

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UNA ESTRUCTURA MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS, PARA UN VEHÍCULO TIPO BUGGY**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**CÉSAR JOSÉ ANDRADE MONTACHANA**

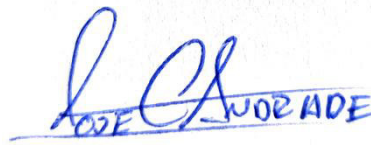
**cesar.andrade@epn.edu.ec**

**DIRECTORA: ING. PATRICIA RODRÍGUEZ, PHD.**

**patricia.rodriguez@epn.edu.ec**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, César José Andrade Montachana declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



---

**CÉSAR JOSÉ ANDRADE MONTACHANA**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por César José Andrade Montachana, bajo mi supervisión.



---

**ING. PATRICIA RODRÍGUEZ, PHD.**

**DIRECTORA**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

César José Andrade Montachana

Ing. Patricia Rodríguez, PHD.

## **DEDICATORIA**

Este proyecto dedico con todo amor a mis padres Hilda y César, por su amor, comprensión y sobre todo por todos los valores que me han servido para terminar esta etapa importante en mi vida. A mis hermanos Diego y Zoila por su cariño y aprecio inigualable.

## **AGRADECIMIENTO**

- A Dios por darme salud para culminar esta etapa de mi vida.
- A mis padres por estar conmigo en cada momento.
- A mis hermanos Diego y Zoila porque son parte de mi vida.
- A mi novia Taty por su apoyo desinteresado en estos últimos años de culminación de la carrera.
- A la Dra. Patricia Rodríguez por su apoyo constante en cada etapa del proyecto.
- Al Ing. Jorge Cepeda Gerente de la empresa COINAV por el aporte de las licencias para la simulación del proyecto.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

<b>1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO</b> .....	1
1.1. <b>Objetivo general</b> .....	1
1.2. <b>Objetivos específicos</b> .....	1
1.3. <b>Alcance</b> .....	1
1.4. <b>Marco teórico</b> .....	1
1.4.1. <b>Historia del Buggy</b> .....	1
1.4.2. <b>Vehículo tipo Buggy</b> .....	2
1.5. <b>Estado del arte</b> .....	4
1.6. <b>Elementos finitos</b> .....	6
1.6.1. <b>Investigación inicial de los elementos finitos.</b> ....	7
1.6.2. <b>Aproximaciones externas por elementos finitos</b> .....	7
1.7. <b>Normas técnicas</b> .....	9
<b>2. METODOLOGÍA</b> .....	10
2.1. <b>Estudio de alternativas</b> .....	11
2.1.1. <b>Requerimientos del producto</b> .....	11
2.1.2. <b>Casa de la Calidad</b> .....	12
2.1.3. <b>Especificaciones técnicas</b> .....	12
2.1.4. <b>Parámetros fundamentales para definir la estructura</b> .....	14
2.1.5. <b>Selección de alternativas</b> .....	15
2.2. <b>Diseño de la estructura del vehículo tipo buggy</b> .....	19
2.2.1. <b>Diseño de la geometría: datos de entrada</b> .....	19
2.2.2. <b>Asignación de cargas aplicadas a la estructura</b> .....	22
2.3. <b>Simulación de la estructura del vehículo tipo buggy</b> .....	26
2.3.1. <b>Altair SimSolid</b> .....	26
2.3.2. <b>Características principales</b> .....	27
2.3.3. <b>Metodología de Simsolid</b> .....	29
<b>3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....	32
3.1. <b>Resultados</b> .....	32
3.1.1. <b>Análisis estático de la estructura del vehículo biplaza</b> .....	32
3.1.2. <b>Factor de aprovechamiento</b> .....	42
3.2. <b>Conclusiones</b> .....	43
3.3. <b>Recomendaciones</b> .....	44
<b>4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	45
<b>5. Anexos</b> .....	47
a. <b>Anexo 1. Casa de la Calidad</b> .....	47

## INDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Buggy monoplaza .....	3
<b>Figura 2.</b> Buggy biplaza .....	3
<b>Figura 3.</b> Tipo Car Cross .....	4
<b>Figura 4.</b> Tipo Monocasco.....	4
<b>Figura 5.</b> Diagrama del SimSolid con External Approximations.....	8
<b>Figura 6.</b> Metodología para el diseño y simulación de una estructura de un buggy.....	10
<b>Figura 7.</b> Cabina de la estructura del buggy.....	20
<b>Figura 8.</b> Parte superior del buggy. ....	20
<b>Figura 9.</b> Modelación geométrica de la estructura del buggy.....	20
<b>Figura 10.</b> Dimensiones de las medidas generales de la estructura del buggy biplaza. ..	21
<b>Figura 11.</b> Dimensiones de la cabina de la estructura laterales.....	21
<b>Figura 12.</b> Dimensiones de la cabina de la estructura frontales. ....	22
<b>Figura 13.</b> Masa de la estructura del vehículo tipo buggy obtenida de Inspire Studio.....	22
<b>Figura 14.</b> Área de la proyección del flujo de aire sobre el vehículo. ....	24
<b>Figura 15.</b> MEF Tradicional - SimSolid.....	28
<b>Figura 16.</b> Comparación de tiempos del MEF Tradicional con SimSolid.....	29
<b>Figura 17.</b> Esquema de la Metodología del proceso SimSolid.....	30
<b>Figura 18.</b> Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto vertical.....	32
<b>Figura 19.</b> Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises.....	33
<b>Figura 20.</b> Desplazamiento para el análisis de impacto vertical .....	33
<b>Figura 21.</b> Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto lateral. ....	34
<b>Figura 22.</b> Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises.....	34
<b>Figura 23.</b> Desplazamiento para el análisis de impacto lateral. ....	35
<b>Figura 24.</b> Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto frontal. ....	36
<b>Figura 25.</b> Desplazamiento para el análisis de impacto lateral. ....	36
<b>Figura 26.</b> Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto vertical con Aluminio 6061 T.....	37
<b>Figura 27.</b> Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises con Aluminio 6061 T.....	38
<b>Figura 28.</b> Desplazamiento para el análisis de impacto vertical con Aluminio 6061 T. ....	38
<b>Figura 29.</b> Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto lateral con Aluminio 6061 T.....	39
<b>Figura 30.</b> Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises con Aluminio 6061 T.....	39
<b>Figura 31.</b> Desplazamiento para el análisis de impacto lateral con Aluminio 6061 T.....	40
<b>Figura 32.</b> Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto frontal con Aluminio 6061 T.....	41

**Figura 33.** Desplazamiento para el análisis de impacto lateral con Aluminio 6061 T.....41



## INDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Matriz de requerimientos del usuario .....	11
<b>Tabla 2.</b> Matriz de criterios del diseñador. ....	11
<b>Tabla 3.</b> Estatura promedio de los ecuatorianos.....	12
<b>Tabla 4.</b> Dimensiones estructurales del cuerpo de mujeres y hombres adultos. ....	13
<b>Tabla 5.</b> Parámetros del vehículo. ....	14
<b>Tabla 6.</b> Especificaciones del motor Honda XR25 Tornado.....	15
<b>Tabla 7.</b> Evaluación de peso específico de cada criterio. ....	16
<b>Tabla 8.</b> Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad. ....	17
<b>Tabla 9.</b> Evaluación del peso específico del criterio límite elástico. ....	17
<b>Tabla 10.</b> Evaluación del peso específico del criterio resistencia a la tracción.....	17
<b>Tabla 11.</b> Evaluación del peso específico del criterio precio. ....	17
<b>Tabla 12.</b> Evaluación del peso específico del criterio peso.....	18
<b>Tabla 13.</b> Evaluación del peso específico del criterio soldabilidad. ....	18
<b>Tabla 14.</b> Evaluación del peso específico del criterio Acabado Superficial. ....	18
<b>Tabla 15.</b> Tabla de conclusiones. ....	18
<b>Tabla 16.</b> Propiedades mecánicas del acero ASTM A36. ....	19
<b>Tabla 17.</b> Propiedades mecánicas del aluminio 6061 T.....	19
<b>Tabla 18.</b> Valores del coeficiente de resistencia aerodinámica para varios tipos de vehículos .....	24
<b>Tabla 19.</b> Diferencias entre MEF tradicional con SimSolid.....	28
<b>Tabla 20.</b> Diferencias entre MEF tradicional con SimSolid en la precisión.....	29
<b>Tabla 21.</b> Resultados obtenidos. ....	42
<b>Tabla 22.</b> Factor de aprovechamiento de las pruebas realizadas a los materiales. ....	42

## **RESUMEN**

El presente proyecto integrador surge del poco o nada de información respecto al desarrollo de proyectos relacionados al diseño y simulación de estructuras para vehículos tipo Buggy para el sector del turismo.

Es así como, se determinaron las características técnicas del vehículo tipo buggy, de tal manera que se garantice el soporte y seguridad de sus elementos constitutivos para posteriormente y mediante el análisis del método ordinal corregido de criterios ponderados de cada alternativa de solución, se seleccionó dos tipos de materiales, Acero A36 y Aluminio 6061T.

Una vez determinadas las especificaciones generales y requerimientos de funcionamiento se realizaron los cálculos de diseño, para garantizar un correcto análisis estructural del vehículo tipo Buggy creando un boceto del modelo de chasis en Inspire Studio, basado en las Normas nacionales e internacionales.

La estructura final del buggy fue sometida a simulación mediante el uso del método de elementos finitos extendidos, para lo que se utilizó el programa SimSolid, tomando en consideración tres pruebas de carga de impacto: impacto frontal, impacto lateral e impacto vertical y los dos tipos de materiales anteriormente mencionados.

La simulación proporcionó el diseño conceptual y la selección definitiva del material, al comparar los valores cuantitativos de la estructura de Acero A36 con la estructura en Aluminio 6061 T determinando así la mejor opción para la fabricación del chasis.

## **ABSTRACT**

The present project arises from little or no information regarding the development of projects related to the design and simulation of structures for Buggy-type vehicles for the tourism sector.

It is so, the technical characteristics of the buggy-type vehicle were determined, in such a way as to guarantee the support and safety of its constituent elements for later and through the analysis of the corrected ordinal method of weighted criteria of each solution alternative, two types of materials were selected, Steel A36 and Aluminum 6061T.

Once the general specifications and operating requirements were determined, the design calculations were carried out to guarantee a correct structural analysis of the Buggy-type vehicle, creating a sketch of the chassis model in Inspire Studio, based on national and international standards.

The final structure of the buggy was subjected to simulation using the extended finite element method, by using SimSolid, taking into consideration three impact load tests: frontal impact, side impact and vertical impact and the two types of aforementioned materials.

The simulation provided the conceptual design and the definitive selection of the material, by comparing the quantitative values of the A36 Steel structure with the 6061 T Aluminum structure, thus determining the best option for the manufacture of the chassis.

# **1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

La estructura del vehículo tipo buggy se diseña con Inspire Studio y se simula con SimSolid mediante el método de elementos finitos aproximados, los materiales empleados en la simulación de la estructura son el Acero ASTM A-36 y el Aluminio 6061T de adquisición local, de esta manera se puede establecer una comparación por medio de la cual se obtiene un producto que hace más ligera la estructura sin perder de vista la seguridad, ergonomía y resistencia, de tal manera que proporciona mejor rendimiento energético y al mismo tiempo, es mas accesible en el mercado local. El diseño de la estructura toma en consideración el uso de neumáticos 21/7R10, la instalación de cinturones de seguridad de 4 puntos y asientos deportivos semi baquet, para proporcionar mayor seguridad y la propulsión por medio de un motor de dos tiempos de 250 cc.

## **1.1. Objetivo general**

Diseñar y simular una estructura mediante el método de elementos finitos, para un vehículo tipo buggy.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Determinar el estado del arte del diseño de estructuras de vehículos tipo buggy.
- Determinar las especificaciones técnicas que intervienen en la estructura para el vehículo tipo buggy.
- Diseñar los elementos de la estructura.
- Elaborar los planos de la estructura.
- Modelar la geometría de la estructura.
- Simular el comportamiento mecánico de la estructura diseñada mediante el método de elementos finitos.

## **1.3. Alcance**

Diseño y simulación de una estructura mediante el método de elementos finitos para un vehículo tipo buggy que se realizará con dos tipos de materiales de adquisición local para poder comparar.

## **1.4. Marco teórico**

### **1.4.1. Historia del Buggy**

Los vehículos tipo Buggy inicialmente eran fabricados a nivel personal a partir de un modelo de carro ya disponible en el mercado, esta actividad era un pasatiempo para

algunos habitantes del Estado de California en EE.UU., de donde se conocen los primeros datos, a mediados de los años 50. En 1964 un californiano llamado Bruce Meyer, después de varios ensayos con modelos de diferentes motores V8 decidió colocar una estructura más ligera por lo que sustituyó la carrocería normal, por una de fibra de vidrio. En la década de 1970 aparecen las primeras competencias con vehículos tipo buggy en superficies planas, pero, posteriormente se realizaron competencias en superficies montañosas, lo que exigió mejoras en este tipo de vehículos, es así como se comenzaron a construir buggies con chasis tubulares, para dar más ligereza a la estructura y protección al conductor en caso de accidentes, (Salinas, 2015).

