



INGENIERIA AUTOMOTRIZ

Proyecto previo a la Obtención del Título de Ingeniero Automotriz

Autor: Byron Hernán Rivera Motoche

Tutor: Alex Llerena Mena, MSc

**Análisis por Elementos Finitos de un Chasis tipo Space Frame
bajo Normativa Fórmula SAE, utilizando Software CAD para el
Diseño y CAE para la Simulación Estructural**

2025

Certificado de Autoría

Yo, Byron Hernán Rivera Motoche, declaro bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedo los derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de Propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

Byron Hernán Rivera Motoche

C.I. 1105974685

Aprobación del tutor

Yo, Alex Fernando Llerena Mena certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Ing. Alex Fernando Llerena Mena.

C.I.: 1804973277

Director del Proyecto.

Dedicatoria

A mis padres, por su amor incondicional y esos sacrificios silenciosos que han marcado y guiado mi camino. Me enseñaron que la perseverancia y la humildad son pilares del éxito y, gracias a su confianza pude avanzar incluso en los momentos de duda y caídas.

A mi familia, por el apoyo constante y las palabras de aliento que fueron fundamentales en los momentos complicados.

A mis profesores, por compartir sus conocimientos con paciencia y por orientar cada paso de mi formación profesional y personal.

A mi tutor de tesis, por sus observaciones puntuales, su compromiso con la calidad académica y la confianza que depositó en este proyecto.

A todos ustedes, mi agradecimiento por su aporte que hizo posible este logro.

Agradecimiento

A mis padres, por su amor infinito y esa paciencia inquebrantable y su apoyo sin condiciones. Cada vez que dudé de mis capacidades sus palabras de aliento me devolvieron la confianza y me dieron fuerzas para seguir adelante. Este proyecto también es fruto de sus desvelos y su entrega diaria.

A mis docentes, gracias por compartir su pasión y dedicación en cada clase. Sus enseñanzas no solo me llenaron de conocimiento, sino que además me enseñaron a cuestionar, a investigar con rigor y a mirar más allá de lo evidente.

A mi tutor de tesis, por su guía constante y sus comentarios siempre precisos. Aprecio el tiempo que me dedicó y su disposición para resolver cada duda además de la confianza que depositó en mí. Su acompañamiento fue clave para dar forma a este trabajo con la profundidad y coherencia que se necesita.

A todos aquellos que con un consejo, una conversación o un gesto de ánimo, hicieron más llevadero este trayecto y es gracias a ustedes que hoy puedo celebrar este logro.

Índice General

Dedicatoria.....	v
Agradecimiento	vi
Índice General.....	vii
Índice de Figuras.....	x
Índice de Tablas	xii
Resumen.....	xiii
Abstract.....	xiv
Capítulo I.	1
1.1 Planteamiento Formulación y Sistematización del Problema.....	1
1.2 Formulación del Problema.....	2
1.3 Sistematización del Problema	2
1.4 Objetivos de la Investigación.....	3
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.5 Justificación e Importancia de la Investigación	3
1.5.1 <i>Justificación Teórica</i>	3
1.5.2 <i>Justificación Metodológica</i>	4
1.5.3 <i>Justificación Práctica</i>	5
1.5.4 <i>Delimitación Temporal</i>	6
1.5.5 <i>Delimitación Geográfica</i>	6
1.5.6 <i>Delimitación del Contenido</i>	6
Capítulo II.....	7
2.1 Fórmula SAE Definiciones	7
2.1.1 <i>Chasis</i>	7

2.1.2	<i>Miembro del Chasis</i>	7
2.1.3	<i>Monocasco</i>	8
2.1.4	<i>Arco Principal</i>	8
2.1.5	<i>Arco Frontal</i>	9
2.1.6	<i>Arcos Antivuelco</i>	9
2.1.7	<i>Soportes de Refuerzo de los Arcos Antivuelco</i>	9
2.1.8	<i>Mamparo Frontal</i>	9
2.1.9	<i>Atenuador de Impacto</i>	10
2.1.10	<i>Estructura Primaria</i>	10
2.1.11	<i>Envolvente de la Estructura Primaria</i>	10
2.1.12	<i>Estructura Principal</i>	11
2.1.13	<i>Envolvente de Protección Antivuelco</i>	11
2.1.14	<i>Envolvente de la Superficie de los Neumáticos</i>	12
2.1.15	<i>Envolvente de Componentes</i>	13
2.1.16	<i>Triangulación</i>	13
2.2	<i>Esfuerzos en la Estructura</i>	15
2.2.1	<i>Puntos de Apoyo</i>	15
2.2.2	<i>Esfuerzos Axiales, Cortantes y de Flexión</i>	15
2.2.3	<i>Rigidez Torsional</i>	16
2.3	<i>Space Frame</i>	16
2.4	<i>Aplicación de CAD y CAE en el Diseño del Chasis</i>	18
2.4.1	<i>Boceto Estructural</i>	18
2.4.2	<i>Modelado de la Estructura Tubular</i>	18
2.4.3	<i>Modelado de Uniones y Cordones de Soldadura</i>	19
2.4.4	<i>Condiciones de Carga y Restricción</i>	19

2.5	Protección del Piloto y Seguridad Estructural	20
2.6	Regulaciones sobre Materiales	22
2.6.1	<i>Tubos y Materiales de Acero</i>	22
2.7	Selección de Material.....	23
Capítulo III.....		25
3.1	Boceto	25
3.2	Diseño Estructural.....	27
3.3	Consideraciones de Peso.....	30
3.4	Aplicación de Restricciones.....	31
3.5	Aplicación de Cargas	32
Capítulo IV.....		37
4.1	Primera Simulación.....	37
4.1.1	<i>Propiedades de la Estructura</i>	37
4.1.2	<i>Fuerza y Pares de Reacción en Restricciones</i>	38
4.1.3	<i>Resumen de Resultados Estáticos</i>	39
4.2	Segunda Simulación.....	44
4.2.1	<i>Propiedades de la Estructura</i>	44
4.2.2	<i>Fuerza y Pares de Reacción en Restricciones</i>	45
4.2.3	<i>Resumen de Resultados Estáticos</i>	46
Conclusiones		52
Recomendaciones		53
Bibliografía		54
Anexos		56

Índice de Figuras

Figura 1 Arco Principal.....	12
Figura 2 Arco Principal desde las Ruedas.....	12
Figura 3 Arco Principal desde el Mamparo	13
Figura 4 Triangulación en Puntos de Unión	14
Figura 5 Space Frame	17
Figura 6 Aro de Cuello.....	20
Figura 7 Partes de la Estructura	21
Figura 8 Vista Superior Posterior del Boceto	26
Figura 9 Mamparo Frontal	28
Figura 10 Vista Lateral Izquierda - Protección Antivuelco.....	29
Figura 11 Silueta del Piloto.....	30
Figura 12 Aplicación de Restricciones	32
Figura 13 Peso del Conductor y Gravedad	33
Figura 14 Distribución de Peso del Paquete de Batería y Motor.....	35
Figura 15 Peso de Pedales y Dirección.....	36
Figura 16 Fuerza de Reacción y Pares de Reacción	39
Figura 17 Resultados Estáticos	40
Figura 18 Zonas de Desplazamiento.....	41
Figura 19 Carga Vertical F_z	42
Figura 20 Momento Torsional Global M_z	43
Figura 21 Tensión de Torsión.....	44
Figura 22 Fuerzas de Reacción y Pares de Reacción.....	46
Figura 23 Zonas de Mayor Desplazamiento	47
Figura 24 Fuerzas Internas sobre la Estructura.....	48

Figura 25 Momentos en X	49
Figura 26 Resultados Estáticos	50
Figura 27 Tensión de Torsión.....	51

Índice de Tablas

Tabla 1 Dimensiones Mínimas Establecidas por la FSAE.....	22
Tabla 2 Requisitos Mínimos Recomendados por FSAE.....	23
Tabla 3 Propiedades que deben Presentar los Materiales del Chasis.....	23
Tabla 4 Comparación de requisitos FSAE con el Acero ASTM A500 Grado C.....	24
Tabla 5 Cargas Estimadas sobre la Estructura	31
Tabla 6 Propiedades Físicas de la Estructura con Acero ASTM A500 Grado C	37
Tabla 7 Propiedades de la Estructura con Aluminio 6061	45

Resumen

El presente proyecto de titulación se desarrolla y valida el diseño de un chasis Space Frame destinado a un monoplaza Fórmula SAE, partiendo desde la idea inicial de una estructura lo suficientemente eficiente hasta la comprobación final mediante simulaciones. Se modeló la estructura en CAD y se sometió a análisis por elementos finitos para evaluar tensiones, desplazamientos y torsión bajo cargas estáticas. Todo el proyecto se ajusta a la normativa Formula SAE tomando como prioridad la seguridad del piloto y las dimensiones obligatorias para la respectiva competencia.

La estrategia del diseño se centró en los objetivos primordiales de minimizar la masa final y mantener la rigidez global de la estructura. Luego de realizar cambios de espesores, diámetros y materiales sin modificar la geometría se logró una reducción significativa de peso sin tener que sacrificar el margen de seguridad de la estructura. El diseño tubular y las aleaciones de material fueron elegidos acorde a la disponibilidad en el mercado ecuatoriano, lo que facilita fabricar la estructura sin recurrir a importaciones costosas que se asemejen a los materiales cuyas propiedades mecánicas dispone la normativa.

Los resultados obtenidos demuestran que un proceso basado en simulaciones previas permite depurar el diseño final, acortar los tiempos de prototipado y asegurar que la integridad estructural es correcta antes de fabricar la estructura. Esta metodología permite tanto para los equipos universitarios como para talleres locales que busquen competir con un chasis ligero, rígido y conforme al reglamento FSAE, realizar simulaciones previas para determinar que el diseño es el correcto y minimizar costos en errores durante la fabricación del diseño estructural que podría ocasionar en un rendimiento muy bajo durante la competencia y costos innecesarios en la búsqueda de mejorar el diseño posterior a su fabricación.

Palabras Clave: Fórmula SAE, Space Frame, análisis estructural, elementos finitos, diseño automotriz.

Abstract

The present degree project develops and validates the design of a Space Frame chassis intended for a Formula SAE single-seater, starting from the initial concept of a sufficiently efficient structure to the final verification through simulations. The structure was modeled in CAD software and subjected to finite element analysis (FEA) to evaluate stress, displacements, and torsional behavior under static loads. The entire project complies with Formula SAE regulations, prioritizing driver safety and the mandatory dimensional requirements established for the competition.

The design strategy focused on the primary objectives of minimizing the final weight while maintaining the overall stiffness of the structure. After adjusting wall thicknesses, tube diameters, and materials without altering the geometry, a significant weight reduction was achieved without compromising the structural safety margin. The tubular design and material alloys were selected according to availability within the Ecuadorian market, facilitating the fabrication of the structure without resorting to costly imports of materials with mechanical properties similar to those specified in the regulations.

The results demonstrate that a process based on prior simulations allows for the refinement of the final design, reducing prototyping times and ensuring that structural integrity is verified before manufacturing. This methodology enables both university teams and local workshops aiming to compete with a lightweight, stiff, and FSAE-compliant chassis to conduct simulations beforehand, ensuring the correctness of the design and minimizing costs related to manufacturing errors that could lead to poor performance during the competition and unnecessary expenses in attempting to improve the design after fabrication.

Keywords: SAE formula, Space Frame, structural analysis, finite elements, automotive design.

Capítulo I.

Antecedentes

1.1 Planteamiento Formulación y Sistematización del Problema

El diseño de un vehículo monoplace para la competencia Fórmula SAE requiere una planificación detallada para garantizar el cumplimiento de los estándares establecidos por SAE International en cuanto a seguridad, rendimiento y eficiencia estructural. A diferencia de otros vehículos de competición, un monoplace de Fórmula SAE debe cumplir con normativas estrictas que regulan aspectos como: la estructura del chasis, el sistema de propulsión, la suspensión y la seguridad del piloto.

Uno de los grandes retos es escoger bien tanto el material como la geometría del chasis, con la finalidad de diseñar una estructura liviana pero que soporte las cargas dinámicas y estáticas que se presentan durante la carrera. Además, hay que distribuir de forma inteligente la suspensión, el tren motriz y todos los elementos de seguridad sin que comprometa a la rigidez ni perder maniobrabilidad durante la competencia.

Otro tema por considerar son las simulaciones FEA y las demás herramientas que podemos usar para verificar el diseño antes de realizar la fabricación de la estructura. De esta forma nos aseguramos de que el monoplace cumple con las reglas de Fórmula SAE y, al mismo tiempo se optimizan costos de diseño y se aumenta el rendimiento de la estructura.

Un factor clave en el diseño y análisis estructural en el Ecuador son los materiales de la estructura a elegir, si bien en el mercado ecuatoriano existen variedades de tubos con diferentes aleaciones y propiedades, existe la limitación en que la normativa FSAE en ciertas partes de la estructura solicita como mínimo 305 MPa y 2mm de espesor, pese a haber disponibilidad de diferentes materiales de acero, generalmente no llegan a cumplir los requisitos al ser materiales de acero especiales o bien sobredimensionan el proyecto final aumentando excesivamente el peso de la estructura.

1.2 Formulación del Problema

¿Cómo diseñar y comprobar un chasis para un vehículo de Fórmula SAE que cumpla las exigencias de la normativa, garantice la seguridad del piloto y optimice el peso, considerando las limitaciones de materiales de aceros disponibles en Ecuador, los costos de fabricación y evitar las fallas estructurales similares a proyectos anteriores?

En el contexto de la ingeniería automotriz en el ámbito universitario, particularmente en el diseño de estructuras o monocascos para competencias surge la necesidad de aplicar en un entorno realista los conocimientos de ingeniería tanto teórica como práctica. A diferencia de muchos países desarrollados que cuentan con una amplia oferta de aceros y compuestos para la fabricación de sus estructuras, en Ecuador los equipos de competencia deben adquirir materiales del mercado local que se encuentra limitado en ofertas de aceros especiales que cuenten con las propiedades que debe presentar el material de acero para que cumpla con las exigencias de la normativa FSAE, por ende surge la necesidad de optar por materiales que se asemejen y a la vez presente las condiciones de seguridad necesarias.

1.3 Sistematización del Problema

- ¿Qué factores clave influyen en el diseño estructural de un vehículo monoplace de Fórmula SAE?
- ¿Cómo optimizar el peso del chasis sin comprometer la seguridad y el rendimiento del vehículo?
- ¿Qué materiales y métodos de fabricación son los más adecuados para un monoplace de Fórmula SAE competitivo?
- ¿Qué estándares técnicos y normativas de la Fórmula SAE deben considerarse durante el diseño?

1.4 Objetivos de la Investigación

1.4.1 Objetivo General

- Desarrollar un chasis para un monoplaza Fórmula SAE mediante software CAD y CAE.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Modelar un chasis optimizado en CAD considerando normativas SAE.
- Simular el comportamiento estructural bajo condiciones críticas en CAE.
- Definir los materiales del chasis comparando los resultados de las simulaciones optimizando su eficiencia

1.5 Justificación e Importancia de la Investigación

1.5.1 Justificación Teórica

El análisis estructural es una parte clave cuando se realiza el diseño de un monoplaza tipo Fórmula SAE, porque es lo que permite determinar si la estructura va a soportar todas las tensiones, cargas y vibraciones que se generan cuando el vehículo se encuentra en funcionamiento. Al tener un diseño bien optimizado garantiza que el chasis va a ser lo bastante resistente para soportar todas esas fuerzas, pero sin la necesidad de añadir peso de más que al final termina afectando el rendimiento en pista.

