

Optimización topológica del diseño estructural de un chasis tubular mediante elementos finitos para un Kart monoplace del SENA GRAND PRIX

Cristiam Camilo Flórez Carreño

Julián Camilo Colmenares Rincón

Trabajo de grado para optar por el título de Ingeniero Mecánico

Director

Alejandro Sierra Vargas

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2024

Dedicatoria

A Dios, primeramente, por permitirme culminar esta importante y valiosa etapa de mi vida. A mis padres, que sin cada uno de sus esfuerzos hubiese sido posible formarme como persona y como profesional. A mis hermanos, por guiarme y apoyarme con palabras de aliento durante todo este proceso. A mis amigos por acompañarme y creer en mí en cada paso que doy. A mis mascotas, que representan una gran parte de mí. A Juliana, Laura y Julián, mis más sinceras amistades, que han creído siempre en mí y que me han acompañado no solo en este proceso, sino en cada una de las situaciones importantes de mi vida.

Cristiam Camilo Flórez Carreño.

Resumen

Título: Optimización topológica del diseño estructural de un chasis tubular mediante elementos finitos para un Kart monoplaça del SENA GRAND PRIX*

Autores: Cristiam Camilo Flórez Carreño, Julián Camilo Colmenares**

Palabras clave: Karts, optimización, chasis, elementos finitos, topología, rendimiento, competencia, bastidor, reglamento.

Descripción:

El proyecto aborda la mejora del diseño estructural del chasis tubular de un kart mediante la optimización topológica con la ayuda de métodos de elementos finitos en el software SolidWorks con el objetivo de disminuir el peso del chasis, mejorando su resistencia y rigidez, cumpliendo con las normativas de la competencia SENA GRAND PRIX.

El estudio inicia con un análisis estático y dinámico del chasis original con el fin de identificar las cargas y fronteras a las cuales está sometido el chasis. Se realizó el estudio estático hallando los esfuerzos y deformaciones máximas del mismo, además de un análisis dinámico para hallar las fuerzas a las cuales está sometido el chasis durante la carrera, con el fin de calcular el esfuerzo torsional que experimenta en las curvas, lo que permitió observar las principales falencias y puntos a mejorar en el chasis.

Se realiza el rediseño y optimización topológica, al cual se le realizaron los mismos estudios estáticos y dinámicos, evidenciando una mejoría en las características del chasis. El desplazamiento tuvo una reducción del 91.8 %, además, el esfuerzo máximo se redujo un 45.44%, lo que respalda una correcta distribución de las cargas actuante. Estos cambios permitieron obtener también una reducción del peso del chasis con los accesorios de 100 kg a 73,5 kg mejorando el rendimiento y la maniobrabilidad.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Alejandro Sierra Vargas.

Abstract

Title: Topological optimization of the structural design of a tubular chassis using finite elements for a SENA GRAND PRIX single-seater kart*

Authors: Cristiam Camilo Flórez Carreño, Julián Camilo Colmenares

Key Words: Karts, optimization, chassis, finite element, topology, performance, competition, frame, regulation.

Description:

The project addresses the improvement of the structural design of the tubular chassis of a kart through topological optimization with the help of finite element methods in SolidWorks software in order to reduce the weight of the chassis, improving its strength and stiffness, complying with the regulations of the SENA GRAND PRIX competition.

The study begins with a static and dynamic analysis of the original chassis in order to identify the loads and boundaries to which the chassis is subjected. The static study was carried out by finding the maximum stresses and deformations of the chassis, in addition to a dynamic analysis to find the forces to which the chassis is subjected during the race, in order to calculate the torsional stress experienced in the curves, which allowed observing the main shortcomings and points to improve in the chassis.

The redesign and topological optimization was carried out, to which the same static and dynamic studies were performed, showing an improvement in the characteristics of the chassis. The displacement had a reduction of 91.8 %, in addition, the maximum stress was reduced by 45.44%, which supports a correct distribution of the acting loads. These changes also resulted in a reduction of the chassis weight with accessories from 100 kg to 73.5 kg, improving performance and maneuverability.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director Alejandro Sierra Vargas.

Contenido

Introducción	12
Justificación	13
1. Objetivos	14
1.1. Objetivo General	14
1.2. Objetivos Específicos	14
2. Marco Teórico.....	15
2.1. Antecedentes	15
2.1.1. Antecedentes Internacionales.....	15
2.1.2. Antecedentes Nacionales	16
2.1.3. Antecedentes Internacionales.....	17
2.2. Referentes teóricos.....	18
2.2.1. Kart y karting	18
2.2.1.2.1. Chasis.....	18
2.2.1.2.2. Chasis escalera.....	19
2.2.1.2.3. Chasis de túnel central	19
2.2.1.2.4. Chasis multitubular	20
2.2.1.2.5. Chasis tipo monocasco.....	21
2.2.2. SENA GRAND PRIX.....	22
2.2.3. Método de elementos finitos	23
2.2.4. Optimización topológica.....	26
3. Validación del modelo matemático.	26
3.1. Método analítico.....	27
3.2. Método elementos finitos.....	30
3.2. Comparación de métodos.....	34
4. Diseño del chasis.....	34
4.1. Proceso de análisis del chasis.....	34
4.1.1. Modelado del chasis.....	34
4.1.2. Análisis estático	36
4.1.3. Análisis dinámico.....	41
4.1.3.2. Fuerzas de torsión aplicadas al eje delantero.....	44
4.1.2.3.1. Fuerzas de torsión aplicadas al eje posterior.....	44
5. Optimización topológica.....	45
5.1. Modelado del bosquejo geométrico inicial	47
5.2. Asignación del material	48

5.3.	Sujeciones y aplicación de fuerzas	49
5.4.	Calidad de malla	51
5.5.	Estudio topológico	53
5.6.	Diseño del nuevo chasis.....	54
5.7.	Aplicación de fuerzas.....	55
5.8.	Mallado del chasis tubular	56
5.9.	Análisis estático	56
	Resultados y discusiones.....	61
	Conclusiones	63
	Recomendaciones	64
	Referencias Bibliográficas	65
	Apéndices.....	67

Lista de Figuras

Figura 1. <i>Go kart</i>	18
Figura 2. <i>Chasis escalera</i>	19
Figura 3. <i>Chasis de túnel central utilizado como plataforma modular en vehículos eléctrico...</i>	20
Figura 4. <i>Chasis multitubular Go kart</i>	20
Figura 5. <i>Chasis de tipo monocasco elaborado por McLaren en fibra de carbono</i>	21
Figura 6. <i>Karting</i>	22
Figura 7. <i>Celebración de los 15 años del Grand Prix</i>	23
Figura 8. <i>Conjunto de elementos finitos denominado discretización</i>	24
Figura 9. <i>Optimización topológica</i>	26
Figura 10. <i>Diseño de viga empotrada con cargas aplicadas</i>	27
Figura 11. <i>Gráfico del momento flector</i>	28
Figura 12. <i>Diagrama de viga flectada</i>	29
Figura 13. <i>Diseño viga en SolidWorks</i>	30
Figura 14. <i>Cargas aplicadas en la viga</i>	31
Figura 15. <i>Malla aplicada</i>	31
Figura 16. <i>Estudio de esfuerzo</i>	32
Figura 17. <i>Estudio de deformaciones</i>	32
Figura 18. <i>Trazado de líneas para el croquis del chasis</i>	35
Figura 19. <i>Conversión del croquis del chasis en miembro estructural</i>	35
Figura 20. <i>Selección del material “Acero AISI 1010 laminado en caliente”</i>	36
Figura 21. <i>Sujeción de los apoyos del chasis</i>	37
Figura 22. <i>Aplicación de fuerzas por componentes</i>	39

Figura 23. <i>Desplazamiento del chasis sometido a fuerzas por elementos</i>	40
Figura 24. <i>Tensión máxima del chasis</i>	40
Figura 25. <i>Rigidez torsional aplicando carga en el eje delantero</i>	44
Figura 26. <i>Rigidez torsional aplicando carga en el eje posterior</i>	45
Figura 27. <i>Posición y medidas del piloto</i>	46
Figura 28. <i>Primera propuesta de la distribución del chasis</i>	47
Figura 29. <i>Segunda propuesta de la distribución del chasis</i>	48
Figura 30. <i>Asignación de material a los modelos propuestos</i>	49
Figura 31. <i>Sujeción y fuerzas aplicadas en la propuesta 1</i>	49
Figura 32. <i>Sujeción y fuerzas aplicadas en la propuesta 2</i>	50
Figura 33. <i>Calidad de la malla de la propuesta 1</i>	51
Figura 34. <i>Restricción de masa</i>	51
Figura 35. <i>Calidad de la malla de la propuesta 2</i>	52
Figura 36. <i>Estudio de topología de la propuesta 1</i>	53
Figura 37. <i>Estudio de topología de la propuesta 2</i>	54
Figura 38. <i>Chasis tubular de la propuesta 2</i>	55
Figura 39. <i>Aplicación de cargas al chasis tubular de la propuesta 2</i>	55
Figura 40. <i>Aplicación de la malla al chasis tubular de la propuesta 2</i>	56
Figura 41. <i>Tensión axial y flexión máxima del chasis tubular de la propuesta 1</i>	57
Figura 42. <i>Desplazamiento del chasis tubular de la propuesta 1</i>	57
Figura 43. <i>Tensión axial y flexión máxima del chasis tubular de la propuesta 2</i>	58
Figura 44. <i>Desplazamiento del chasis tubular de la propuesta 2</i>	59
Figura 45. <i>Rigidez torsional aplicando carga en el eje delantero</i>	59

Figura 46. <i>Rigidez torsional aplicando carga en el eje trasero</i>	60
Figura 47. <i>Factor de seguridad</i>	60
Figura 48. <i>Kart SENA GRAND PRIX</i>	61

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Resultados método analítico</i>	30
Tabla 2. <i>Resultados método elementos finitos</i>	33
Tabla 3. <i>Análisis entre métodos</i>	34
Tabla 4. <i>Características de los elementos principales del kart</i>	37
Tabla 5. <i>Distribución de fuerzas por elementos actuantes</i>	49

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Planos del chasis optimizado</i>	66
---	----

Introducción

El Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) se caracteriza impulsar la creatividad de sus aprendices a través de la innovación en diferentes áreas y especialidades, uno de ellos es el proyecto SENA GRAND PRIX. Esta competencia se realiza con la finalidad de motivar a diferentes regionales a utilizar el ingenio para la construcción de un vehículo de competencia de tipo kart con motor de combustión interna.

En la actualidad, el chasis para un kart de competencia enfrenta desafíos relacionados con el peso, las dimensiones, los materiales y la resistencia, los cuales cumplen un papel esencial en el desempeño de carrera, maniobrabilidad y seguridad del piloto. Por esto, el chasis debe cumplir con especificaciones morfológicas expresadas detalladamente en las normas constituidas por la competición.

El diseño del chasis tubular de un kart de competencia debe cumplir con parámetros adecuados que le permitan sacar el máximo provecho a cada uno de sus componentes, además de poder soportar las diversas cargas e impactos a los que constantemente puede estar sometido con el fin de salvaguardar la integridad física del piloto.

Es por esto, que este proyecto se centra en la optimización topológica del chasis tubular del kart monoplaza con el fin de obtener un diseño liviano y seguro con las dimensiones adecuadas aplicando elementos finitos.

Justificación

El karting es una rama del automovilismo la cual se practica con karts en pistas o circuitos denominados kartódromos, considerándose una disciplina que introduce a otras categorías del automovilismo más especializadas. Este tipo de competiciones requiere de altas velocidades con pistas complejas, por lo que se prioriza salvaguardar la vida de los pilotos, es por esto, que se debe contar con un diseño óptimo del chasis del vehículo, que es uno de sus principales y más importantes componentes.

El chasis de un kart es un elemento esencial que tiene un impacto directo en su rendimiento. Un chasis correctamente optimizado puede incrementar la maniobrabilidad, la velocidad y la seguridad del vehículo. Por lo tanto, el proceso de diseño y mejora del chasis requiere de conocimiento acerca de la dinámica del kart, los materiales utilizados y su distribución de cargas.

Con la optimización topológica, se busca obtener un chasis ligero que permita mejorar la rapidez y eficiencia del combustible, así como también lograr que sea lo suficientemente resistente para soportar las cargas o impactos a los que se somete durante la carrera

En este proyecto se quiere aprovechar las ventajas de la optimización topológica para explorar nuevas estructuras y configuraciones en un nuevo chasis con el objetivo de eliminar el material innecesario, mejorar la distribución de cargas y lograr aumentar la seguridad del piloto.

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

Optimizar topológicamente el chasis de un Kart de competencia mediante el uso de elementos finitos para reducir el peso total del vehículo y cumplir con la reglamentación actual.

1.2. Objetivos Específicos

- Determinar las condiciones de carga y frontera a las que está sometido el chasis del kart, mediante un estudio de fuerzas actuantes en el sistema.
- Analizar estática y dinámicamente el chasis utilizando métodos de elementos finitos bajo las condiciones actuales para obtener tensiones y desplazamientos del sistema.
- Comparar el chasis actual con el optimizado topológicamente para verificar la reducción del peso y garantizar su cumplimiento según reglamento.

2. Marco Teórico

El karting es una práctica deportiva automovilística que ha ido tomando un impulso significativo en temas de competición, que hoy, se considera una base en la formación de pilotos cuya meta apunta a ser partícipes de eventos como la fórmula 1. Como cualquier deporte, esta práctica requiere habilidades técnicas, físicas y estratégicas del conductor, y depende en gran parte del vehículo y sus especificaciones técnicas, como motor, chasis, materiales.

2.1. Antecedentes

2.1.1. *Antecedentes Internacionales*

2.1.1.1. **Diseño del proceso de manufactura del bastidor de un vehículo de competición Go Kart aplicando técnicas de optimización. Ambato, Ecuador.**

Esta investigación tuvo como objetivo principal “diseñar el proceso de manufactura para un bastidor de un vehículo de competición Go Kart usando técnicas de optimización” (Jácome, 2021, p.4)

En el desarrollo de esta investigación, se realizó el diseño del bastidor para que esté bajo la normativa exigida por la CIK-FIA y así realizar la selección adecuada del material. Después, se realizó un análisis detallado en ANSYS para simular el comportamiento respecto a los esfuerzos aplicados. Para concluir, se obtuvo un diseño para el proceso de manufactura del vehículo bajo normativa y estándares sin necesidad de hacer una inversión considerable y que cumpla con su debido funcionamiento.

2.1.1.2. Análisis de un kart de competición y sus componentes. Zaragoza, España.

Este estudio tiene por objetivo realizar un análisis de rigidez y resistencia de los elementos estructurales de un kart de competición, además de la comprobación de los sistemas de frenado, dirección y transmisión (González, 2011).

A través de SOLIDWORKS se realizaron los estudios anteriormente mencionados, acompañado de cálculos y análisis enfocados en la dirección, frenos y chasis para verificar que cumplan con las respectivas normas y sea óptimo para competición. Por último, se complementa este análisis a través del estudio de la ergonomía, las condiciones de homologación y de seguridad.

2.1.2. Antecedentes Nacionales

2.1.2.1. Diseño de un alerón delantero para un kart de competencia mediante CFD. Bogotá, Colombia.

El objetivo de este proyecto de investigación era “diseñar un alerón delantero para reducir la inestabilidad de un kart de competencia usando herramientas computacionales” (Pacheco y Rojas, 2018, p.24)

En el desarrollo de este proyecto, se eligió el perfil aerodinámico adecuado para mejorar su desempeño y la simulación con el alerón seleccionado y evaluar los resultados para identificar si se consiguió reducir la inestabilidad y aumentar la eficiencia aerodinámica.

En los resultados se establece que el alerón implementado en el estudio mejoró la eficiencia aerodinámica, y se recomienda usar herramientas computacionales para obtener resultados más precisos.

2.1.2.2. Diseño e implementación del modelo computacional de un Kart eléctrico. Bogotá, Colombia.

Este proyecto tiene como objetivo principal desarrollar un modelo computacional que permita, mediante la realización de simulaciones, predecir el desempeño de un kart bajo determinadas condiciones de diseño y operación (Robayo, 2019).

Este proyecto se centró en el desarrollo de un modelo computacional usando CarSim, a través del estudio de la dinámica vehicular, simulando así los subsistemas del vehículo en interacción con su entorno. Por último, se validaron los resultados arrojados por medio de la teoría analítica y también por pruebas realizadas a un kart real.

2.1.3. Antecedentes Internacionales

2.1.3.1. Rediseño y construcción del chasis para el monoplaza FSO2-E 2014 de la Fórmula SENA ECO. Bucaramanga, Santander.

Este proyecto tiene como objetivo mejorar aspectos tales como la ergonomía, el cual afectó el rendimiento del piloto para la versión del proyecto 2012-2013, la posición de los controladores, buscado una mejor refrigeración, así como adecuar el chasis con el fin de adicionar el nuevo sistema de transmisión de potencia (Gómez, 2015).

Además, Gómez (2015) afirma que, con la realización del proyecto se consiguió adecuar de manera óptima el habitáculo a través del rediseño del arco trasero, lo que permitió cambiar un nuevo sistema de transmisión de potencia.

2.2. Referentes teóricos

2.2.1. *Kart y karting*

2.2.1.1. Definición de kart

Un kart es un vehículo de baja altura que posee motor, un chasis rígido y en ocasiones carrocería, pero sin suspensión, el cual fue creado principalmente para entretenimiento, pero que con el paso del tiempo se ha ido involucrando en competencias hasta poder convertirse en un deporte.