En la década de los 70 surgieron los modelos más populares en Europa, con motores Volkswagen Beetle y carrocería en fibra de vidrio, en tanto que en la década de los 80 Europa comenzó a importar con fuerza estos vehículos, ya que se fueron convirtiendo en una de las competencias automovilísticas más aceptadas pues estaban provistos de un motor de motocicleta de 600 cc. con una potencia de más de 100 hp, que combinado con un peso de 300 kg les permitía soportar aceleraciones y derrapes extremos. En la actualidad los buggies además de uso competitivo, se han tornado en una herramienta de trabajo para agricultores, y un medio por el cual se promueve el recorrido turístico por áreas naturales, (Martinez, 2017).

La versatilidad en el uso de este vehículo ha abierto un amplio interés para diseñar nuevos modelos y experimentar con diferentes materiales, de tal manera que se torne más eficiente y seguro para sus ocupantes.

#### **1.4.2. Vehículo tipo Buggy**

El buggy es un vehículo que originalmente fue diseñado para viajar sobre arena siendo posteriormente adaptado para ser usado en superficies irregulares; se caracteriza por su chasis ligero, carrocería de techo rígido y ruedas grandes, la disposición del motor es trasera al igual que su tracción. En la actualidad se están diseñando modelos con tracción a las cuatro ruedas y versiones de dos o cuatro asientos, y aunque legalmente su potencia esta limitada a 19,79 hp y velocidades de hasta 70 km/h, se están utilizando motores de 650, 800 y 1100cc, (Espín & Hidalgo, 2012).

- **Tipos de buggies**

Los buggies se clasifican según el tipo de chasis, el número de pasajeros, su aplicación y el tipo de terreno por el que serán conducidos, de la siguiente manera:

1. **Buggy monoplaza:** Este tipo de vehículos generalmente está diseñado para desplazarse en superficies irregulares; muchos de estos están fabricados para

competencias por lo que tienen mayor rendimiento. El buggy monoplaza tiene estructura tubular que le proporciona mayor seguridad de acuerdo a la actividad para la que esté diseñado. El chasis competitivo disminuye el espacio a la hora de ubicar los mecanismos mecánicos por lo que este vehículo tiene capacidad solo para un pasajero (Figura 1), (Martinez, 2017).



**Figura 1.** Buggy monoplaza

Fuente: (Martinez, 2017)

- 2. Tipo biplaza:** A principios de la década de 1970, apareció una nueva variante llamada "Dune Buggy" que podía escalar montañas parecidas a dunas. Dado que estos vehículos de estructura tubular todoterreno se utilizan como entretenimiento en el hogar, en la actualidad son biplaza, lo que permite más espacio y flexibilidad en la personalización del vehículo (Figura 2), (Martinez, 2017).



**Figura 2.** Buggy biplaza

Fuente: (Martinez, 2017)

- 3. Tipo car cross:** Este tipo de vehículo está diseñado únicamente para la competencia en terrenos de arena y asfalto; son propulsados por motores de motocicletas lo que proporciona una rápida aceleración en carreteras rectas y deslizamiento en curvas. La altura vehículo-suelo es muy baja y sus dimensiones

son reducidas, en su mayoría son diseñados para una persona, aunque existen también para dos personas (Figura 3), (Pauta & Villacís, 2012).



**Figura 3.** Tipo Car Cross

Fuente: (Martinez, 2017)

- 4. Tipo Monocasco:** Este tipo de buggy, es conocido también con el nombre de carrocería autoportante, ya que la lámina externa del vehículo soporta la mayor parte de la carga estructural del vehículo, pero, también existen modelos que tienen estructura con recubrimiento de fibra de vidrio. La primera marca en comercializarlos fue Volkswagen y su uso está limitado a superficies planas. Este buggy está diseñado para actividades turísticas (Figura 4), (Pauta & Villacís, 2012).



**Figura 4.** Tipo Monocasco

Fuente: (Martinez, 2017)

## 1.5. Estado del arte

Existe una cantidad reducida de estudios desarrollados en torno al diseño, simulación y construcción de vehículos tipo Buggy. Se ha realizado una búsqueda minuciosa de trabajos realizados respecto a esta temática con la intención de analizar la información existente, por lo que se citan los siguientes trabajos.

“Análisis comparativo del desempeño en vehículos monoplaza tipo Buggy entre motor de encendido provocado y motor eléctrico”. Este proyecto desarrollado en 2021 analizó el desempeño de la estructura del vehículo monoplaza tipo buggy mediante el estudio

comparativo entre un motor de encendido provocado y un motor eléctrico, de baja cilindrada (250 cc.), considerando la normativa SAE formula Student, para el cual se empleó el software SOLIDWORKS. El sistema de regulación electrónica se programa mediante modulación por ancho de pulso (PWM). En la prueba comparativa, el Buggy utiliza un motor eléctrico de bajo cilindraje con una capacidad máxima de 5,85 hp y un par máximo de 14 Nm, mientras que el segundo Buggy utiliza un motor de combustión interna con una capacidad máxima de 4,3 hp y un par máximo de 10,2 Nm. El motor eléctrico del buggy produce 24,08% más de par y 19,79% más de potencia que el motor de combustión interna, favoreciendo al motor eléctrico, (Bolaños & Cruz, 2021).

"Análisis estructural y rediseño de un chasis tubular de un vehículo Buggy". En este estudio efectuado en 2018, se analizó la estructura de un vehículo Buggy tubular previamente construido, se verificó la resistencia de las cargas de dos ocupantes y, también se rediseñó para ser validado estructuralmente por la Real Federación Española de Automovilismo. El diseño de la estructura se realiza en AutoCAD, seguido de un análisis estructural en SAP2000, que muestra las tensiones y deformaciones que experimenta cada elemento y las áreas afectadas, que, en consecuencia, se pueden fortalecer, haciendo factible el rediseño de la estructura para verificar el cumplimiento con las normas RFEDA en función de las cargas de impacto, (Jaramillo, 2018).

"Diseño y construcción de un chasis tubular para un vehículo de competición tipo supercrosscar" desarrollado en 2014 en el que se realizó el diseño a partir de datos generales como largo, ancho y alto, para ser modelado mediante el programa CAD (diseño asistido por ordenador) y analizado estáticamente mediante el software Ansys 14,5. A partir de estos resultados se fabricó la estructura verificando las soldadura por el método de las tintas penetrantes, (Cabrera & Márquez , 2014).

"Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehículo monoplaza para la competición en la fórmula SAE". Este estudio se realizó en 2014 y contempla el diseño según las especificaciones de la norma SAE con el fin de evitar que el vehículo sea sancionado en la competencia. El diseño de dicho chasis fue simulado para optimizar su rendimiento y proceder con la construcción en función del resultado por lo que también se realizó un cálculo del costo de materiales y manufactura. El chasis resultante fue sometido a un ensayo real de torsión, dando como resultado un vehículo tipo buggy en condiciones óptimas para la competencia, (Bermeo & Calle , 2014).

"Diseño y construcción de un vehículo biplaza de estructura tubular con motor monocilíndrico yamaha YFM 200" desarrollado en 2012, en este trabajo se diseñaron los componentes y mecanismos que permitieron la optimización del funcionamiento del



vehículo considerando parámetros como formas, materiales, dimensiones y distribuciones de pesos; para el efecto se usó el método de elementos finitos. La segunda etapa de este proyecto abarca la construcción de los componentes, así como las pruebas de funcionamiento, conducción y operación del motor. El trabajo concluyó que el vehículo tipo buggy presentaba óptimos niveles de rendimiento, (Pauta & Villacís, 2012).

## 1.6. Elementos finitos

El método de elementos finitos (MEF) es ampliamente utilizado en diversos campos de la ingeniería para analizar problemas lineales y no lineales, transitorios y permanentes en muchos campos, principalmente para el análisis de esfuerzos en estructuras, así como análisis de transferencia de calor, electromagnetismo o mecánica de fluidos.

Este método tiene como objetivo dividir el objeto analizado en varios elementos de forma variada (tetraédrica y hexaédrica entre otras). La distribución de la variable sobre cada elemento se puede definir como una función polinomial o trigonométrica. La cantidad y tipo de elementos se seleccionan de manera que exista una distribución uniforme sobre el objeto de estudio, proporcionando valores admisibles, que se acercan a los valores reales. Si bien, el método ofrece una solución numérica aproximada y no exacta, su nivel de precisión lo hace el método más extraordinario para simular situaciones de ámbito físico y tecnológico, (Martínez, 2018).

El origen del método de elementos finitos se remonta a principios del siglo XX cuando algunos investigadores utilizaron un método similar para simular un modelo elástico en barras, pero de manera oficial se considera que fue creado por el matemático Richard Courant en 1943 en el curso del estudio de la torsión. Para el efecto usó la interpolación polinómica sobre pequeñas regiones triangulares, (Chiquesi & Dos Santos, 2020).

El conjunto de elementos y nodos se define malla. Cada nodo es discretizado, es decir, se calculan las ecuaciones rectoras de cada elemento, mediante balance, principios energéticos o residuales ponderados. Posteriormente, se realiza la interacción entre cada uno de ellos, superponiendo las ecuaciones, y formando así un sistema de ecuaciones que describen el comportamiento del cuerpo en conjunto y que, para un análisis estático, generalmente toma la siguiente forma:

$$K_{11}u_1 + K_{12}u_2 + \dots + K_{1n}u_n = F_1$$

$$K_{21}u_1 + K_{22}u_2 + \dots + K_{2n}u_n = F_2$$

...

$$K_{n1}u_1 + K_{n2}u_2 + \dots + K_{nm}u_n = F_n$$

O, lo que es lo mismo:

$$[k]\{u\} = \{F\}$$

Donde  $[k]$  es una matriz cuadrada, conocida como matriz de rigidez,  $\{u\}$  es un vector de incógnitas, que puede ser de desplazamientos nodales, de temperaturas nodales, etc., dependiendo del problema que se resuelva; y  $\{F\}$  es un vector de fuerza nodal, que puede representar fuerzas, flujos de calor nodalizados, etc. (Souz, 2016).

### **1.6.1. Investigación inicial de los elementos finitos.**

El método de elementos finitos, MEF, apareció en la década de 1950 y era solo una implementación diferente del enfoque clásico de Ritz-Galerkin, pero logró resolver tanto las limitaciones como los problemas de inestabilidad numérica porque usaba constantemente funciones con soportes locales llamados elementos finitos.

Aunque las funciones base locales de los elementos finitos eran polinomios estándar infinitamente diferenciables, las funciones base globales ensambladas a partir de polinomios locales no eran suaves en absoluto, incluso sus primeras derivadas eran discontinuas. El éxito del MEF demostró que los requisitos de continuidad de las funciones de aproximación deben cumplirse sólo hasta cierto grado, lo suficiente para proporcionar energía finita cuando se sustituyen en el funcional de energía de un problema de valor límite. Los espacios de tales funciones fueron introducidos e investigados por Sobolev en la década de 1930.

A la disminución de los requisitos de continuidad de las funciones de aproximación se aunó el concepto de External Approximations, esto es, cuando las funciones de aproximación pertenecen al espacio de Sobolev de funciones con energía finita, la aproximación se llama interna, lo que significa que mientras la aproximación se refina y la solución converge a la solución exacta, las funciones de aproximación siempre están dentro de dicho espacio. Pero, alternativamente, en aproximaciones externas las funciones de aproximación no pertenecen a los espacios de Sobolev en cada paso de refinamiento (tienen energía infinita), pero en el límite, cuando el número de grados de libertad tiende a infinito, la función límite debe pertenecer al espacio de Sobolev correspondiente, es decir, debe recuperar las propiedades de suavidad necesarias, (Goelke, 2021)(Figura 5).

### **1.6.2. Aproximaciones externas por elementos finitos**

Como ya se ha mencionado, las aproximaciones internas de elementos finitos se construyen sobre funciones que pertenecen a un espacio de Sobolev correspondiente. Estas funciones deben cumplir ciertas condiciones de continuidad en los límites entre

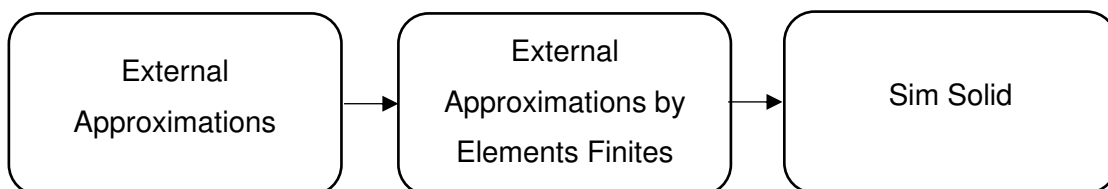
elementos. Por ejemplo, cuando se consideran problemas de teoría de la elasticidad en 2D o 3D, la función debe ser continua entre elementos finitos. Para los problemas de flexión de placas, no sólo las funciones, sino también sus primeras derivadas deben ser continuas.

