OT	0	Trip Steel 450
14	3	110	DG	1	Trip Steel 450
22	4	110	DG	1	Dual phase steel
23	5	70	OT	1	Dual phase steel
1	6	70	DG	0	Dual phase steel
31	7	70	OT	1	Trip Steel 450
26	8	110	DG	0	Trip Steel 450
25	9	70	DG	0	Trip Steel 450
32	10	110	OT	1	Trip Steel 450
13	11	70	DG	1	Trip Steel 450
27	12	70	OT	0	Trip Steel 450
16	13	110	OT	1	Trip Steel 450
21	14	70	DG	1	Dual phase steel
5	15	70	DG	1	Dual phase steel
4	16	110	OT	0	Dual phase steel
24	17	110	OT	1	Dual phase steel
6	18	110	DG	1	Dual phase steel
29	19	70	DG	1	Trip Steel 450
9	20	70	DG	0	Trip Steel 450
10	21	110	DG	0	Trip Steel 450
15	22	70	OT	1	Trip Steel 450
20	23	110	OT	0	Dual phase steel
11	24	70	OT	0	Trip Steel 450
3	25	70	OT	0	Dual phase steel
2	26	110	DG	0	Dual phase steel
19	27	70	OT	0	Dual phase steel
7	28	70	OT	1	Dual phase steel
30	29	110	DG	1	Trip Steel 450
28	30	110	OT	0	Trip Steel 450
18	31	110	DG	0	Dual phase steel
8	32	110	OT	1	Dual phase steel

#### 5.4. Análisis del diseño generativo

Se propone un método de diseño basado en CAD generativo. Ya que es adecuado para problemas complejos de diseño. El método se basa en la construcción de un genotipo del diseño dentro de un sistema CAD paramétrico basado en un historial y, a continuación,

en la variación aleatoria de sus parámetros dentro de unos límites predefinidos para generar un conjunto de diseños distintivos. A continuación, los diseños generados se filtran a través de varias envolventes de restricciones que representan la viabilidad geométrica, la manufactura, el coste y otras restricciones relacionadas con el rendimiento, reduciendo así el vasto espacio de diseño a un espacio de diseño viable más pequeño representado por un conjunto de diseños distintivos. El método de diseño generativo propuesto impone un mínimo de requisitos de diseño manteniendo la flexibilidad y fluidez que apoyan la creatividad del diseño.

El método se implementa a través de FUSION 360® en el cual se introducen parámetros iniciales y de cargas para obtener diferentes resultados que posteriormente fueron filtrados, de acuerdo con análisis estructurales posteriores. En la Fig. 9 se muestran las geometrías pospuestas de acuerdo con los parámetros iniciales mencionados.

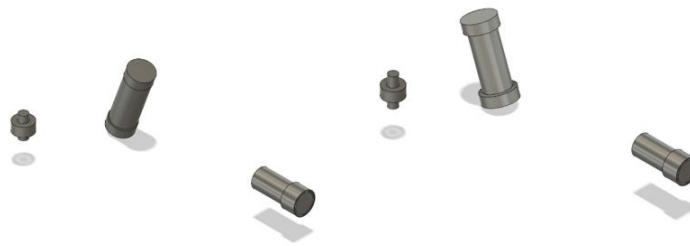


Fig 9. Condiciones iniciales del DG.

### 5.5. Análisis de optimización topológica

El método de optimización topológica fue implementado con el fin de obtener una pieza con geometría mejorada quitando material a las partes donde la distribución de esfuerzos es menor. Se considero aplicaciones de carga estáticas y de baja frecuencia. Los esfuerzos aplicados para el análisis correspondiente fueron tomados de etapas tempranas del diseño donde se simulo el sistema. Para la optimización se utiliza un modelo tridimensional de la mangueta con las cargas definidas desde Msc.Adams® para comience a realizar las iteraciones de eliminación de material, como se muestra en la Fig. 10.

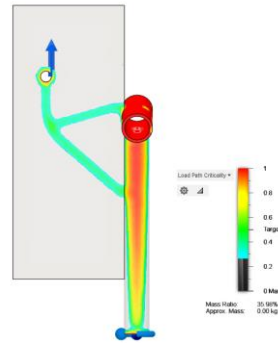


Fig 10. Iteraciones de reducción de material.

## 6. RESULTADOS Y DISCUSION

El análisis de datos obtenidos de la simulación en Adams Car se determinó que las fuerzas involucradas en el sistema son de 392 a 397 N, acompañado de un torque de 6.5 N.mm como se muestra en las figuras 11a y 11b. impresas desde Adams Car®.