2.2.1.2. Componentes principales

2.2.1.2.1. *Chasis.*

El chasis se refiere a la parte estructural que logra ensamblar los diferentes subsistemas del kart. Por lo general, está formado por tubería de acero y unido por medio de soldadura para lograr mantener la rigidez. En ocasiones, se suele pensar que la efectividad en competencia depende directamente del motor, sin embargo, el chasis es quien juega uno de los papeles principales, ya que este es quien une las demás partes del kart y sus especificaciones morfológicas pueden marcar el factor diferenciador.

Figura 1

Go kart



Nota. La figura muestra un prototipo de Go kart. Tomado de: Go Power Sports, s.f,

(<https://www.gopowersports.com/vintage-go-kart-roller-kit/?zCountry=CO>)

2.2.1.2.2. *Chasis escalera.*

Este tipo de chasis es el más convencional y antiguo que existe. Posee un diseño sencillo, el cual está conformado por dos vigas estructurales de perfil ya sea en L o de perfil tubular, tal como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Chasis escalera



Nota. La figura describe un chasis tipo escalera, por AlbrodpulF1, 2014, Rodríguez, A.

(<https://albrodpulF1.wordpress.com/2014/10/16/analisis-tecnico-chasis/>)

2.2.1.2.3. *Chasis de túnel central*

Este tipo de chasis actúa gracias a su túnel central que conecta el eje delantero con el trasero, que, además, es utilizado de forma modular para todo tipo de vehículos. El tamaño del túnel central y del chasis varía dependiendo del uso.

Figura 3

Chasis de túnel central utilizado como plataforma modular en vehículos eléctricos



Nota. La figura describe un chasis de tipo túnel, por Diariomotor, Álvarez, S, 2011

<https://www.diariomotor.com/2011/04/08/audi-a3-e-tron-anticipandonos-un-a3-electrico/>

2.2.1.2.4. *Chasis multitubular*

Está compuesto por la unión de varios tubos metálicos que están soldados entre sí y se suele usar comúnmente para competencias con alto impacto, ya que por su unión triangular entre tubos se logra conseguir mayor rigidez y resistencia con poco peso.

Figura 4

Chasis multitubular Go kart



Nota. La figura describe un prototipo de chasis multitubular, por Motores, 2011, HUSH

<https://motores.com.py/foro/index.php?threads/karting-cross-proyecto-2011.17629/>

2.2.1.2.5. *Chasis tipo monocasco*

Según Redondo (2017) consta de una estructura construida a base de polímero reforzado de fibra de carbono, resina y un núcleo compuesto de varios materiales. Este tipo de chasis es de un peso considerablemente bajo gracias al material del cual está elaborado, además, posee una mayor resistencia. Sin embargo, posee un costo elevado de construcción.

Figura 5

Chasis de tipo monocasco elaborado por McLaren en fibra de carbono



Nota. La figura describe un chasis de tipo monocasco, por Diariomotor, Álvarez, S, 2016

(<https://www.diariomotor.com/2016/05/03/monocasco-fibra-carbono-historia-mclaren/>)

2.2.1.3. **Karting**

Mendoza (2015) define el karting como una modalidad del automovilismo que permite la formación de pilotos de otras categorías, que, por lo general, empiezan a muy temprana edad y que se disputa en circuitos de entre 600 y 1.700 metros y un ancho entre 8 y 15 metros que son conocidos como kartódromos.

El karting poco a poco se ha ido adentrando más en el mundo del automovilismo deportivo, al punto de implementarse como una competencia de pista de un nivel intermedio por el uso de los diversos elementos que se emplean en la construcción de los karts, así como también el desarrollo que dicha competición tiene sobre las pistas nacionales.

Figura 6

Karting



Nota. La figura describe a pilotos de karting compitiendo, por Fradcba, 2024, Chino, A. (<https://fradcba.com.ar/el-provincial-de-karting-en-asfalto-se-lucio-en-su-reencuentro-con-general-cabrera/>)

2.2.2. SENA GRAND PRIX

El Servicio Nacional de Aprendizaje [SENA] (2023), dentro del manual y reglamento particular del proyecto SENA GRAND PRIX, afirma que:

El “Proyecto Sena Grand Prix” es un evento formativo y deportivo institucional por excelencia del CENTRO DE TECNOLOGÍAS DEL TRANSPORTE, del SERVICIO NACIONAL DE APRENDIZAJE –SENA-, sede Cazucá en el cual los Aprendices agrupados en equipos (Escuderías) utilizando su ingenio, experiencia y conocimientos; elaboran un vehículo monoplace, tipo Go-Kart y compiten en pruebas de diseño, construcción y pilotaje, las cuales buscan que este vehículo se destaque por sus características de desempeño, estabilidad, rendimiento y maniobrabilidad, siendo amigable con el Medio Ambiente incentivando energías alternativas. (p.5)

Figura 7

Celebración de los 15 años del Grand Prix



Nota. La figura el evento realizado por la celebración de los 15 años de la competencia.

Servicio Nacional de Aprendizaje – SENA TV (2019)

2.2.2.1. Reglamento para el chasis

Según el manual del Sena Grand Prix 2023, se indica que el chasis debe ser elaborado en acero estructural o acero estructural aleado. Dentro de las dimensiones, se tienen designadas las siguientes:

- Largo máximo del bastidor: 1820mm (sin incluir el carenaje y el bómper)
- Ancho máximo externo entre llantas: 1400mm
- Distancia entre ejes: 1055mm
- Diámetro externo del tubo para el chasis: 28mm, 30mm o 32mm
- Espesor de pared del tubo: 2,3mm

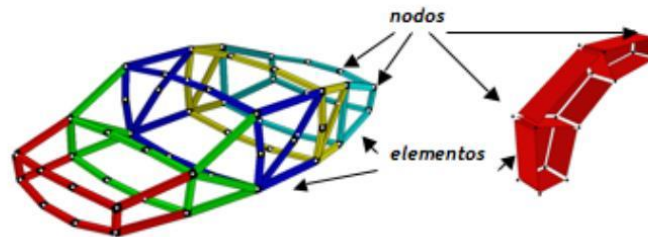
2.2.3. Método de elementos finitos

Este es uno de los métodos más importantes de la ingeniería, usado para conseguir soluciones numéricas altamente aproximadas ya sea de un cuerpo o de una estructura. Este método consiste en dividir el cuerpo en una gran cantidad elementos diferenciales a través de

conexiones entre sí. Gráficamente, se representa por elementos que están unidos o conectados por medio de nodos, como se muestra Figura 8.

Figura 8

Conjunto de elementos finitos denominado discretización



Nota. La figura describe la discretización en elementos finitos, por Udocz, s.f, Cáritas, R.

(<https://www.udocz.com/apuntes/951/conceptos-basicos-del-metodo-por-elemento-finito>)

A diferencia de métodos convencionales de mecanizado, los elementos finitos permiten realizar estudios a piezas o elementos de mayor complejidad, los cuales también están apoyados por un proceso conocido como optimización topológica.

2.2.3.1. Métodos de solución para problemas ingenieriles

En ingeniería existen tres métodos principales para solucionar problemas, estos nos brindan una gran exactitud al realizar diseños y simulaciones. El primero de ellos es el método analítico, este método es uno de los más antiguos junto al método experimental. El método analítico es basado en realizar cálculos mediante leyes físicas las cuales nos brindan exactitud a la hora de realizar los cálculos, y es necesario que la persona que en el campo donde se aplique exista un amplio conocimiento del tema para adicionalmente aplicar aproximaciones basadas en la experiencia.

El segundo método de solución es mediante elementos finitos, el cual se describe en el apartado anterior.

Por último, está el método experimental, el más antiguo de los tres, y actualmente está sujeto a los dispositivos físicos disponibles como galgas extensiométricas, medidores de vibraciones y demás dispositivos. La principal ventaja de este método es que nos brinda una medida real y confiable, pero esto está limitado a que se debe repetir la práctica de 3 a 5 veces esperando datos similares para comprobar su veracidad.

En este caso se usará el mediante de elementos finitos con la comprobación del método analítico. El método analítico se puede ejecutar siguiendo dos simples pasos:

1. Realizar el análisis y definir que leyes físicas son aplicables al caso para poder definir las fórmulas y sistemas de ecuaciones.
2. Solucionar los sistemas de ecuaciones propuestos con los datos particulares del caso.

Para usar el método de elementos finitos es necesario:

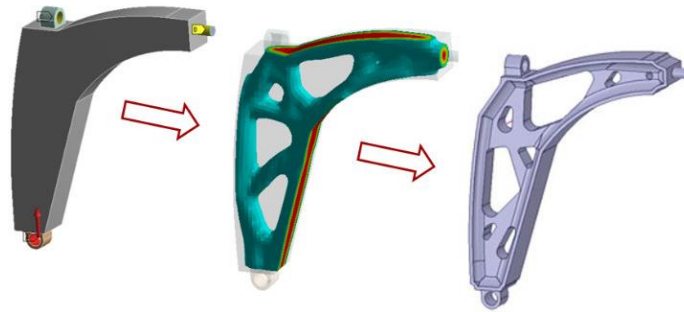
1. Definir el tipo de análisis a usar.
2. Realizar el diseño geométrico mediante un software CAD con el que se desee trabajar.
3. Definir propiedades del elemento como el material y demás información que solicite el software para la solución del problema.
4. Realizar el mallado de la geometría dependiendo de la cantidad de nodos elegida.
5. Definir las cargas y restricciones.
6. Determinar la solución.
7. Visualización y análisis de resultados a través de gráficos 2D/3D, desplazamientos, esfuerzos, etc.

2.2.4. Optimización topológica

Es empleada con el fin de eliminar el material que no está involucrado a la hora de soportar alguna de las cargas a las cuales está siendo sometida la pieza o elemento a trabajar, obteniendo una reducción de peso, lo cual se traduce en disminución de costos de fabricación.

Figura 9

Optimización topológica



Nota. La figura describe el las etapas de la optimización topológica. The

SOLIDWORKS Blog (2019).

(https://blogs.solidworks.com/solidworkslatamyesp/solidworks-blog/simulacion/solidworks_simulation/analisis-de-topologia-y-optimizacion-con-solidworks/attachment/00-portda-analisis-topologico-y-optimizacion-con-solidworks/)

3. Validación del modelo matemático.

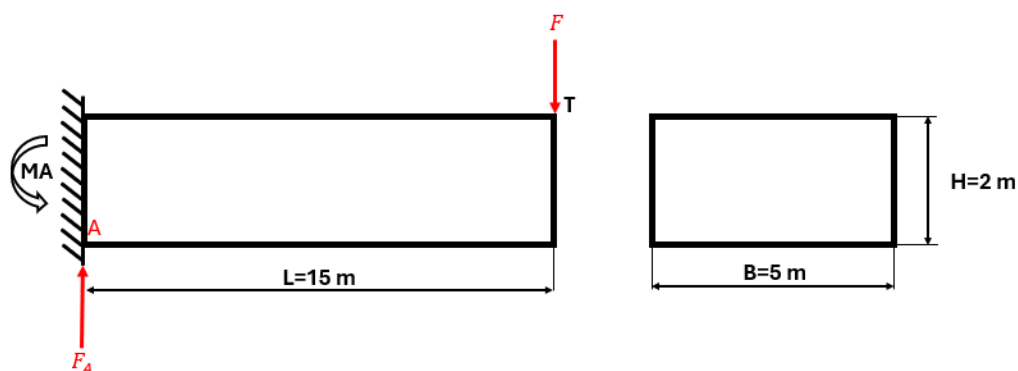
La validación del modelo matemático se realizó mediante el análisis de una viga de acero AISI 1010 rectangular, con empotramiento en una de sus puntas. Este proceso se hizo con el fin de convalidar el método de elementos finitos mediante el uso del software SolidWorks con el proceso del método analítico, el cual siguió mismo patrón aplicado al chasis. Dicha comprobación se realizó tanto de forma procedimental y numérica como también a través de la implementación de SolidWorks para corroborar los cálculos posteriores.

3.1. Método analítico

Timoshenko (1973), propone el análisis de una viga empotrada, la cual presenta flexión por una carga aplicada en plano simétrico, tal como se muestra en la figura 10. Este análisis se realiza para comprobar el correcto funcionamiento del método analítico frente a la simulación presentada por SolidWorks.

Figura 10

Diseño de viga empotrada con cargas aplicadas.



Para el cálculo de esfuerzo y deformaciones producidos en la viga se tomaron varios valores para la fuerza F, esto para tener una mayor confiabilidad en los resultados finales. Para la realización de estos cálculos se tuvieron en cuenta los siguientes datos:

- Módulo de resistencia (E) Acero AISI 1010: 200000MPa.
- Longitud de la viga: 15 m.
- Fuerzas aplicadas: F1=1000kN, F2=1500kN y F3=2000kN.
- Distancia del eje neutro a la superficie (c): 1m.

Se realizó la sumatoria de fuerzas y se halló la reacción de la fuerza Fy.

$$\uparrow + \sum Fy = 0$$

Ecuación (1)

$$F_A - F = 0 \quad \text{Ecuación (2)}$$

$$F_A = F \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde:

F_A = Reacción en el punto A

F = Fuerza aplicada.

Aplicando sumatoria de momentos en A.

$$\curvearrowright + \sum M_A = 0 \quad \text{Ecuación (4)}$$

$$M_A = F * (L) \quad \text{Ecuación (5)}$$

Donde:

M_A = Momento en el punto A.

L = Longitud de la viga.

La inercia de la Viga es:

$$I = \frac{B * H^3}{12} \quad \text{Ecuación (6)}$$

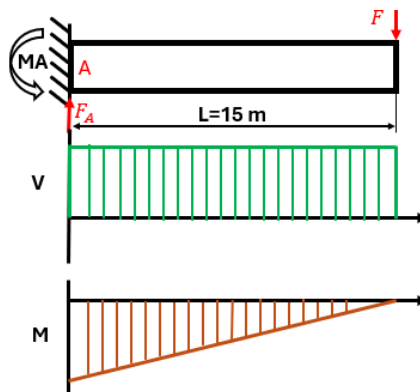
Reemplazando:

$$I = \frac{5 * 2^3}{12} = 3,333 \text{ m}^4$$

Una vez calculada la fuerza resultante y el momento flector se realizó el gráfico del mismo.

Figura 11

Gráfico del momento flector.

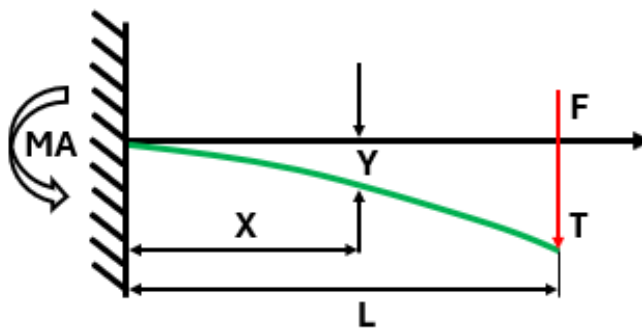


Para el cálculo de esfuerzos y deflexiones producidos en la viga por la fuerza F , se partió de la ecuación diferencial para una viga sometida a flexión en un plano de simetría.

$$\frac{d^2y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad \text{Ecuación (7)}$$

Figura 12

Diagrama de viga flectada.



Remplazando por los valores del problema.

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = F(L - X) \quad \text{Ecuación (8)}$$

Realizando la integración de la ecuación 9.

$$ELy = \frac{FLX^2}{2} - \frac{FX^3}{6} + C \quad \text{Ecuación (10)}$$

Cuando $X=0$, $Y=0$ tenemos que $C=0$ por ende:

$$Y_F = \frac{FX^2}{2EI} \left(L - \frac{x}{3} \right) \quad \text{Ecuación (11)}$$

Ahora, si $X=L$, tendríamos:

$$Y_F = \frac{FL^3}{3EI} \quad \text{Ecuación (12)}$$

Donde:

E = Modulo de elasticidad.

I = Inercia.

Con esto, ya tendríamos la deformación en el punto T o en la esquina de la barra. Ahora bien, para el cálculo de esfuerzos sabemos que son más altos en el punto empotrado, por esto, se realiza este cálculo en el punto A.

$$\sigma = \frac{M}{I} \quad \text{Ecuación (13)}$$

Con esto se presentan los resultados del método analítico.

Tabla 1

Resultados método analítico.

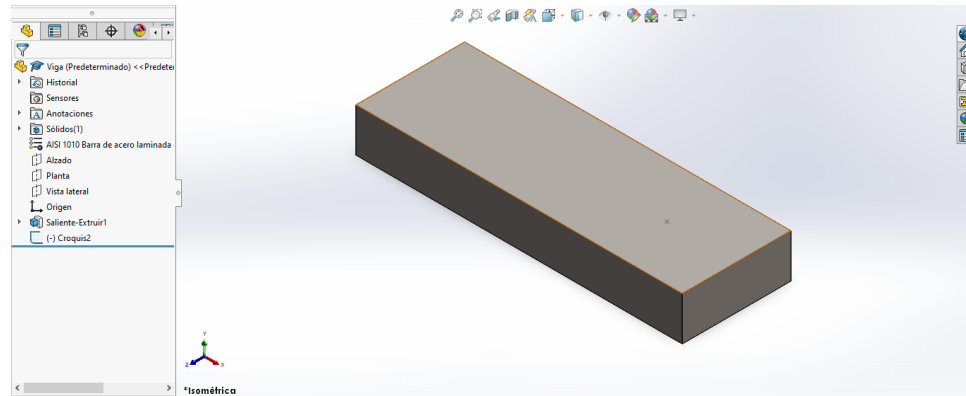
ANÁLISIS MÉTODO ANÁLITICO					
FUERZA APLICADA		DEFORMACIÓN		ESFUERZO	
1000	KN	1,68764	mm	4,301559	MPa
1500	KN	2,530457	mm	6,453773	MPa
2000	KN	3,372929	mm	8,599680	MPa

3.2. Método elementos finitos.

Para iniciar el análisis por el método de elementos finitos se realizó el diseño de la pieza en el software SolidWorks el cual será el usado en este caso.