Las condiciones de continuidad son bastante restrictivas. Sólo pueden cumplirse para formas muy simples de elementos finitos con polinomios de interpolación estándar como funciones básicas de elementos finitos. Los polinomios se asocian a los nodos de los elementos. Para garantizar la compatibilidad entre elementos, se utilizan las mismas funciones de interpolación para representar la forma de los elementos finitos. En el caso de los límites curvos, se utiliza el mapeo en un elemento canónico para proporcionar la compatibilidad. La geometría de los elementos finitos y sus funciones de aproximación están estrechamente acopladas.

Para mejorar las cualidades de aproximación de los elementos finitos, los investigadores inventaron los elementos finitos incompatibles. Estos elementos aparecen cuando las funciones base de interpolación de los elementos de forma estándar se enriquecen con algunos otros polinomios. Las funciones adicionales crean una discontinuidad a través de los límites entre elementos, pero los elementos finitos incompatibles suelen proporcionar una precisión mucho mayor que los compatibles. El problema residía en las dificultades de la prueba matemática de la convergencia y en la incoherencia de los resultados, ( Goelke, 2021).

El External Approximations es una generalización del método de elementos finitos (MEF) en términos de:

- Formas geométricas absolutamente arbitrarias que se pueden utilizar como elementos finitos.
- Las funciones de base que se aproximan al campo de interés del elemento de la pieza pueden ser de clase arbitraria y son independientes de la forma del elemento.



**Figura 5.** Diagrama del SimSolid con External Approximations.

Fuente: Propia

## 1.7. Normas técnicas

“Al considerar al chasis como una estructura interna que aporta sostén y es usada para conectar rígidamente los diferentes sistemas que conforman los vehículos se debe tener en cuenta las siguientes Normas Técnicas Ecuatorianas”, (Guasumba, 2019).

De acuerdo con la Norma NTE INEN 2656, la clasificación de vehículos indica que los vehículos se dividen en vehículos motorizados y vehículos no motorizados, en base a las características de diseño y aplicación; se ubica al buggy, en la Categoría L7, donde se especifican todos los vehículos, con una capacidad de no más de 8 asientos, excepto el asiento del conductor, diseñados para circulación terrestre.

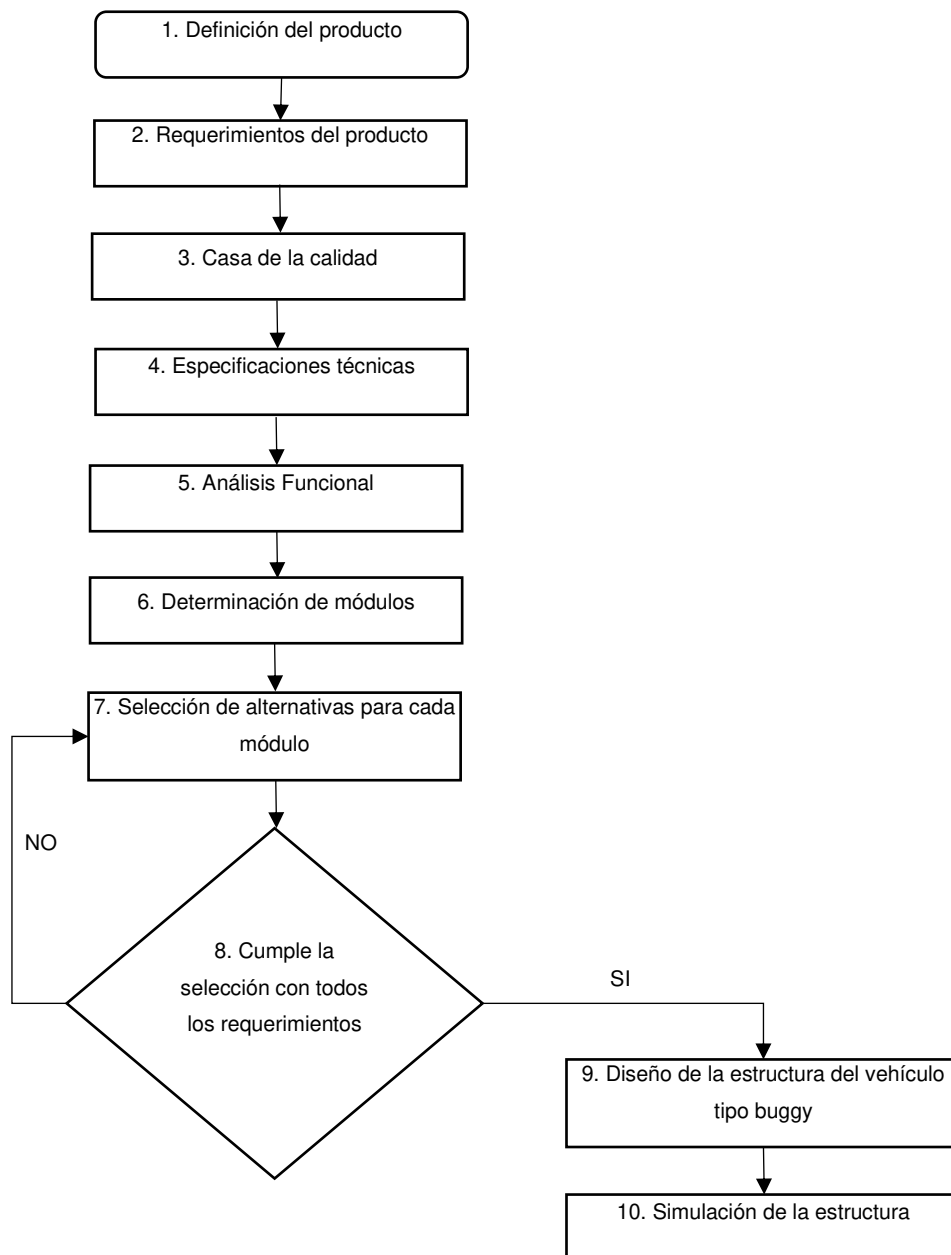
Por otra parte, la Norma Técnica NTE INEN 1323:2009, especifica los requisitos generales para el diseño, fabricación y montaje de carrocerías de automóviles y aborda consideraciones tales como:

- Chasis, tipo de servicio, peso del vehículo, peso del bastidor vacío, etc.
- Estabilidad, distribución del peso, altura del centro de gravedad, dimensión de la estructura.
- Seguridad, manejan las activas y pasivas.
- Estructura, donde se especifica, los materiales metálicos y no metálicos, uniones y juntas, geometría y resistencia estructural; así como las cargas de diseño usadas para el análisis cuasi estático, cargas vivas que representan al peso corporal de las personas, cargas de giro producidas en función de la fuerza centrífuga, cargas de frenado donde se ubica una desaceleración definida por la norma, carga de aceleración brusca y carga por resistencia de aire frontal en un plano perpendicular.
- Estructura, donde se especifica, los materiales metálicos y no metálicos, uniones y juntas, geometría y resistencia de la estructura, cargas de diseño para análisis cuasi estático, cargas directas que representan el peso del cuerpo humano, cargas rotacionales dadas en función de la fuerza centrífuga.
- Montaje.
- Métodos de anclaje, etc.

También se considerará para el diseño del vehículo normas de seguridad y parámetros internacionales utilizadas en la fabricación de vehículos tubulares como es la SAE Internacional (SAE - Society of Automotive Engineers).

## 2. METODOLOGÍA

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó la metodología propuesta en el diseño concurrente de Riba, partiendo del diseño conceptual donde las especificaciones se determinan a partir de la casa de calidad. Previamente es importante conocer los tipos de estructuras disponibles para conocer la función de cada una y compararlas según sus especificaciones, obteniendo así un diseño estructural con una relación costo-beneficio efectiva y provechosa mayor que otras estructuras del mercado. Un diagrama de la metodología se muestra en la, (Figura 6).



**Figura 6.** Metodología para el diseño y simulación de una estructura de un buggy.

(Fuente: Propia)

## 2.1. Estudio de alternativas

Partiendo de la definición del producto mostrado en el marco teórico este subcapítulo comprende los pasos del 2 al 6 presentados en la Figura 6, donde se determina los principales parámetros y requerimientos de la estructura de un vehículo tipo buggy.

### 2.1.1. Requerimientos del producto

- **Requerimientos del usuario**

Siguiendo con el diseño concurrente, (Riba, 2002), los requerimientos y deseos del usuario más importantes que se deben cumplir se detallan en la (Tabla 1).

**Tabla 1.** Matriz de requerimientos del usuario.

<b>Requerimientos del usuario</b>
Larga vida útil
Liviano
Un fácil mantenimiento
Precio
Un buggy estable
Fácil utilización
Recubrimiento de pintura
Confiable
Permitir la entrada de aire

(Fuente: Propia)

- **Especificaciones Técnicas**

En base a las exigencias del usuario, se representa las especificaciones técnicas en forma de matriz (Tabla 2).

**Tabla 2.** Matriz de criterios del diseñador.

<b>Requerimientos del usuario</b>
Vida útil
Peso
Periodo de mantenimiento
Bajo costo
Estabilidad
Ergonomía
Estética
Seguridad
Ventilación

(Fuente: Propia)

Bajo estos criterios de diseño se elabora la casa de la calidad.

### 2.1.2. Casa de la Calidad

La función de la casa de la calidad es interpretar los requerimientos del usuario como requerimientos técnicos (Riba, 2002). En el Anexo 1 se puede apreciar la casa de la calidad. A continuación, se muestra los resultados obtenidos.

- **Resultados de la Casa de la Calidad**

Los requerimientos de mayor puntaje para satisfacer las necesidades del usuario son las siguientes:

- Larga vida útil (17,3%)
- Liviano (13%)
- Fácil mantenimiento (10,4)
- Precio (17,3%)
- Fácil utilización (10,4%)
- Confiable (10,4%)

### 2.1.3. Especificaciones técnicas

- **Criterios de espacios**

Para el diseño del buggy, es necesario conocer las medidas promedio de la población, por lo que se toma como referencia la población ecuatoriana. La Tabla 3 muestra la estatura promedio de hombres y mujeres ecuatorianos.

**Tabla 3.** Estatura promedio de los ecuatorianos.

Percentil	Género	Altura (cm)		
		Mestizos	Indígenas	Afroecuatorianos
50	Hombres	172,39	163,26	174,2
	Mujeres	159,21	155,26	165,3

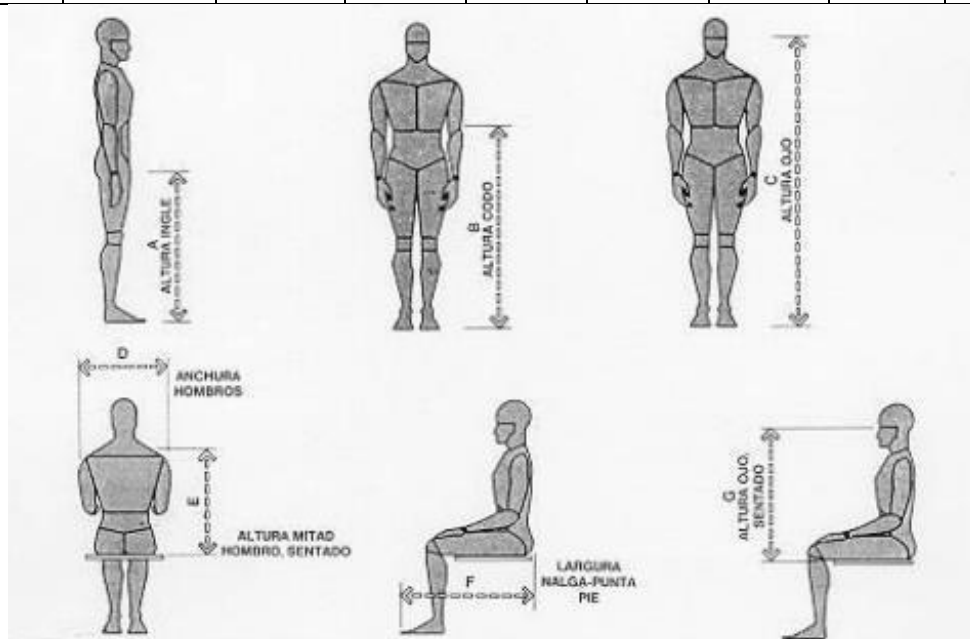
(Fuente: Lema, 2013)

En la

Tabla 4, se presentan los datos antropométricos, de hombres y mujeres según el percentil 5 y 95, con la correspondiente ilustración gráfica. Para este estudio se tomó en cuenta las medidas de la población afroecuatoriana, por ser los más altos, por lo que en base a las medidas de un hombre sentado en posición normal se diseñó la estructura del buggy.