Para poder realizar el diseño y optimización se recurre a herramientas de diseño CAD y también al análisis por elementos finitos (FEA), ya que con este tipo de software se puede modelar la estructura y asegurarse de que todo cumpla con las medidas, materiales y requisitos de ensamblaje que pide la normativa de Fórmula SAE. Gracias a estas herramientas es posible tener una simulación mucho más realista de cómo se va a comportar el chasis durante la competencia.

Las simulaciones CAE son fundamentales porque determina como realmente responde la estructura cuando se le aplican distintas condiciones de carga. Estas simulaciones proporcionan información muy valiosa de cómo se distribuyen las tensiones, dónde se

producen deformaciones y qué puntos podrían necesitar algún refuerzo para que no vayan a fallar en momentos críticos. Esto ayuda a que el diseño cumpla con los requisitos de seguridad sin afectar la eficiencia que se busca en este tipo de vehículos además que permite evitar costos innecesarios al realizar este tipo de análisis.

A pesar de que existen investigaciones previas enfocadas en el diseño de un chasis tipo Space Frame para competencias FSAE, la mayoría de los proyectos se desarrollan bajo contextos internacionales y con acceso a materiales certificados, sin embargo, son escasos los estudios que analicen estructuras aplicables en países con limitaciones técnicas y de mercado como el de Ecuador. Este proyecto aporta una perspectiva local al validar un diseño estructural competitivo utilizando materiales que se asemejen a los materiales como el acero ASTM A500 Grado C que en el mercado ecuatoriano se puede encontrar con facilidad y además presenta propiedades similares al AISI 1018 o el AISI 1020.

1.5.2 Justificación Metodológica

La metodología que se aplicó en este proyecto es netamente cuantitativo, enfocándose principalmente en simulaciones y datos numéricos. Para esto se utilizó software especializado en análisis estructural y sobre todo mediante análisis por elementos finitos (FEA), que permitió realizar simulaciones bien detalladas para ver cómo se comportan las tensiones, los esfuerzos y las cargas que actúan sobre la estructura del monoplaza. Gracias a estas simulaciones se pudieron obtener datos precisos sobre cómo se distribuyen los esfuerzos y qué tan resistente es cada componente nuestro diseño en distintos escenarios que podrían darse durante su uso o en la respectiva competencia.

También se usaron herramientas CAD para poder realizar el diseño de un modelo 3D completo y detallado de la estructura, el cual sirvió como base para luego realizar todas las simulaciones estructurales. A partir del diseño del modelo se pudieron ir haciendo los respectivos ajustes y mejoras necesarias para optimizar tanto la resistencia como la durabilidad

del chasis frente a las cargas dinámicas y las vibraciones a las que estará sometido en competencia y realizar los ajustes para obtener un excelente rendimiento.

El motivo por el cual se escogió esta metodología cuantitativa es porque se buscan resultados precisos, numéricos y confiables, que nos permitan optimizar de forma técnica y precisa el diseño del monoplaza y asegurar que su rendimiento y seguridad se encuentren a la altura de las exigencias reales de una competencia.

1.5.3 Justificación Práctica

El objetivo principal de este proyecto es diseñar una estructura que sea realmente eficiente para un monoplaza tipo Fórmula SAE pensado para su competencia. Los resultados que se obtienen a partir de las simulaciones permitirán mejorar la resistencia estructural del diseño del vehículo, asegurando que su desempeño en pista sea el adecuado bajo las condiciones tan exigentes que se presentan bajo condiciones de cargas, lo cual también permite mejorar tanto la seguridad como la competitividad del vehículo basado en el diseño y los resultados obtenidos durante la simulación.

Esta investigación además aporta al conocimiento dentro del área del análisis estructural e ingeniería automotriz aplicado a vehículos de competición, ya que los datos que se han obtenido pueden servir como referencia para futuros proyectos automotrices que busquen replicar el diseño estructural y posteriormente optimizar o diseñar nuevas estructuras enfocadas en este tipo de vehículos y competencias similares a la FSAE o en carrocerías de transportes.

Además, el contenido de este proyecto puede ser de gran utilidad para el uso autodidáctico de estudiantes o profesionales que estén interesados en la rama de la ingeniería automotriz, ya que aporta a la creación de nuevas metodologías orientadas al diseño de estructuras que sean ligeras pero seguras, siempre pensando en la optimización estructural para obtener un alto rendimiento en la pista.

1.5.4 Delimitación Temporal

Este proyecto de titulación se prevé su publicación para el mes de septiembre del 2025.

1.5.5 Delimitación Geográfica

El presente proyecto se desarrolla de forma autónoma, en el establecimiento de la UIDE sede Guayaquil en la Av. Las aguas, sector Urbanor.

1.5.6 Delimitación del Contenido

La investigación se realiza en cuatro capítulos. El primero establece los antecedentes, el segundo ayuda a comprender conceptos teóricos relacionados al estudio, el tercero describe la metodología que se aplica. Finalmente, el ultimo capitulo detalla el análisis de los resultados de las mediciones experimentales.

Capítulo II

Marco Teórico

2.1 Fórmula SAE Definiciones

La Fórmula SAE, auspiciada por SAE International, es un certamen global en el que equipos universitarios de distintas ramas de la ingeniería se retan a diseñar, fabricar y validar un prototipo monoplace de inspiración fórmula. Tras pasar por simulaciones, ensayos de laboratorio y controles de calidad, los vehículos se enfrentan en pista y en evaluaciones estáticas que miden desde la eficiencia del tren motriz hasta la solidez del plan de negocio. (Gusñay Llallico, et al., 2024)

2.1.1 Chasis

El chasis constituye la estructura principal sobre la cual se ensamblan y soportan todos los componentes del vehículo como el sistema de suspensión, la dirección, el motor, la transmisión, los sistemas de frenos y los elementos de seguridad. Su función es proporcionar soporte físico además de garantizar la rigidez estructural necesaria para resistir las cargas generadas por las condiciones de funcionamiento del vehículo. Estas cargas pueden ser estáticas como el peso propio del conjunto o dinámicas producto de maniobras como frenado, aceleración o paso por curvas. Dependiendo del diseño un chasis puede construirse como una estructura única fabricada por completo o dividirse en varias partes ensambladas entre sí e incluso combinar diferentes materiales y métodos de fabricación para lograr su propósito estructural y funcional. (Shiva Prasad, et al., 2020)

2.1.2 Miembro del Chasis

Un miembro del chasis corresponde a una pieza individual que forma parte de la estructura tubular del vehículo. Estos elementos suelen fabricarse en tubería continua sin cortes a lo largo de su longitud con el objetivo de asegurar su resistencia y mantener la integridad estructural. Estos tubos generalmente se encuentran distribuidos estratégicamente para

conformar una estructura sólida contribuyendo tanto a la rigidez como a la capacidad del chasis para absorber y distribuir las cargas de manera adecuada. Además, el diseño del chasis debe optimizar la distribución de las cargas del peso y la aerodinámica para mejorar la estabilidad y el manejo del vehículo durante la competencia (Escobar Humaquinga & Garcia Frias, 2024).

2.1.3 Monocasco

El monocasco es un tipo de diseño estructural en el que la carrocería del vehículo también cumple la función de chasis pues soporta las cargas estructurales a las que está sometido el conjunto. A diferencia de las estructuras tubulares el monocasco se basa en paneles exteriores y refuerzos internos que distribuyen las cargas por toda la envolvente del vehículo. Esta técnica permite obtener estructuras más ligeras y con alta rigidez torsional por esta razón es ampliamente utilizado en vehículos de competición de alto rendimiento.

Aunque el monocasco puede superar en rendimiento al Space Frame, en FSAE la relación costo / beneficio importa, su facilidad de fabricación y acceso a materiales lo convierten en una opción mas viable y popular, cabe recordar que el monocasco durante su diseño se requiere materiales de compuestos, resinas y curaciones en las uniones y un análisis estructural mas complejo que valide la seguridad del piloto, en cambio un Space Frame se requiere la unión de tubos soldados dispuestos en una geometría para distribuir las cargas por ende la fabricación se realiza en un menor tiempo (Waggoner et al., 2010).

2.1.4 Arco Principal

El arco principal o también conocido como Main Hoop es un elemento estructural ubicado detrás del asiento del conductor. Su principal función es proteger al piloto en caso de que el vehículo llegue a sufrir un vuelco evitando que la cabeza del ocupante llegue a tocar el suelo, además este componente contribuye a incrementar la rigidez del conjunto en la parte trasera del vehículo por ende es un requisito obligatorio según las normativas de la Fórmula SAE y otras competencias similares.

2.1.5 Arco Frontal

El arco frontal o Front Hoop se sitúa en la parte delantera de la estructura o por encima de la zona donde se encuentran las piernas del conductor. Su función principal es brindar protección adicional al piloto en caso de vuelcos o colisiones frontales complementando así la función del arco principal. Este elemento refuerza la rigidez de la estructura en la zona delantera del vehículo y además contribuye a formar la envolvente de seguridad requerida por los reglamentos de competencia.

2.1.6 Arcos Antivuelco

Es el conjunto formado por el arco principal y el arco frontal. Estos elementos trabajan en conjunto para proteger al piloto en situaciones de riesgo como vuelcos asegurando que exista un espacio seguro alrededor de la cabeza del ocupante en todo momento. Además de seguridad estos arcos proporcionan rigidez estructural al chasis ayudando a mejorar su comportamiento ante las diferentes cargas que actúan sobre la estructura durante la conducción.

2.1.7 Soportes de Refuerzo de los Arcos Antivuelco

Los soportes de refuerzo son elementos estructurales que conectan la base de los arcos antivuelco con otras zonas del chasis cuyo objetivo es distribuir de manera más eficiente las cargas que llegan a los arcos logrando evitar concentraciones de esfuerzos en puntos críticos. Estos refuerzos ayudan a mejorar la rigidez de todo el chasis y aseguran que los arcos antivuelco mantengan su forma y capacidad de protección incluso ante cargas elevadas.

2.1.8 Mamparo Frontal

El mamparo frontal es una estructura que se encuentra ubicada en la parte delantera inferior del chasis su principal función es proteger los pies del conductor ante posibles impactos frontales. Además, este componente suele servir como punto de montaje para sistemas como los pedales, la dirección y otros elementos menores.

2.1.9 Atenuador de Impacto

El atenuador de impacto es un componente diseñado para absorber la energía generada en caso de colisión frontal logrando reducir la fuerza que se transmite a las demás partes del chasis y por ende al conductor. Este dispositivo se ubica delante del mamparo frontal y suele estar fabricado con materiales que se deforman de manera controlada para disipar la energía del impacto. Su uso es de carácter obligatorio en las competencias de Fórmula SAE ya que forma parte de los sistemas de seguridad pasiva que buscan minimizar los daños en caso de un accidente.

2.1.10 Estructura Primaria

Conjunto de componentes que incluye:

- Mamparo frontal y sus soportes.
- Arco frontal, arco principal, refuerzos y soportes de los arcos antivuelco.
- Estructura de protección contra impactos laterales.
- (Solo vehículos eléctricos) Protección del sistema de tracción y protección contra impactos traseros.
- Cualquier miembro del chasis, guías o soportes que transmitan cargas desde el sistema de retención del conductor.

2.1.11 Envolverte de la Estructura Primaria

La envolvente de la estructura primaria se conoce al volumen que envuelve y delimita la zona principal del chasis el cual es trazado mediante planos tangentes que siguen de forma precisa el contorno exterior de los tubos que conforman dicha estructura. Esta envolvente no es un componente físico como tal, sino que es un espacio teórico y geométrico utilizado para definir los límites donde se concentran los elementos más importantes en términos de seguridad y rigidez del chasis. Esta zona es donde se encuentran los componentes críticos para la

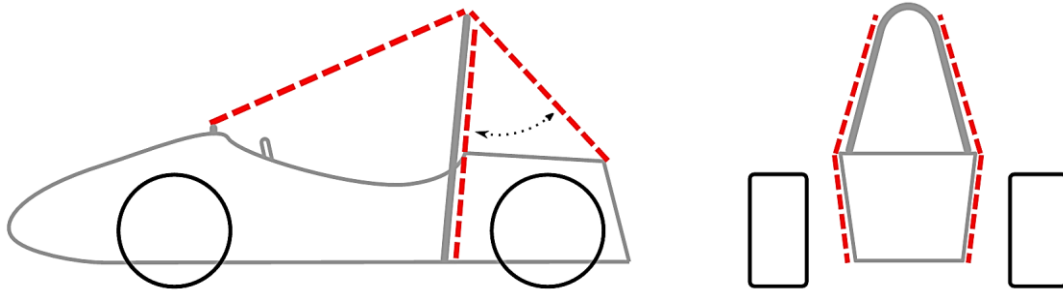
integridad estructural como los arcos antivuelco, los miembros laterales de impacto y los mamparos de refuerzo.

2.1.12 Estructura Principal

La estructura principal comprende todas las partes del chasis que se encuentran contenidas dentro de la envolvente de la estructura primaria a excepción de algunos refuerzos específicos. En este caso se excluyen los refuerzos del arco principal y cualquier porción del mismo que se extienda por encima de un plano horizontal que pasa sobre el miembro superior del área de impacto lateral, es decir la estructura principal está conformada por los elementos que garantizan la integridad y rigidez del habitáculo donde se encuentra el piloto al igual que aquellos que contribuyen a disipar las cargas provenientes de impactos frontales, laterales y torsionales. Este concepto permite diferenciar las zonas del chasis que tienen un rol estructural directo en la protección del conductor de aquellas que funcionan como refuerzos adicionales y ayudan a establecer criterios claros para su diseño y validación en las simulaciones estructurales.

2.1.13 Envolvente de Protección Antivuelco

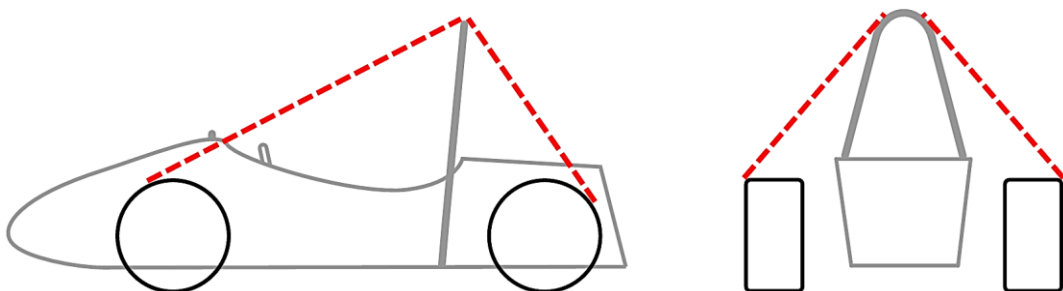
Conjunto formado por la estructura primaria, un plano que conecta la parte superior del arco principal y se extiende por delante del conductor con el arco frontal, y otro plano que se extiende desde la parte superior del arco principal hasta el tubo estructural triangulado más trasero o su equivalente en un monocasco. Si no existen miembros estructurales triangulados detrás del arco principal, la envolvente de protección antivuelco termina en el plano trasero del arco principal.

Figura 1*Arco Principal*

Fuente: Fórmula SAE 2025

2.1.14 Envolvente de la Superficie de los Neumáticos

La envolvente de la superficie de los neumáticos es un volumen teórico y que se define mediante líneas tangentes que conectan el arco principal del chasis con el borde exterior de cada uno de los cuatro neumáticos del vehículo. Esta envolvente ayuda a establecer un límite claro para evaluar las dimensiones y proporciones del vehículo en relación a sus neumáticos para asegurar que la estructura principal respete las distancias mínimas y proporciones requeridas por la normativa. Esta definición resulta útil durante el proceso de diseño y validación ya que garantiza que las ruedas se mantengan correctamente contenidas dentro del perímetro de seguridad del chasis y además que su desplazamiento no comprometa la integridad estructural ni la seguridad del piloto.