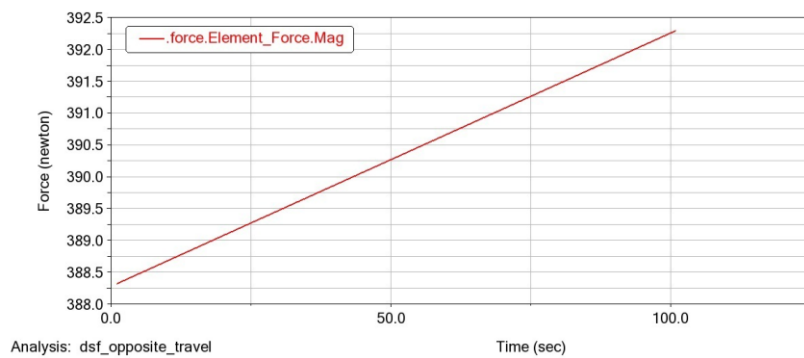


Fig 11a. Fuerza normal en la mangueta.

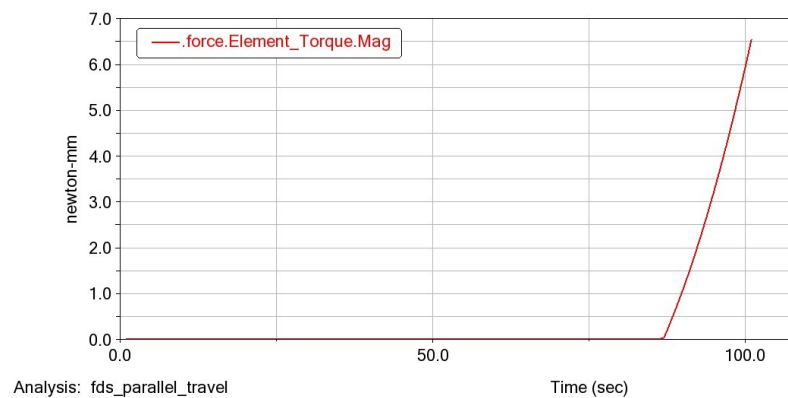


Fig 11b. Torque en la conexión de la mangueta y la rueda

Además, tiene una fuerza de empuje en la unión de la mangueta y el brazo de dirección de 100 N la cual se transmite desde el movimiento del kart.

Los análisis de los resultados presentados demuestran que varios enfoques de diseño de optimización topológica y de diseño generativo pueden interpretarse en muchas situaciones dentro del marco del mejoramiento de elementos y validaciones, pero lo que se tiene que tomar como factor de relevancia es las limitaciones que existen al aplicar estos métodos que pueden ser la aproximación a la realidad que se va a obtener como respuesta de la ejecución de dichos métodos.

También es evidente, a partir de una visión general de las metodologías actuales, que, a pesar de la abundancia de resultados, todavía hay desarrollos teóricos e implementaciones en la práctica complejas que superar. Así, la relación entre mejoramiento de la pieza y manufactura de la respuesta está abierta para la mayoría de las clases de problemas, y estrechamente relacionadas con esto, están los elementos asociados a los límites de las propiedades para el comportamiento de problemas lineales y cuadráticos. Desde un punto de vista práctico, la cuestión más apremiante es, sin duda, el desarrollo de un marco general para concebir esquemas correctos para obtener la mejor solución al problema sujeto a ser resuelto, lo cual puede se observa en la Figura 12 con los resultados de cada una de las herramientas implementadas.