**Tabla 4.** Dimensiones estructurales del cuerpo de mujeres y hombres adultos.

Percentil	Género	A	B	C	D	E	F	G
		cm	cm	cm	cm	cm	cm	cm
95	Hombres	91,9	120,1	174,2	52,6	69,3	94,0	86,1
	Mujeres	81,3	110,7	162,8	43,2	62,5	94,0	80,5
5	Hombres	78,2	104,9	154,4	42,2	60,2	81,3	76,2
	Mujeres	68,1	98,0	143,0	37,8	53,8	68,6	71,4



(Fuente: Cabrera & Márquez, 2014)

- **Ergonomía**

Ergonomía es adaptar las capacidades del ser humano a la tecnología para que exista una perfecta armonía. Este parámetro debe ser considerado en el diseño de este tipo de vehículos, siempre teniendo en cuenta que no ponga en peligro la seguridad del conductor y sus acompañantes. Para ello, se deben considerar los siguientes aspectos:

- Los pilotos deben tener el espacio necesario en la cabina tanto a nivel de las extremidades inferiores como superiores.
- El vehículo debe estar equipado con un asiento que sea cómodo y adecuado para conducir en terrenos accidentados.
- Entrar y salir del vehículo debe ser cómodo y libre de cualquier tipo de obstrucción.
- El puesto del piloto debe tener una buena visión tanto del terreno como de los elementos de conducción.



- **Selección de la alternativa óptima.**

Al analizar los tipos de buggies presentes en el medio, se eligió el modelo biplaza que, al tener mayor espacio, hace que los pasajeros se sientan cómodos facilitando el despliegue de elementos y sistemas de seguridad. Para el diseño del vehículo estructural tipo buggy se considera que estará constituido por:

- Sistema de transmisión, con motor Otto de dos tiempos de 250 cc.; con una potencia máxima de 22,98 hp y un torque máximo de 23,73 Nm ubicado en la parte posterior en el eje de transmisión trasero, (HONDA, 2021).
- Sistema de suspensión independiente para cada rueda con amortiguadores hidráulicos para un mejor control y comodidad.
- Frenos de disco en los ejes delantero y trasero para un mejor rendimiento de frenado y facilidad de mantenimiento.
- Cinturón de seguridad tipo arnés de poliéster entretejido de 2" que sujeta al piloto manteniéndolo en su asiento en caso de colisión. Para el vehículo tipo buggy se seleccionó el de 4 puntos que tiene dos cinturones en el regazo y dos cinturones en los hombros, por lo que es más restrictivo y seguro.
- Asientos deportivos semi baquet, que proporcionan mayor seguridad, además de poseer regulación de altura, distancia al volante y respaldo.
- Neumáticos para hierba y gravilla, utilizando para el eje delantero neumáticos 21/7R10 y para el eje posterior 22/ 11R8.

#### **2.1.4. Parámetros fundamentales para definir la estructura**

- **Dimensiones principales**

En la Tabla 5 se indica las dimensiones de la estructura del vehículo tipo buggy.

**Tabla 5.** Parámetros del vehículo.

<b>Características</b>	<b>Dimensión (mm)</b>
Distancia longitudinal	2400
Ancho total	1500
Altura total desde el suelo	1400
Distancia entre ejes	1200
Vía anterior	900
Vía posterior	1400
Distancia al piso Buggy -suelo	250 - 300

(Fuente: Propia)

- **El motor**

El motor que propulsará el vehículo tipo buggy es un motor de moto Honda XR25 Tornado, con buenas características de potencia y torque. La (Tabla 6) muestra las especificaciones de dicho motor.

**Tabla 6.** Especificaciones del motor Honda XR25 Tornado.

<b>Características motor Honda XR25 Tornado</b>	
Tipo de motor	DOCH 4T 4 válvulas
Cilindrada	249 cc.
Potencia máxima	22,98 hp a 7500 rpm
Torque máximo	23,73 Nm a 6000 rpm
Sistema de alimentación	Carburador 32 mm
Consumo de gasolina	120 km/gl
Velocidad máxima	122 km/h

(Fuente: (HONDA, 2021))

### **2.1.5. Selección de alternativas**

- **Selección de material**

Los materiales de fabricación juegan un papel fundamental en el diseño de la estructura y otros elementos, y la selección del material depende de factores como las propiedades mecánicas, metalurgia, soldabilidad, costo, entre otras, además es necesario, en todo tipo de diseño, considerar el mercado en el cual el producto será empleado por lo que es fundamental utilizar materia prima de disponibilidad local, en este caso, Ecuador.

Existen varias empresas en el país que fabrican materiales ferrosos y no ferrosos terminados. En función de esto se ha preseleccionado cuatro alternativas:

Opción A: Acero ASTM A 36

Opción B: Acero ASTM A 500 gr. A (galvanizado)

Opción C: Acero ASTM A 500 gr. B

Opción D: Aluminio 6061

En cuanto a la selección de materiales, según (Riba, 2002), en el método de evaluación de soluciones es necesario elegir al menos 2 alternativas con los respectivos criterios para determinar el material a utilizar. Por lo tanto, se usa el método ordinal corregido de criterios ponderados para obtener una correcta evaluación.

Según (Riba, 2002) es necesario establecer criterios sobre esta base para evaluar las alternativas, así como también la ponderación relativa entre ellas, sobre esta base se ha considerado seis criterios de acuerdo a la estructura.

- Límite elástico: es el máximo esfuerzo que un material resistir sin causar en éste una deformación permanente.
- Resistencia a la tracción: es el esfuerzo de tracción máxima al que se puede someter un material.
- Disponibilidad en el mercado: facilidad de encontrar un material en cualquier parte del país.
- Peso: un criterio muy importante que se desea reducir en cualquier diseño estructural para optimizar el consumo energético.
- Precio: es un criterio indispensable y determinante para la fabricación de la estructura.
- Soldabilidad: es la facilidad que tienen ciertos materiales, para ser soldados de forma permanente mediante procesos de soldadura.

Los criterios (o soluciones) de evaluación es la confrontación entre filas y columnas, dando valoraciones de 1 cuando el criterio (o solución) de filas es superior al comparar con las columnas, de 0,5 cuando las filas son equivalentes al de las columnas y de 0 cuando las filas son inferiores a las columnas.

**Tabla 7.** Evaluación de peso específico de cada criterio.

Criterio	Límite elástico	Resistencia a la tracción	Disponibilidad	Peso	Precio	Soldabilidad	Acabado superficial	$\sum +1$	Ponderación
Límite elástico	-	0,5	0	1	1	0	1	4,5	0,17
Resistencia a la tracción	0,5	-	0	1	1	0	1	4,5	0,17
Disponibilidad	1	1	-	1	1	1	1	7	0,27
Peso	0	0	0	-	1	0	1	3	0,12
Precio	0	0	0	0	-	1	0,5	2,5	0,10
Soldabilidad	0	0	0	1	0	-	1	3	0,12
Acabado Superficial	0	0	0	0	0,5	0	-	1,5	0,06
							<b>SUMA</b>	26	1

(Fuente: Propia)

Como se observa en la Tabla 7, el criterio con mayor ponderación es la disponibilidad seguido del límite elástico, resistencia a la tracción y precio, en tanto que la soldabilidad y el acabado superficial tienen igual ponderación, siendo el menor ponderado el peso.

**Tabla 8.** Evaluación del peso específico del criterio disponibilidad.

Disponibilidad	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\sum +1$	Ponderación
Opción A	-	1	1	0,5	3,5	0,35
Opción B	0	-	0	0	1	0,10
Opción C	0	1	-	0	2	0,20
Opción D	0,5	1	1	-	3,5	0,35
(Fuente: Propia)				<b>Suma:</b>	10	1

**Tabla 9.** Evaluación del peso específico del criterio límite elástico.

Disponibilidad	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\sum +1$	Ponderación
Opción A	-	1	0	1	3	0,30
Opción B	0	-	0	1	2	0,20
Opción C	1	1	-	0,5	3,5	0,35
Opción D	0	0	0,5	-	1,5	0,15
(Fuente: Propia)				<b>Suma:</b>	10	1

**Tabla 10.** Evaluación del peso específico del criterio resistencia a la tracción.

Disponibilidad	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\sum +1$	Ponderación
Opción A	-	1	0,5	1	3,5	0,35
Opción B	0	-	0	1	2	0,20
Opción C	0,5	1	-	1	3,5	0,35
Opción D	0	0	0	-	1	0,10
(Fuente: Propia)				<b>Suma:</b>	10	1

**Tabla 11.** Evaluación del peso específico del criterio precio.

Disponibilidad	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\sum +1$	Ponderación
Opción A	-	1	1	1	4	0,4
Opción B	0	-	1	0,5	2,5	0,25
Opción C	0	0	-	0	1	0,10
Opción D	0	0,5	1	-	2,5	0,25
(Fuente: Propia)				<b>Suma:</b>	10	1

**Tabla 12.** Evaluación del peso específico del criterio peso.

Disponibilidad	Opción A	Opción B	Opción C	Opción D	$\sum +1$	Ponderación
Opción A	-	1	1	0	3	0,3
Opción B	0	-	0,5	0	1,5	0,15
Opción C	0	0,5	-	0	1,5	0,15
Opción D	1	1	1	-	4	0,4
(Fuente: Propia)				<b>Suma:</b>	10	1

**Tabla 13.** Evaluación del peso específico del criterio soldabilidad.

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	0,5	1	3,5	0,35
Solución B	0	-	0	0	1	0,1
Solución C	0,5	1	-	0,5	3	0,3
Solución D	0	1	0,5	-	2,5	0,25
(Fuente: Propia)				<b>Suma:</b>	10	1

**Tabla 14.** Evaluación del peso específico del criterio Acabado Superficial.

Disponibilidad	Solución A	Solución B	Solución C	Solución D	$\sum +1$	Ponderación
Solución A	-	1	0,5	0	2,5	0,25
Solución B	0	-	0,5	0	1,5	0,15
Solución C	0,5	0,5	-	0	2	0,20
Solución D	1	1	1	-	4	0,40
(Fuente: Propia)				<b>Suma:</b>	10	1

**Tabla 15.** Tabla de conclusiones.

Conclusión	Límite elástico	Resistencia a la tracción	Disponibilidad	Peso	Precio	Soldabilidad	Acabado Superficial	$\Sigma$	Prioridad
Opción A	0,30*0,17	0,35*0,17	0,35*0,27	0,30*0,12	0,40*0,10	0,35*0,12	0,25*0,06	0,3380	1
Opción B	0,20*0,17	0,20*0,17	0,10*0,27	0,15*0,12	0,25*0,10	0,10*0,12	0,15*0,06	0,1590	4
Opción C	0,35*0,17	0,35*0,17	0,20*0,27	0,15*0,12	0,10*0,10	0,30*0,12	0,20*0,06	0,2490	3
Opción D	0,15*0,17	0,10*0,17	0,35*0,27	0,40*0,12	0,25*0,10	0,25*0,12	0,40*0,06	0,2640	2

(Fuente: Propia)

La Tabla 15 muestra que las soluciones óptimas, de acuerdo con las valoraciones realizadas, son la opción A (ASTM A36), seguida de la opción D (Aluminio 6061 T) materiales que serán empleados en la simulación del chasis del vehículo tipo buggy.

### 2.1.6. Propiedades físicas y mecánicas de los materiales

- **Acero ASTM A36**

Densidad: 7,85 g/cc.

**Tabla 16.** Propiedades mecánicas del acero ASTM A36.

Propiedades Mecánicas	Unidades
Esfuerzo Máximo	550 MPa
Límite elástico	315 MPa
Módulo de elasticidad	140 GPa
Tensión a la rotura de corte	80 GPa

Fuente: (IPAC, 2019)

- **Aluminio 6061 T**

Densidad: 2,7 g/cc.

**Tabla 17.** Propiedades mecánicas del aluminio 6061 T.

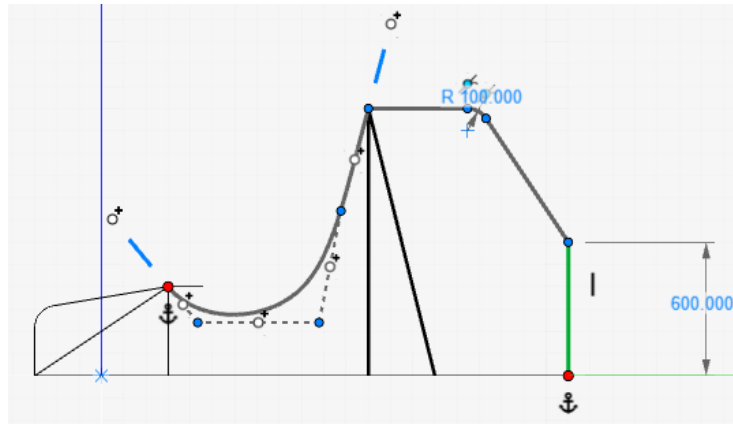
Propiedades Mecánicas	Unidades
Esfuerzo Máximo	310 MPa
Límite elástico	275 MPa
Módulo de elasticidad	68,64 GPa
Tensión a la rotura de corte	89,24 GPa

Fuente: (Aluminio, 2019)

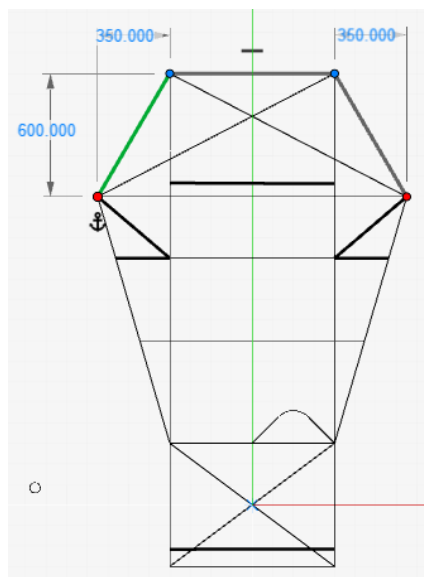
## 2.2. Diseño de la estructura del vehículo tipo buggy.