Figura 2*Arco Principal desde las Ruedas*

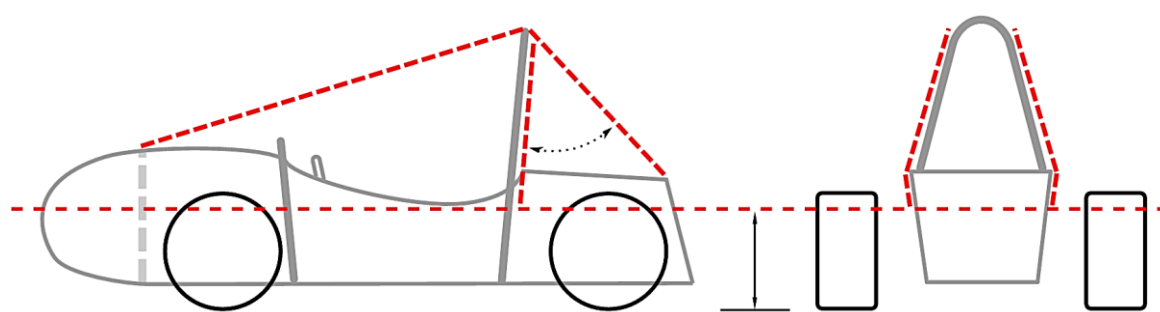
Fuente: Formula SAE 2025

2.1.15 *Envolvente de Componentes*

La envolvente de componentes es un área a la cual se define geométricamente mediante planos que conectan puntos clave de la estructura del chasis. Por un lado, se establece un plano que une la parte superior del arco principal con la parte superior del mamparo frontal y por otro lado otro plano conecta la parte superior del arco principal con el tubo estructural más trasero que forme parte de la triangulación del chasis o con su equivalente en caso de utilizar un diseño monocasco. Esta envolvente tiene como propósito delimitar el espacio que debe proteger y albergar los componentes internos más importantes del vehículo tales como el motor, las baterías, los sistemas de transmisión y otros elementos críticos. Además, ayuda como referencia para verificar que dichos componentes estén correctamente contenidos dentro de un volumen protegido y estructuralmente reforzado de tal modo que su montaje no interfiera con la rigidez ni con la seguridad del conjunto.

Figura 3

Arco Principal desde el Mamparo



Fuente: Formula SAE 2025

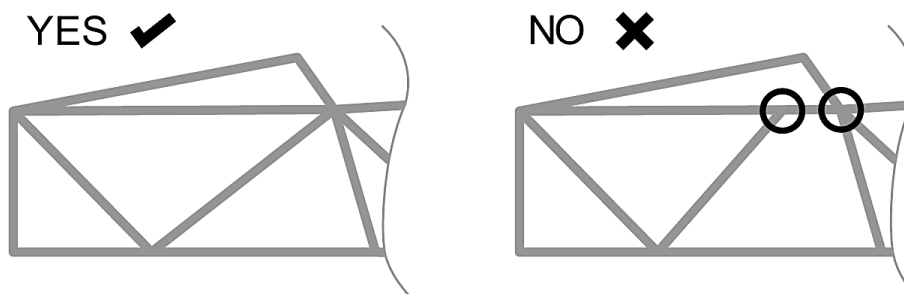
2.1.16 *Triangulación*

Disposición de los miembros del chasis en la que todos los elementos y segmentos de tubos estructurales entre dobleces o nodos para formar una estructura exclusivamente por triángulos en diferente parte de la estructura.

Este arreglo es muy necesario entre dos o más miembros de la estructura, donde cada uno puede estar compuesto por varios segmentos, requiriendo un tubo diagonal para formar múltiples triángulos.

Figura 4

Triangulación en Puntos de Unión



Fuente: Formula SAE 2025

2.1.16.1 Uniones en las Triangulaciones

Cuando se diseña un chasis tipo Fórmula SAE, generalmente es una estructura espacial hecha a base de triángulos, las uniones entre los tubos son clave para que todo funcione bien y soporte las cargas que se van a aplicar. Normalmente estas uniones se hacen soldando los diferentes tubos, aunque en algunos casos también se utilizan pernos, pero siempre se colocan de manera estratégica justo en los puntos donde se juntan los tubos que forman toda la estructura.

Es muy importante que estas uniones queden de la forma correcta, porque es el lugar donde se concentran y reparten todas las fuerzas que va a recibir el chasis cuando esté en competencia. Si una unión está mal diseñada o mal ejecutada, puede terminar siendo el punto débil que arruine toda la estructura, su función es asegurar que los esfuerzos estructurales se repartan de manera pareja por todos los tubos conectados o estructura, lo que ayudará a mantener la rigidez y estabilidad del chasis.

Además, estas uniones son las que permiten que los triángulos de la estructura hagan bien su trabajo, ayudando a que el chasis conserve su forma cuando le toque soportar las cargas de

tracción, compresión, flexión o torsión, que es lo que realmente se encuentra sometida una estructura en una competencia real.

2.2 Esfuerzos en la Estructura

En el diseño estructural de un chasis FSAE, uno de los aspectos fundamentales a considerar son los esfuerzos estáticos que actúan sobre la estructura durante su funcionamiento. Estos esfuerzos derivan de la interacción entre las fuerzas generadas por la aceleración, frenado, paso por curva, peso propio y de los componentes, así como de las condiciones de carga específicas de cada evento en competencia.

2.2.1 Puntos de Apoyo

Los puntos de apoyo son las zonas donde la estructura del chasis transfiere las cargas hacia otros sistemas o al suelo. En una estructura de competencia generalmente son 4 puntos de apoyo que se mencionan a continuación:

- **Anclajes de Suspensión:** son los 4 puntos de donde se transmiten las fuerzas verticales, laterales y longitudinales producto del contacto de la rueda con el suelo o pista de competencia.
- **Soporte del Motor y Transmisión:** zonas de transferencia de vibraciones y peso.
- **Anclajes del Asiento y Piloto:** transmiten el peso y las cargas de inercia del conductor.
- **Fijaciones de los Sistemas Auxiliares:** como radiadores, batería y depósitos.

2.2.2 Esfuerzos Axiales, Cortantes y de Flexión

En una estructura hay la presencia de tres principales tipos de esfuerzos que se mencionan a continuación:

- **Axiales:** son esfuerzos de tracción o compresión en los tubos o estructura debido a las cargas directamente aplicadas que pueden generar deformación en la estructura o punto de fuerza aplicada.

- **Cortantes:** generados por fuerzas transversales, especialmente en las zonas cercanas a los anclajes de suspensión.
- **Momentos de Flexión:** se producen en zonas de gran longitud entre uniones o en componentes expuestos a cargas distribuidas.

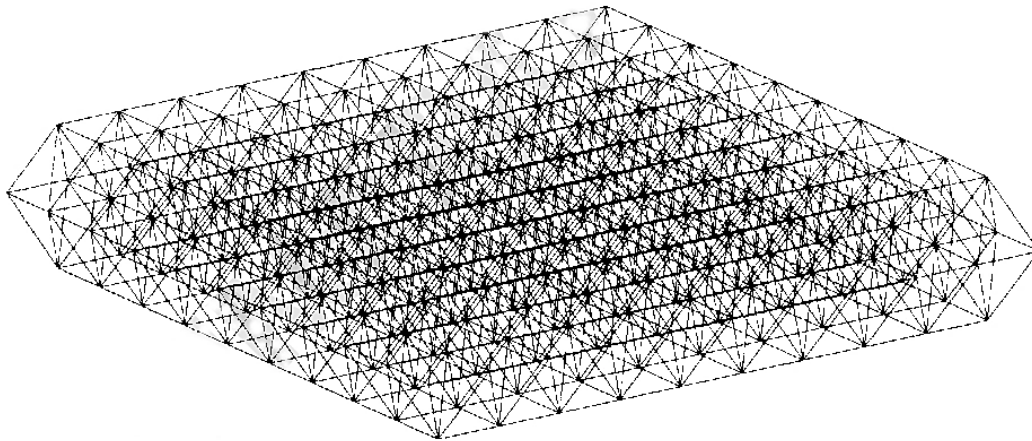
2.2.3 Rigidez Torsional

La rigidez torsional de una estructura se define como la capacidad de resistir deformaciones angulares ante la aplicación de un par torsor. Se expresa generalmente como la relación entre el momento torsor aplicado y el ángulo de giro resultante.

Durante maniobras de alto rendimiento, como frenadas bruscas o cambios rápidos de dirección, el chasis está sometido a cargas torsionales generadas por las fuerzas de contacto de los neumáticos que actúan en planos distintos, creando momentos alrededor del eje longitudinal del vehículo.

2.3 Space Frame

Un Space Frame es una estructura tridimensional compuesta por puntales, varillas interconectadas o tubos dispuestos en un patrón geométrico. Por lo general, estas estructuras forman una serie de pirámides triangulares, prismas triangulares, cubos, pirámides cuadrangulares truncadas, etc., y distribuyen las cargas de manera uniforme en todas las direcciones.

Figura 5*Space Frame*

Fuente: Archi-Monarch

El Space Frame en un vehículo FSAE es una estructura ligera pero muy resistente que se encuentra formada por una red de tubos de acero o aluminio y en algunos casos, placas de refuerzo unidos en distintos puntos. Cada tubo trabaja principalmente en tracción o compresión que al estar conformados en triángulos evitan que la estructura se deforme ante las cargas de frenado, aceleración o en el desplazamiento en una curva. Esta disposición geométrica permite maximizar la rigidez torsional sin añadir peso innecesario que afecte durante la competencia.

Los tubos se cortan a medida y se sueldan entre sí en donde los puntos convergen tres o más perfiles llegando a formar siempre figuras triangulares. Los nodos sirven como puntos de soldadura e incluyen refuerzos localizados si en esa zona las cargas son particularmente elevadas, como es el caso de las fijaciones de la suspensión o el sistema de dirección del vehículo.

Anteriores estudios como el de (Galgotias University, et al., 2020) y (MIT, 2008) entre otros, demuestran que la configuración de una estructura mediante Space Frame, con una

triangulación perfecta permite obtener una excelente rigidez torsional y una correcta distribución de cargas a lo largo de la estructura, además que permite una fácil reparación.

2.4 Aplicación de CAD y CAE en el Diseño del Chasis

El uso de herramientas de diseño asistido por computadora (CAD) y análisis asistido por computadora (CAE) se ha consolidado como una práctica esencial en la ingeniería automotriz, especialmente en el desarrollo de chasis para monoplazas FSAE. Estas tecnologías permiten diseñar, optimizar y validar estructuras antes de su fabricación física, reduciendo tiempos, costos y riesgos asociados a errores estructurales. Existen varias herramientas que permiten el diseño CAD como el programa de Autodesk Inventor, AutoCAD, ANSYS, SolidWorks entre otros, así mismo estas herramientas de software vienen preinstaladas herramientas CAE para posterior al diseño se puedan realizar simulaciones bajo ciertas condiciones y parámetros ajustados por el usuario sin necesidad de instalar otras herramientas de software.

2.4.1 Boceto Estructural

El proceso de diseño comienza con la elaboración de un boceto inicial, donde se definen las dimensiones generales del chasis y la disposición espacial de sus elementos. En este punto se trazan las líneas guía para la ubicación y dirección geométrica de los tubos principales, nodos estructurales y triangulaciones de nuestro diseño, dando forma a la geometría del modelo tridimensional de nuestra estructura.

2.4.2 Modelado de la Estructura Tubular

A partir del primer boceto el siguiente paso se deben ir colocando los tubos estructurales usando las herramientas que trae el software CAD para este tipo de estructuras. Estas funciones te dejan permitir seleccionar los perfiles que se van a usar, ya sean redondos o cuadrados o cualquier sea la geometría seleccionada, y se van siguiendo las trayectorias que ya se marcaron en ese boceto inicial. Es muy importante que todo quede bien alineado y las uniones bien

hechas, porque cualquier fallo o corte raro en la geometría después puede afectar cuando se vaya a realizar los análisis del comportamiento estructural más adelante y nos genere fallas en la simulación.

2.4.3 *Modelado de Uniones y Cordones de Soldadura*

Una parte clave al momento de diseñar la estructura de un chasis FSAE es cómo se representan bien las uniones entre los tubos. Cuando uno trabaja en CAD, normalmente se dibujan las intersecciones de manera exacta, bien geométricas, esto es muy necesario ya que en el entorno CAE se tienen que modelar esas uniones pensando en los cordones de soldadura o como si fueran conexiones rígidas. Esto se hace para poder analizar de forma más realista cómo se reparten las tensiones justo en esas zonas, ya que por lo general ahí es donde se concentran los esfuerzos y es más probable que con el tiempo se llegue a generar fatiga luego de haber aplicado las respectivas cargas sobre la estructura.

2.4.4 *Condiciones de Carga y Restricción*

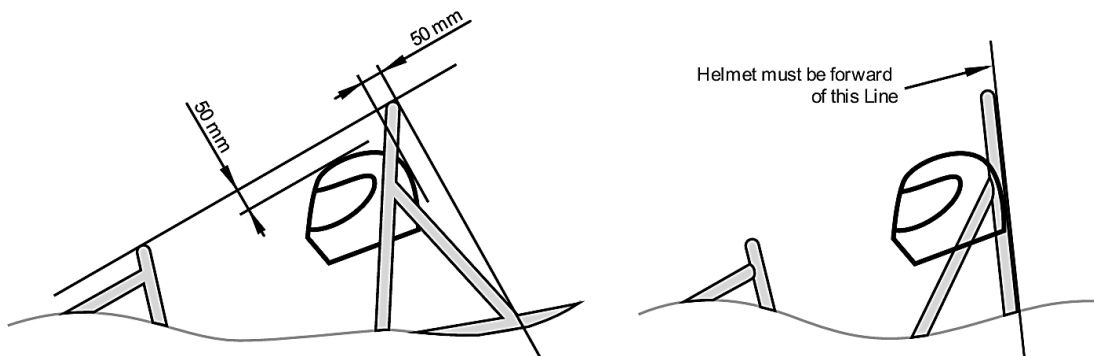
El modelado estructural se realiza definiendo las condiciones de carga correspondientes a los escenarios operativos a los que estará sometido el chasis, en estos casos generalmente se ocupa de los pesos de los componentes y se multiplica por la gravedad para obtener una fuerza. Las fuerzas aplicadas corresponden a las tensiones transmitidas por los puntos de montaje de la suspensión, las cargas o pesos de la tracción, las masas de los componentes como el motor, conjunto de baterías, engranajes o cableados y las aceleraciones debidas al frenado, la aceleración y las maniobras laterales. Además, se aplican restricciones que simulan soportes o fijaciones que limitan los grados de libertad en ciertas áreas, estas restricciones van en los 4 puntos de apoyo para simular las ubicaciones de las ruedas de la estructura. Estas restricciones son indispensables para simular correctamente los efectos de carga sobre la estructura, y su adecuada representación es decisiva para la precisión de los resultados.

2.5 Protección del Piloto y Seguridad Estructural

El chasis debe incorporar dos estructuras principales denominadas Roll Hoop: el Main Hoop y el Front Hoop. El primero se ubica inmediatamente detrás del torso del piloto y el segundo, por delante de sus piernas, próximo al volante. Estas estructuras deben diseñarse de manera que la cabeza de un piloto correspondiente al percentil 95, considerando su posición sentada, quede al menos a 50 mm por debajo de la línea imaginaria que conecta la parte superior de ambos Roll Hoop tal como se indica en la Figura 6. Además, estas estructuras deben estar debidamente trianguladas mediante tubos de refuerzo que aseguren su rigidez y capacidad de absorción ante cargas. La ergonomía contribuye a la prevención de lesiones en el piloto, ya que están sometidos a fuerzas G extremas y posturas exigentes durante las carreras (Vera Puebla et al., 2019).