Figura 13

Diseño viga en SolidWorks.

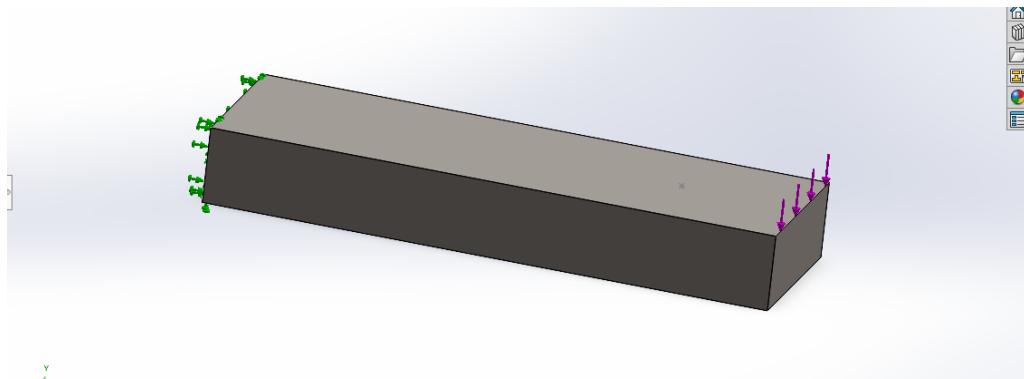


Como se puede apreciar en la Figura 14, se aplicó el material a la viga, correspondiente a un acero AISI 1010, el cual tiene las mismas dimensiones mencionadas en la sección 3.1.

Seguido de esto se empotró la viga y aplicaron las cargas.

Figura 14

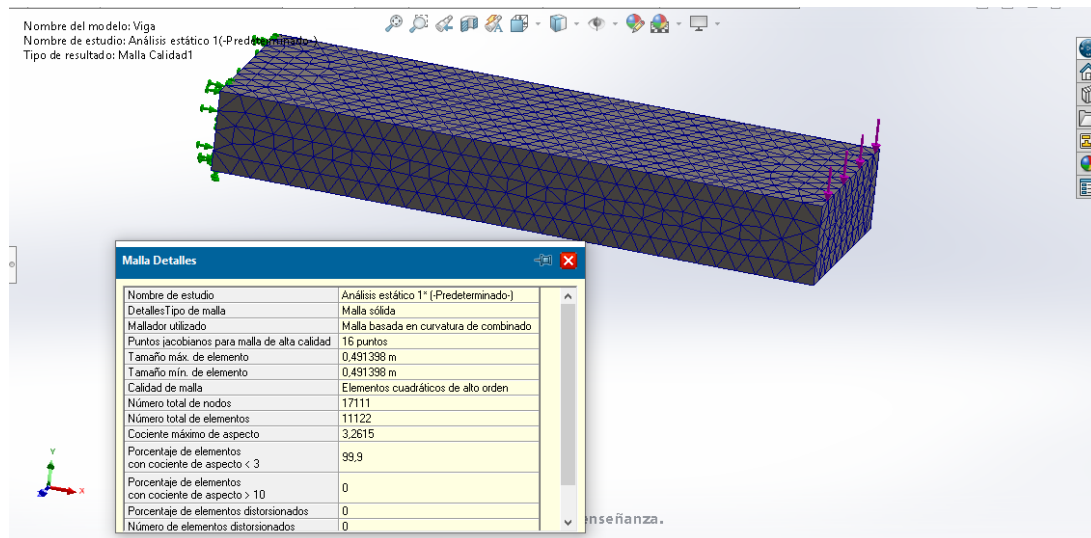
Cargas aplicadas en la viga.



Luego, procedemos con el mallado de la barra con 11.122 elementos y 17.111 nodos.

Figura 15

Malla aplicada.



Se ejecutó el análisis, el cual arrojó los siguientes resultados mostrados en la Figura 16.

Figura 16

Estudio de esfuerzo.

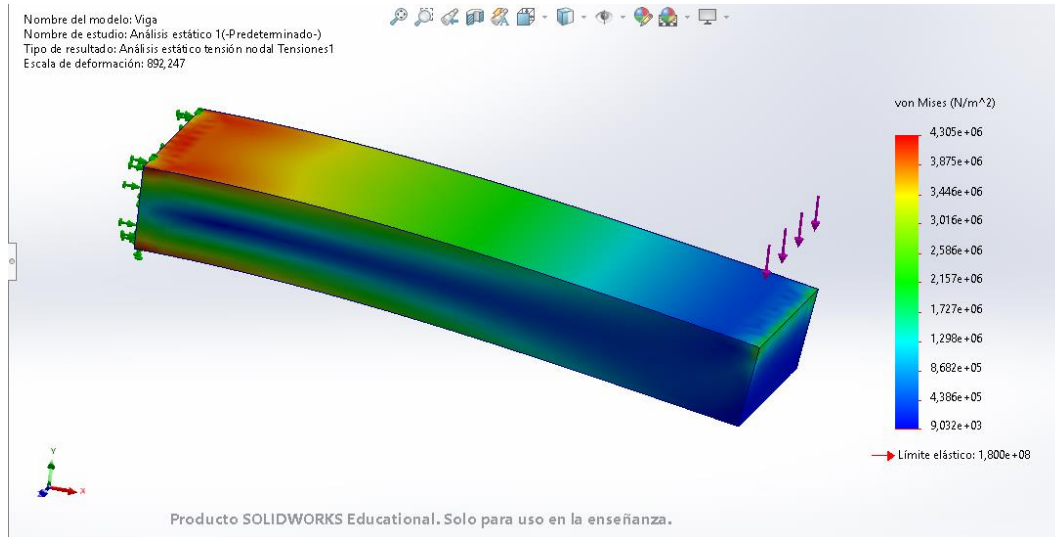
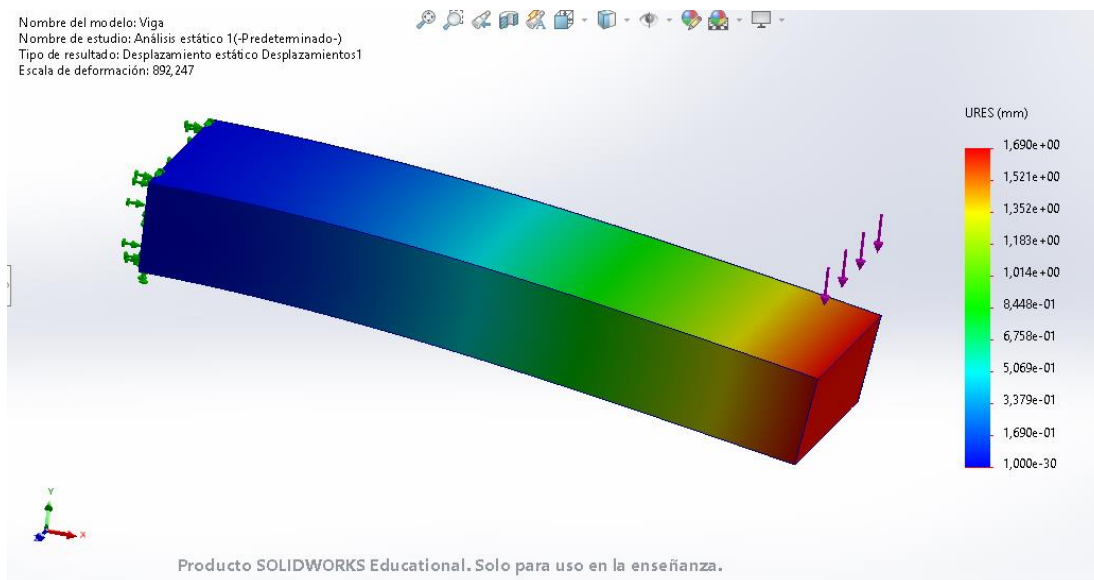


Figura 17

Estudio de deformaciones.



En las figuras 14 y 15 se pudo observar el estudio y resultados con la primera carga. En la Tabla 2, observamos los resultados obtenidos a partir de todas las cargas.

Tabla 2

Resultados método elementos finitos.

ANÁLISIS ELEMENTOS FINITOS					
FUERZA APLICADA		DEFORMACIÓN		ESFUERZO	
1000	KN	1,69	mm	4,305	MPa
1500	KN	2,534	mm	6,457	MPa
2000	KN	3,379	mm	8,61	MPa

Para la elección de los valores de la fuerza se utilizó el método científico, el cual sugiere realizar los cálculos con 3 valores distintos, en este caso de fuerza, por lo que, se tomaron valores altos y con incrementos regulares para lograr observar la variación que se presenta entre los dos métodos. Además, permite analizar el comportamiento de la viga bajo distintas condiciones de carga.

3.2. Comparación de métodos.

Al realizar el análisis de los datos se percibe que hay una gran similitud en estos, así que se halló una variación entre estos del 0.15%, como se puede observar en la tabla 3, por lo que se concluye que el método de elementos finitos a pesar de ser una aproximación, nos brinda una gran exactitud.

Tabla 3

Análisis entre métodos.

FUERZA APLICADA		DEFORMACIÓN ANALÍTICA		DEFORMACIÓN ELEMENTOS FINITOS		% VARIACIÓN
1000	KN	1,68763731	mm	1,69	mm	0,14%
1500	KN	2,53045736	mm	2,534	mm	0,14%
2000	KN	3,37292873	mm	3,379	mm	0,18%
FUERZA APLICADA		ESFUERZO ANALÍTICO		ESFUERZO ELEMENTOS FINITOS		% VARIACIÓN
1000	KN	1,68763731	mm	1,69	mm	0,14%
1500	KN	2,53045736	mm	2,534	mm	0,14%
2000	KN	3,37292873	mm	3,379	mm	0,18%
Variación promedio						0,15%

4. Diseño del chasis.

El chasis del kart está diseñado para satisfacer necesidades tales como rigidez, bajo peso, optimización en la forma, buena ergonomía y la resistencia a las cargas por impacto, además, brindar seguridad al piloto durante la carrera según lo estipulado en el reglamento.

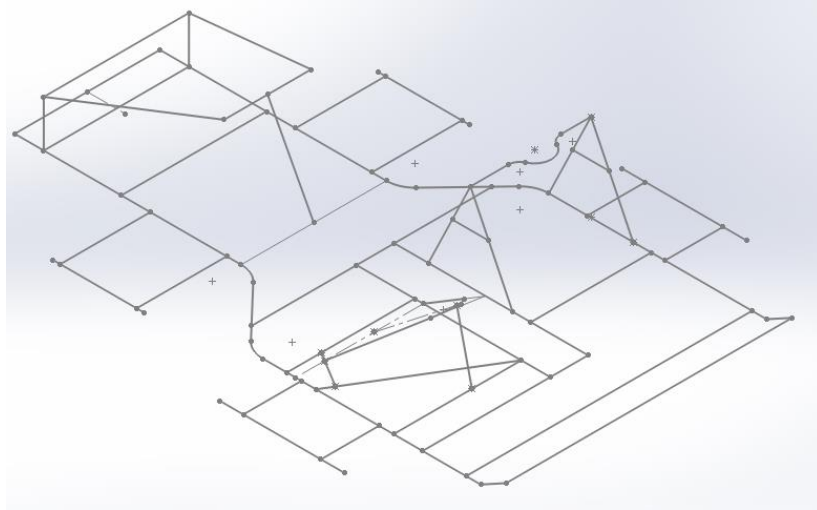
4.1. Proceso de análisis del chasis

4.1.1. Modelado del chasis

Para el modelado del chasis se implementó el uso del software SolidWorks, donde se realizó un croquis por líneas con sus respectivas dimensiones hasta completar un bosquejo con todas las partes del chasis real.

Figura 18

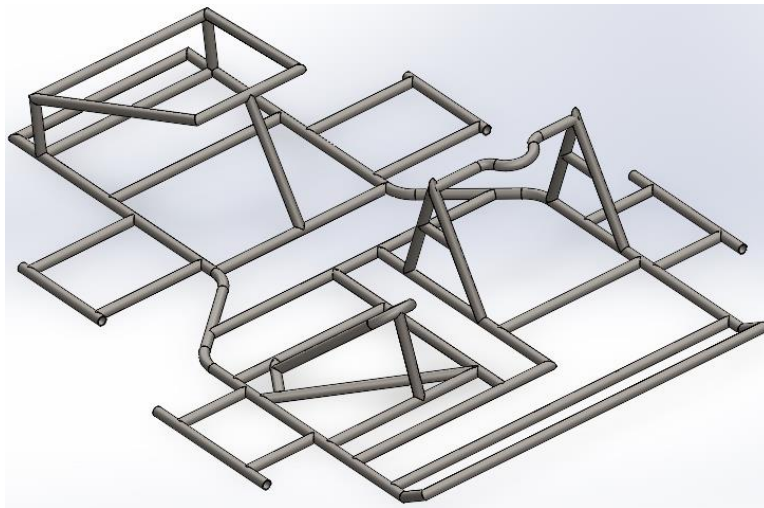
Trazado de líneas para el croquis del chasis



Por medio de la función “Piezas soldadas” en el apartado “Insertar”, convertimos el croquis en miembro estructural para poder emplear el estudio de rigidez.

Figura 19

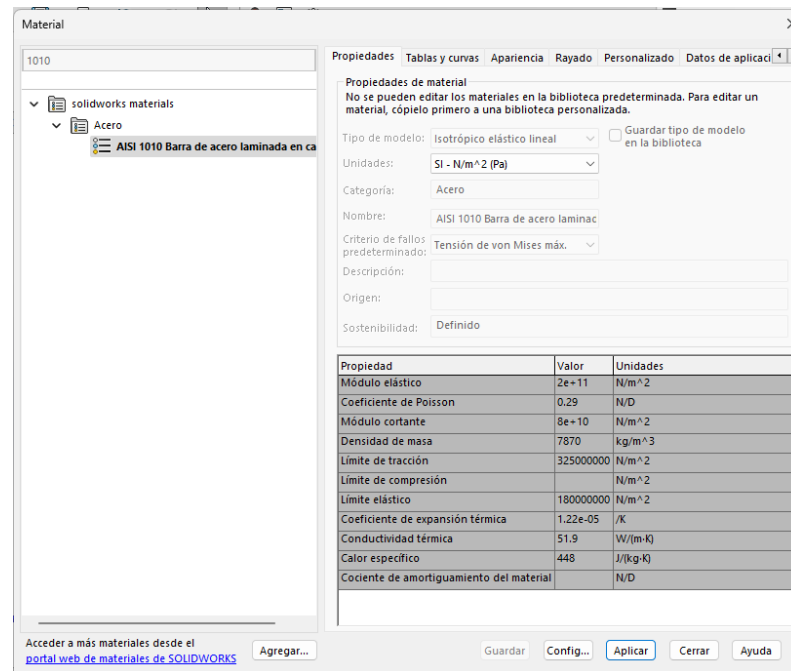
Conversión del croquis del chasis en miembro estructural



Se define la selección del material del chasis, el cual corresponde a un Acero AISI 1010 laminado en caliente con bajo contenido en carbono.

Figura 20

Selección del material “Acero AISI 1010 laminado en caliente”



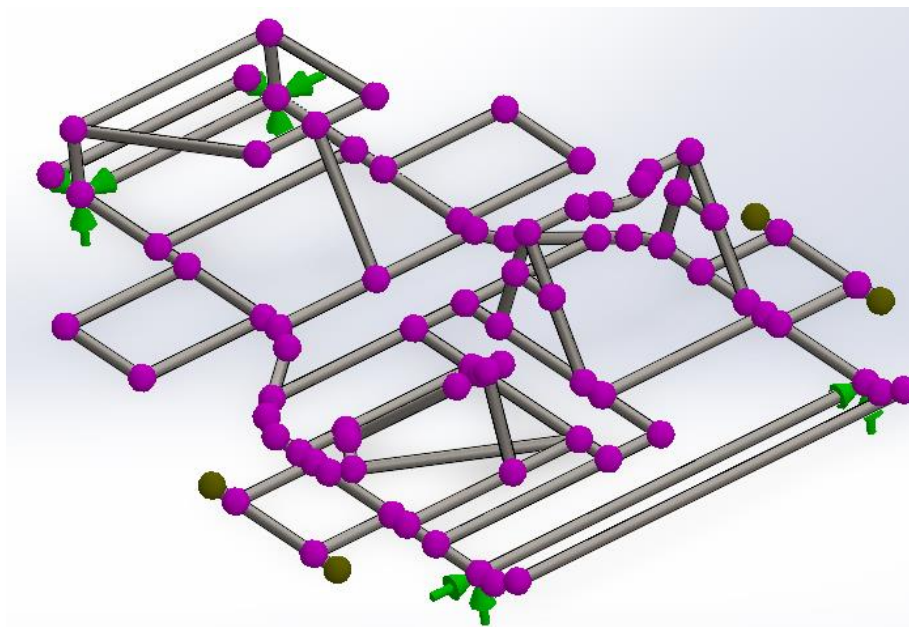
Nota. La figura describe la biblioteca de materiales, por SolidWorks (2023).

4.1.2. Análisis estático

El análisis del chasis en reposo se llevó a cabo mediante la fijación de tipo inamovible en la parte delantera para evitar traslaciones y en la parte posterior restringir el movimiento en los ejes Y y Z, simulando que el chasis está sobre el suelo.