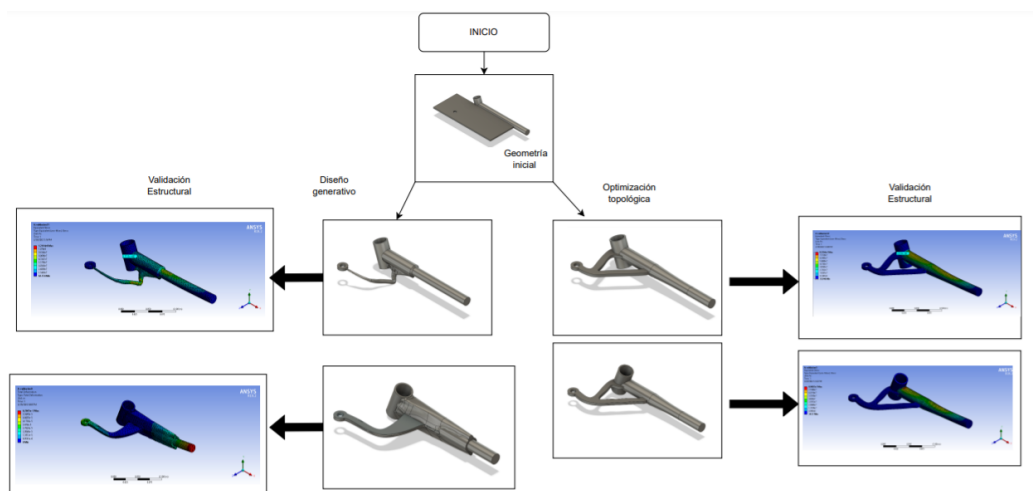


Fig 12. Resultados obtenidos por los diferentes métodos

### 6.1. Validaciones estructurales

En la Fig. 13, se puede observar la distribución del campo de esfuerzos que se tienen a lo largo de la pieza, lo que destaca es la zona crítica, con las mayores intensidades de esfuerzo que guían el proceso mejorado de las propuestas presentadas. En ambos casos la magnitud del esfuerzo varía sensiblemente debido al cambio que se propone en la



geometría, sin embargo, continua siendo una variable que aporta la información necesaria en el proceso de mejora de la mangueta en estudio.

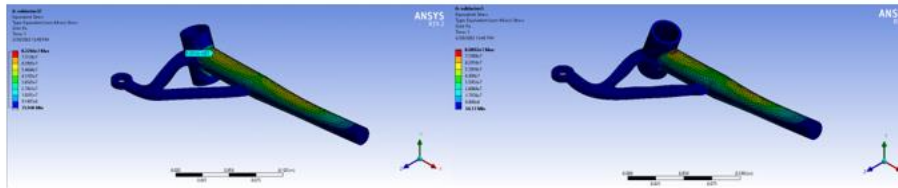


Fig 13. Validaciones de las piezas a 110 y 70 grados.

## 6.2. Costo computacional aparente

El costo computacional que se ha tenido en primera instancia es el consumo de créditos que se necesitan para ejecutar cada una de las corridas de los diseños generativos y de optimización topológica vía Cloud Computing con fusión 360. Por lo que aproximadamente tenemos un gasto de por cada diseño generativo son 33 créditos de Cloud, por lo que en diseño generativo se consumió aproximadamente 330 contando la optimización topológica fueron 36 créditos por un total de 366 créditos, sin contar las validaciones correspondientes en ANSYS® por lo que al hacer la conversión se estima un precio de 1098 \$USD.

## 6.3. Diseño de experimentos con variables internas y externas

De acuerdo con las variables de salida medidas en el diseño de la mangueta propuestos. Los datos obtenidos se procesaron con Minitab®, versión de prueba para estudiantes (hacer la referencia) y se obtuvieron las Figuras 14 y 15, donde se observa que existe significancia con todas las variables de entrada seleccionadas, sin embargo, individualmente muestran mayor significancia el ángulo de inclinación y el material, tal como se esperaba de acuerdo con el FS.

Respecto al efecto cruzado, se destaca que la metodología es muy importante ya que va a dar cambios significantes en el comportamiento de los resultados obtenidos, mejorando el comportamiento mecánico de la mangueta ya que efectivamente se puede disminuir el peso.

La distribución de esfuerzos de la pieza muestra que la variable que afecta es como se ubica el ángulo de la conexión que va a existir en la conexión entre el chasis y la

mangueta, esto es debido a que un aumento del ángulo puede cambia la magnitud de los estados de carga transmitidos por la pieza y por lo tanto cambia la dsitribucion de los desplazamientos y esfuerzos. Si bien para este estudio se tomó diseños de karts de competencia anteriores se vale decir que con conociendo las variables se puede hacer más iteraciones con los ángulos hasta obtener una pieza funcional pero que cumpla con las limitaciones de manufactura existentes