Figura 6

Aro de Cuello



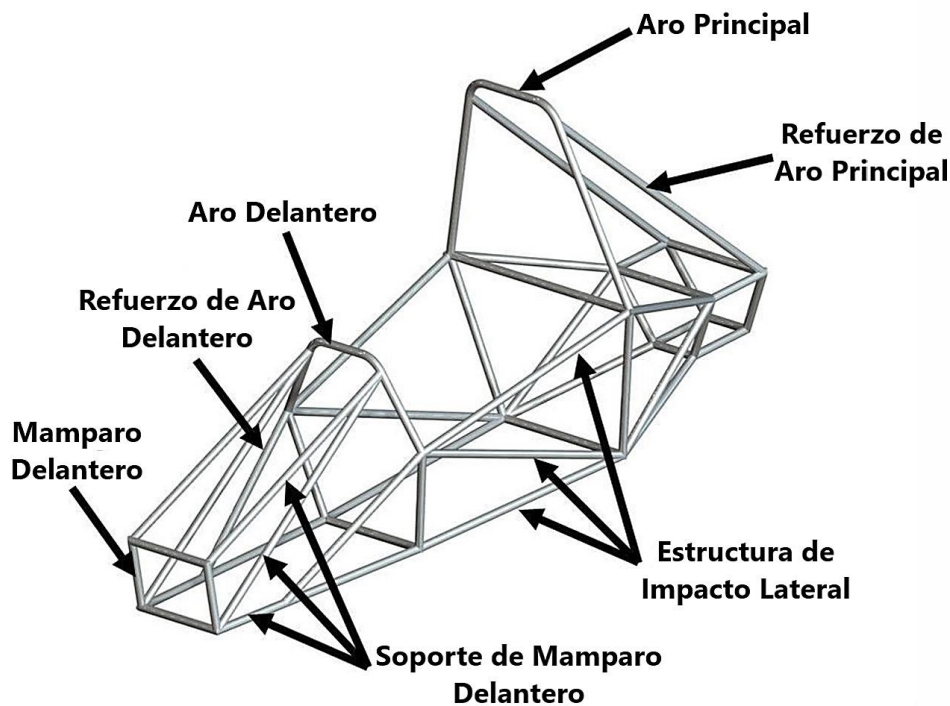
Fuente: Formula SAE 2025

A lo largo de los laterales del vehículo, se exige la implementación de una estructura de protección contra impactos laterales, conocida como Side Impact Structure tal como se indica en la Figura 6. Esta se compone, como mínimo, de tres tubos cerrados en cada costado, denominados Upper, Lower y Diagonal Side Impact Members, que conectan longitudinalmente el Main Hoop con el Front Hoop. La ubicación del tubo superior debe garantizar una distancia

vertical mínima respecto al tubo inferior, situándose entre 265 mm y 320 mm sobre la base de éste, protegiendo así las zonas laterales del torso y piernas del piloto frente a colisiones.

Figura 7

Partes de la Estructura



Fuente: Formula SAE 2025

El Main Hoop y el Front Hoop deben reforzarse mediante tubos de bracing que transmitan cargas hacia nodos estructurales y permitan una correcta triangulación de la estructura. Estos refuerzos no pueden presentar dobleces y deben construirse con materiales equivalentes en resistencia y geometría a los especificados en el reglamento para los tubos estructurales. En el caso de que el chasis sea de tipo monocasco, se definen requisitos adicionales para garantizar que las uniones entre secciones de material compuesto y cualquier tubo cumplan equivalencias estructurales demostradas mediante cálculos o ensayos.

El Front Bulkhead y su soporte deben cumplir requisitos estructurales equivalentes a secciones tubulares de acero estandarizadas, garantizando propiedades mínimas de módulo de

rigidez a flexión (EI) y resistencia al corte en su perímetro. Estas propiedades deben verificarse mediante cálculos o ensayos, reflejando las características exigidas para los tubos definidos en las tablas de materiales del reglamento.

2.6 Regulaciones sobre Materiales

2.6.1 Tubos y Materiales de Acero

Los valores descritos en la Tabla 1 son proporcionados por la normativa FSAE 2025 Rules y son dimensiones y espesores comunes en el mercado que sirven como guía a tomar en cuenta durante el diseño de la estructura. A continuación, se describen el tipo de tubo a seleccionar de acuerdo con la aplicación en la estructura:

Tabla 1

Dimensiones Mínimas Establecidas por la FSAE

Aplicación	El Tubo de Acero Debe Cumplir con el Tamaño según Tabla 2:	Se Permite Material de Tubería Alternativo según Tabla 3:
a. Mamparo Frontal	Tamaño B	Sí
b. Soporte del Mamparo Frontal	Tamaño C	Sí
c. Aro Frontal	Tamaño A	Sí
d. Refuerzo del Aro Frontal	Tamaño B	Sí
e. Estructura de Impacto Lateral	Tamaño B	Sí
f. Miembro de Impacto Lateral Superior Curvo / Múltiple	Tamaño D	Sí
g. Aro Principal	Tamaño A	No
h. Refuerzo del Aro Principal	Tamaño B	No
i. Soportes del Refuerzo del Aro Principal	Tamaño C	Sí
j. Fijación del Arnés de Sujeción del Conductor	Tamaño B	Sí
k. Barra de Montaje del Arnés de Hombro	Tamaño A	No
l. Refuerzo de la Barra de Montaje del Arnés de Hombro	Tamaño C	Sí
m. Montaje y Protección del Acumulador	Tamaño B	Sí
n. Protección de Componentes	Tamaño C	Sí
o. Tubería Estructural	Tamaño C	Sí

Fuente: Fórmula SAE

El tubo seleccionado debe contar con los 4 requisitos mínimos por cada tamaño especificado tal como se indica en la Tabla 2:

Tabla 2

Requisitos Mínimos Recomendados por FSAE

Tubo	Momento Mínimo de Inercia del Área	Área Mínima de la Sección Transversal	Diámetro Exterior Mínimo o Ancho Cuadrado	Espesor Mínimo de Pared	Tamaños de Ejemplo de Tubo Redondo
a. Tamaño A	11320 mm ⁴	173 mm ²	25.0 mm	2.0 mm	1.0" x 0.095" / 25 x 2.5 mm
b. Tamaño B	8509 mm ⁴	114 mm ²	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.065" / 25.4 x 1.6 mm
c. Tamaño C	6695 mm ⁴	91 mm ²	25.0 mm	1.2 mm	1.0" x 0.049" / 25.4 x 1.2 mm
d. Tamaño D	18015 mm ⁴	126 mm ²	35.0 mm	1.2 mm	1.375" x 0.049" / 35 x 1.2 mm

Fuente: Fórmula SAE

Las propiedades de cualquier material de acero deben presentar las características mencionadas en la Tabla 3:

Tabla 3

Propiedades que deben Presentar los Materiales del Chasis

Tipo de Propiedad	Propiedad	Valor
a. Propiedades No Soldadas (para cálculos de material continuo):	Módulo de Young (E)	200 GPa (29,000 ksi)
	Límite Elástico (Sy)	305 MPa (44.2 ksi)
	Resistencia Última (Su)	365 MPa (52.9 ksi)
b. Propiedades Soldadas (para material discontinuo, como cálculos de uniones):	Límite Elástico (Sy)	180 MPa (26 ksi)
	Resistencia Última (Su)	300 MPa (43.5 ksi)

Fuente: Fórmula SAE

2.7 Selección de Material

La normativa FSAE establece como referencia mínima el uso de materiales estructurales de acero como el AISI 1018 o el 1020, los cuales presentan propiedades mecánicas específicas para la competencia en cuanto a: límite elástico, la resistencia a la tracción y la

ductilidad. Sin embargo cabe mencionar que en el mercado ecuatoriano, materiales como el AISI 1018 o el 1020 no se comercializan con garantía de certificación estructural como en países desarrollados, por ende, su adquisición implica procesos de importación lo que eleva los costos finales del proyecto.

En el mercado Ecuatoriano podemos encontrar tubos redondos con diferentes propiedades físicas y mecánicas que suelen usarse para el diseño de diferentes tipos de estructuras, en nuestro caso se planteó el uso de un tubo ASTM A500 Grado C que se puede encontrar en cualquier ferretería de construcción y que cuenta con las propiedades físicas y mecánicas que exige la regulación FSAE para la estructura que se va a usar para la competencia, en la tabla 4 se evidencia que el material empleado cumple con los requisitos para la competencia.

Tabla 4

Comparación de requisitos FSAE con el Acero ASTM A500 Grado C

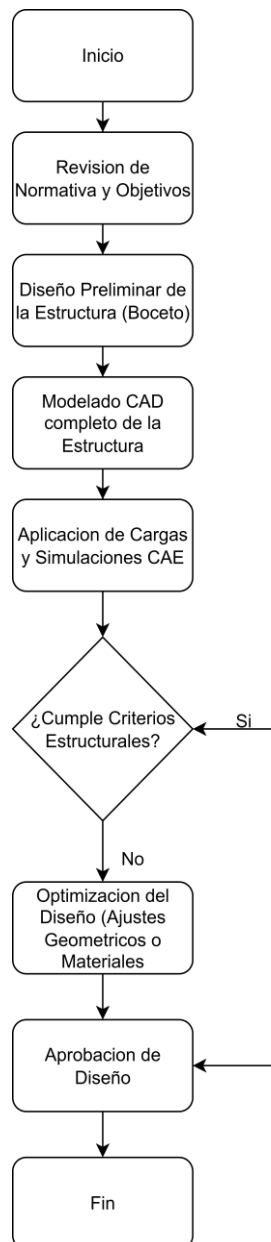
Propiedad	Requisito FSAE 2025	ASTM A500 Grado C
Módulo de Young (E)	200 GPa (29,000 ksi)	200 GPa (29,000 ksi)
Límite de elasticidad (Sy) No soldado	305 MPa (44.2 ksi)	345-380 MPa (50-55 ksi)
Resistencia a tracción (Su) No soldado	365 MPa (52.9 ksi)	427-482 MPa (62-70 ksi)
Límite de elasticidad (Sy) Soldado	180 MPa (26 ksi)	~275-300 MPa (40-43 ksi)
Resistencia a tracción (Su) Soldado	300 MPa (43.5 ksi)	~380-420 MPa (55-61 ksi)

Fuente: Formula SAE

Capítulo III

Metodología

A continuación, se presenta un diagrama de flujo que resume las etapas del desarrollo y diseño de la estructura del chasis tipo Space Frame.



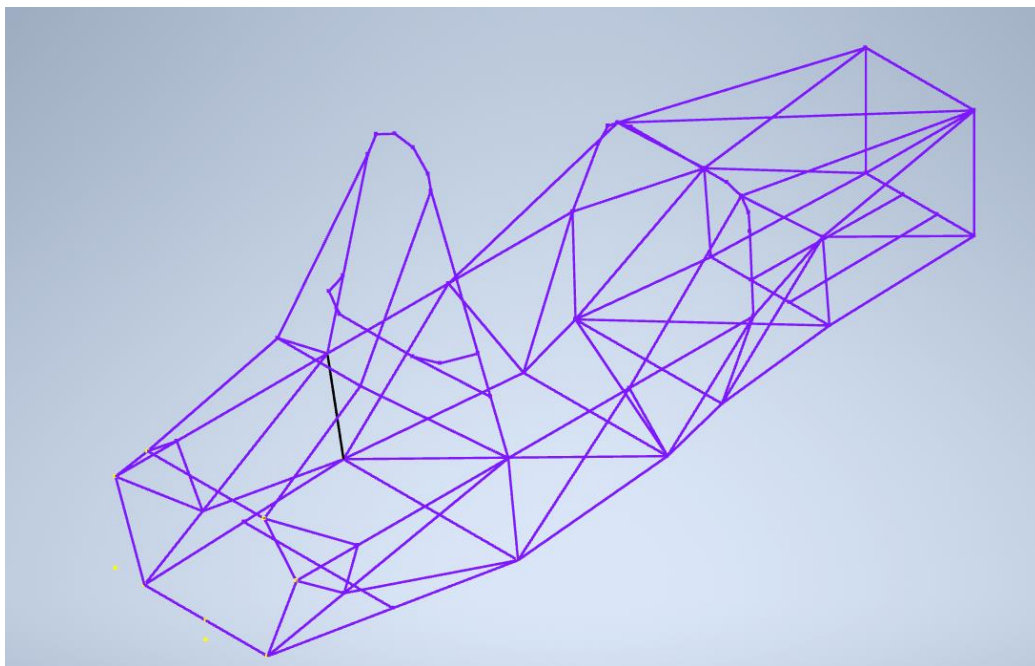
3.1 Boceto

Para dar inicio al desarrollo estructural del chasis, se procedió a la elaboración del diseño preliminar a través de un boceto digital utilizando el software Autodesk Inventor 2024

Student tal como se muestra en la figura 8. Este proceso se fundamentó en las dimensiones mínimas exigidas por el reglamento de la competencia Fórmula SAE, así como en las recomendaciones técnicas estipuladas en la normativa vigente particularmente en las zonas: Main Hoop, Front Hoop, los miembros laterales de impacto, y las zonas de resguardo ergonómico para un piloto correspondiente al percentil 95. El resto de la estructura se diseño considerando un promedio de espacio que puede ocupar el resto de los componentes, como baterías, motor y el resto de los componentes ya que la normativa FSAE no establece una medida a considerar en estas zonas.

Figura 8

Vista Superior Posterior del Boceto

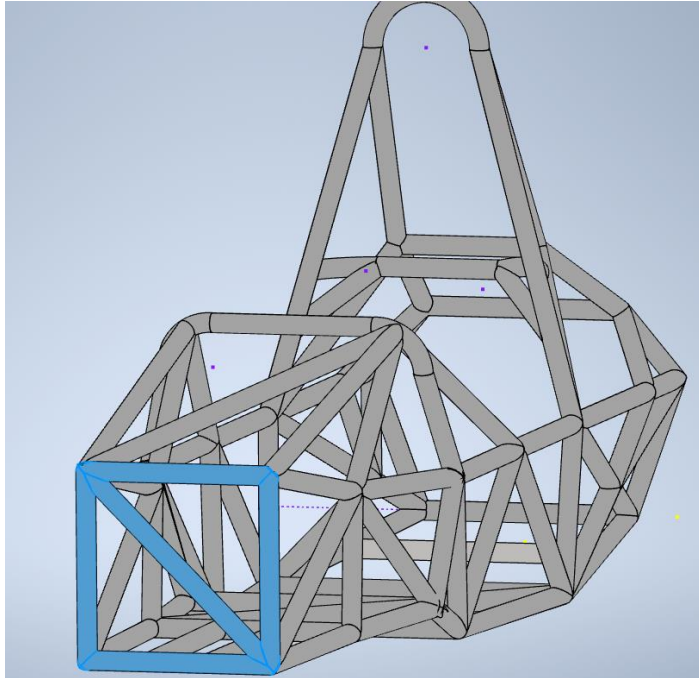


El boceto fue diseñado en tres dimensiones para definir el contorno de la estructura, guiándose a través de los ejes x,y,z aunque previamente se diseñó la base en un plano 2D ya que facilita tomar una guía usando los ejes x,y para luego haciendo uso de un tercer plano continuar con toda la geometría logrando así una correcta distribución espacial de los elementos estructurales y facilitar posteriores análisis CAD y CAE orientados a la optimización del diseño.