### 2.2.1. Diseño de la geometría: datos de entrada

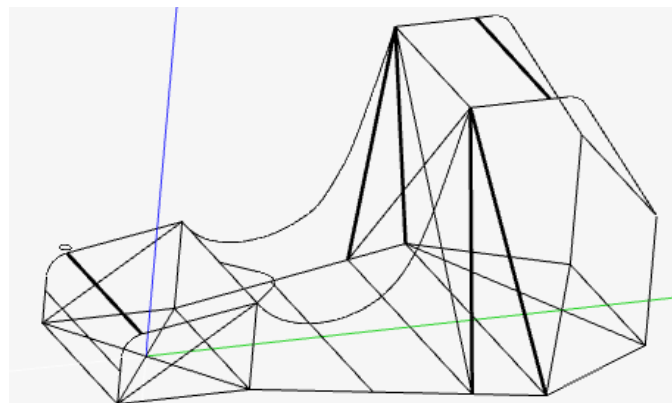
Con el conocimiento previo de los diversos tipos de estructuras tubulares descritas en el marco teórico, se realizó un diseño en Inspire Studio (Figura 7, Figura 8 y Figura 9) considerando los criterios establecidos en la Tabla 5.



**Figura 7.** Cabina de la estructura del buggy  
**Fuente:** Propia

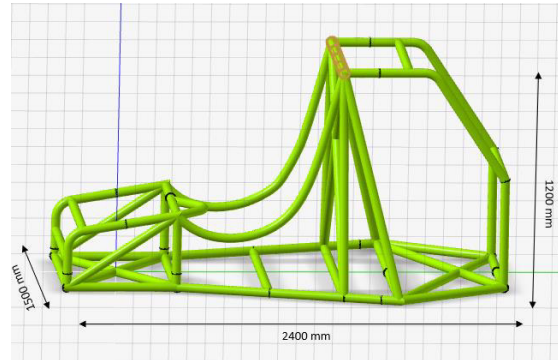


**Figura 8.** Parte superior del buggy.  
**Fuente:** Propia



**Figura 9.** Modelación geométrica de la estructura del buggy.  
**Fuente:** Propia

Las dimensiones del chasis se establecieron en función del diseño de un vehículo tipo buggy biplaza siempre precautelando la seguridad, estabilidad y confort de los ocupantes en el vehículo, por lo que se establecieron las siguientes medidas generales, (Figura 10).



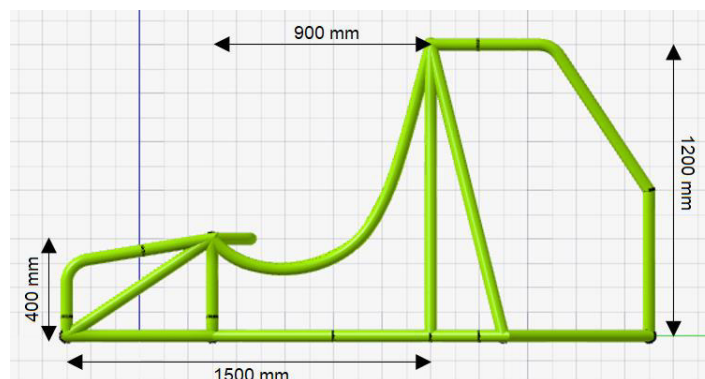
**Figura 10.** Dimensiones de las medidas generales de la estructura del buggy biplaza.

**Fuente:** Propia

A la hora de determinar el espacio de la cabina se tienen en cuenta criterios espaciales y ergonómicos, por lo que se considera una persona de 1,75 m y aproximadamente 70 kg.

De la

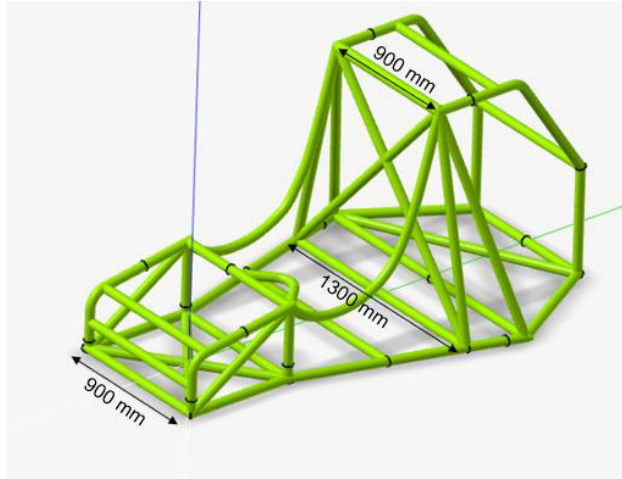
Tabla 4 se toma las dimensiones del cuerpo de hombres y mujeres adultas dimensionada en centímetros. Para el diseño de la estructura las medidas seleccionadas corresponden al percentil 95, esto quiere decir que solo el 95% de la población puede ingresar a la cabina de la estructura, estas condiciones traducidas a requerimientos se pueden visualizar en la Figura 11 y Figura 12.



**Figura 11.** Dimensiones de la cabina de la estructura laterales.

**Fuente:** Propia





**Figura 12.** Dimensiones de la cabina de la estructura frontales.

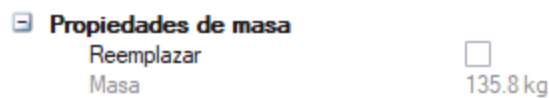
**Fuente:** Propia

### 2.2.2. Asignación de cargas aplicadas a la estructura

El diseño del sistema estructural se basa en cargas estáticas y dinámicas, las cuales se distribuyen a lo largo de la estructura como se indica a continuación:

**Carga Permanente (Pe)**, comprende el peso neto de la estructura y de todas aquellas partes que están ligadas permanentemente como son: asientos, neumáticos, motor, sistema de suspensión, frenos, transmisión.

Por lo tanto:



**Figura 13.** Masa de la estructura del vehículo tipo buggy obtenida de Inspire Studio.

**Fuente:** (Studio, 2020)

$$P_{e-acero} = 135,8 \text{ kg}$$

$$P_{e-aluminio} = 43,6 \text{ kg}$$

**Carga de Seguridad (Cs)**, esta carga se considera para evitar que la estructura se dañe por sobrecarga durante su vida útil. y según el Colegio de Ingenieros Mecánicos de Pichincha se recomienda un valor aproximado de  $20 \frac{Kg}{m^2}$ , (López Cisneros & Silva Gavidia, 2010).

$$C_s = 20 \frac{Kg}{m^2} * \text{Área de carga del vehículo} \quad \text{Ecuación 1}$$

$$C_{s-acero} = 20 \frac{Kg}{m^2} * 0,81 \text{ m}^2 = 16,2 \text{ [Kg]}$$

$$C_{s-\text{aluminio}} = 20 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} * 0,81 \text{ m}^2 = \mathbf{16,2 \text{ [Kg]}}$$

**Carga Muerta (Cm)**, según la Norma INEN (1323:2009) concierne al peso total de la carrocería en condiciones operantes, incluyendo todos los componentes de la estructura y accesorios.

$$C_m = C_s + P_e \quad \text{Ecuación 2}$$

$$C_{m-\text{acero}} = 16,2 \text{ Kg} + 135,8 \text{ Kg} = \mathbf{152 \text{ [Kg]}}$$

$$C_{m-\text{aluminio}} = 16,2 \text{ Kg} + 43,6 \text{ Kg} = \mathbf{59,8 \text{ [Kg]}}$$

**Carga Viva (Ca)**, según la Norma INEN (1323:2009) corresponde a la carga de los ocupantes en el vehículo tipo buggy y es distribuida uniformemente sobre los elementos de la estructura del vehículo.

Por lo tanto, la carga viva es el peso del piloto y del copiloto más una sobrecarga de 10% de acuerdo con la norma mencionada.

$$C_a = C_t + (C_t * 0,1) \text{ [Kg]} \quad \text{Ecuación 3}$$

$$C_{a-\text{acero/aluminio}} = 140 \text{ kg} + (140 * 0,1) \text{ [Kg]} = \mathbf{154 \text{ [Kg]}}$$

**Cargas de Impacto (Ci)**, son aquellas en las cuales la dirección del movimiento coincide con la dirección en la que se produce la carga y se caracterizan por ser cargas instantáneas.

$$C_i = 0,3(C_M + C_V) \quad \text{Ecuación 4}$$

$$C_{i-\text{acero}} = 0,3(152 + 154) = \mathbf{91,80 \text{ [Kg]}}$$

$$C_{i-\text{aluminio}} = 0,3(59,8 + 154) = \mathbf{64,14 \text{ [Kg]}}$$

**Carga de Viento (Cf)**: también conocida como resistencia aerodinámica, esta fuerza se opone al movimiento del vehículo en la atmósfera. La carga de viento a bajas velocidades es poco importante, mientras que a altas velocidades es considerable ya que el vehículo debe vencerla para seguir avanzando.

$$C_f = \frac{1}{2} (C_D \rho A_f V^2) \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde:

$C_f$  =Carga de viento [N]

$\rho$  =Densidad del aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

$V$  =Velocidad en [ $\text{m}/\text{s}$ ]

$A_f$  =Superficie frontal del vehículo [ $m^2$ ]

$C_D$  =Coeficiente aerodinámico del vehículo

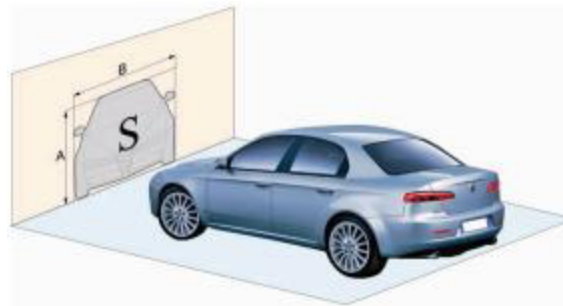
El componente del coeficiente de resistencia aerodinámica varía entre 0,3 para automóviles y 1 para camiones con cargas muy voluminosas debido a la forma del cuerpo. Para este tipo de vehículo biplaza se toma un valor de  $C_D = 0,3$  ,(Tabla 18).

**Tabla 18.** Valores del coeficiente de resistencia aerodinámica para varios tipos de vehículos.

Vehicle Type	Aerodynamic Resistance (Coefficient $C_D$ )
Passenger cars	0,30-0,52
Vans	0,40-0,58
Buses	0,50-0,80
Tractor-semitrailers	0,64-1,10
Truck-trailers	0,74-1,00

Fuente: (Wong, 1978)

Para determinar el área frontal se proyecta sobre un plano perpendicular al flujo del aire que se produce sobre la estructura, como se observa en la Figura 14.



**Figura 14.** Área de la proyección del flujo de aire sobre el vehículo.

Fuente: (Tuteorica, 2020)

$$A_f = (\text{Alto} * \text{Ancho})$$

Ecuación 6

Donde:

$$\text{Alto} = 1,2 \text{ [m]}$$

$$\text{Ancho} = 1,5 \text{ [m]}$$

Por lo tanto:

$$A_f = (1,2 * 1,5) \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_f = 1,8 \text{ [m}^2\text{]}$$

Reemplazando los datos en la Ecuación 5, se tiene:

$$C_f = \frac{1}{2}(C_D \rho A_f V^2)$$

$$C_f = \frac{1}{2}(0,3 * 1,2 * 1,8 * 27,77^2)$$

$$C_{f-acero/aluminio} = 249,86 [N] = \mathbf{25,50 [Kg]}$$

**Carga Sísmica (Cv):** estas cargas son vibraciones simultaneas y cíclicas en forma horizontal y vertical, toda estructura debe ser diseñada para resistir fuerzas sísmicas que provienen de cualquier dirección hacia la estructura.

$$C_V = C_a + C_f + C_s \quad \text{Ecuación 7}$$

$$C_{V-acero} = (154 + 25,50 + 16,20) [Kg] = \mathbf{195,70 [Kg]}$$

$$C_{V-aluminio} = (154 + 25,50 + 16,20) [Kg] = \mathbf{195,70 [Kg]}$$

**Carga de Diseño:** se obtiene mediante la suma de la carga muerta, carga de impacto y carga sísmica. La carga de diseño es la base para el diseño estructural del vehículo tipo buggy.

$$C_d = C_m + C_V + C_i \quad \text{Ecuación 8}$$

$$C_{d-acero} = 152 + 195,70 + 91,80 = \mathbf{439,50 [Kg]}$$

$$C_{d-aluminio} = 59,8 + 195,70 + 64,14 = \mathbf{319,64 [Kg]}$$

### Cálculos de las cargas de impacto

Según el reglamento del Buggy de competencias, la estructura del vehículo debe cumplir los siguientes requerimientos:

- Carga de impacto lateral:  $2C_d$
- Carga de impacto longitudinal:  $6C_d$
- Carga de impacto vertical:  $8C_d$

Esta estructura esta destinada para el turismo, por lo que no debe presentar exceso de material ya que no solo aumentaría el peso de la estructura, sino que afectaría el factor ergonómico, así como el rendimiento del motor.