Figura 21

Sujeción de los apoyos del chasis



Así mismo, se tuvieron en cuenta las propiedades dimensionales, características y sistemas de cargas a considerar en el estudio, tales como peso del piloto, peso del chasis, batería, motor y demás accesorios, como se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4

Características de los elementos principales del kart

CARACTERÍSTICA GENERAL	DESCRIPCIÓN TÉCNICA
Peso del motor	30 kg
Cilindrada	124.6 CC
Torque máximo	8.8 NM
Capacidad de aceite	900 ML
Material del chasis	Acero AISI 1010
Densidad del Acero AISI 1010	7870 kg/m ³
Diámetro de la estructura tubular	1"
Espesor de pared de la estructura tubular	2 mm
Batería	YTX7A-BS (GEL)12V 4Ah/10 Hr

Peso de la batería	3 kg
Capacidad de tanque de combustible	6 L
Tipo de freno	Hidráulico
Numero de dientes del piñón del motor	14
Numero de dientes del engrane del eje	17
Relación de transmisión	1,2
Caja de cambios	Automática CVT
Suspensión	Rígida
Peso total del vehículo sin piloto	120 kg
Peso total del vehículo con piloto	180 kg
Marca de motor	Honda
Tipo de motor	Gasolina- automático
Relación de compresión	9.5:1
Alimentación de combustible	Carburador
Peso del asiento	5 kg
Peso de la cadena	1.5 kg
Peso del piñón	0.2 kg
Peso del engranaje del eje	0.22 kg
Peso de cada rodamiento	0.1 kg
Peso del disco de freno	1.3 kg

Una vez determinado el peso de cada uno de los componentes importantes a considerar en el sistema, se ubicaron las fuerzas que ejercen sobre las vigas donde están ubicados correspondientemente. Además, se considera la fuerza que ejerce la gravedad para obtener resultados más aproximados en el estudio estático de la estructura.

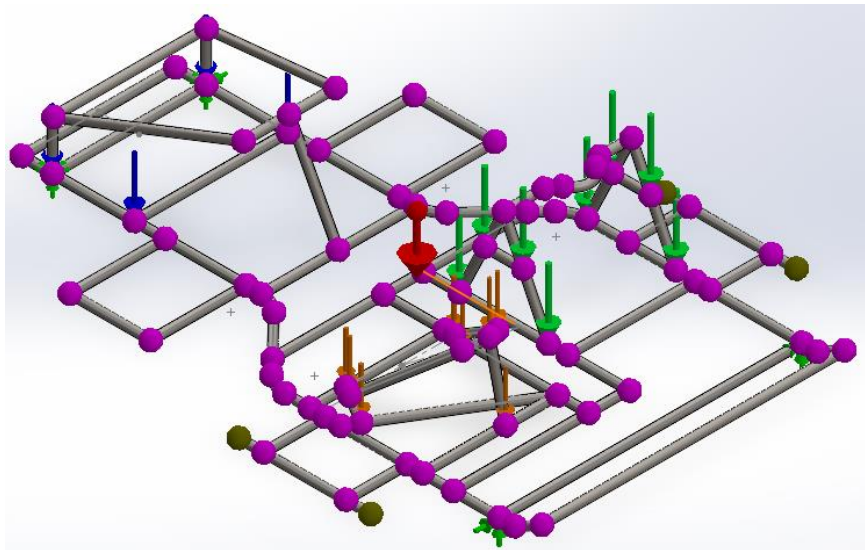
Las flechas verdes indican las fuerzas que generan el motor, la cadena, los rodamientos y la batería sobre los elementos en los que estos componentes están ubicados, que suman un total de 384,48N, los cuales están divididos en 8 elementos.

Las flechas naranjas corresponden al peso del piloto (60kg en promedio) junto con el peso del asiento, que suman en total 599,36N dividido en 8 elementos.

Por último, las flechas azules indican el peso generado por el tanque de combustible de 6 litros, el cual representa un total de 48,28N dividido en 4 elementos.

Figura 22

Aplicación de fuerzas por componentes

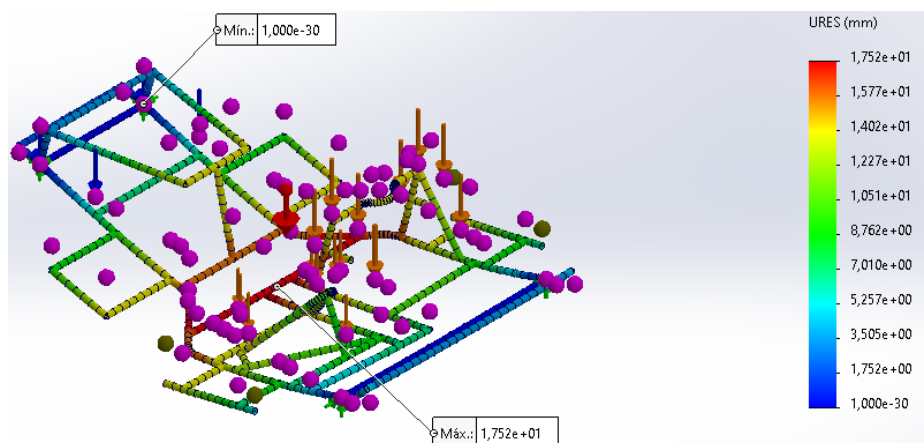


4.1.2.1. Desplazamiento

En la Figura 23 se observan los distintos desplazamientos que sufre el chasis producto de las cargas de los elementos principales como motor, batería, rodamientos y cadena. Se observa que la parte central del chasis es la que mayor desplazamiento sufre debido a la cantidad de peso que debe soportar.

Figura 23

Desplazamiento del chasis sometido a fuerzas por elementos

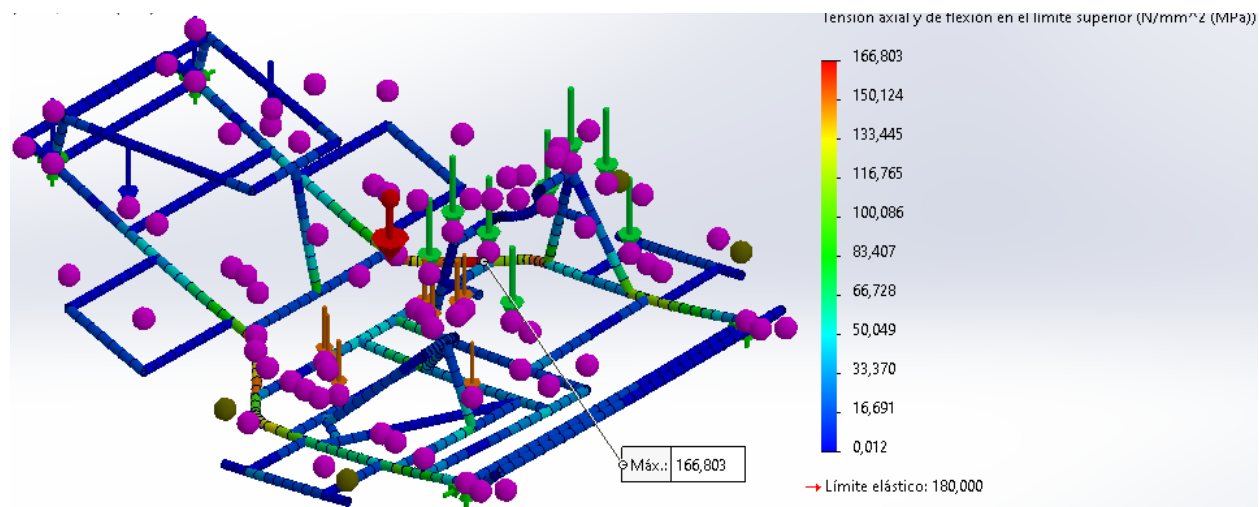


Se puede apreciar que en la parte central del chasis ocurre un desplazamiento de 17,52mm, lo que refleja una baja rigidez del chasis debido a la inadecuada distribución de los elementos distintos al chasis.

4.1.2.2. Tensión axial y de flexión máxima

Figura 24

Tensión máxima del chasis



La Figura 24 ilustra el punto que sufre un esfuerzo máximo de 166,803Mpa, lo que representa un problema para la estructura del chasis, ya que el límite elástico está por el orden de los 180Mpa y dicho esfuerzo está por alcanzarlo.

4.1.3. Análisis dinámico

El análisis dinámico se realiza bajo las condiciones de torsión que presenta el chasis al experimentar curvas y frenados, así como determinar la transferencia de masa que sufren el eje delantero y trasero.

4.1.3.1. Rigidez torsional

Para el estudio de rigidez torsional se realizó el cálculo de las fuerzas de torsión aplicadas tanto en el eje delantero como el trasero, fijando los extremos del eje contrario a someter a estudio, con el fin de restringir los desplazamientos. Para esto, se tuvo en cuenta que el vehículo transitará por una curva que tiene 30m de radio, alcanzando una velocidad máxima de 45 km/h con el fin de calcular la aceleración normal a través de la siguiente ecuación:

$$a_n = \frac{v^2}{\rho} \quad (1)$$

Donde:

a_n = Aceleración normal [m/s²]

v^2 = Velocidad [m/s]

ρ = Radio de curvatura del tramo [m]

Al reemplazar los valores en la ecuación, se obtiene:

$$a_n = \frac{\left(12,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)^2}{(30\text{m})}$$

$$a_n = \frac{\left(12,5 \frac{m}{s}\right)^2}{(30m)}$$

$$a_n = 0,4166 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

Una vez hallada la aceleración normal, calculamos la transferencia de masa lateral por medio de la siguiente ecuación:

$$W = \frac{a_n \cdot m \cdot h_{cg}}{b}$$

(2)

Donde:

W = Transferencia de masa lateral [N/s²]

a_n = Aceleración normal [m/s²]

m = Masa del chasis incluyendo componentes y piloto [kg]

h_{cg} = Altura del centro de gravedad [m]

b = Ancho de vía del chasis [m]

Reemplazando valores en la ecuación 2:

$$W = \frac{(0,4166\text{m/s}^2) \cdot (160\text{kg}) \cdot (0,0489\text{m})}{(0,5\text{m})}$$

$$W = 6,519 \text{ [N/s}^2\text{]}$$

Se dividió entre la gravedad para obtener la masa transferida:

$$W_{del} = \frac{6,519 \text{ [N/s}^2\text{]}}{9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}}$$

$$W = 0,664 \text{ [kg]}$$

Considerando los cálculos para el eje delantero asumimos una distribución de 25%,
obteniendo un total de:

$$W_{del} = 0,664 \text{ [kg]} \cdot 0,25$$

$$W_{del} = 0,16 \text{ [kg]}$$

También se consideró la transferencia de masa para las dos llantas del eje delantero del
chasis, por lo que se usó la siguiente ecuación:

$$W_{del1} = \left(m \cdot \frac{\text{Distribución de masa}}{2} \right) + W_{del} \quad (3)$$

Reemplazando:

$$W_{del1} = \left(160 \text{ [kg]} \cdot \frac{0,25}{2} \right) + 0,16 \text{ [kg]}$$

$$W_{del1} = 20,16 \text{ [kg]}$$

Una vez determinada la transferencia de masa, se multiplicó por la gravedad para obtener
la fuerza a aplicar en cada llanta del eje delantero:

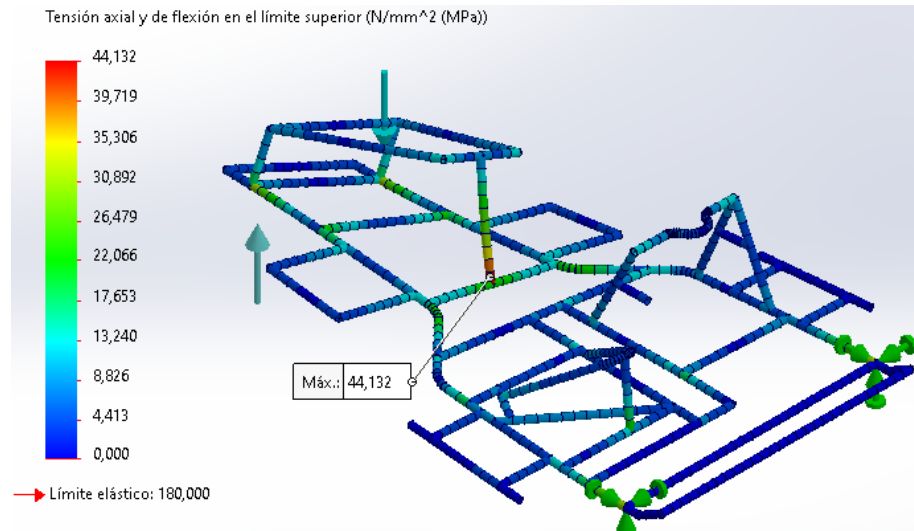
$$F_{del} = 20,16 \text{ [kg]} \cdot 9,81 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

$$F_{del} = 197,77 \text{ [N]}$$

4.1.3.2. Fuerzas de torsión aplicadas al eje delantero.

Figura 25

Rigidez torsional aplicando carga en el eje delantero



En la Figura 25 se observa que la tensión más alta producto de las dos fuerzas contrarias aplicadas en la parte superior del chasis corresponde a 44,132Mpa, que, a su vez, es el límite para no exceder el valor mínimo del coeficiente de seguridad.

Dicha tensión tiene lugar en el punto de apoyo de la barra donde se ubica el volante, que, en caso de incrementar las cargas, puede ocasionar deformaciones plásticas o rotura.

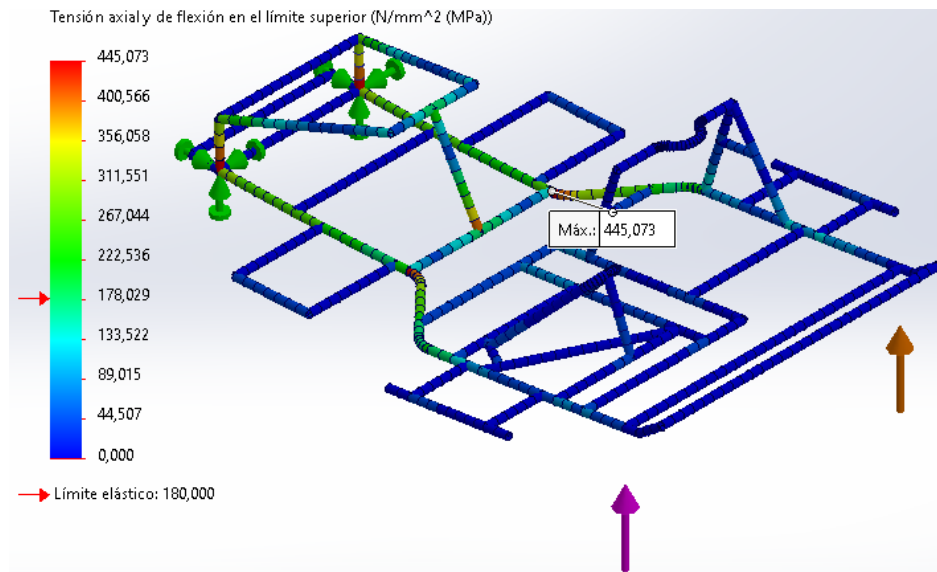
4.1.2.3.1. Fuerzas de torsión aplicadas al eje posterior.

Para cálculos de la fuerza a aplicar en el eje posterior, se tomó una distribución de 65%, por lo que, al rehacer los cálculos, la fuerza a aplicar en cada llanta del eje posterior fue:

$$F_{post} = 335,81 \text{ [N]}$$

Figura 26

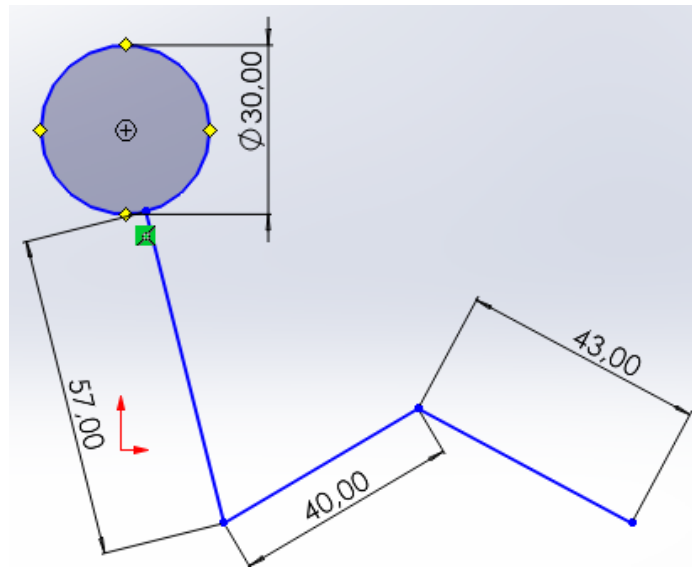
Rigidez torsional aplicando carga en el eje posterior



Se observó que en distintos puntos del chasis se superaba el límite elástico, alcanzando hasta un máximo de 445Mpa, demostrando inconsistencias en la distribución de cargas y de forma en la estructura.

5. Optimización topológica

En primer lugar, es importante determinar las condiciones ergonómicas en las que se encontrará el piloto y a partir de ello distribuir adecuadamente los demás componentes, de forma que no incomoden su posición o haya alguna interacción térmica, como lo estipula la norma.