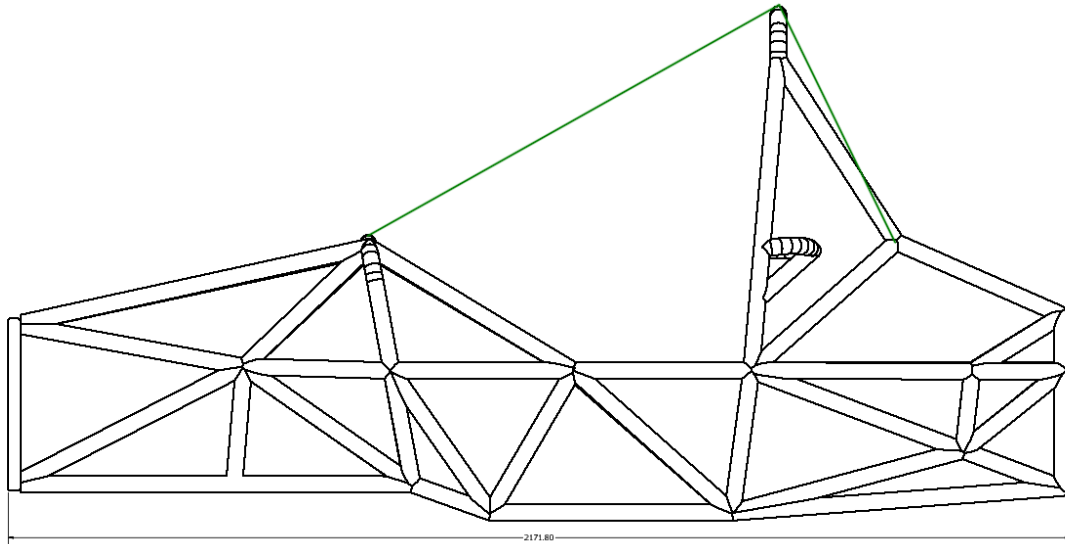
3.2 Diseño Estructural

En la cinta de opciones del programa de Autodesk Inventor, en la opción de Diseño, se seleccionó la opción de Insertar Estructura, una herramienta muy útil para definir el cuerpo de una estructura a partir del diseño de un boceto ya que permite diseñar tomando en cuenta la dirección del boceto.

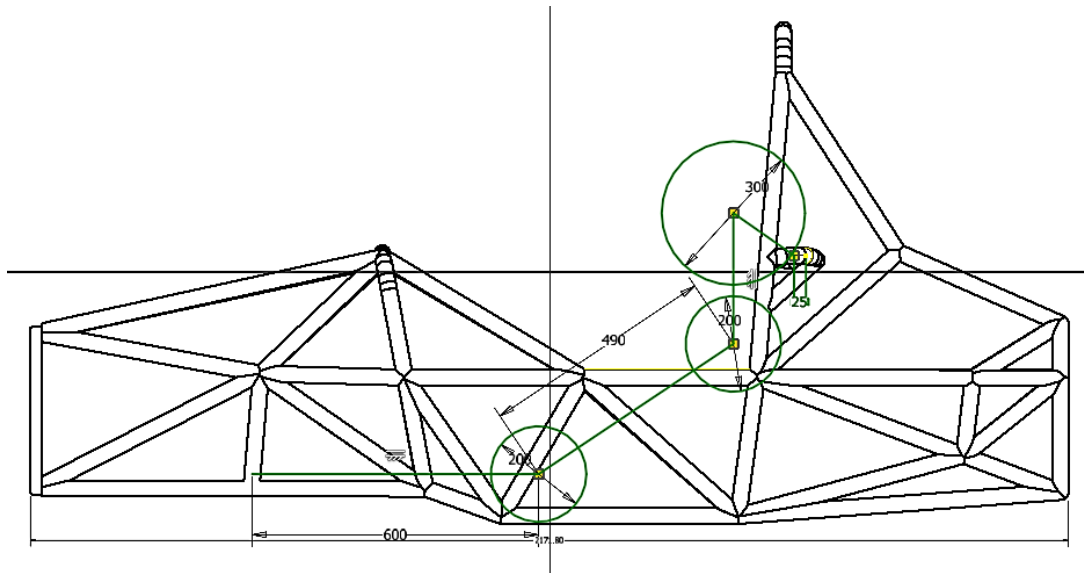
La estructura se modeló utilizando tubos redondos con 25.4 mm de diámetro exterior que es el requisito mínimo solicitado por la normativa FSAE y 2.79 mm de espesor de pared, una medida preconfigurada en el programa de Autodesk Inventor y que a la vez es un espesor de pared que es comúnmente empleado en diversas aplicaciones, además está por encima de la medida solicitada por la normativa FSAE incluida en la tabla 2 de este documento, con esta configuración se está cumpliendo con los requisitos mínimos establecidos por el reglamento. Adicionalmente, en la zona frontal del chasis se emplearon tubos redondos para crear una geometría cuadrada, con una base de 350 mm de base por 350 mm de altura tal como se muestra en la figura 9, esto con el objetivo de facilitar uniones estructurales y mejorar la rigidez frontal ante un eventual choque frontal.

Figura 9*Mamparo Frontal*

Se diseñó también el arco de protección antivuelco tal como se observa en la línea de color verde de la figura 10, cumpliendo así con el requisito de la norma, así mismo en el diseño de uniones de la estructura se diseñó de tal manera que haya triangulaciones y evitar fallos en nuestra estructura que pueda afectar la seguridad del piloto. La longitud total de nuestra estructura fue de 2,170 mm.

Figura 10*Vista Lateral Izquierda - Protección Antivuelco*

En primer lugar, se colocó un círculo de 200 mm en la sección inferior, justo bajo la zona donde iría el asiento, cuidando que la distancia entre el centro de dicho círculo y la superficie trasera del chasis no fuera menor a 915 mm. Después, se situó otro círculo de 200 mm a la altura aproximada de los hombros, coincidiendo con la posición del respaldo. Por último, el círculo superior de 300 mm se fijó a una distancia máxima de 25 mm del reposacabezas, en la zona en la que habitualmente quedaría la parte posterior del casco del piloto, tal como se ilustra en la figura 11.

Figura 11*Silhueta del Piloto*

3.3 Consideraciones de Peso

Para realizar la simulación de cargas, se tomó en cuenta el peso promedio de los principales componentes del vehículo, recopilando información de proveedores locales en Ecuador y referencias comerciales. Se incluyó un paquete de baterías de 5 kWh nominales que puede ser proporcionado por Rising Sun y con un peso aproximado de 33 kg, mismo que se puede validar en su catálogo web, no obstante este valor puede variar de acuerdo a la configuración de baterías y su capacidad (Rising Sun, 2025).

Un motor DC ME0709 con su controlador, con un peso de 16.5 kg, que puede ser adquirido a través de EnergyEV Ecuador u otro distribuidor, el peso mencionado también se puede validar en el sitio web del distribuidor (EnergyEV, 2025).

Asimismo, se estimó el peso del sistema de frenos (pinzas y discos) en 8 kg y el líquido de frenos en 0.5 kg que fácilmente pueden ser adquiridos en distribuidores automotrices locales. La transmisión, compuesta por ejes y diferencial, fue estimada con un peso de 5 kg

fabricada por cualquier taller de mecánica o CNC. También se contempló la pedalera junto con el cilindro maestro, con un peso aproximado de 1.5 kg

Se añadió el peso del cableado con sensores, con un peso promedio de 2 kg y se contempló los soportes y herrajes de montaje fabricados localmente en talleres CNC o torno, con un peso de 3 kg. Finalmente, para la simulación, se estimó el peso del piloto en 70 kg, alcanzando un peso total de 165.5 kg que sirvió como base para definir las condiciones de carga en el análisis estructural del vehículo tal como se detalla en la tabla 5.

Tabla 5

Cargas Estimadas sobre la Estructura

Canti- dad	Componente	Proveedor en Ecuador	Peso (kg)
1	Paquete de baterías de 5 kwh nominales	Rising Sun	33
1	Motor DC ME0709 + controlador	EnergyEV Ecuador	16.5
1	Sistema de frenos (pinzas + discos)	Distribuidores automotrices	8.0
1	Líquido de frenos	Distribuidores automotrices	0.5
1	Transmisión (ejes + diferencial)	Mecánica Avanzada CNC	5.0
1	Pedalera + cilindro maestro	Distribuidores automotrices	1.5
1	Cableado + sensores	Distribuidores automotrices	2.0
1	Soportes / herrajes de montaje	Fabricación local en talleres CNC o torno	3.0
1	Piloto	N/A	70
Total			165.5

3.4 Aplicación de Restricciones

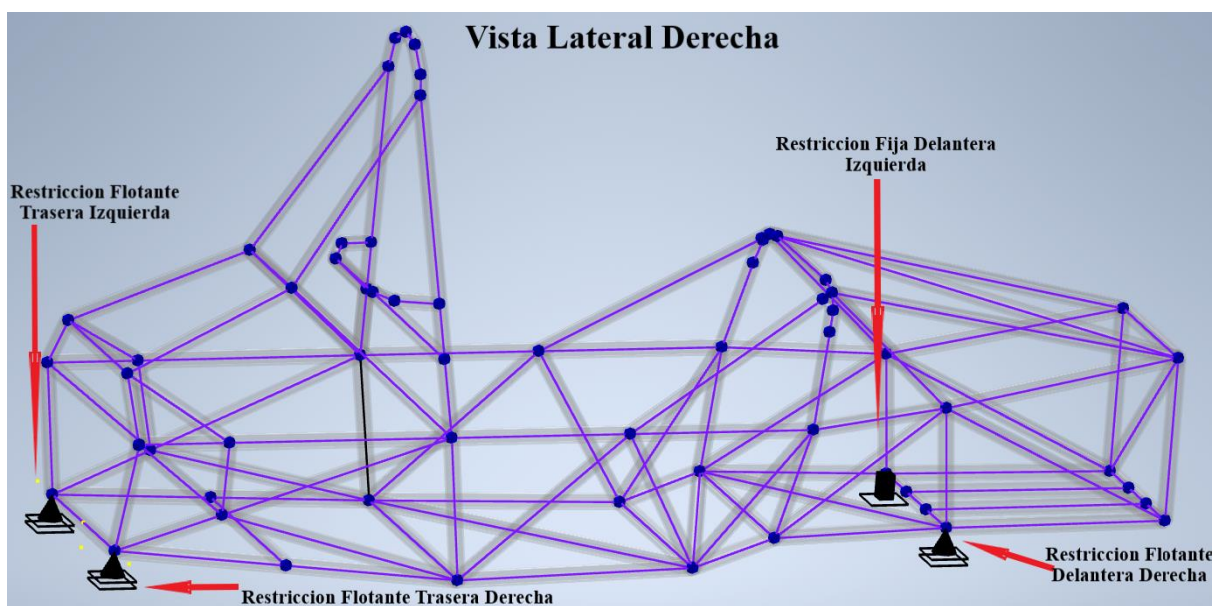
Cuando se realiza la simulación de una estructura en FEA, es necesario evitar un sistema hiperestático, ya que esto puede generar reacciones internas no reales y por ende errores numéricos por este motivo se restringe completamente un solo nodo para eliminar los seis grados de libertad del sistema que son: 3 traslaciones y 3 rotaciones (x,y,z), y se colocan restricciones flotantes en los otros puntos de contacto con el suelo para estabilizar el modelo

sin generar incompatibilidades durante la simulación ya que la estructura dentro del programa de simulación se encuentra en un entorno espacial, por ende necesita puntos de apoyo en los que fijen a la estructura y se puedan aplicar cargas para su posterior análisis de comportamiento. (Daryl L. , 2015)

Las restricciones de la estructura se colocaron 4, una en cada parte donde se prevé que van a estar ubicados los neumáticos. Del lado izquierdo delantero se añadió una restricción fija, y en la otra parte delantera se añadió una restricción flotante al igual que en los 2 lados traseros de la estructura tal como se aprecia en la figura 12.

Figura 12

Aplicación de Restricciones



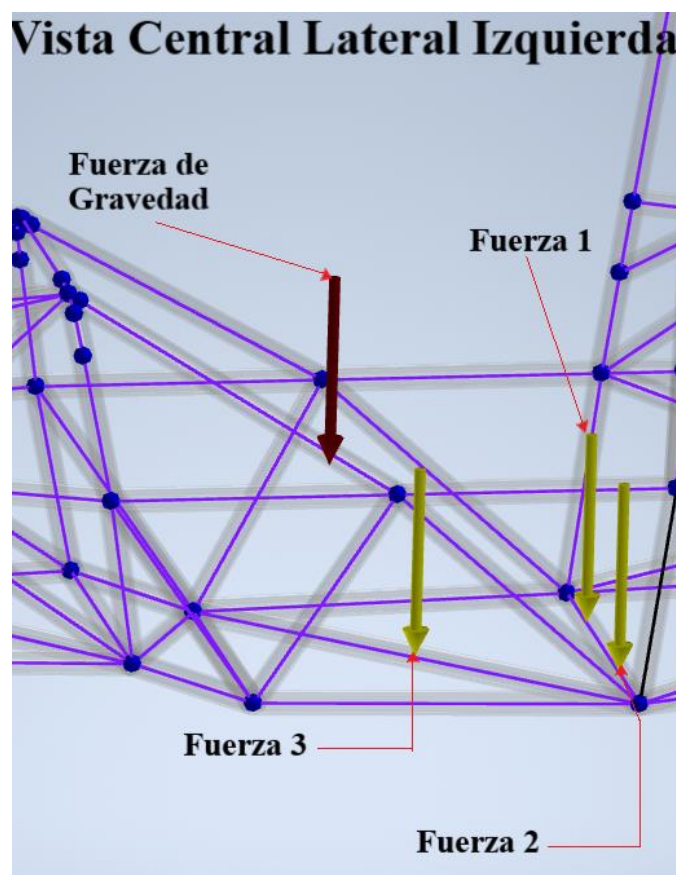
3.5 Aplicación de Cargas

Para realizar la simulación estructural, se aplicó el peso del piloto de 70 kg (equivalente a 686.7 N) distribuido en tres puntos de apoyo (Fuerza 1, 2 y 3) que representaron las zonas principales de contacto con el chasis. Se asignaron dos fuerzas puntuales (Fuerza 1 y 2) sobre la línea trasera del asiento, aplicando 240 N en cada uno como carga vertical, mientras que en la tercera fuerza (Fuerza 3) sobre la línea diagonal correspondiente al área donde se desplaza

las piernas del conductor se aplicó una carga de 206 N, logrando así representar de manera realista la distribución del peso del conductor sobre la estructura del vehículo como se muestra en la figura 13. Cabe destacar que los dos puntos de apoyo de 240 N corresponden al 70% ($240\text{ N} + 240\text{ N} = 480\text{ N}$) del peso del conductor de forma vertical, dado a que se concentra el mayor peso del piloto y el 30% restante son los 206 N que representan el peso de las piernas del piloto. Los puntos que simulan el peso del conductor están de color amarillo y la gravedad (Fuerza de Gravedad) están de color rojo.