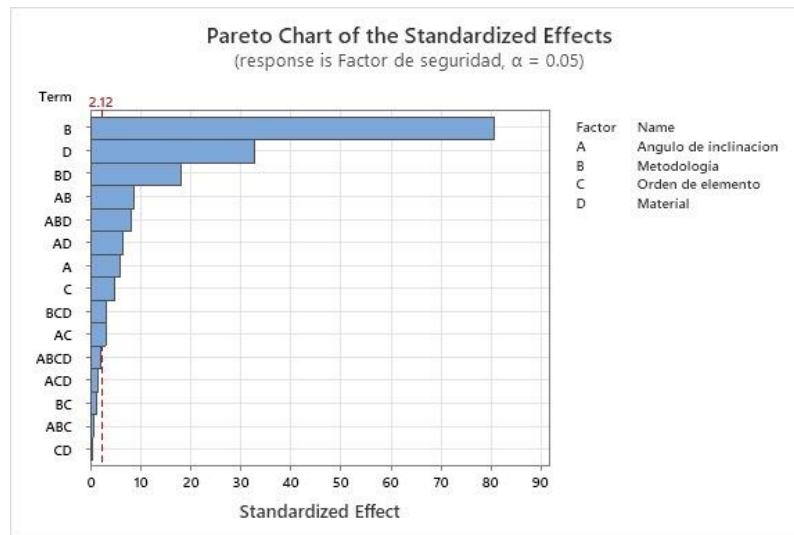


Fig 14. Variables significativas para el factor de seguridad.

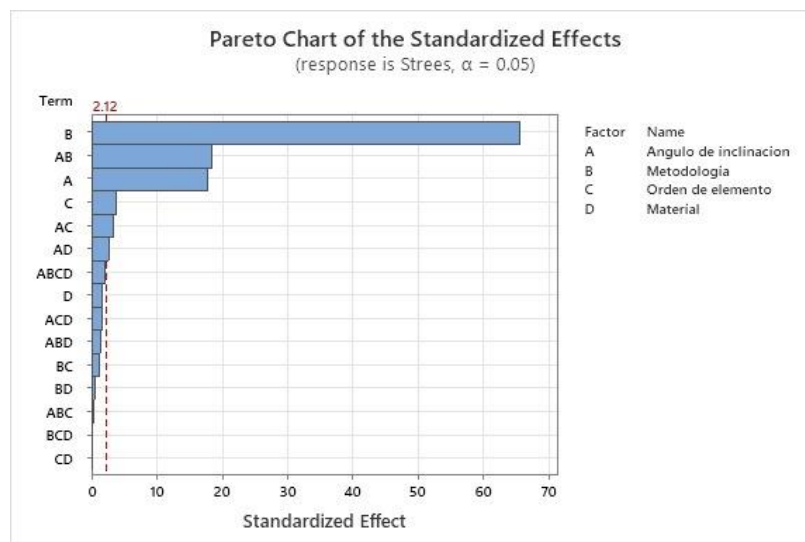


Fig 15. Variables significativas del esfuerzo mecánico.

En la Figura 16, se muestra una solución optimizada de acuerdo con las variables de salida del experimento. Esta respuesta genera tres soluciones posibles para obtener un peso mínimo, un factor de seguridad de 7, una deformación mínima y además un esfuerzo mínimo. La solución alta que nos garantiza un mejor funcionamiento, la media un

funcionamiento óptimo y la baja que está al límite de lo requerido pero por cuestiones de seguridad del elemento es recomendable elegir las dos primeras.

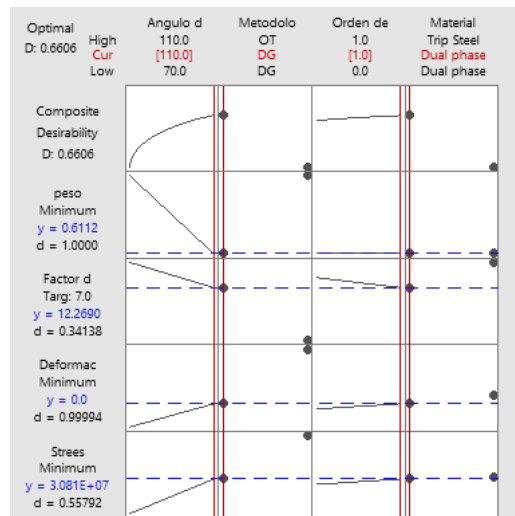


Fig 16. Diseño optimizado.

#### 6.4. Propuesta final de Diseño de la Mangueta

La propuesta final tenemos dos diseños los cuales son de diseño generativo y OT correspondientemente, en el cual se aplicó un análisis de fatiga para validar el modelo obtenido considerando su factor de seguridad. Utilizando el método de Soderberg debido a que si bien se sabe las cargas que este va a soportar se desconoce otras cargas de funcionamiento por lo que hacer nuestro diseño con el método más conservador nos ayuda a tener robustez en la pieza.