Según (Pauta & Villacís, 2012) las cargas a considerar son las siguientes:

- Carga de impacto lateral:

$$1,5C_{d-acero} = 1,5 * 439,50 = 6460,65 [N]$$

$$1,5C_{d-aluminio} = 1,5 * 319,64 = 4698,70 [N]$$

- Carga de impacto longitudinal:

$$3C_{d-acero} = 3 * 439,50 = 12921,30 [N]$$

$$3C_{d-aluminio} = 3 * 319,64 = 9397,42 [N]$$

- Carga de impacto vertical:

$$4C_{d-acero} = 4 * 439,50 = 17228,40 [N]$$

$$4C_{d-aluminio} = 4 * 319,64 = 1278,56 [N]$$

**Carga de giro (G)**, según la Norma INEN (1323:2009) corresponde a la fuerza derivada por el giro de la estructura.

**Carga de frenado (CF)**, según la Norma INEN (1323:2009) corresponde a la fuerza originada por el frenado del vehículo en movimiento. Con los parámetros establecidos de frenado a una  $V = 80 \text{ km/h}$  y distancia no mayor de 75 m con un peso máximo de 439,50 kg la carga de frenado es de:

$$C_F = P * \frac{V^2}{2S} \quad \text{Ecuación 9}$$

$$C_{F-acero} = 439,5 * \frac{22,22^2}{2(75)} = \mathbf{1446,91 [N]}$$

$$C_{F-aluminio} = 319,64 * \frac{22,22^2}{2(75)} = \mathbf{1042,22 [N]}$$

**Carga de aceleración brusca (CAb)**, según la Norma INEN (1323:2009) corresponde a la fuerza originada por la brusca aceleración producida por el vehículo. Para obtener la aceleración es el mismo concepto de la carga de frenado, pero con signo opuesto.

$$C_{Ab-acero} = - C_F = - \mathbf{1446,91 [N]}$$

$$C_{Ab-aluminio} = - C_F = - \mathbf{1042,22 [N]}$$

## 2.3. Simulación de la estructura del vehículo tipo buggy

### 2.3.1. Altair SimSolid

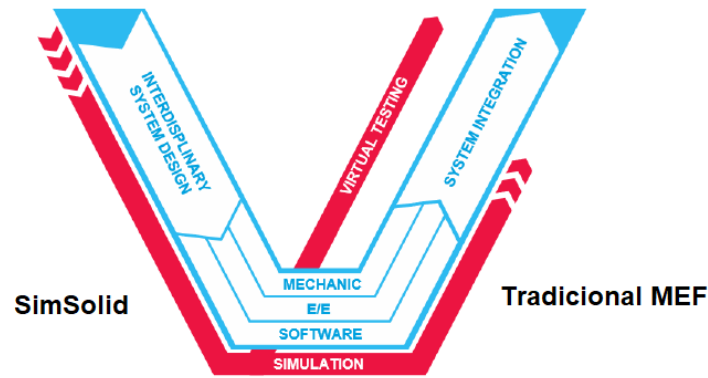
Altair SimSolid es un software de análisis estructural que permite analizar desde los conjuntos CAD más simples hasta los más complejos y numerosos, en segundos o minutos, utilizando una PC convencional. Es un entorno de simulación que elimina las simplificaciones geométricas y el mallado, los cuales son los pasos más extensos que requieren un amplio conocimiento, cuando se realiza el análisis utilizando el método tradicional de elementos finitos (MEF). SimSolid utiliza funciones de orden superior que están adaptadas localmente para refinar la solución.

Este software simula de forma rápida y precisa varios escenarios de diseño en condiciones reales. El SimSolid es tolerante a la inexactitud geométrica, a diferencia de otras herramientas de simulación, por lo que proporciona una capacidad única al no tener la necesidad de simplificar complejas geometrías antes de analizar el proyecto, (INNEO-ALTAIR, s,f) (Altair-HyperWorks, 2020).

### 2.3.2. Características principales

- **Soluciones de simulación:** Análisis estático lineal, modal, térmico, termo mecánico acoplado, estático no lineal (material y geométrico), dinámica transitoria (tiempo, frecuencia y respuesta aleatoria).
- **Enlaces compatibles:** Reconocimiento automático de conexión, fija, deslizante, separación por fricción, uniones atornilladas, uniones soldadas por puntos y láser, uniones soldadas en esquina / longitudinales, uniones remachadas y conectores virtuales.
- **Condiciones fronterizas:** Restricciones inamovibles, restricción de deslizamiento, restricción de rotación axial, restricción forzada, fuerza, presión, gravedad, térmica, inercial, tornillo / tuerca con precarga, cargas dinámicas, cargas hidrostáticas, cargas de rodamientos y cargas remotas.
- **Conectividad CAD:** Legibilidad de todos los formatos de archivo CAD, incluidos: CATIA, NX, PTC / Creo, Inventor, Fusion 360, SOLIDWORKS, Onshape, SolidEdge, JT, STEP, VDA, Parasolid, ACIS, PLMXML, CGR, STL.
- **Análisis de resultados:** Gráficos de contorno para desplazamientos, tensión y extensión, animación de deformación, etiquetas Max/min, medidores de puntos, gráficos XY, fuerzas de reacción / contacto, fuerzas de perno/tuerca, fuerzas de soldadura por puntos, frecuencias y modos, factores modales participativos, factores de seguridad.

Para mejorar el diseño, el rendimiento estructural debe entenderse y optimizarse al iniciar el proceso, es decir, obtener información sobre evolución de piezas y ensamblajes del mundo real ( Goelke, 2021).



**Figura 15.** MEF Tradicional - SimSolid.

Fuente: ( Goelke, 2021)

En otras palabras, SimSolid complementa, pero no reemplaza a los MEF Solvers existentes, (Figura 15).

A continuación, se muestra una breve comparación entre los métodos utilizados en SimSolid con MEF más tradicionales. También se describe los pasos que se llevan a cabo para el diseño y simulación de la estructura para el vehículo tipo buggy según la Fast Start Training Guide, (Altair-SimSolid, 2019).

**Tabla 19.** Diferencias entre MEF tradicional con SimSolid.

MEF tradicional	SimSolid
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regiones simples.</li> <li>• Los grados de libertad están asociados con los nodos.</li> <li>• Los grados de libertad son desplazamientos nodales <math>U_x</math>, <math>U_y</math>, <math>U_z</math>.</li> <li>• Cada nodo puede tener 3 grados de libertad.</li> <li>• La adaptación de la solución se basa principalmente en cambiar la densidad de energía local y rara vez se usa para ensamblajes.</li> <li>• Las funciones de forma son polinomios de interpolación simples de bajo grado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regiones arbitrarias: la parte completa puede ser una región.</li> <li>• Los grados de libertad no son nodales, sino que se puede asociar con superficies, volúmenes o líneas.</li> <li>• Los GDL son integrales sobre los correspondientes objetos geométricos, no son nodales.</li> <li>• Es posible tener muchos grados de libertad para cualquier geometría, dependiendo del ajuste de la solución.</li> <li>• SimSolid garantiza la precisión de la solución a través de un "análisis adaptativo de múltiples pasadas". La adaptación de la solución está siempre activa y permite refinar automáticamente la solución a través de un proceso iterativo, basado en variaciones en la densidad de energía local y errores absolutos en los límites de la región analizada.</li> <li>• Las funciones de forma pueden ser de clase arbitraria y se derivan durante la fase de solución. Por lo tanto, no necesariamente tienen que ser polinomios.</li> </ul>

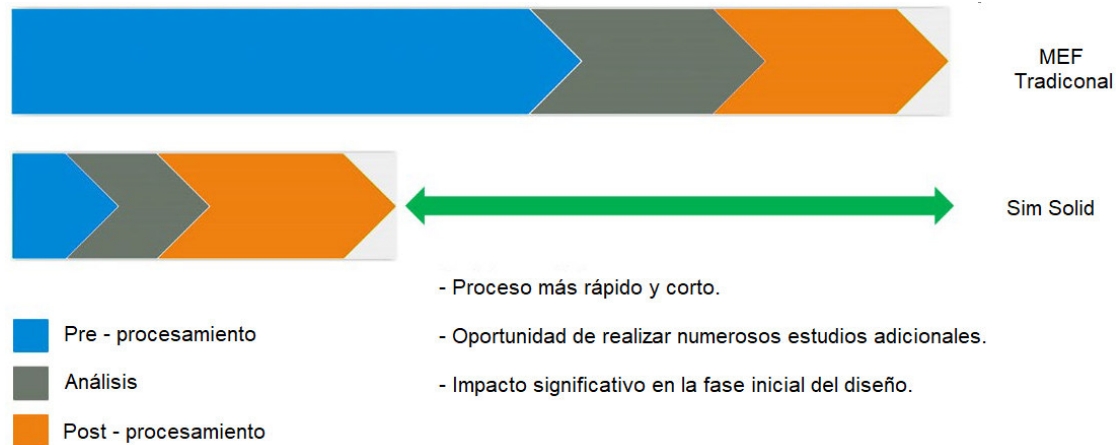
Fuente: (Altair-SimSolid, 2019)

**Tabla 20.** Diferencias entre MEF tradicional con SimSolid en la precisión.

MEF tradicional	SimSolid
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nivel de geometría de decisión de detalle por parte del usuario.</li> <li>• Tipos de elementos decisión por usuario.</li> <li>• Decisión de controles basados en la densidad y distribución de la malla por usuario.</li> <li>• Interpretación correcta de la configuración de análisis por parte del usuario.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Métodos de solucionador y solución</li> <li>○ Tolerancias y opciones</li> </ul> </li> <li>• La adaptación de la solución se basa principalmente en la densidad de energía local. cambio, es relativo.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Rara vez utilizado para ensamblajes.</li> </ul> </li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Geometría con todo detalle minimizan errores de modelado.</li> <li>• Sin elementos.</li> <li>• Sin malla.</li> <li>• Sin ajustes en análisis dinámicos y no lineales, incluidos separar el contacto con la fricción.</li> <li>• La adaptación de la solución se basa en el cambio de densidad de energía local y errores absolutos en el límite.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Siempre activo.</li> <li>○ Fácil de configurar tanto global (conjunto completo) como local (pieza basada) adaptación de la solución.</li> <li>○ Las fuerzas de reacción en el soporte y las conexiones son muy preciso.</li> </ul> </li> </ul>

Fuente: (Altair-SimSolid, 2019)

La parte superior de la imagen representa el proceso MEF tradicional, mientras que la parte inferior refleja el proceso de análisis con SimSolid, (Figura 16).