Figura 13

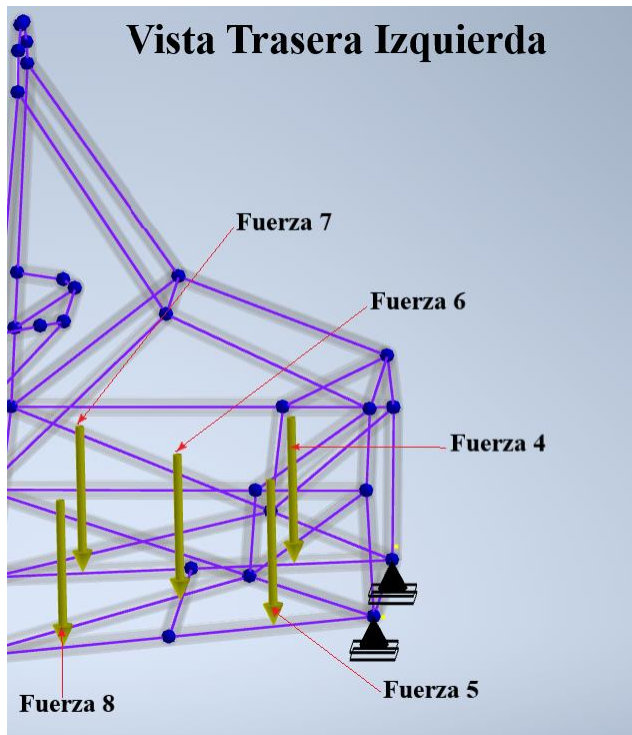
Peso del Conductor y Gravedad



El peso correspondiente al conjunto del paquete de baterías junto con el motor alcanzó un total de 49.5 kg lo que equivale a una carga aproximada de 485.595 N aplicada sobre la estructura del chasis. Esta carga al tratarse de uno de los elementos más pesados del vehículo

fue distribuida con el fin de garantizar una correcta transmisión de las fuerzas hacia la estructura sin generar concentraciones de esfuerzos que puedan comprometer su integridad o rigidez en un solo punto. Ésta carga se dividió en cinco puntos de apoyo identificados en la simulación como Fuerza 4, 5, 6, 7 y 8. A cada uno de estos puntos se le asignó un valor igual de 97.119 N. Estos puntos fueron ubicados de manera uniforme sobre tres tubos principales que actúan como soporte directo para estos componentes. Esta distribución permite que las cargas sean distribuidas de forma homogénea y además asegura que los tubos trabajen de manera conjunta para evitar deformaciones localizadas o esfuerzos innecesarios que pudieran afectar esa zona.

En la figura 14 se puede apreciar cómo estos cinco puntos de color amarillo representan la ubicación exacta donde el peso fue aplicado de forma equitativa sobre la estructura. Esta metodología de distribución contribuye a mantener la estabilidad del conjunto y garantiza que las cargas estén repartidas de manera racional en el vehículo de tal modo que se asemejen a las condiciones reales de uso.

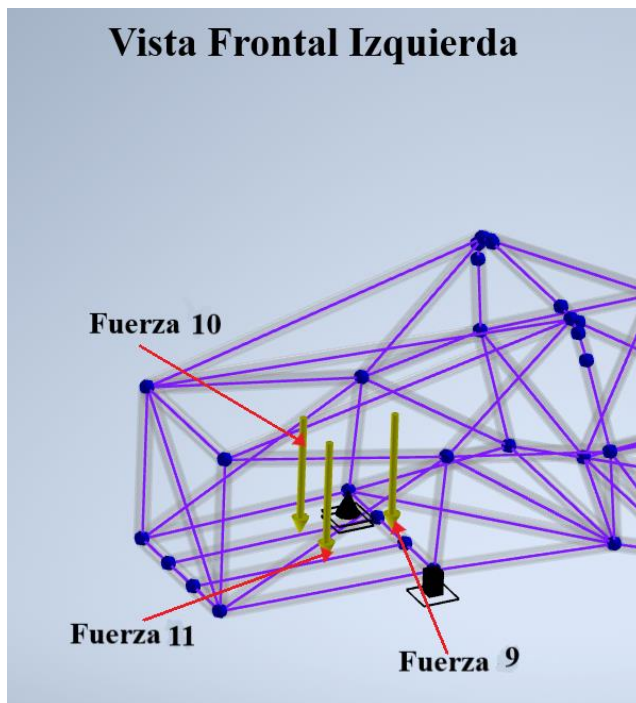
Figura 14*Distribución de Peso del Paquete de Batería y Motor*

El resto de los componentes considerados en la simulación como el sistema de frenos, el cableado eléctrico, la transmisión, los pedales, los soportes y el líquido de frenos sumaron en conjunto un peso aproximado de 20 kg lo que equivale a una carga de 196.2 N aplicados sobre la estructura. Estos elementos, aunque no representan grandes cargas de manera individual en conjunto aportan un peso significativo que debe ser tomado en cuenta especialmente por su ubicación en la parte delantera del chasis, donde influyen directamente en la distribución del peso total del vehículo. Éste peso se distribuyó de forma equitativa en tres puntos asignando a cada uno un valor de 65.4 N (identificados como Fuerza 6, 7 y 8 en la simulación). Esta distribución fue planteada estratégicamente para asegurar que las cargas se repartan de manera uniforme sobre los tubos estructurales que actúan como soporte en la zona frontal del vehículo minimizando así cualquier concentración de esfuerzos que pudiera comprometer la integridad estructural en esa zona.

En la figura 15 se puede observar con claridad la ubicación de estos puntos de carga donde se evidencia cómo fueron aplicados de forma equitativa sobre los tubos correspondientes. Esta distribución contribuye a mantener un equilibrio adecuado entre la parte delantera y trasera del chasis cuyo aspecto es fundamental para asegurar una correcta distribución de masas y no llegue a afectar el equilibrio.

Figura 15

Peso de Pedales y Dirección



Capítulo IV

Simulación y Análisis de Resultados

4.1 Primera Simulación

Los valores proporcionados a continuación son proporcionados por el mismo programa que realiza los respectivos cálculos en base a los parámetros establecidos y al material elegido a la estructura para su simulación.

4.1.1 *Propiedades de la Estructura*

Luego de haber diseñado el modelo y la estructura y a su vez aplicado el material correspondiente a la estructura (Acero ASTM A500 Grado C), el programa de simulación Autodesk Inventor automáticamente realizó el cálculo de las propiedades físicas de la estructura tal como se puede apreciar en la tabla 6 lo que nos permite tener conocimiento para el análisis completo de la estructura en base a sus propiedades.

Tabla 6

Propiedades Físicas de la Estructura con Acero ASTM A500 Grado C

Propiedades Físicas	
Masa	91.620 kg
Área	69833.589 mm ²
Volumen	11671.282 mm ³
Centro de gravedad	x=-273.635 mm
	y=-316.417 mm
	z=34.091 mm

4.1.2 Fuerza y Pares de Reacción en Restricciones

En la figura 16 se detallan las respectivas magnitudes de fuerzas calculadas por el programa Autodesk Inventor en los correspondientes ejes (X, Y, Z), los cuales son producto de las cargas o peso que se aplicó en diferentes zonas del vehículo, cabe destacar que las restricciones del vehículo actúan como punto de apoyo de la estructura y que las restricciones fueron colocadas en el punto donde van a ir las ruedas del vehículo. La restricción izquierda delantera fue definida como una restricción fija, lo que significa que bloquea todos los grados de libertad siendo: traslación y rotación en los tres ejes (X, Y, Z), mientras las otras 3 restricciones como flotantes bloqueadas, es decir, restringen parcialmente el movimiento, solo en traslación, pero permiten que el nodo gire (no restringen los momentos).

Como resultado, se observó que solo la restricción Izquierda Delantera presentó momentos de reacción, mientras que las demás únicamente mostraron fuerzas normales. Esto se debe a que, en un entorno computacional de análisis por elementos finitos, únicamente los apoyos que impiden la rotación generan pares de reacción. Los apoyos flotantes, al permitir la rotación libre del nodo, no pueden absorber ni devolver momentos al sistema, por lo que no generan datos en ese campo.

En la práctica real, los neumáticos y la suspensión de un vehículo no se encuentran completamente fijados el chasis al terreno, muy por el contrario, permiten cierto grado de rotación y flexión local, y no actúan como apoyos rígidamente empotrados, por ende, solo se aplicó una restricción fija para el análisis y evitar errores en la simulación ya que si se hubiera asignado todas las restricciones fijas habría representado un sistema más rígido de lo que ocurre en la realidad. En cambio, si todas fueran flotantes, el modelo no tendría cómo equilibrarse correctamente.

Figura 16*Fuerza de Reacción y Pares de Reacción*

Nombre de la Restricción	Fuerza de Reacción (N)		Pares de Reacción (N mm)	
	Magnitud	Componentes (Fx, Fy, Fz)	Magnitud	Componentes (Mx, My, Mz)
Restricción Izq-Trasera	555.008	-0.000	0.000	-0.000
		555.008		0.000
		0.000		0.000
Restricción Der-Trasera	544.551	-0.000	0.000	0.000
		544.551		0.000
		-0.000		0.000
Restricción Izq-Delantera	615.501	-0.000	12714.570	-6723.308
		615.501		-0.000
		0.000		10791.544
Restricción Der-Delantera	547.786	0.000	0.000	0.000
		547.786		0.000
		0.000		-0.000

4.1.3 Resumen de Resultados Estáticos

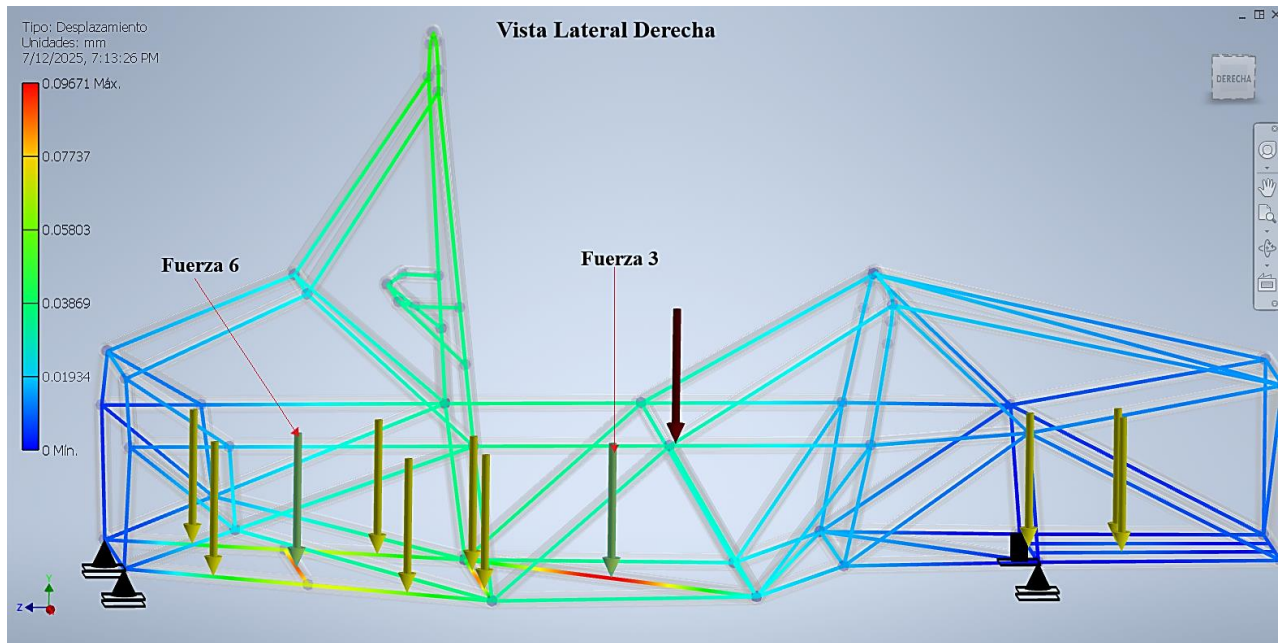
En la figura 17 se presentan los resultados estáticos obtenidos durante la simulación detallando los valores generados por el software Autodesk Inventor tras aplicar las condiciones de carga y restricciones previamente definidas en el modelo. Estos resultados incluyen las deformaciones máximas y mínimas en distintos puntos de la estructura al igual que la distribución de las fuerzas internas y las zonas donde se concentran los esfuerzos mayores.

Figura 17*Resultados Estáticos*

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento (mm)		0.000	0.097
Fuerzas (N)	Fx	-250.365	231.353
	Fy	-133.969	130.155
	Fz	-623.524	845.653
Momentos (N mm)	Mx	-16943.948	11256.928
	My	-19694.510	22793.006
	Mz	-2669.240	2194.143
Tensiones normales (MPa)	Smax	-2.285	12.139
	Smin	-12.255	1.799
	Smax(Mx)	0.000	7.716
	Smin(Mx)	-7.716	-0.000
	Smax(My)	0.000	10.379
	Smin(My)	-10.379	-0.000
	Saxial	-2.643	1.949
Tensión de corte (MPa)	Tx	-1.434	1.552
	Ty	-0.807	0.830
Tensiones de torsión (MPa)	T	-0.500	0.608

Los datos de desplazamiento que se muestran en la figura 18 indican que toda la estructura se mueve menos de una décima de milímetro por ende hay una rigidez global muy alta y por tanto no hay riesgo de flexiones visibles ni interferencia con otros sistemas.

La Fuerza 3 es un punto donde de las 3 fuerzas del peso del piloto distribuidas de igual magnitud, es el punto donde presenta mayor desplazamiento de 0.097 mm al igual que la Fuerza 6, punto central donde se encuentra distribuido el peso del motor y paquete de batería con un valor de 0.085 mm. La parte trasera en el contorno donde se encuentran distribuidas las fuerzas del motor y el paquete de batería presentan un leve desplazamiento de 0.062 mm al igual que la zona de impacto lateral derecho e izquierdo en cambio la zona del arco principal tiene un pequeño desplazamiento de 0.058 mm.

Figura 18*Zonas de Desplazamiento*

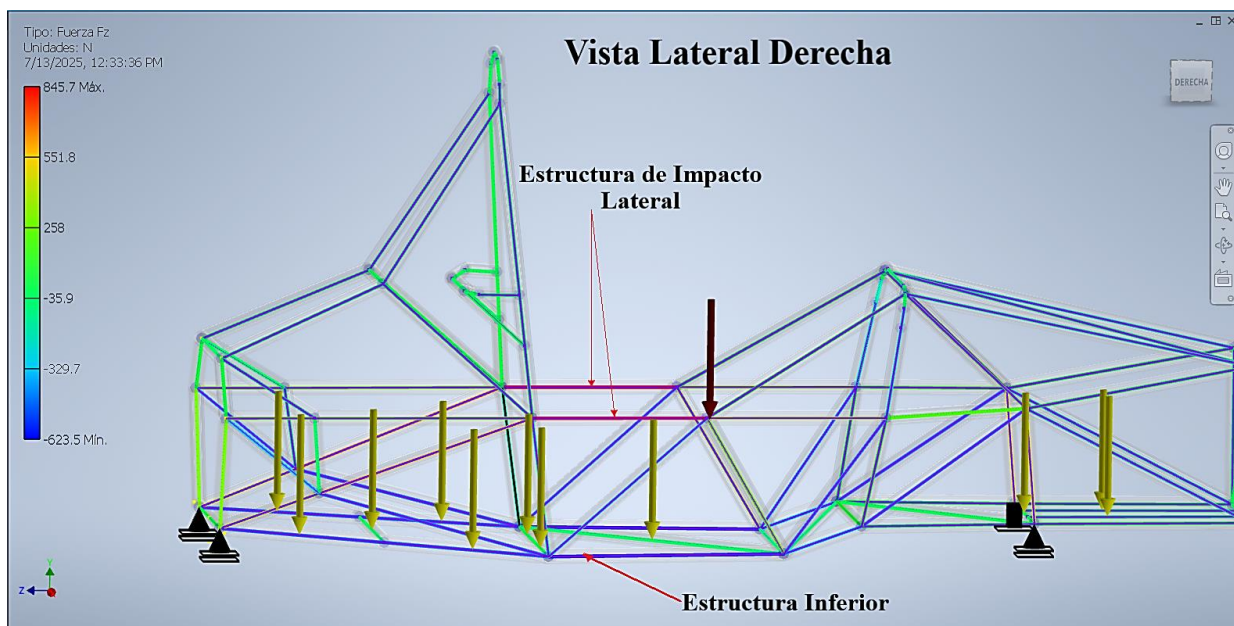
En las fuerzas internas obtenidas durante la simulación se identificaron las componentes máximas de fuerza en los tres ejes principales. En el eje X (F_x) las fuerzas alcanzaron valores de ± 231 N mientras que en el eje Y (F_y) oscilaron alrededor de ± 130 N. En cambio, en el eje Z (F_z) que corresponde a las cargas verticales los valores fueron de -624 N en las zonas inferiores de la estructura y de hasta $+846$ N en la zona de la estructura de impacto lateral. Estos resultados se pueden apreciar claramente en la figura 19 donde se evidencia cómo las cargas se distribuyen a lo largo de la estructura y en qué zonas tienden a concentrarse los esfuerzos.