Figura 27*Posición y medidas del piloto*

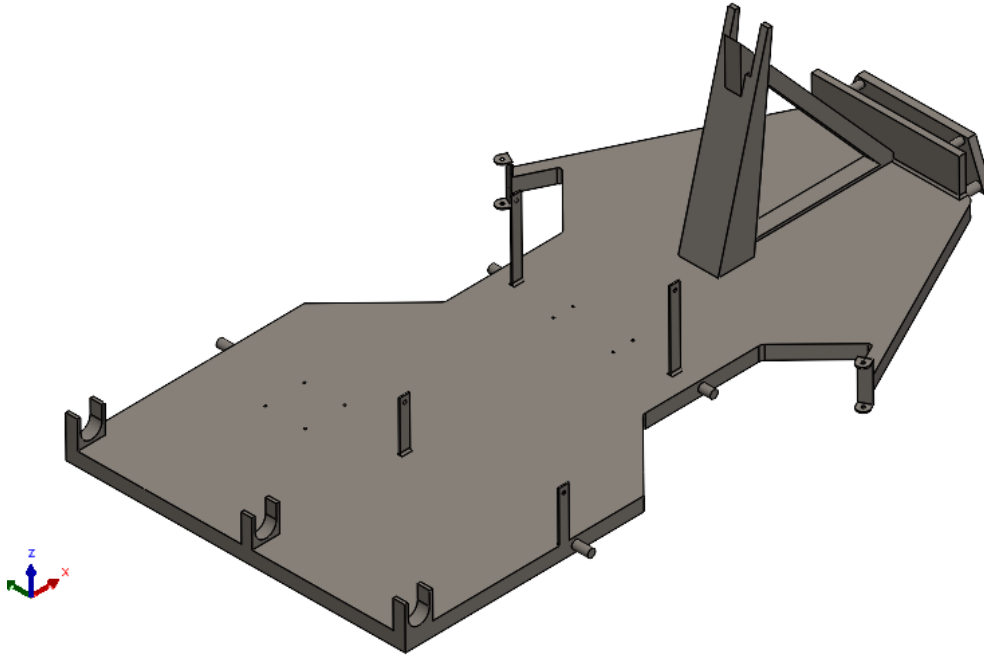
La circunferencia se toma de 30cm de diámetro considerando el tamaño de la cabeza junto con el casco equipado. Así mismo, el torso del piloto se considera en contacto constante con el asiento y la posición de las piernas en una leve flexión de rodillas para reducir espacio.

Así mismo, se considera que el piloto posea una altura no mayor a 165cm para evitar incomodidad en su posición durante la carrera.

5.1. Modelado del bosquejo geométrico inicial

Figura 28

Primera propuesta de la distribución del chasis

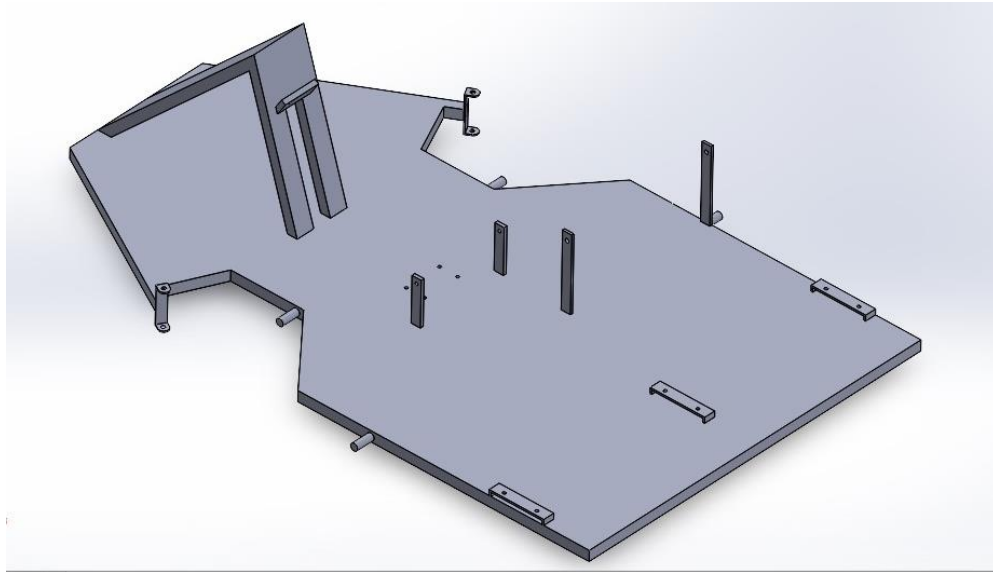


Para esta primera propuesta, se incluyeron platinas de acero, de modo que sujeten el motor y el asiento del piloto por los costados para conseguir una mejor estabilidad, así como también 3 soportes para los rodamientos que conectan al eje trasero con la transmisión de potencia del motor. Adicionalmente, se implementaron dos soportes fijos para las ruedas delanteras, los cuales les permiten girar sobre un pasador.

Por último, según lo estipula la norma de la competencia, se agregó la defensa delantera compuesta por cuatro puntos de apoyo unidos directamente al chasis.

Figura 29

Segunda propuesta de la distribución del chasis



En la segunda propuesta de chasis, se contemplan platinas de acero en las cuales se apoyan el motor y el asiento del piloto. Adicionalmente, un grupo de tres platinas para las chumaceras que servirán de apoyo del eje trasero y una última para el apoyo de la columna del volante. En la parte delantera del chasis se ubicó una estructura que brindará seguridad al piloto y también servirá como soporte para el volante.

5.2. Asignación del material

Para los modelos propuestos, al igual que en el prototipo original, se mantiene el mismo material, correspondiente a un acero AISI 1010, el cual está disponible en la biblioteca de materiales de SolidWorks.

Figura 30

Asignación de material a los modelos propuestos

The screenshot shows the SolidWorks material library interface. On the left, a tree view lists various materials under 'solidworks materials' > 'Acero'. 'AISI 1010 Barra de acero laminada en caliente' is selected. On the right, the 'Propiedades' (Properties) pane is open, displaying the material's characteristics.

Propiedades de material
 No se pueden editar los materiales en la biblioteca predeterminada. Para editar un material, cópielo primero a una biblioteca personalizada.

Tipo de modelo: **Isotrópico elástico lineal** Guardar tipo de modelo en la biblioteca

Unidades: **SI - N/m² (Pa)**

Categoría: Acero

Nombre: AISI 1010 Barra de acero laminada

Criterio de fallos predeterminado: Tensión de von Mises máx.

Descripción:

Origen:

Sostenibilidad: Definido

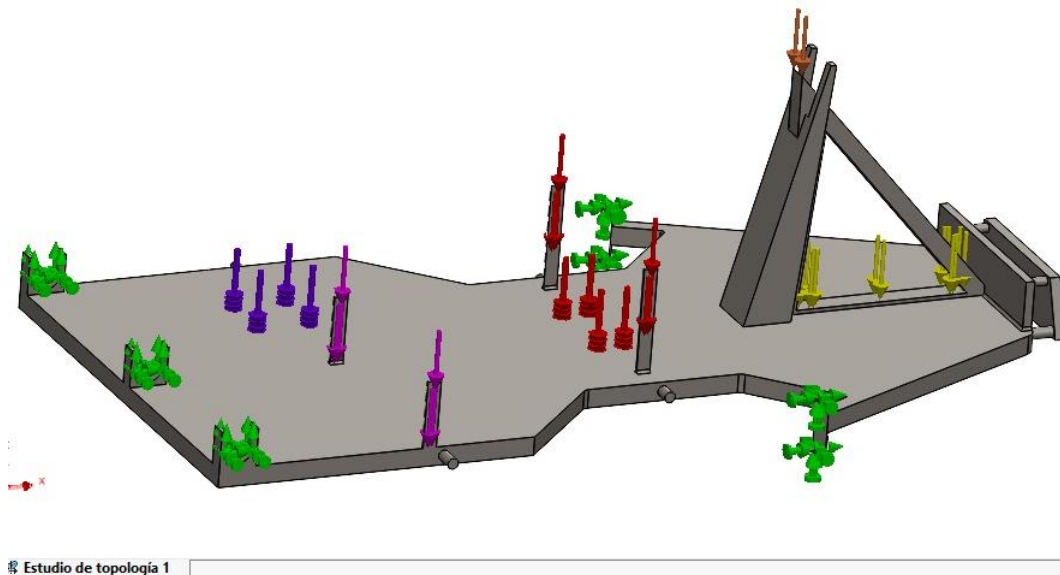
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	2e+11	N/m ²
Coefficiente de Poisson	0,29	N/D
Módulo cortante	8e+10	N/m ²
Densidad de masa	7870	kg/m ³
Límite de tracción	325000000	N/m ²
Límite de compresión		N/m ²
Límite elástico	180000000	N/m ²
Coefficiente de expansión térmica	1,22e-05	/K
Conductividad térmica	51,9	W/(m·K)
Calor específico	448	J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Nota. Biblioteca de materiales, por SolidWorks (2023).

5.3. Sujeciones y aplicación de fuerzas

Figura 31

Sujeción y fuerzas aplicadas en la propuesta 1



Del mismo modo que se realizó el estudio estático al modelo del chasis original, se realiza la sujeción de los apoyos donde van ubicadas las ruedas traseras y delanteras, así como también la aplicación de fuerzas actuantes producto del peso que generan los elementos principales del kart. Las fuerzas están distribuidas de la siguiente manera:

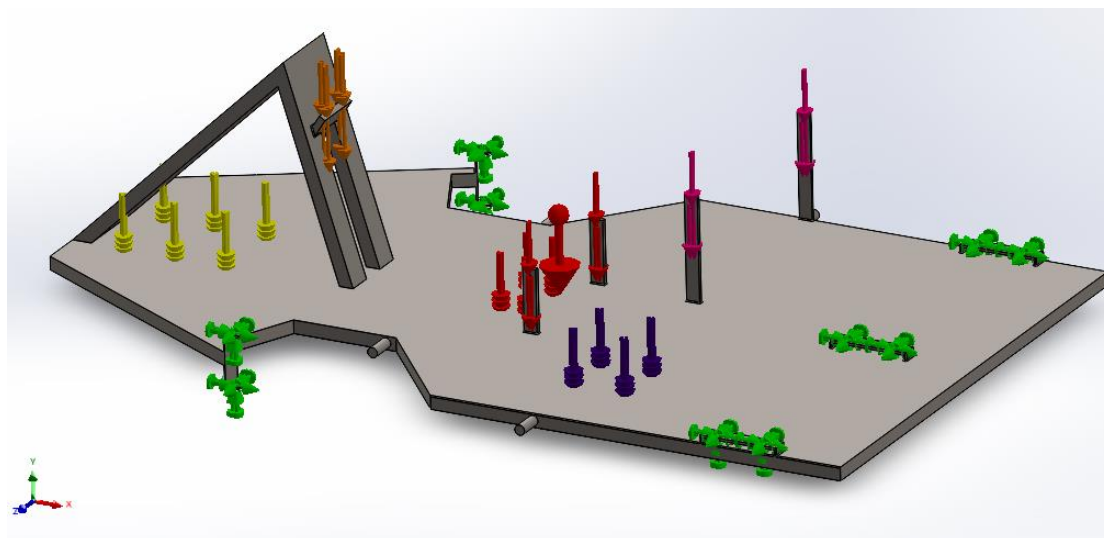
Tabla 5

Distribución de fuerzas por elementos actuantes

COLOR	ELEMETOS ACTUANTES	MASA [kg]	FUERZA QUE REPRESENTA POR ELEMENTO [N]	#ELEMENTOS EN LOS QUE ESTÁ DISTRIBUIDA LA FUERZA
FUCSIA	Motor, cadena, escape	32,2	157,941	2
AZUL	Batería y sistema eléctrico	3	12,2625	4
ROJO	Asiento y piloto	68	118,18	6
NARANJA	Volante	1,5	14,71500003	1
AMARILLO	Tanque de combustible	4,922	48,28482	1

Figura 32

Sujeción y fuerzas aplicadas en la propuesta 2

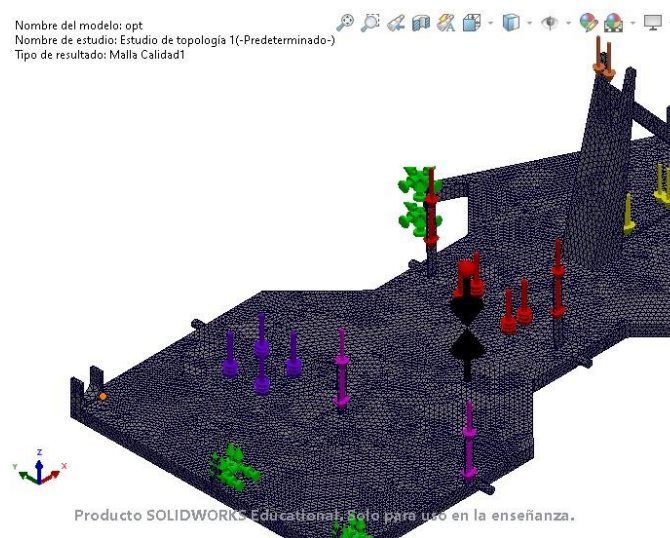


5.4. Calidad de malla

Una vez ubicadas las fuerzas en las caras respectivas según la distribución de la propuesta, se define la calidad de la malla, la cual está especificada por un tamaño de 9 mm que se considera un mallado fino para las dimensiones del chasis.

Figura 33

Calidad de la malla de la propuesta 1.

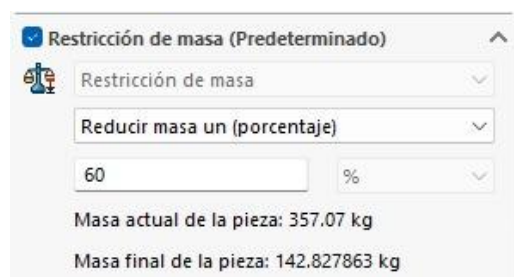


El mallado es ligeramente fino para obtener resultados más precisos y verificar la convergencia de los resultados, para así determinar si la malla debe ser más refinada o no.

Con la malla aplicada, establecemos los objetivos y restricciones que se consideren importantes para satisfacer los parámetros que solicite la normativa de la competición.

Figura 34

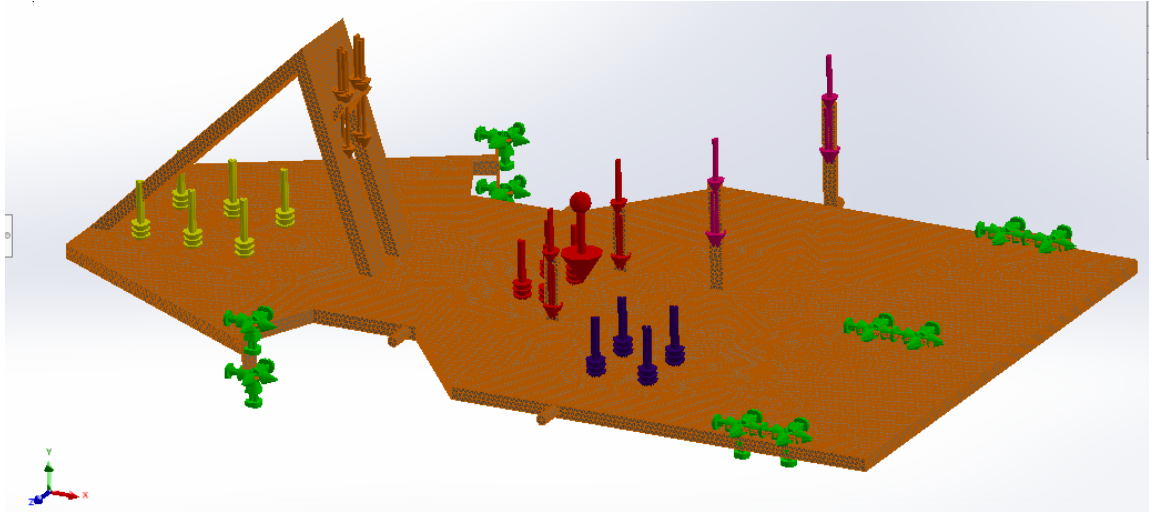
Restricción de masa



La masa actual de la propuesta 1 representa más de 350kg debido a que el modelado propuesto se está considerando totalmente sólido y compacto, por lo que al establecer la tubería hueca se verá reflejada una disminución considerable en la masa final de la misma.

Figura 35

Calidad de la malla de la propuesta 2.

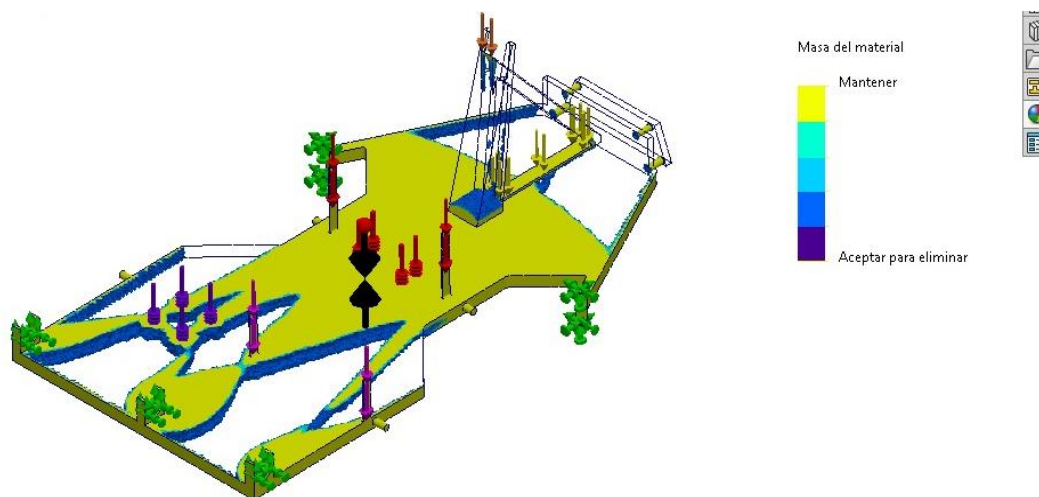


La masa actual de la propuesta 2 es de 85 kg debido que la placa base de esta se contempló hueca con un espesor de pared similar a la de la tubería de 1 pulgada para que al momento de realizar el estudio de topología arrojara un valor final de masa más aproximado al diseño original.