**Figura 16.** Comparación de tiempos del MEF Tradicional con SimSolid.

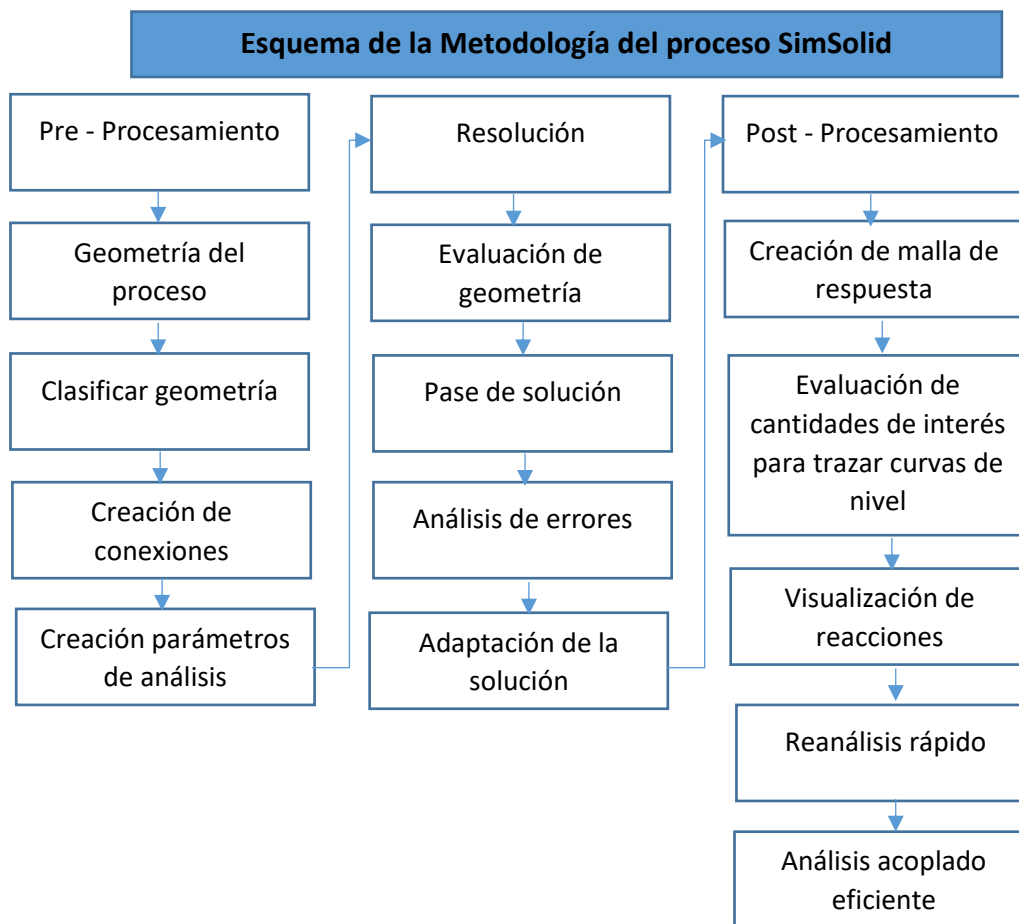
Fuente: ( Goelke, 2021)

### 2.3.3. Metodología de Simsolid

Al igual que con el método MEF tradicional, incluso al realizar un análisis estructural con SimSolid, es necesario seguir una serie de pasos precisos durante las fases de Pre-procesamiento, Resolución y Post-procesamiento. En la



Figura 17 se muestra un esquema de la metodología usada por el software.



**Figura 17.** Esquema de la Metodología del proceso SimSolid.

**Fuente:** (Altair-SimSolid, 2019)

- **Pre - procesamiento**

A diferencia del método tradicional, no es necesario utilizar tres programas diferentes para cada una de las fases ya que este software cuenta con una interfaz gráfica simple y esquemática, lo que permite al operador realizar un análisis de forma casi intuitiva.

Durante esta fase tiene lugar la importación de la geometría, la creación de conexiones entre los distintos componentes de un conjunto y la atribución de los materiales utilizados.

- **Resolución**

Desde un punto de vista teórico, el método de cálculo utilizado por SimSolid se basa en la teoría de aproximaciones externas, que es una generalización del método de elementos finitos.

SimSolid garantiza la precisión de la solución a través de un "análisis adaptativo de múltiples pasadas". Permite refinar automáticamente, mediante un proceso iterativo, la solución en las áreas donde es necesario obtener la máxima precisión, en base a las

variaciones de densidad energética local y a los errores absolutos en los límites de la región analizada. El usuario también tiene la capacidad de elegir el número de pasos iterativos que se deben realizar durante el proceso de resolución.

Durante la fase de resolución, después de haber elegido y fijado el tipo de análisis a realizar, se resuelve el modelo estructural. Con algunas limitaciones, SimSolid permite realizar los siguientes tipos de análisis:

- Análisis modal
- Análisis estático lineal y no lineal
- Tiempo de respuesta dinámico y análisis de frecuencia;
- Análisis térmico

Finalmente, antes de realizar un análisis, es necesario seleccionar las caras o aristas de los componentes a los que desea aplicar una condición de restricción.

- **Post - procesamiento**

Con SimSolid es posible realizar análisis cualitativos gráficamente, gracias a una animación en el tiempo del sistema modelado o mediante mapas colorimétricos que proporcionan una distribución de colores según las cantidades de interés. Además, para evaluaciones más precisas, es posible obtener valores puntuales de cualquier zona de un componente de la cantidad física de salida requerida. Por ejemplo, se pueden evaluar formas modales, tensiones, deformaciones, desplazamientos y reacciones de restricción del modelo. Además, dependiendo del tipo de análisis realizado, es posible visualizar y exportar gráficos 2D, (Giannelli, 2019).

### 3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 3.1. Resultados

##### 3.1.1. Análisis estático de la estructura del vehículo biplaza.

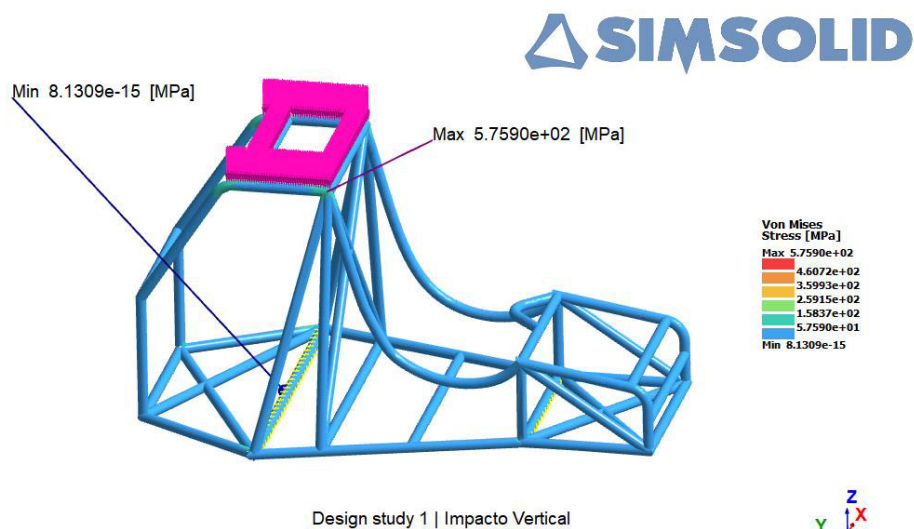
Para la simulación de la estructura del vehículo biplaza se utilizó el software SimSolid determinando de esta manera deformaciones y esfuerzos máximos, así como la ubicación de los mismos en la estructura.

##### ➤ ACERO ASTM A 36

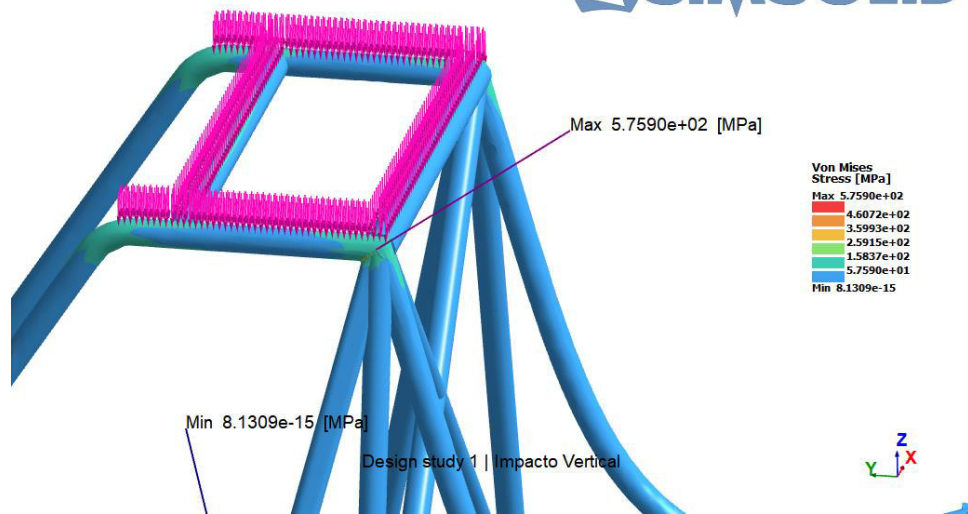
##### 1. Análisis con cargas de impacto vertical.

Se realiza un análisis vertical para asegurar la integridad del piloto y del copiloto en caso de una volcadura. Por lo tanto, se aplica una fuerza equivalente a 4 veces la carga de diseño del vehículo  $P = 439,5 \text{ kg}$  repartida en la parte superior de la estructura que conforma el compartimento del piloto. Según (Beltrán, 2009) las restricciones se ubican en los soportes de los ejes.

En la Figura 18 se pueden observar los resultados gráficos del análisis que muestran los esfuerzos de Von Mises, en tanto que en la Figura 19 los esfuerzos máximos que se sitúan en la barra que une la estructura, debido a la restricción del movimiento de esta última. La Figura 20 muestra el desplazamiento de la estructura debido a estos esfuerzos.

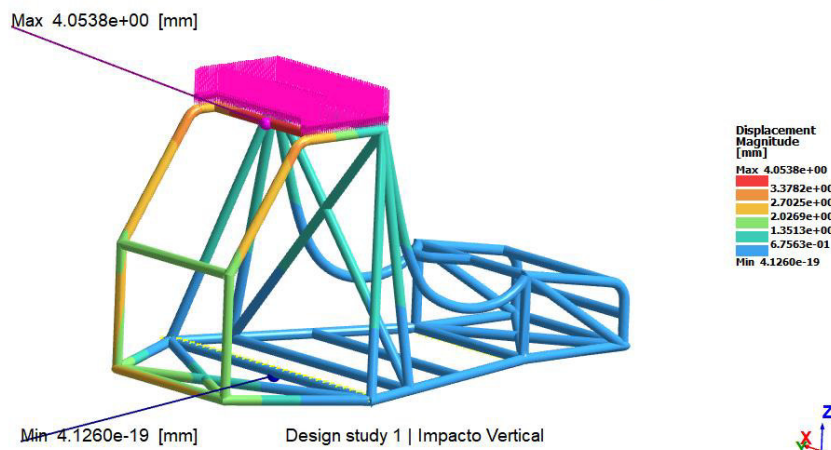


**Figura 18.** Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto vertical.  
**Fuente:** Propia



**Figura 19.** Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises.

Fuente: Propia



**Figura 20.** Desplazamiento para el análisis de impacto vertical.

Fuente: Propia

Los esfuerzos en los miembros estructurales son mayores a medida que se acerca a la parte superior del compartimento de pasajeros. Como se puede ver, estas zonas están más afectadas porque son las zonas directamente responsables de absorber el impacto.

- Esfuerzo máximo de Von Mises 575 MPa

En la Figura 20, al igual que en la representación de los esfuerzos de Von Mises, se observa que la región de mayor desplazamiento se encuentra en la parte superior, ya que es la región más alejada de las restricciones. También se observó desplazamiento nulo en las áreas más cercanas a las restricciones debido a que la estructura se fijó en estas áreas durante el análisis de simulación.

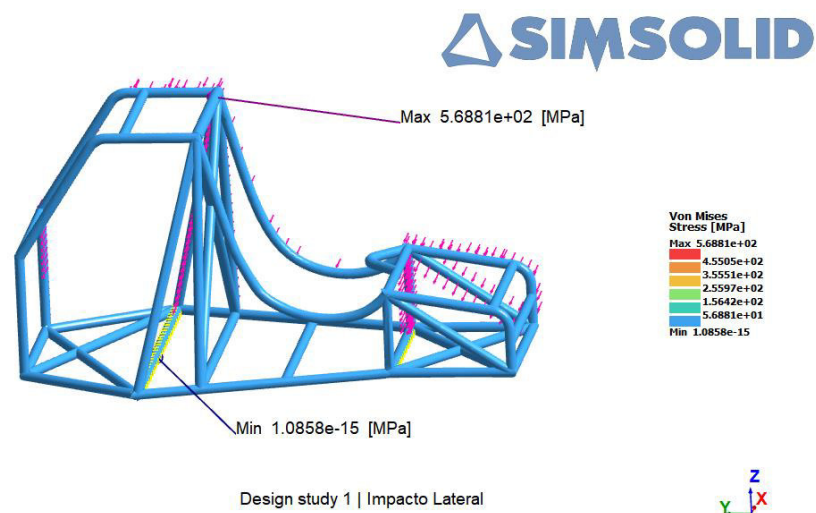
- Deformación máxima 4,05 mm

## 2. Análisis con cargas de impacto lateral

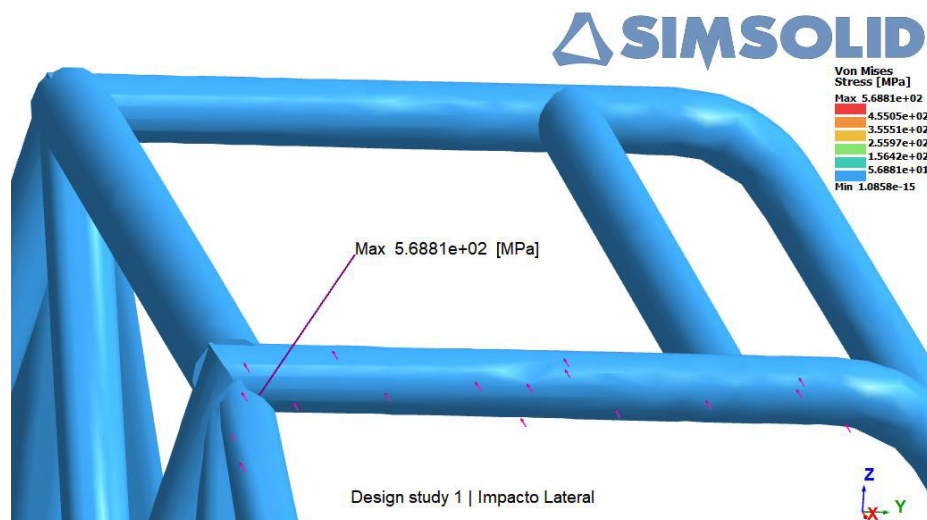
Se realiza un análisis de impacto lateral, aplicando una fuerza equivalente a 1,5 veces la carga de diseño  $P = 439,5 \text{ Kg}$  en el lateral de la estructura. Según (Beltrán, 2009) las restricciones se ubican en los soportes de los ejes. Debido a la tensión experimentada, se puede observar que la estructura del buggy se ve menos afectada ya que las barras absorben casi la totalidad de la fuerza.