La carga negativa de -624 N se encuentra en la parte inferior de la estructura lo que indica que esta zona soporta gran parte del peso total del conjunto. Por otro lado, la carga positiva de 846 N recae sobre la estructura de impacto lateral trasladándose además hacia algunos de los miembros que conforman la estructura trasera lo que evidencia que esas zonas fueron correctamente diseñadas para absorber y distribuir las cargas de manera segura.

En cuanto a las acciones longitudinales (F_x) y laterales (F_y) fueron considerablemente menores en comparación con las cargas verticales. En este caso las condiciones de carga simuladas y las solicitaciones más relevantes fueron las generadas por el peso del conjunto y no por efectos dinámicos como frenadas bruscas, aceleraciones extremas o maniobras violentas que en este caso no fueron contempladas al ser una simulación estática por ende las fuerzas en los ejes X e Y no representan una influencia determinante en el comportamiento estructural bajo las condiciones estáticas analizadas.

Figura 19

Carga Vertical F_z



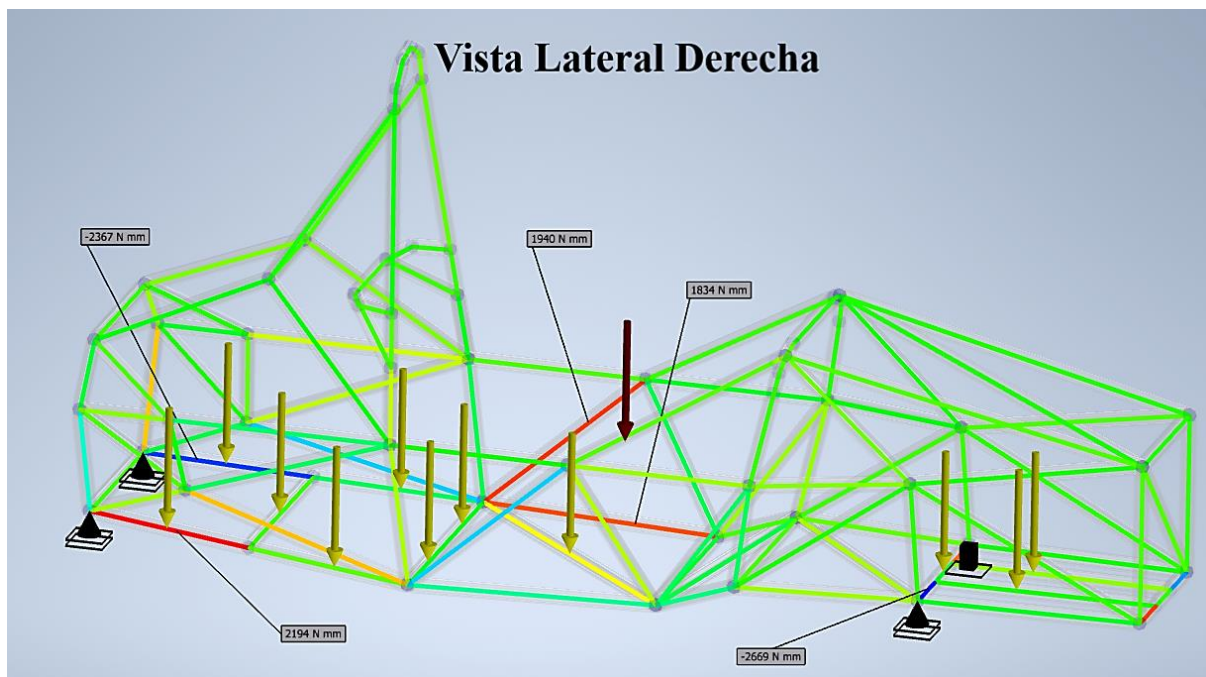
En cuanto a las tensiones normales absolutas, la tensión máxima de tracción fue $S_{max} = 12.139 \text{ MPa}$ y la máxima de compresión $S_{min} = -12.255 \text{ MPa}$. Ambos valores representan menos del 4 % del límite elástico del acero ASTM A500 que es de 344 MPa, proporcionando un margen de seguridad holgado frente a la plastificación.

Por otro lado, los momentos máximos se registraron en $M_y = + 22.793 \text{ kN}\cdot\text{mm}$ y $M_x = -16.944 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, confirmando que la flexión sobre el eje longitudinal del vehículo es la

solicitud más exigente. El momento torsional global M_z alcanzó solo $\pm 2.194 \text{ kN}\cdot\text{mm}$, evidenciando que la triangulación del bastidor limita eficazmente la torsión total de la estructura tal como se muestra en la figura 20.

Figura 20

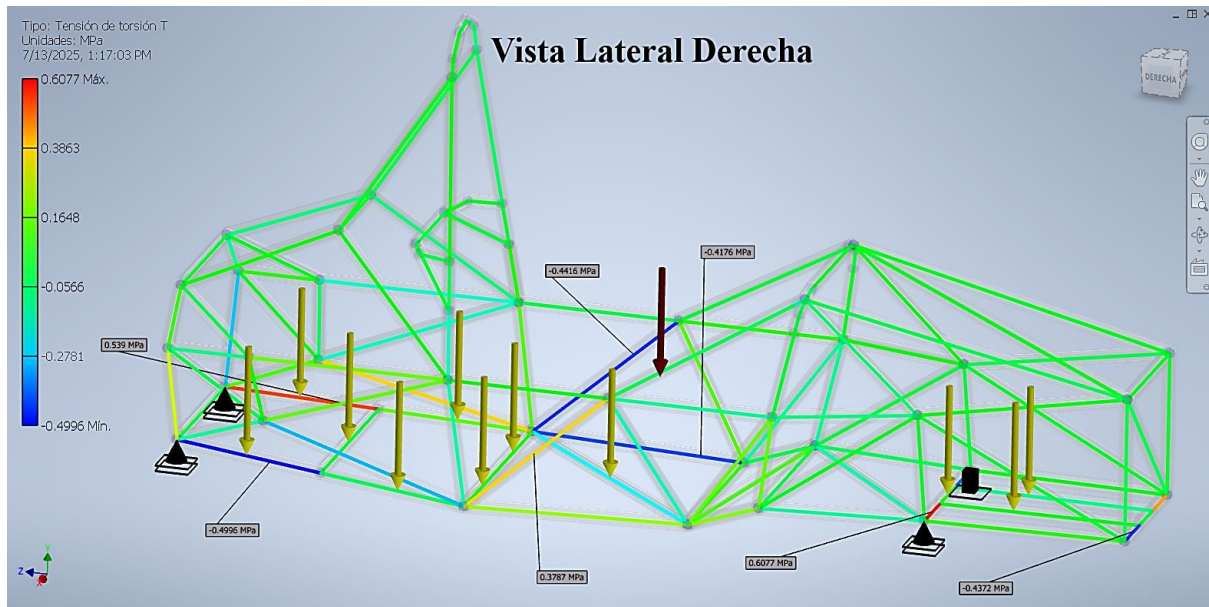
Momento Torsional Global M_z



La componente axial osciló entre -2.643 MPa (compresión) y $+1.949 \text{ MPa}$ (tracción). Estos niveles son muy bajos, lo que indica que el peso se distribuye de forma efectiva a lo largo de los tubos sin generar columnas críticamente comprimidas.

En la figura 21 el valor extremo de la tensión de torsión fue $T = 0.608 \text{ MPa}$, confirmando que los efectos torsionales globales son mínimos gracias a la disposición geométrica y al uso de diagonales estructurales.

El valor de las tensiones de corte fue $T_x = 1.552 \text{ MPa}$ y $T_y = 0.830 \text{ MPa}$, ambas por debajo del 1 % de la resistencia cortante típica del material. La cizalladura no constituye un modo de falla significativo en este chasis bajo las cargas consideradas.

Figura 21*Tensión de Torsión*

En la tabla 6 el peso final de la estructura es de 91.620 kg lo que representa un peso excesivo en nuestra estructura para la competencia y afecta el rendimiento en pista, por ende, se procedió a usar un material con menor densidad como el aluminio para reducir considerablemente el peso.

4.2 Segunda Simulación

Para la segunda simulación se realizaron cambios en las propiedades del material para disminuir el peso final de la estructura manteniendo el mismo diseño y la geometría. El material seleccionado es el aluminio 6061 cuyas propiedades se acercan a los requisitos mínimos que pide la competencia FSAE, el tamaño de los tubos es igual que el anterior (25 mm de diámetro exterior y 3.302 mm de espesor) manteniendo así el mismo tamaño y dentro de los requisitos que pide la FSAE en la tabla 2.

4.2.1 Propiedades de la Estructura

Luego de cambiar acero por aluminio, la masa de nuestra estructura disminuyó considerablemente un 65.6 % dado que la densidad del aluminio es inferior que la del acero.

En la tabla 7 se puede apreciar que el área, el volumen y el centro de gravedad no tuvieron cambios debido a que es el mismo diseño y geometría del anterior análisis, por ende, se mantuvieron con los mismos valores.

Tabla 7

Propiedades de la Estructura con Aluminio 6061

Propiedades Físicas	
Masa	31.512 kg
Área	69833.589 mm ²
Volumen	11671.282 mm ³
Centro de gravedad	x=-273.635 mm
	y=-316.417 mm
	z=34.091 mm

4.2.2 Fuerza y Pares de Reacción en Restricciones

Los resultados obtenidos en las fuerzas de reacción en las restricciones, se observó que el mayor esfuerzo se concentró en la parte trasera izquierda de la estructura, con una fuerza de 494.36 N, mientras que la menor se registró en la restricción delantera derecha, con 330.93 N.

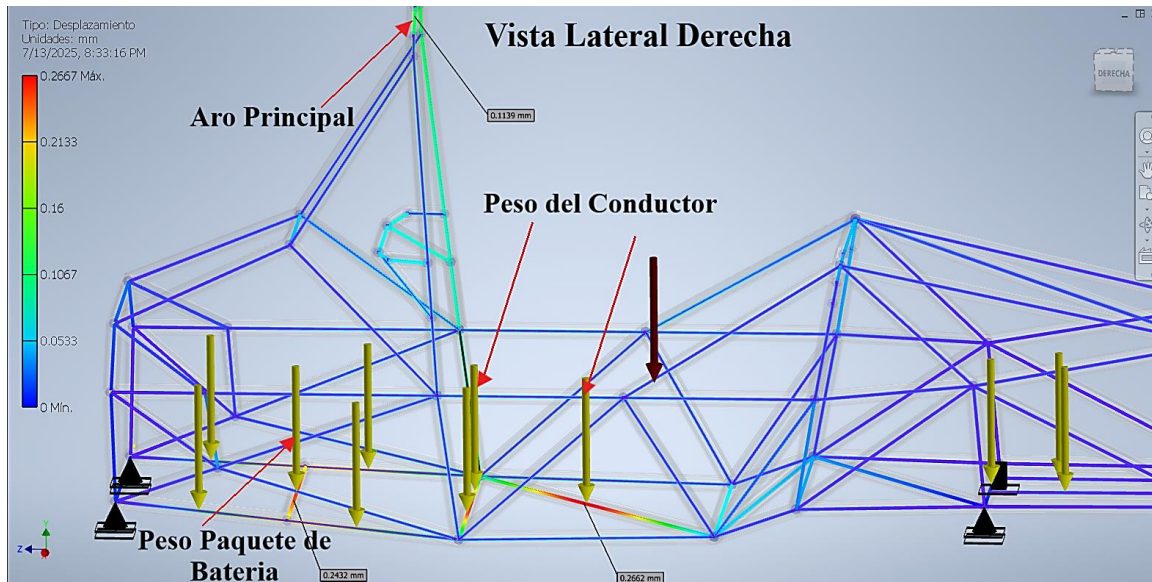
También se identificaron algunos momentos en la restricción delantera izquierda, donde se registró un momento en el eje Y de aproximadamente 9731.14 N·mm y en el eje Z de -5715.12 N·mm. En la figura 22 se evidencia que las demás restricciones no presentaron momentos relevantes por lo que indica que, aunque las reacciones son equilibradas, la estructura presenta ciertos momentos principalmente en la parte delantera, lo cual es normal por la ubicación de los puntos de carga y las condiciones de apoyo ya que la restricción izquierda delantera se encuentra fija para la respectiva simulación.

Figura 22*Fuerzas de Reacción y Pares de Reacción*

Nombre de la restricción	Fuerza de reacción (N)		Pares de reacción (N mm)	
	Magnitud	Componentes (Fx, Fy, Fz)	Magnitud	Componentes (Mx, My, Mz)
Restricción Izq-Trasera	494.361	-0.000	0.000	0.000
		494.361		0.000
		0.000		0.000
Restricción Der-Trasera	408.092	0.000	0.000	-0.000
		408.092		0.000
		-0.000		-0.000
Restricción Izq-Delantera	472.256	0.000	11285.289	-5715.117
		472.256		0.000
		-0.000		9731.145
Restricción Der-Delantera	330.938	0.000	0.000	-0.000
		330.938		0.000
		0.000		-0.000

4.2.3 Resumen de Resultados Estáticos

El resultado de la simulación usando como material el aluminio 6061 dio como resultado que la masa total de la estructura es de 31.512 kg. En cuanto a las zonas de desplazamiento de la figura 23, se obtuvo un valor máximo de 0.267 mm en la zona donde está ubicado el peso del conductor, lo cual demuestra que la estructura tiene una buena rigidez frente a las cargas aplicadas. En la parte trasera donde se encuentra ubicado el peso del paquete de batería presenta un ligero desplazamiento de 0.24 mm al igual que en la zona del arco principal con un valor de 0.113 mm de desplazamiento en esa zona.

Figura 23*Zonas de Mayor Desplazamiento*

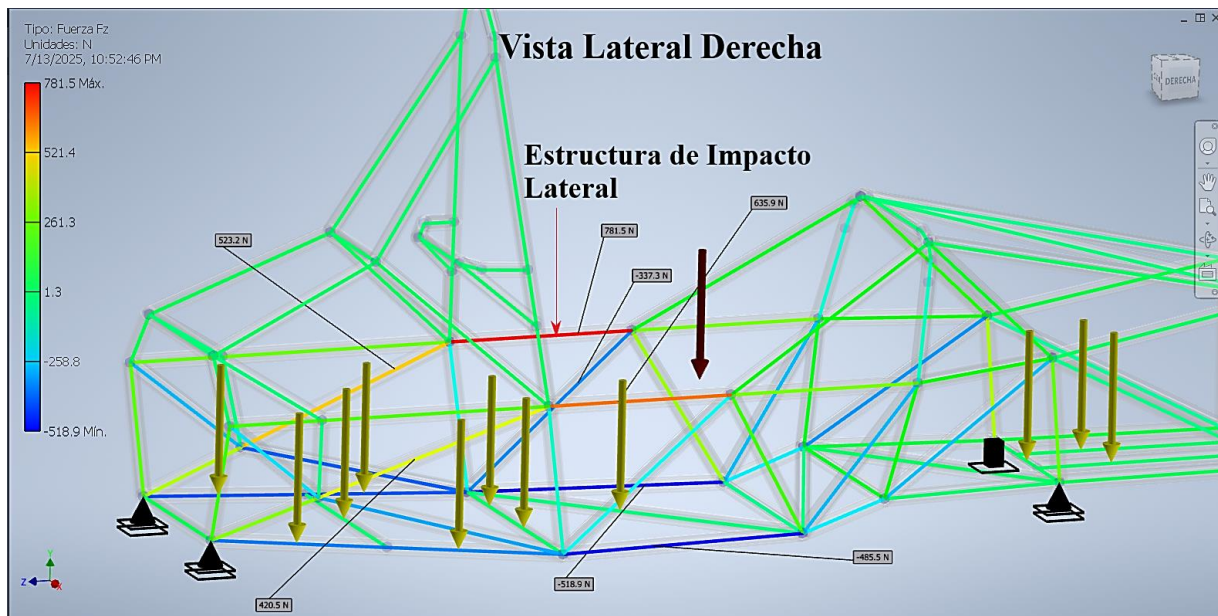
En cuanto a las fuerzas internas obtenidas durante la simulación las cuales se pueden observar detalladamente en la figura 24, se pudo comprobar que todos los valores se mantuvieron dentro de rangos bajos y por tanto no representan ningún tipo de riesgo para la integridad estructural del chasis ya que la distribución de las cargas a lo largo de la estructura fue adecuada y el diseño puede soportar las solicitaciones previstas.