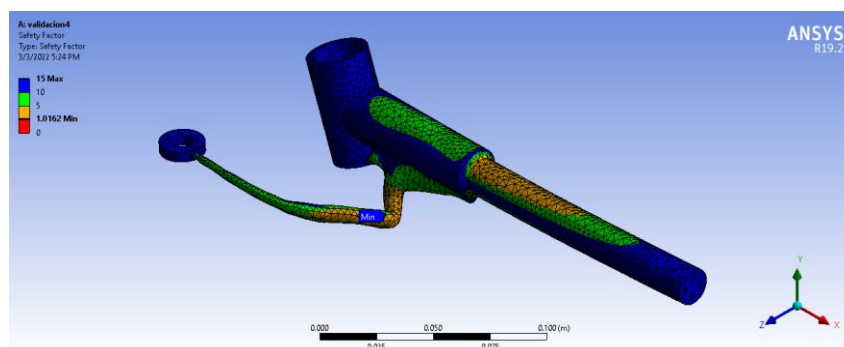


Fig 17. Propuesta final diseño generativo.

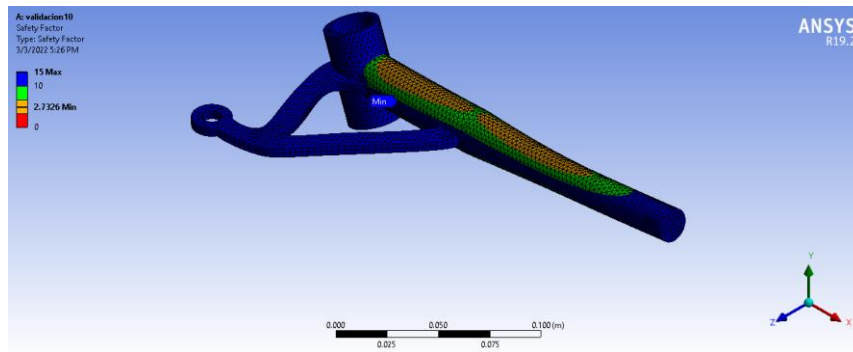


Fig 18. Propuesta final optimización topológica.

Por lo que se puede observar que para el alcance obtenido de optimización topológica tenemos factor de seguridad con un mínimo de 1 en todas las piezas soportando a  $1 \cdot 10^8$  ciclos.

Tabla 3. Peso final de las propuestas.

Angulo de conexión	Metodología	Material	Peso kg
110	DG	Dual phase steel	0.61122
110	OT	Trip Steel 450	0.66223

Cabe recalcar que el peso total de las propuestas es de 0.6 kg en comparación al peso inicial de 1.6 kg lo que da una reducción de material del 37.5%.

## 7. CONCLUSIONES

Se obtuvieron dos propuestas que cumplen con requisitos de diseño asociados a la resistencia del material, menor peso y rigidez necesaria para que la mangueta de dirección-suspensión de un kart de la categoría KZ2 cumpla su función.

Los diseños finales propuestos se basan en un análisis dinámico Multicuerpo, diseño generativo y optimización topológica a través de un diseño de experimentos y por lo tanto permiten concluir que:

- Mediante el análisis multicuerpo se determinó que la mangueta actúa como un elemento de absorción de cargas axiales, longitudinales y torsionales de 100 N, 397 N y 6.2 N mm respectivamente.
- La norma ISO 4948 determina características que deben tener los materiales con los cuales se construirá partes automotrices que con ayuda del Granta se encontraron tres tipos de materiales óptimos que son el Dual phase steel, trip steel

Y400 y el trip Steel Y450 que son de igual densidad, pero de los cuales se consideró el primero y el tercer ya que posee mayor resistencia.

- Se determinó un análisis de experimentos factorial completo de cuatro variables, el cual dio como resultado que la variable predominante para la distribución de esfuerzos y un factor de seguridad óptimo es el tipo de metodología empleada en el diseño.
- Se obtuvo una respuesta optimizada que garantice un factor de seguridad adecuado y un peso mínimo la cual dio como resultado que se puede utilizar tanto diseño generativo como optimización topológica ya que cada uno de los dos resultados finales presentan vida infinita, pero tiene que realizarse a 110° la conexión de la mangueta y el chasis se sugiere que se utilice el trip Steel Y450 ya que tiene una densidad igual a la del dual phase Steel pero tiene una mayor resistencia.