5.5. Estudio topológico

Figura 36

Estudio de topología de la propuesta 1.



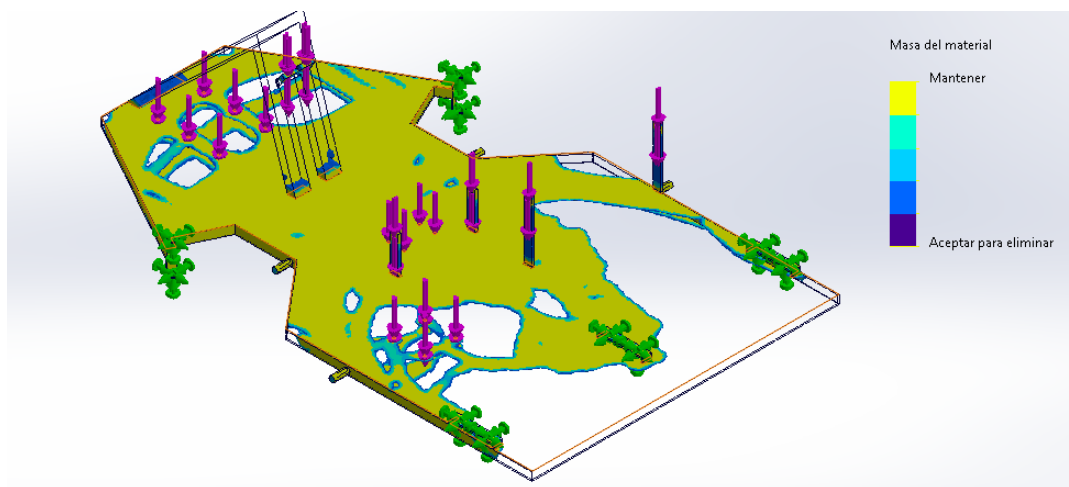
Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

El estudio de topología elimina todo el material innecesario con el fin de mantener las zonas que realmente contribuyen a soportar las cargas que actúan sobre el sistema. Sin embargo, el software no contempla todos los elementos que se necesitan mantener, ejemplo de ello son la defensa frontal y la columna de dirección donde va soportado el volante, por lo que es importante reevaluar y reconstruir esas partes eliminadas que son necesarias para el correcto funcionamiento del prototipo.

En el estudio de topología de esta segunda propuesta se evidenció una remoción de material mucho menor que en la anterior, lo que se traduce en la conservación de más elementos estructurales para poder soportar las cargas estipuladas.

Figura 37

Estudio de topología de la propuesta 2.



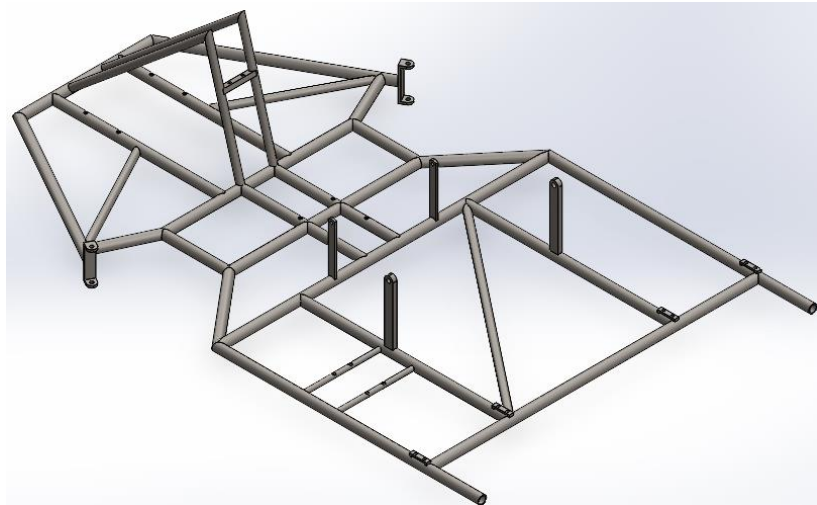
5.6. Diseño del nuevo chasis

El diseño tubular del chasis se inició analizando el estudio topológico, para evaluar dónde se concentran más las cargas y que parte del chasis se debe reforzar o conservar. En el chasis de la propuesta 2 se usaron tubos de acero de 1 pulgada, de $\frac{3}{4}$ de pulgada y de $\frac{1}{2}$ pulgada, con el fin de alivianar el peso del mismo en zonas donde no fuese necesario soportar grandes cargas. Este chasis tiene un peso de 21,27 kg por lo que resulta ser más liviano que el chasis original.

Adicionalmente, se realizó el croquis del chasis bajo dimensiones que no sobrepasen las exigidas por la norma, como lo son la distancia entre ejes de las ruedas delanteras y traseras, así como también el largo máximo del eje longitudinal del chasis, que en el modelo original se encontraba sobre el límite.

Figura 38

Chasis tubular de la propuesta 2.

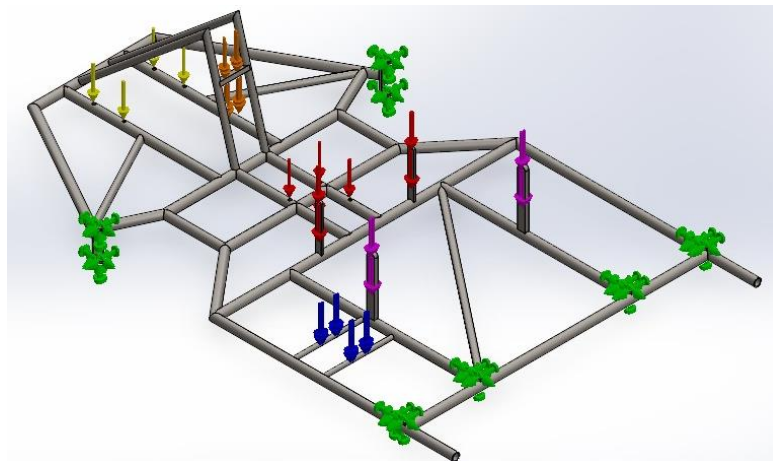


5.7. Aplicación de fuerzas

Se aplicaron las mismas fuerzas descritas en la tabla 5 con sus respectivos colores y se realizó la sujeción fija en los puntos de anclaje del eje trasero y delantero.

Figura 39

Aplicación de cargas al chasis tubular de la propuesta 2.

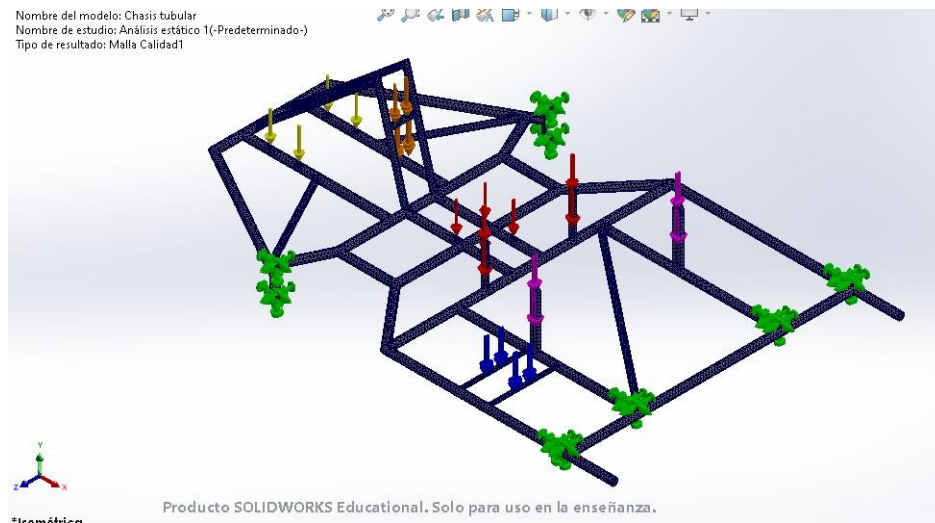


5.8. Mallado del chasis tubular

Al chasis se le realizó un mallado de 9 mm, el cual, como se comentó anteriormente, es un mallado fino considerando las dimensiones y estructura del chasis, esto para obtener los datos más confiables posibles.

Figura 40

Aplicación de la malla al chasis tubular de la propuesta 2.



5.9. Análisis estático

Se realizó el análisis estático a los 2 diseños propuestos, utilizando las mismas fuerzas descritas en la tabla 5. De los análisis estáticos se obtuvieron los siguientes resultados.

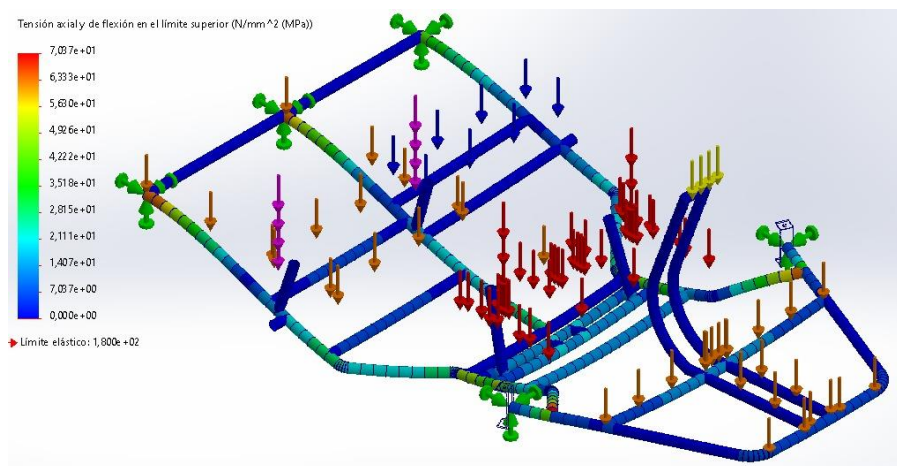
5.9.1 Análisis estático de la propuesta 1.

5.9.1.1. Tensión axial y de flexión máxima.

En este estudio se evidenció que la tensión axial máxima es de 70.3 MPa, valor que se encuentra por debajo del límite elástico del material, que corresponde a 180 MPa, representando que este diseño es viable para la optimización.

Figura 41

Tensión axial y flexión máxima del chasis tubular de la propuesta 1.

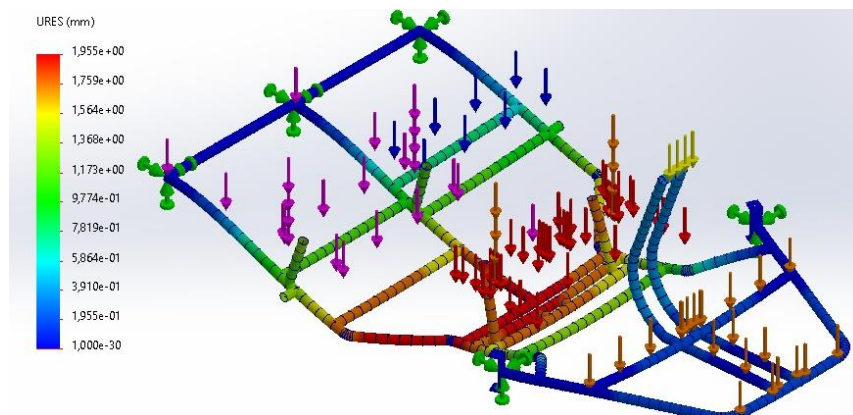


5.9.1.2. Desplazamiento.

En la figura 42 se evidencia el desplazamiento máximo producido por las cargas en el chasis de la propuesta 1. Este desplazamiento máximo se ubica en la mitad del chasis y es equivalente a 1.95 mm, que representa un valor relativamente bajo. Sin embargo, este desplazamiento se evidencia en varias partes de forma repetitiva, lo que representa un problema.

Figura 42

Desplazamiento del chasis tubular de la propuesta 1.



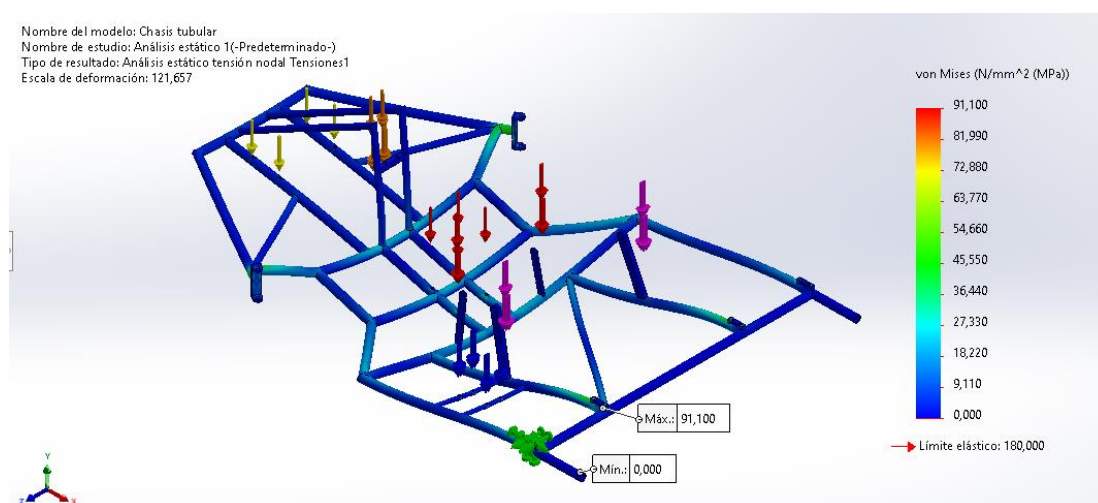
5.9.2 Análisis estático de la propuesta 2.

5.9.2.1. Tensión axial y de flexión máxima.

En la figura 43 se observa el punto de tensión máxima del chasis de la propuesta 2. Esta tensión máxima se presenta en los anclajes del eje trasero que es donde se genera toda la aceleración del kart. A pesar de que el punto de tensión máxima se dé en este punto, el valor de dicha tensión es de tan solo 91,1 MPa, que corresponde aproximadamente a la mitad del límite elástico del material.

Figura 43

Tensión axial y flexión máxima del chasis tubular de la propuesta 2.

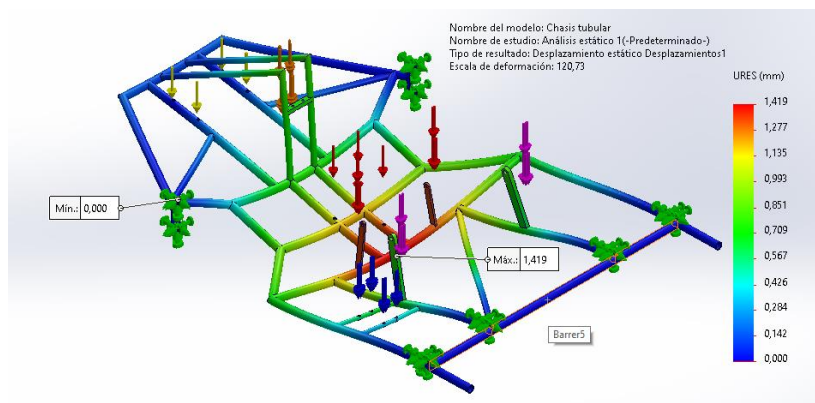


5.9.2.2. Desplazamiento.

El desplazamiento máximo en la propuesta 2 se presenta justo en el centro del chasis, como se evidencia en la figura 44. Este desplazamiento máximo es de 1.41 mm, valor del cual se obtiene ventaja por su baja magnitud, además de que se presenta en una única zona que cuenta con diversos apoyos y que puede disminuir su valor dependiendo del peso del piloto.

Figura 44

Desplazamiento del chasis tubular de la propuesta 2.



5.9.2.3. Rigidez torsional

De la misma forma en la que se realizó el análisis por rigidez torsional del modelo original, se aplican las mismas cargas al eje trasero y delantero fijando los apoyos en las ruedas.