La mayor fuerza interna registrada fue de 781.46 N en el eje Z localizada principalmente en la zona de la estructura de impacto lateral como se evidencia en la figura 24. Este resultado se debe a que en esa zona se concentran parte de las cargas derivadas del peso del paquete de baterías y del motor los cuales fueron posicionados estratégicamente en la parte trasera para mantener el equilibrio del vehículo. La fuerza mínima encontrada en este mismo eje fue de -518.88 N registrada en la zona inferior de la estructura. Esta diferencia entre las fuerzas máximas y mínimas en el eje Z soportan el peso del vehículo y sus componentes en sentido vertical.

Las fuerzas internas que actúan sobre los ejes X e Y presentaron rangos más reducidos. En el eje X las fuerzas variaron entre -212.22 N y 290.53 N mientras que en el eje Y los valores oscilaron entre -131.20 N y 135.12 N. Estos resultados se den al comportamiento natural de la estructura ante las condiciones de carga aplicadas en sentido vertical siendo menores los esfuerzos en los planos laterales y longitudinales.

Figura 24

Fuerzas Internas sobre la Estructura



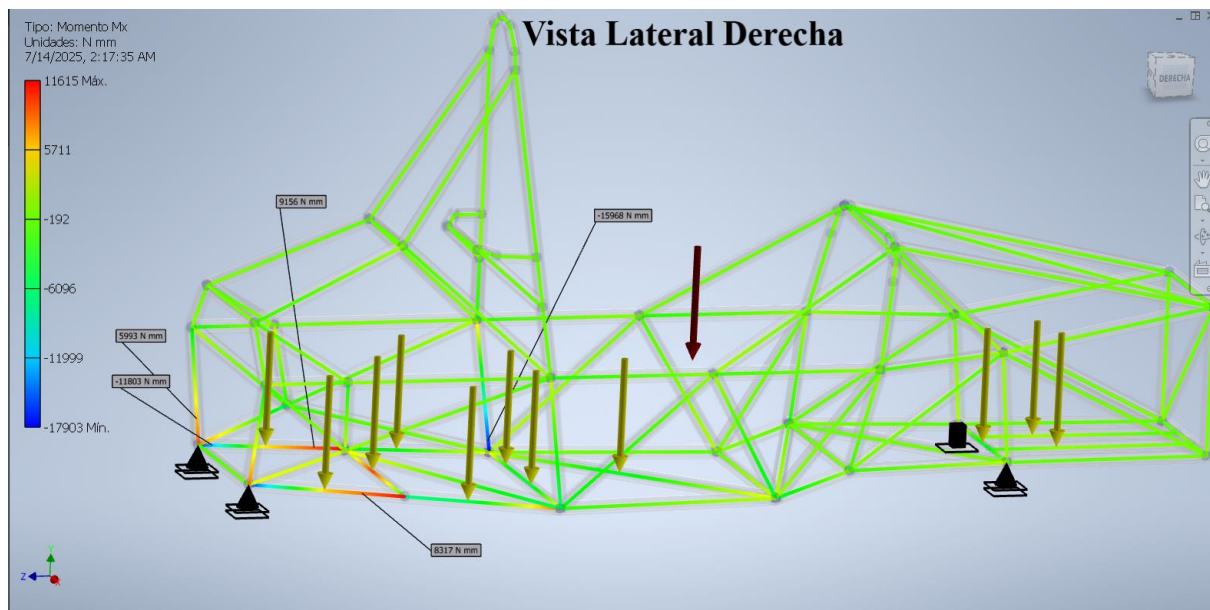
Respecto a los momentos internos generados en la estructura se pudo evidenciar que el mayor momento registrado se presentó alrededor del eje Y alcanzando un valor de 22,692.52 N·mm mientras que el menor momento en este mismo eje fue de -22,632.37 N·mm. Esta diferencia entre ambos extremos indica que el eje Y es el que concentra la mayor cantidad de esfuerzos lo cual es coherente con el tipo de cargas aplicadas ya que es el eje que recibe las mayores solicitaciones derivadas del peso del piloto y del conjunto de baterías y motor, ubicados en posiciones estratégicas que generan momentos considerables en esa dirección.

En el eje X por su parte los momentos oscilaron entre -17,902.79 N·mm y 11,614.61 N·mm tal como se puede apreciar en la figura 25. Estos valores también reflejan las

solicitaciones que recibe la estructura debido a la distribución de los componentes, aunque en menor proporción que en el eje Y puesto que el diseño del chasis y la ubicación de los elementos tienden a distribuir las cargas de forma más equilibrada en este plano.

Figura 25

Momentos en X



En cambio, en el eje Z los momentos fueron significativamente menores con un máximo de 2,234.88 N·mm y un mínimo de -2,299.07 N·mm. Esta diferencia tan reducida entre ambos valores confirma que las cargas en este eje no generan grandes esfuerzos de torsión o flexión sobre la estructura debido a que la triangulación y la geometría del chasis contribuyen a mantener la estabilidad y minimizar las deformaciones en este plano.

Figura 26*Resultados Estáticos*

Nombre		Mínimo	Máximo
Desplazamiento (mm)		0.000	0.267
Fuerzas (N)	Fx	-212.224	290.535
	Fy	-131.202	135.125
	Fz	-518.887	781.460
Momentos (N mm)	Mx	-17902.797	11614.617
	My	-22632.377	22692.526
	Mz	-2299.072	2234.886
Tensiones normales (MPa)	Smax	-2.189	12.670
	Smin	-12.687	1.455
	Smax(Mx)	0.000	8.152
	Smin(Mx)	-8.152	-0.000
	Smax(My)	0.000	10.333
	Smin(My)	-10.333	-0.000
	Saxial	-2.442	1.622
Tensión de corte (MPa)	Tx	-1.801	1.316
	Ty	-0.838	0.813
Tensiones de torsión (MPa)	T	-0.509	0.523

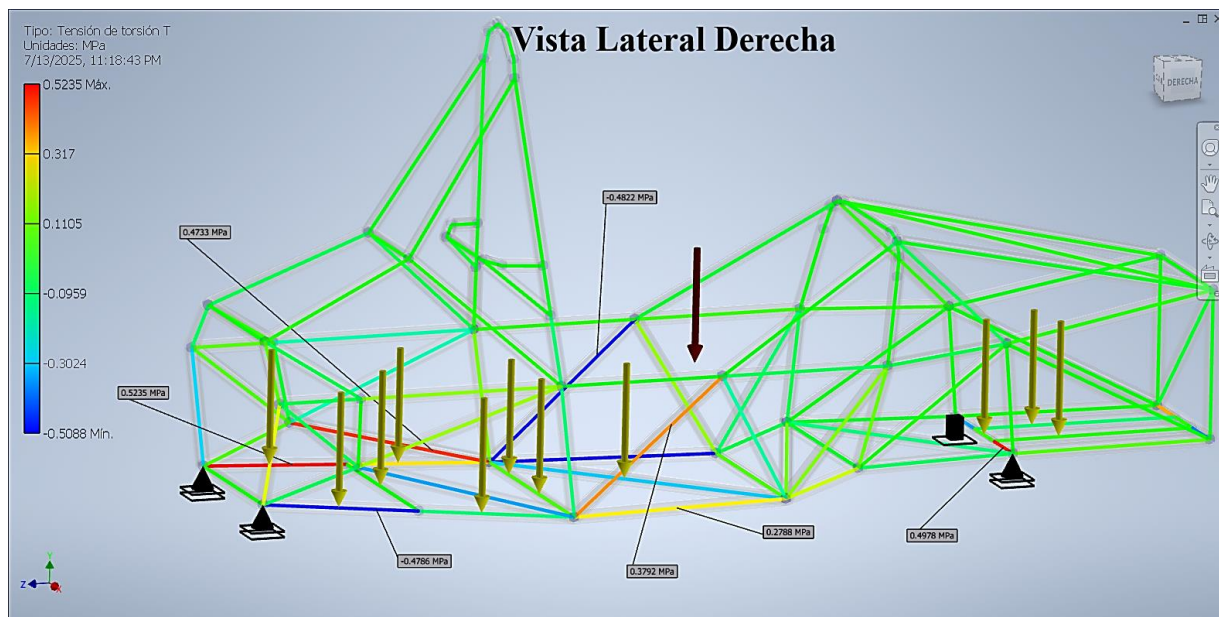
Estos resultados reflejan que los esfuerzos tanto de torsión como de flexión están correctamente distribuidos a lo largo de toda la estructura lo que garantiza que el diseño cumple con los requisitos de rigidez y resistencia planteados desde un inicio, además no se identificaron zonas críticas que representen un riesgo para la integridad del chasis por ende la estructura tiene un buen comportamiento frente a las cargas aplicadas, manteniendo su forma y resistencia dentro de márgenes seguros y aceptables para la competencia.

En lo relacionado a los esfuerzos, la tensión máxima fue de 12.67 MPa, un valor bastante bajo si se compara con las propiedades del material. Los esfuerzos de corte y torsión también se mantuvieron dentro de rangos bajos, lo que indica que la estructura no presenta

zonas críticas que comprometan su funcionamiento. El valor mayor fue de 0.523 MPa ubicado al costado izquierdo de la zona de impacto lateral trasero de la estructura el de menor valor fue de - 0.508 MPa ubicado en 3 zonas de la parte inferior de la estructura de impacto lateral central y trasero tal como se aprecia en la figura 27.

Figura 27

Tensión de Torsión



Con base en los resultados obtenidos, se logró un mejor desempeño al utilizar aluminio 6010, manteniendo la misma geometría y tamaño de los tubos. En comparación con el acero ASTM A500 Grado C, el peso del aluminio es considerablemente menor, lo que representa una ventaja importante, ya que el exceso de peso del acero resultaba desfavorable. Los resultados de la simulación indican que las cargas aplicadas son adecuadas y que la geometría de la estructura es correcta, ya que la deformación presentada es mínima.

Conclusiones

El desarrollo del chasis tipo Space Frame para un monoplace Fórmula SAE se logró utilizando software CAD y CAE para el diseño de una estructura que garantiza la protección del piloto, además se logró mantener una correcta distribución de las cargas y una rigidez adecuada frente a las condiciones críticas a las que estará expuesto el vehículo.

El modelado del chasis se realizó de acuerdo con las especificaciones y regulaciones establecidas por la normativa Fórmula SAE, cumpliendo correctamente con las dimensiones, refuerzos, protecciones y triangulaciones necesarias para garantizar la seguridad del piloto y el correcto funcionamiento del vehículo.

Las simulaciones estructurales realizadas mediante software CAE demostraron que el chasis propuesto es capaz de soportar las cargas a las que estará sometido, manteniendo las deformaciones dentro de rangos mínimos y mostrando un comportamiento estructural estable y seguro. Se verificó además que las zonas de mayor exigencia estructural fueron correctamente diseñadas mediante la triangulación de sus miembros, lo que aseguró una adecuada resistencia torsional y una óptima distribución de los esfuerzos internos.

Finalmente, la comparación entre los materiales utilizados evidenció que, aunque el acero ASTM A500 Grado C cumple con las propiedades mecánicas necesarias, el aluminio 6061 representa una alternativa más eficiente para este tipo de estructuras debido a su menor peso. El cambio de material permitió reducir significativamente la masa del chasis, manteniendo la misma geometría y niveles de seguridad, lo que aporta ventajas directas al desempeño y eficiencia del vehículo sin comprometer la integridad estructural.

Recomendaciones

Es fundamental que el diseño del chasis contemple desde las primeras etapas la ubicación de las cargas y restricciones, replicando las condiciones reales a las que estará expuesto el vehículo en pista. Esto permitirá que el análisis estructural refleje un comportamiento más cercano a la realidad y evitará la necesidad de rehacer simulaciones por errores en el diseño.

Al momento de modelar el chasis en CAD es recomendable mantener un diseño completamente paramétrico de modo que ante cualquier modificación en dimensiones, espesores o ángulos pueda ser ajustada sin la necesidad de rehacer el modelo desde cero, con esto se facilita la adaptación a modificaciones en el diseño general del vehículo o mejoras identificadas durante el proceso de simulación y validación.

Aunque se demostró que el acero ASTM A500 es una opción segura y ampliamente utilizada, si el objetivo es maximizar el rendimiento del monoplaza, se recomienda evaluar materiales alternos como el aluminio 6061 ya que su menor densidad permite reducir considerablemente el peso total del chasis sin sacrificar la seguridad ni la integridad estructural, adicionalmente se puede optar por reducir el espesor del tubo independientemente del material que se desee emplear ya que la finalidad es obtener un alto rendimiento en pista sin que afecte la seguridad estructural.

Bibliografía

- Galgotias University, Shobhit , A., Prashant Awasthi, Tarun Saatyaki, Mukul Kushwaha, & Vishal Jaiswal. (2020). Design & Analysis of Spaceframe Chassis for FSAE Vehicle. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 559-561.
- Daryl L. , L. (2015). *A First Course in the Finite Element Method*. Boston (5th ed.). Cengage Learning.
- EnergyEV. (2025). Motor DC de imán permanente 21-6kw 300amp 96v: <https://energyev.com/tienda/motores/motores-dc-de-iman-permanente/motor-dc-de-iman-permanente-21-6kw-300amp-96v-motenergy/>
- Escobar Humaquinga, J., & Garcia Frias, M. (2024). *Análisis de una estructura aerodinámica para un vehículo de formula SAE*. [Tesis de pregrado, Universidad Internacional del Ecuador]. Repositorio UIDE. <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/7363>
- SAE International. (2025). Formula SAE rules. SAE International.
- Gusñay Llallico, L., Lidioma Suntasig, D., & Reyes Campaña, G. (2024). Structural analysis of a chassis for a Formula SAE using finite element software. *Revista Científica Interdisciplinaria Investigación Y Saberes*, 9(2), 164–192.
- MikeWaggoner, Richard Lewis, Jeffrey Pace, & Nigel Lavers. (2010). *Monocoques vs. Spaceframe*. FSAE.
- Rising Sun. (2025). *Rising Sun Ecuador*. <https://risingsunecuador.com.ec/>
- Shiva Prasad, U., Athota Rathan , B., Bandu Sairaju, & SaikrishnaAmirishetty. (2020). Automotive Chassis Design Material Selection for Roadand Race Vehicles. *Journal of Mechanical Engineering Re-search and Developments, Zibeline*, 43(7), 274–282.
- Soo, A. (2008). Design, Manufacturing, and Verification of a Steel Tube Spaceframe Chassis for Formula SAE. (*Tesis de licenciatura, Massachusetts Institute of Technology*). <https://dspace.mit.edu/handle/1721.1/44387>

Vera Puebla, E., Morales Neira, D., Peña Pinargote, A., & Rodríguez Vargas, A. (2019).

Ergonomía para pilotos de monoplaza. Biblioteca Colloquium:

<https://colloquiumbiblioteca.com/index.php/web/article/view/10>