## 8. RECOMENDACIONES

- La aplicación de las metodologías en la simulación usando computación en la nube permite generar más iteraciones del modelo y así proceder a validar los resultados correspondientemente, por lo tanto, se recomienda alquilar licencias de Fusion 360 en nube con los créditos o tokens necesarios para ejecutar las simulaciones en promedio correr un diseño generativo cuesta 33 créditos y uno de optimización topológica cuesta 9 créditos cada crédito tiene su valor en fiat.
- En el estudio multicuerpo se debe identificar los nodos del sistema para obtener las fuerzas ejercidas que exista en cada conexión por lo que se recomienda una correcta ubicación espacial basándose en sistemas ya desarrollados.
- La simulación es lo más minimalista posible para obtener una buena relación de costo computacional / tiempo.
- No es fácil automatizar un proceso genérico para obtener el resultado óptimo holístico de cualquier pieza, debido a que existen muchas variables que considerar. Sin embargo, herramientas de inteligencia artificial parecen dar una respuesta particular a diseños específicos, por lo anterior sería interesante explorar esas herramientas con metodologías probadas en este trabajo de investigación y verificar que en el caso de la mangueta es posible un diseño mejorado.

## REFERENCIAS

- Bhusari, A., Chavan, A., & Karmarkar, S. (2015). FEA & OPTIMISATION OF STEERING KNUCKLE OF ATV. *International Journal of Mechanical And Production Engineering*, 3, 2092–2320.
- Cervieri, A., Gertz, L. C., Rodrigues, A. F. A., da Silveira, M. A., & Giovanaz, J. (2012). Design and structural analysis of a stub axle front suspension. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2012-36-0277>
- FIA, C. I. D. E. K. (CIK); (2017). Règlement technique de karting. *January*, 38. <http://www.cikfia.com/fileadmin/content/REGULATIONS/Technical/Technical>
- ISO - ISO 4948-1:1982 - Steels — Classification — Part 1: Classification of steels into unalloyed and alloy steels based on chemical composition. (n.d.). Retrieved March 2, 2022, from <https://www.iso.org/standard/10963.html>
- Kim, G.-Y., Han, S.-H., & Lee, K.-H. (2014). Structural Optimization of a Knuckle with Consideration of Stiffness and Durability Requirements. *TheScientificWorldJournal*, 2014, 763692. <https://doi.org/10.1155/2014/763692>
- Krishnamoorthi, S., Prabhu, L., Shadan, M. D., Raj, H., & Akram, N. (2020). Design and analysis of electric Go-Kart. *Materials Today: Proceedings*, 45(xxxx), 5997–6005. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.413>
- Oh, S., Jung, Y., Kim, S., Lee, I., & Kang, N. (2019). Deep generative design: Integration of topology optimization and generative models. *Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME*, 141(11). <https://doi.org/10.1115/1.4044229>
- Rajendran, I., & Vijayarangan, S. (2001). Optimal design of a composite leaf spring using genetic algorithms. *Computers & Structures*, 79(11), 1121–1129. [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(00\)00174-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(00)00174-7)
- Sanjay Yadav, Ravi Kumar Mishra, Varish Ansari, & Shyam Bihari Lal. (2016). Design and Analysis of Steering Knuckle Component. *International Journal of Engineering Research And*, V5(04). <https://doi.org/10.17577/IJERTV5IS040818>
- Shuaib, M., Haleem, A., Kumar, L., Rohan, & Sharma, D. (2019). Design and analysis of steering knuckle joint. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 5(04), 423–431. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-6469-3\\_38](https://doi.org/10.1007/978-981-13-6469-3_38)
- TKART. (2022). *Mejorar la configuración del kart y la posición con accesorios extra*. TKART. <https://tkart.it/es/magazine/como-hacer-para/accesorios-extra-mejorar-configuracion/#2>
- Tyflopoulos, E., Flem, D. T., Steinert, M., & Olsen, A. (2018). State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs.

*Proceedings of NordDesign: Design in the Era of Digitalization, NordDesign 2018*, 1–15.

- v S, S., Loganathan, K., Vignesh, V., Tamilmani, R., & Akash, M. (2018). Design and Analysis of Steering Knuckle Component For Terrain Vehicle. *International Journal of Recent Trends in Engineering and Research*, 4. <https://doi.org/10.23883/IJRTER.2018.4092.MYRIK>
- Vijayarangan, S., Rajamanickam, N., & Sivananth, V. (2013). Evaluation of metal matrix composite to replace spheroidal graphite iron for a critical component, steering knuckle. *Materials & Design*, 43, 532–541. <https://doi.org/10.1016/J.MATDES.2012.07.007>