Figura 45

Rigidez torsional aplicando carga en el eje delantero

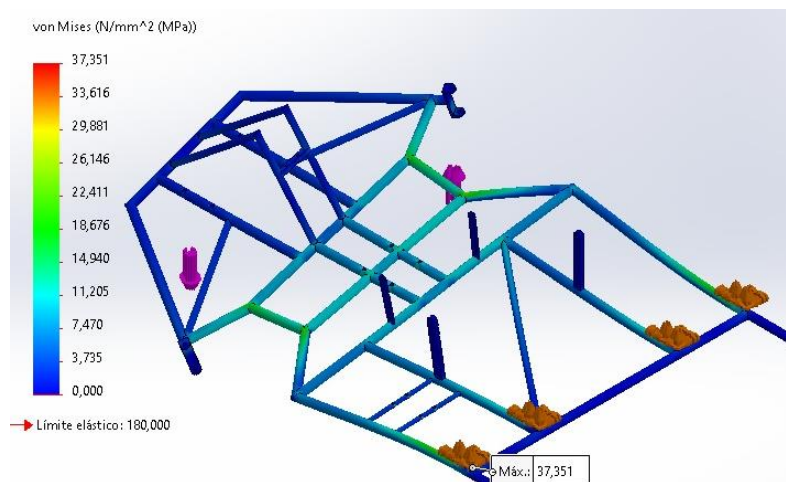
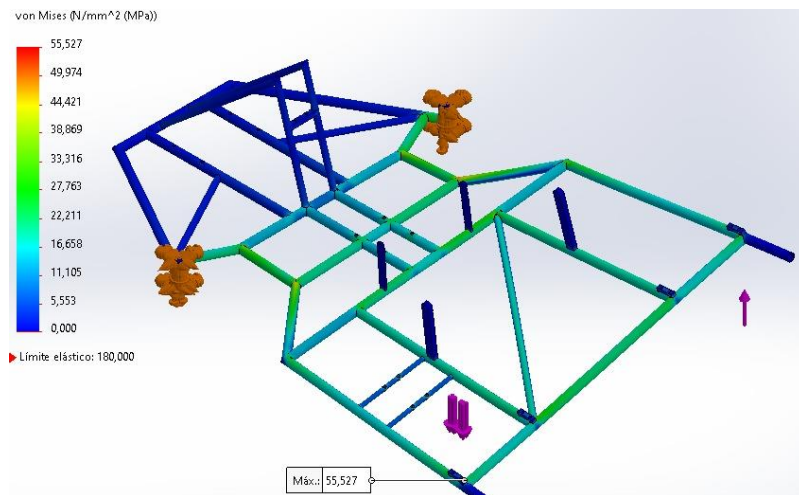


Figura 46

Rigidez torsional aplicando carga en el eje trasero

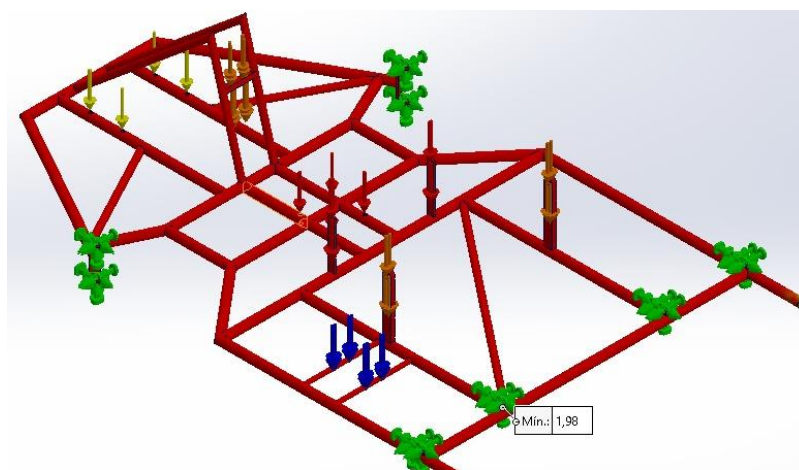


5.9.2.4. Factor de seguridad

Para la evaluación del factor de seguridad del chasis, al tratarse de un material dúctil se empleó el criterio de von Misses, bajo el cual se obtiene un FDS de 1,98 como se observa en la figura 47.

Figura 47

Factor de seguridad



Resultados y discusiones

El modelo del chasis original fue elaborado artesanalmente por aprendices y un instructor del Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) sin considerar límites dimensionales o estudios para la distribución de esfuerzos que permitieran sacar el máximo provecho durante la competición.

Figura 48

Kart SENA GRAND PRIX



A través de los diferentes estudios realizados a ambos modelos, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 6*Análisis de resultados*

	CHASIS ORIGINAL	CHASIS OPTIMIZADO
DESPLAZAMIENTO MÁXIMO	17,52mm	1,419mm
TENSIÓN MÁXIMA	166,803Mpa	91Mpa
esfuerzo máximo RIGIDEZ TORSIONAL (EJE DELANTERO)	44,132Mpa	37,351Mpa
esfuerzo máximo RIGIDEZ TORSIONAL (EJE TRASERO)	445,073	55,527Mpa
PESO DEL CHASIS CON ACCESORIOS	100kg	73,05kg

Es importante resaltar que, el modelo computacional de optimización no puede ser implementado como es mostrado en la figura 37 debido a la forma que sugiere el software, ya que la tubería utilizada no permite acoplarse a ese diseño, además del costo que representaría fabricar un chasis de ese estilo. Por ello, es necesario rediseñar el modelo bajo distribuciones reales y funcionales.

Conclusiones

Con base en los estudios del chasis original se realizó un levantamiento de medidas, así como la identificación de elementos principales que permitieron establecer las condiciones de carga y frontera que actuaban directamente sobre el kart. Estas se aplicaron en los análisis del modelo, donde se observó que la distribución tanto de los elementos estructurales como de las partes principales que componen el kart no eran adecuadas, puesto que, generaban concentración de esfuerzos y había exceso de material innecesario.

El análisis estático y dinámico realizado a través del estudio de flexión, desplazamiento y rigidez torsional permitió identificar los puntos específicos donde el chasis estaba sometido a sobreesfuerzos y deflexión estructural, lo que reafirmó la necesidad de optimizar topológicamente el nuevo diseño que permita distribuir adecuadamente las cargas, ajustar las dimensiones según normativa y eliminar el exceso de material.

Una vez realizados los estudios correspondientes y la optimización del nuevo diseño obtuvimos que, el desplazamiento máximo disminuyó un 91,8%; la tensión máxima 45,44%; el esfuerzo máximo por rigidez torsional delantero 15,36%; el esfuerzo máximo por rigidez torsional trasero 87,524%; y, por último, el peso del chasis con todos sus elementos y accesorios estimados alcanzó una reducción de 26,95%. Adicionalmente, se consiguió un factor de seguridad de 1,98, lo que representa un diseño confiable. A partir de lo anterior, se concluye que, la segunda propuesta de diseño del chasis cumple con todos los parámetros necesarios para ser implementado en el kart.

Recomendaciones

Para proyectos futuros se recomienda tener en cuenta cada una de las especificaciones expuestas en el manual reglamentario, tales como distancia entre ejes, longitud total, materiales y peso. Así como también las condiciones climatológicas y de carrera a las cuales va a ser sometido el chasis.

Establecer de manera correcta los puntos de apoyo de los elementos para evitar sobrecargas en puntos inadecuados que generen concentraciones de esfuerzos, lo que se puede ver reflejado en problemas a la hora de competir.

Referencias Bibliográficas

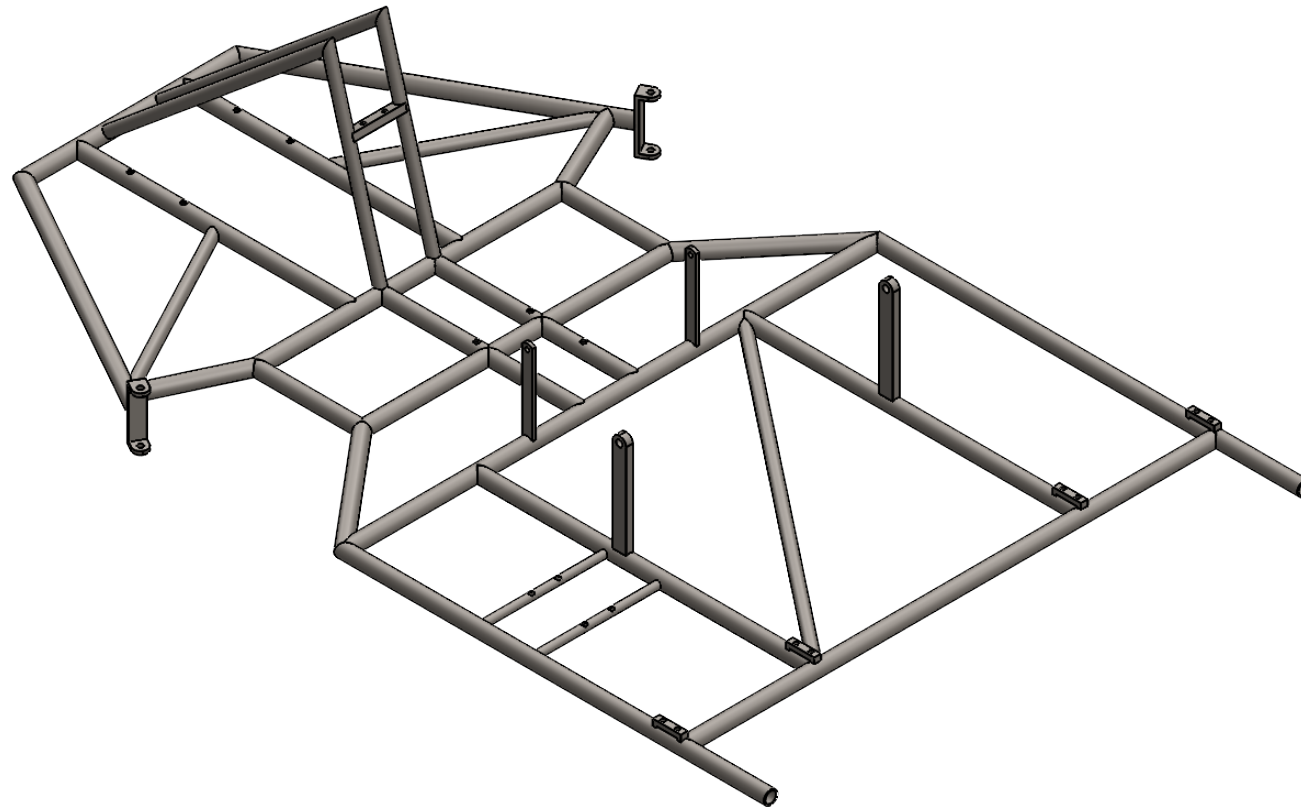
- Barón, E. (2019). *Diseño e implementación del modelo computacional de un kart eléctrico* (Doctoral dissertation, Uniandes).
- Borja R y Morocho P. (2017). *Análisis estructural mediante el método de elementos finitos del chasis del vehículo formula SAE eléctrico de la Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca 2017* (Master's thesis).
- Espinoza, E. y Román, S. (2021). *Optimización topológica de un chasis tubular para vehículo eléctrico biplaza* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).
- Gómez, J. (2015). *Rediseño y construcción del chasis para el monoplaza FSO2-E 2014 de la Fórmula SENA ECO*. Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica.
- González, F (2011). *Análisis de un Kart de Competición y de sus Componentes*. Zaragoza, España.
- Jácome, F. (2021). *Diseño del proceso de manufactura del bastidor de un vehículo de competición GO KART aplicando técnicas de optimización* (Master's thesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Maestría en Mecánica Mención Manufactura).
- Mendoza, I. (2015). *Todo sobre karting: consejos, normas y equipación necesaria*. Auto10. <https://www.auto10.com/reportajes/todo-sobre-karting-consejos-normas-y-equipacion-necesaria/6442>
- Montesdeoca, R. y Zeas, P. (2022). *Análisis de las prestaciones estructurales de un chasis vehicular tubular de un vehículo eléctrico Bi-Plaza* (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

- Oña, F. y Peña, H. (2019). *Diseño y construcción de un chasis desarmable para un vehículo solar de competencia por medio de optimización topológica* (Bachelor's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo).
- Pacheco, K. y Rojas, O. (2018). *Diseño de un alerón delantero para un kart de competencia mediante CFD*.
- Pérez, M. (2021). *Aplicación de un programa de optimización topológica al diseño de un chasis para Formula Student*.
- Timoshenko, S. y Young, D. (1973). *Elementos de resistencia de materiales*. Barcelona-España: Montaner y Simon S.A.

Apéndices

Apéndice A

Planos del chasis optimizado



OBSERVACIONES:

EL CHASIS ES CONSTRUIDO CON TUBOS DE 1" DE ACERO AISI 1010, EXCEPTUANDO LAS PARTES EN LAS QUE SE ACLAREN QUE SON DE DISTINTA MEDIDA.



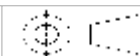
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 23/09/2024

ESCALA: 1:10

UNIDADES: MMGS

A4

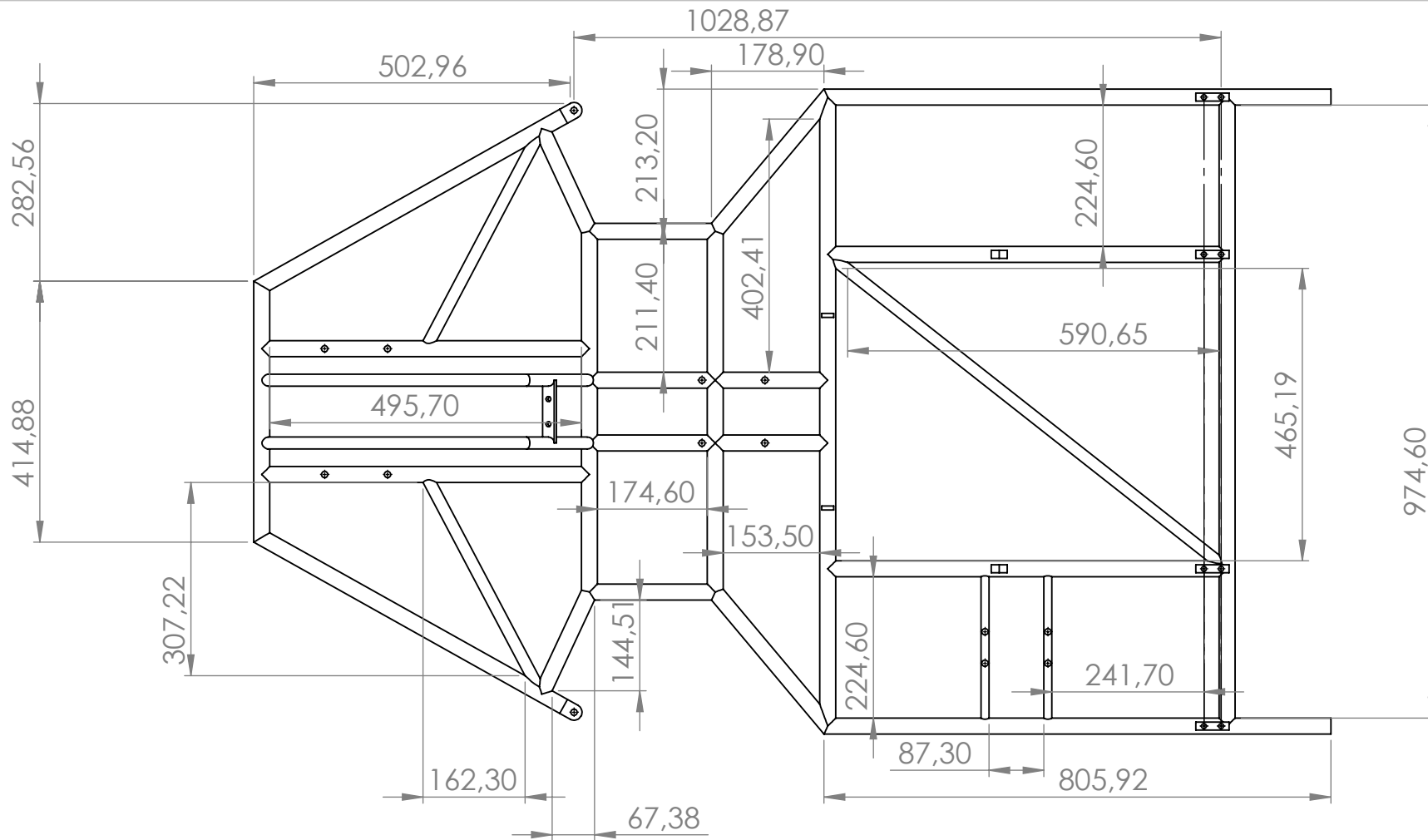


TITULO: CHASIS TUBULAR OPTIMIZADO
VISTA ISOMETRICA

AUTOR: JULIAN COLMENARES, CRISTIAM FLORES

REVISIA: ING. ALEJANDRO SIERRA VARGAS

HOJA 1/7



OBSERVACIONES:

EL CHASIS ES CONSTUIDO CON TUBOS DE 1" DE ACERO AISI 1010, EXCEPTUANDO LAS PARTES EN LAS QUE SE ACLAREN QUE SON DE DISTINTA MEDIDA.



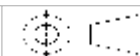
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 23/09/2024

ESCALA: 1:10

UNIDADES: MMGS

A4

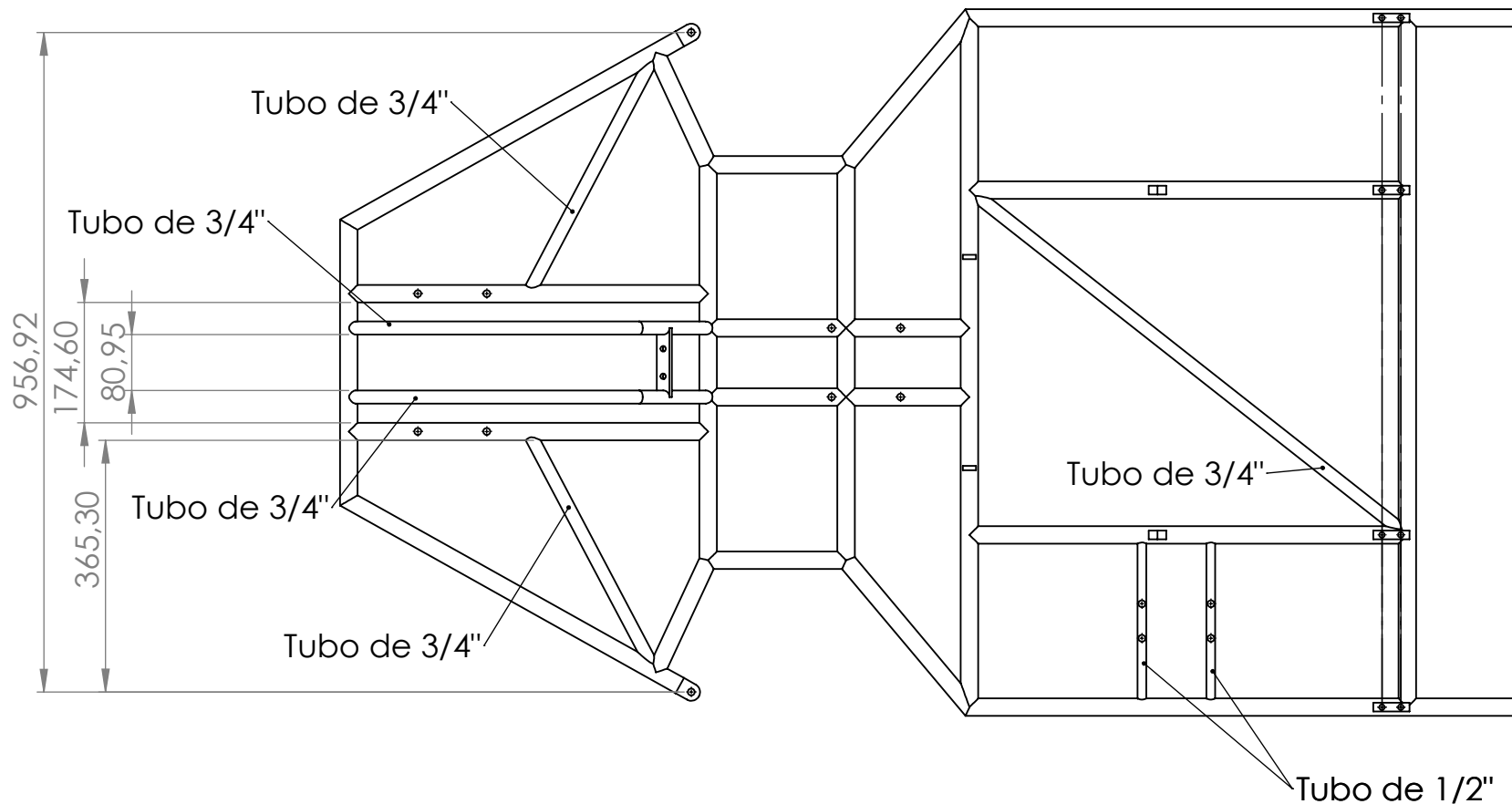


TITULO: CHASIS TUBULAR OPTIMIZADO
VISTA SUPERIOR 1

AUTOR: JULIAN COLMENARES, CRISTIAM FLORES

REVISIA: ING. ALEJANDRO SIERRA VARGAS

HOJA 2/7



OBSERVACIONES:

EL CHASIS ES CONSTRUIDO CON TUBOS DE 1" DE ACERO AISI 1010, EXCEPTUANDO LAS PARTES EN LAS QUE SE ACLAREN QUE SON DE DISTINTA MEDIDA.



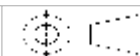
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 23/09/2024

ESCALA: 1:10

UNIDADES: MMGS

A4

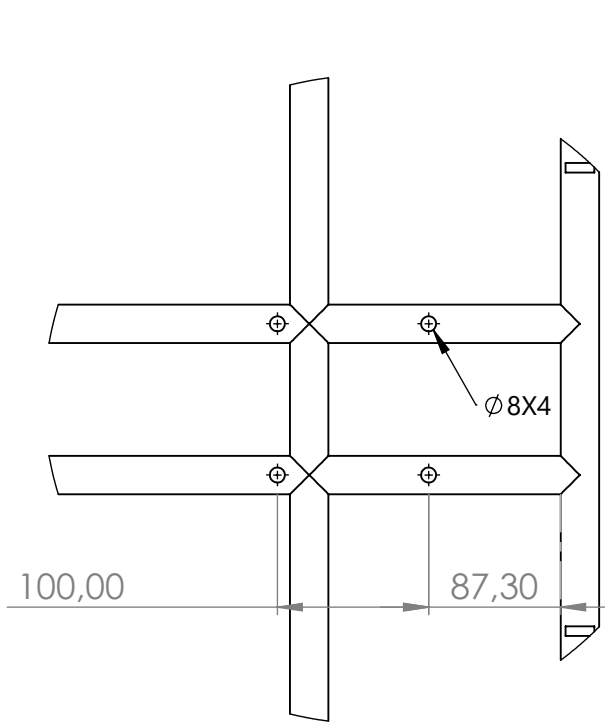


TITULO: CHASIS TUBULAR OPTIMIZADO
VISTA SUPERIOR 2

AUTOR: JULIAN COLMENARES, CRISTIAM FLORES

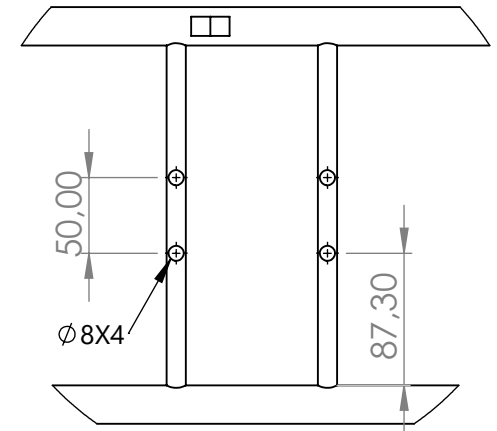
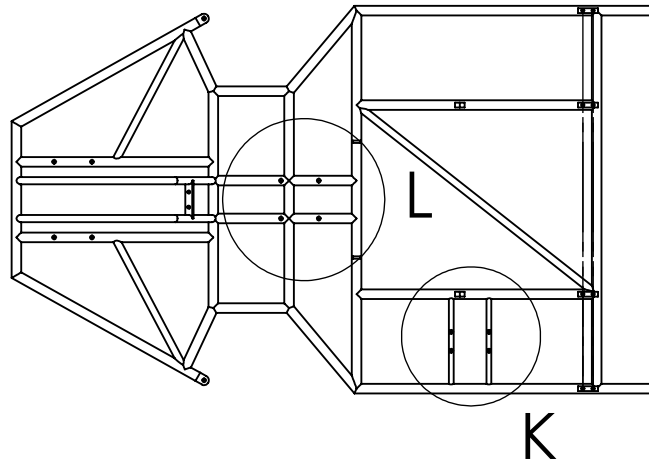
REVISA: ING. ALEJANDRO SIERRA VARGAS

HOJA 3/7



DETALLE L

ESCALA 1 : 5



DETALLE K

ESCALA 1 : 5

OBSERVACIONES:

EL CHASIS ES CONSTUIDO CON TUBOS DE 1" DE ACERO AISI 1010, EXCEPTUANDO LAS PARTES EN LAS QUE SE ACLAREN QUE SON DE DISTINTA MEDIDA.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 23/09/2024

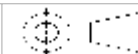
TITULO: CHASIS TUBULAR OPTIMIZADO
VISTA DETALLE 1

ESCALA: 1:10

UNIDADES: MMGS

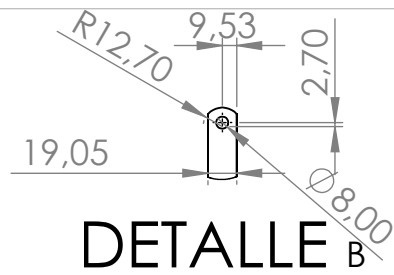
AUTOR: JULIAN COLMENARES, CRISTIAM FLORES

A4



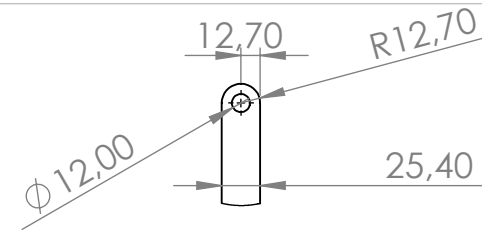
REVISA: ING. ALEJANDRO SIERRA VARGAS

HOJA 4/7



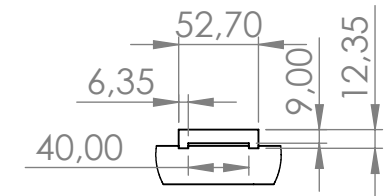
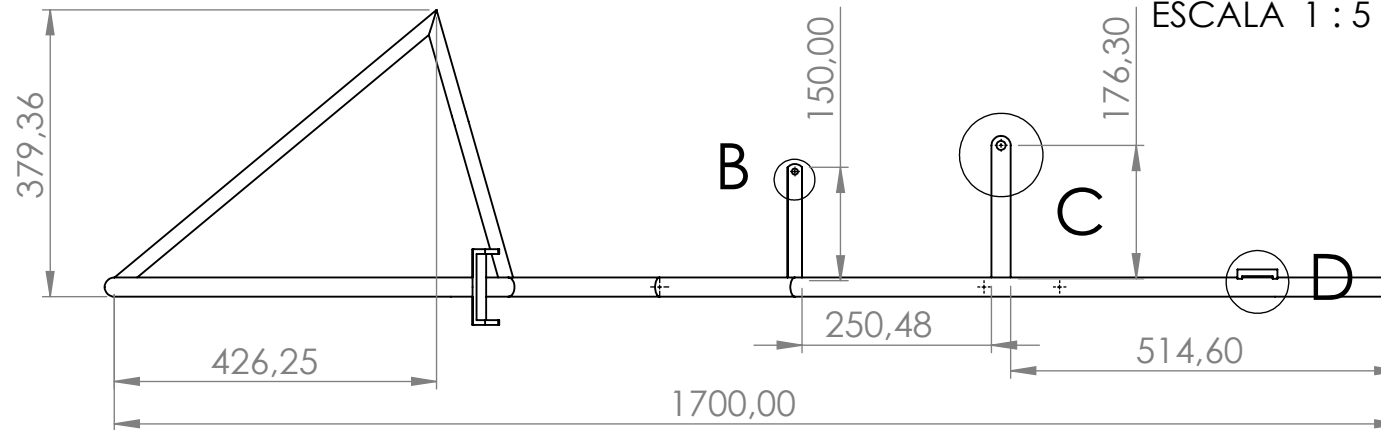
DETALLE B

ESCALA 1 : 5



DETALLE C

ESCALA 1 : 5



DETALLE D

ESCALA 1 : 5

OBSERVACIONES:

EL CHASIS ES CONSTUIDO CON TUBOS DE 1" DE ACERO AISI 1010, EXCEPTUANDO LAS PARTES EN LAS QUE SE ACLAREN QUE SON DE DISTINTA MEDIDA.



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 23/09/2024

ESCALA: 1:10

UNIDADES: MMGS

A4

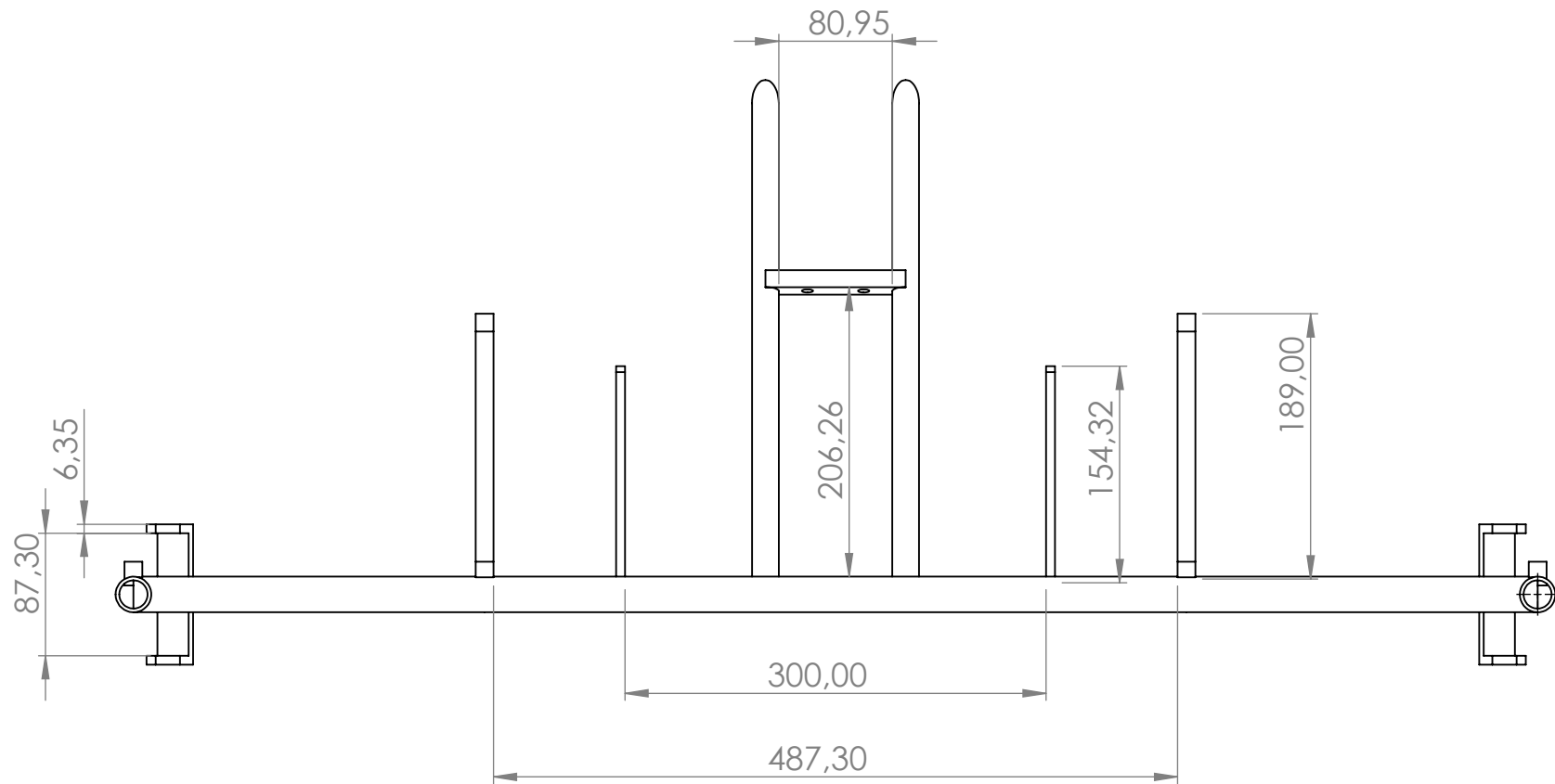


TITULO: CHASIS TUBULAR OPTIMIZADO
VISTA FRONTAL

AUTOR: JULIAN COLMENARES, CRISTIAM FLORES

REVISA: ING. ALEJANDRO SIERRA VARGAS

HOJA 5/7



OBSERVACIONES:

EL CHASIS ES CONSTRUIDO CON TUBOS DE 1" DE ACERO AISI 1010, EXCEPTUANDO LAS PARTES EN LAS QUE SE ACLAREN QUE SON DE DISTINTA MEDIDA.



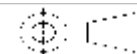
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 23/09/2024

ESCALA: 1:10

UNIDADES: MMGS

A4

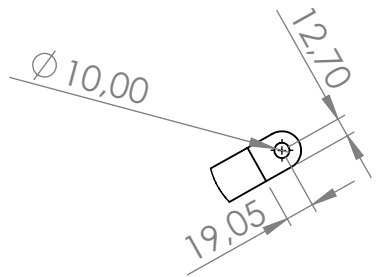


TITULO: CHASIS TUBULAR OPTIMIZADO
VISTA LATERAL DERECHA

AUTOR: JULIAN COLMENARES, CRISTIAM FLORES

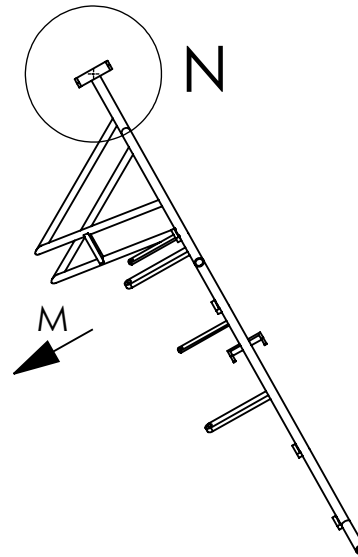
REVISIA: ING. ALEJANDRO SIERRA VARGAS

HOJA 6/7

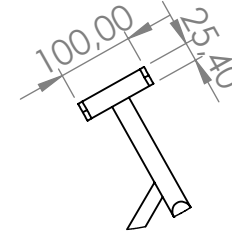


DETALLE O

ESCALA 1 : 5

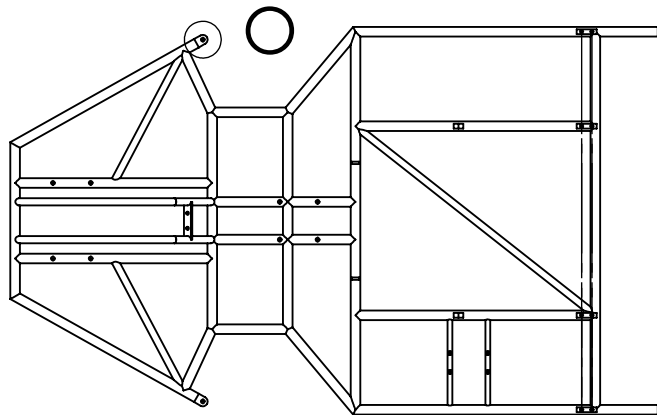


VISTA M



DETALLE N

ESCALA 1 : 10



OBSERVACIONES:

EL CHASIS ES CONSTRUIDO CON TUBOS DE 1" DE ACERO AISI 1010, EXCEPTUANDO LAS PARTES EN LAS QUE SE ACLAREN QUE SON DE DISTINTA MEDIDA.



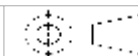
UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FECHA: 23/09/2024

ESCALA: 1:10

UNIDADES: MMGS

A4



TITULO: CHASIS TUBULAR OPTIMIZADO
VISTA DETALLE 2

AUTOR: JULIAN COLMENARES, CRISTIAM FLORES

REVISIA: ING. ALEJANDRO SIERRA VARGAS

HOJA 7/7