En la Figura 21 se muestran los esfuerzos de Von Mises provocadas por la fuerza aplicada y el desplazamiento que sufre la estructura debido a dichos esfuerzos (Figura 23). En la Figura 22, se puede observar que los esfuerzos máximos se sitúan en la unión de las barras laterales y verticales del compartimento del pasajero.

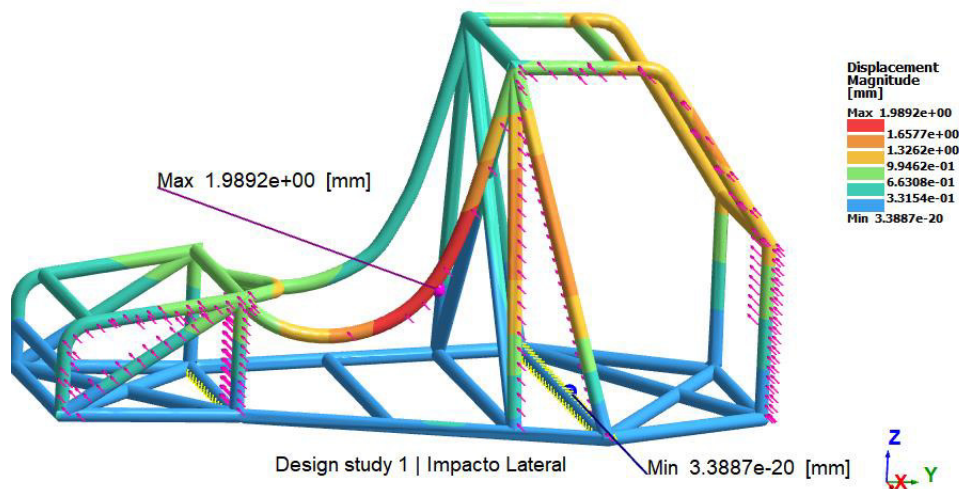
- Esfuerzo máximo de Von Mises 568 MPa



**Figura 21.** Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto lateral.  
**Fuente:** Propia



**Figura 22.** Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises.  
**Fuente:** Propia



**Figura 23.** Desplazamiento para el análisis de impacto lateral.

Fuente: Propia

En la Figura 23, al igual que con la representación de esfuerzos, se observa que la zona de mayor desplazamiento se encuentra en el compartimento del piloto, esto se debe a que el impacto se recibe de forma directa.

- Deformación máxima 1,98 mm

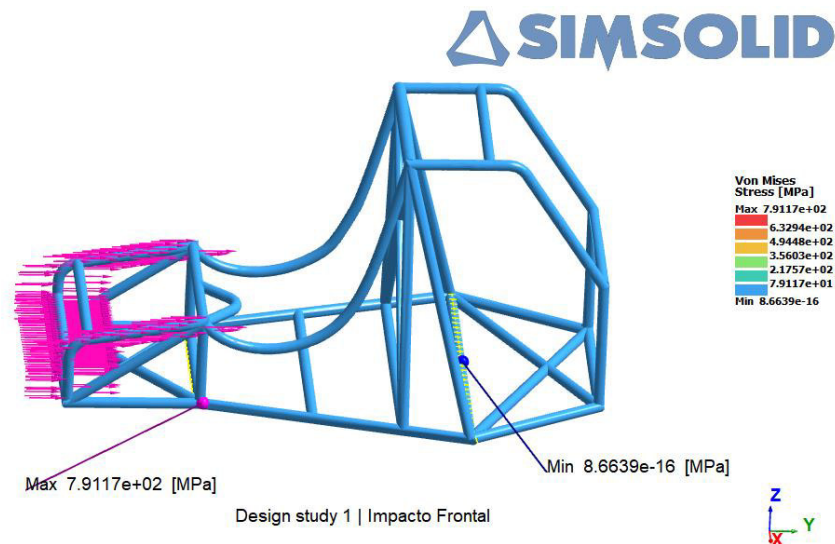
### 3. Análisis con cargas de impacto frontal

Se realiza un análisis de impacto frontal, aplicando una fuerza equivalente a 3 veces la carga de diseño  $P = 439,5 \text{ Kg}$  en las barras frontales de la estructura, distribuida en sentido longitudinal e impidiendo exclusivamente el desplazamiento de la parte trasera de éste, (Beltrán, 2009).

Debido a los esfuerzos a los que es sometida la estructura, se ha observado que el marco inferior tiende a doblarse, mientras que las barras superiores trabajan bajo compresión.

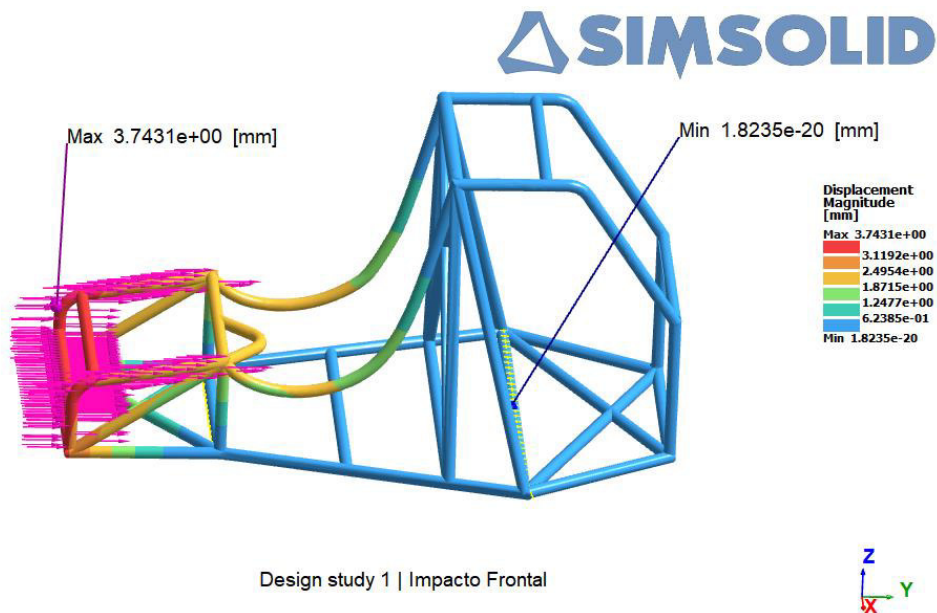
La Figura 24, muestra los esfuerzos de Von Mises causadas por las fuerzas aplicadas y los desplazamientos estructurales causados por estos esfuerzos, (Figura 25).





**Figura 24.** Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto frontal.  
Fuente: Propia

- Tensión máxima de Von Mises 791 MPa



**Figura 25.** Desplazamiento para el análisis de impacto lateral.  
Fuente: Propia

De igual forma que para la representación de las tensiones, se observa que las zonas que sufren mayores desplazamientos se encuentran en la parte frontal (Figura 26). Este resultado es consecuente, por las restricciones que se colocó en los ejes.

La rigidez del chasis no se ve afectada en este análisis porque la deflexión máxima es de 3,74 mm.

- Deformación máxima 3,74 mm.

## ➤ ALUMINIO 6061T

### 1. Análisis con cargas de impacto vertical.

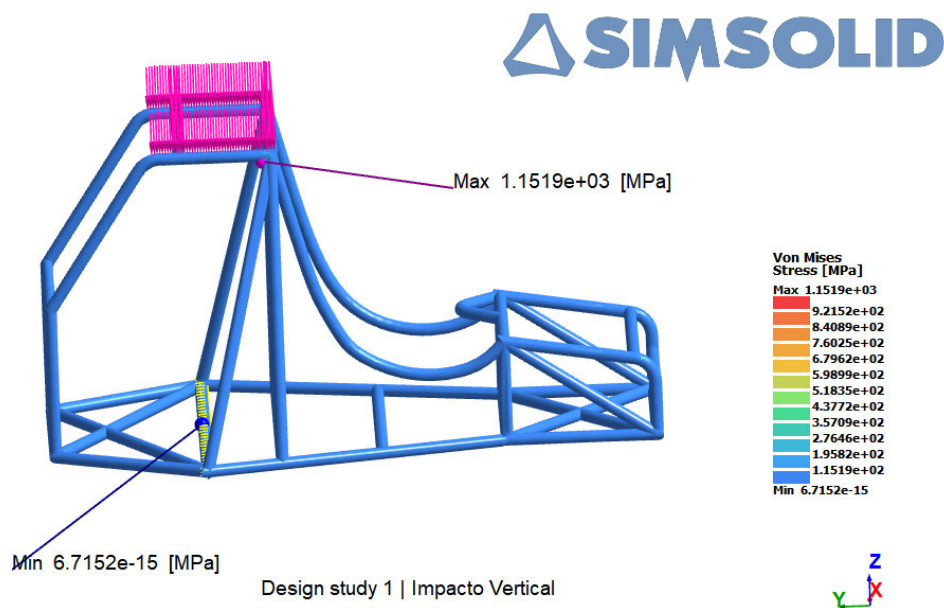
Con la variación del material al Aluminio 6061T y con los parámetros utilizados anteriores, se realiza un análisis vertical para asegurar la integridad de los ocupantes en caso de volcadura, por lo tanto, se aplica una fuerza equivalente a 4 veces la carga de diseño  $P = 439,5 \text{ kg}$  repartida en la parte superior de la estructura que forma parte del compartimento.

A continuación, se puede observar los resultados del análisis gráficamente representando los esfuerzos de Von Mises (Figura 26) y los desplazamientos estructurales causados por estos esfuerzos (Figura 28) que al igual que en la representación de los esfuerzos de Von Mises, se observa que la región de mayor desplazamiento se encuentra en la parte superior, ya que es la región más alejada de las restricciones.

Deformación máxima 11,69 mm

En la Figura 27, se puede observar que los esfuerzos máximos se sitúan en las barras que unen la estructura del buggy. Los esfuerzos en los miembros estructurales son mayores a medida que se acerca a la parte superior del compartimento de pasajeros. Se visualiza que estas zonas están más afectadas porque son las zonas directamente responsables de absorber el impacto.

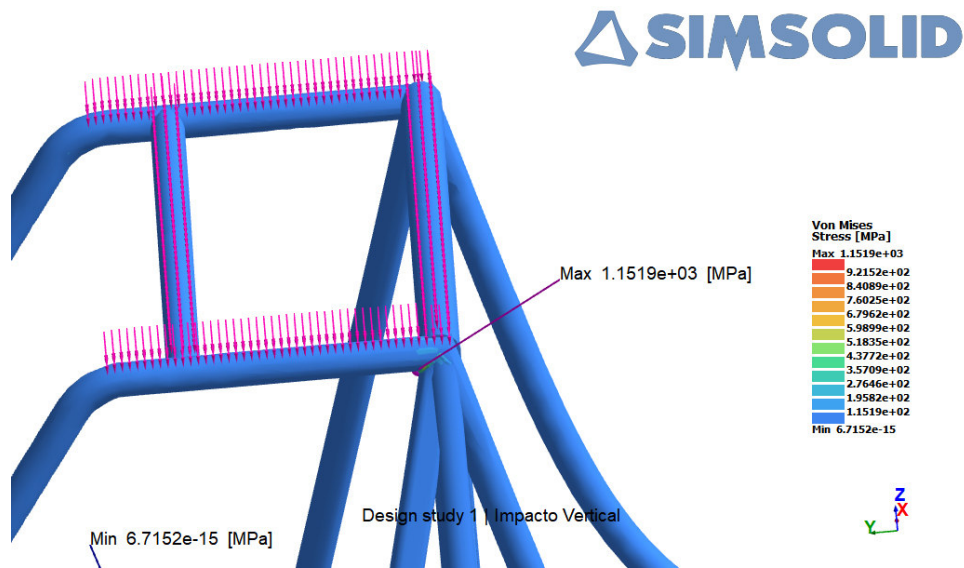
- Esfuerzo máximo de Von Mises 1151 MPa



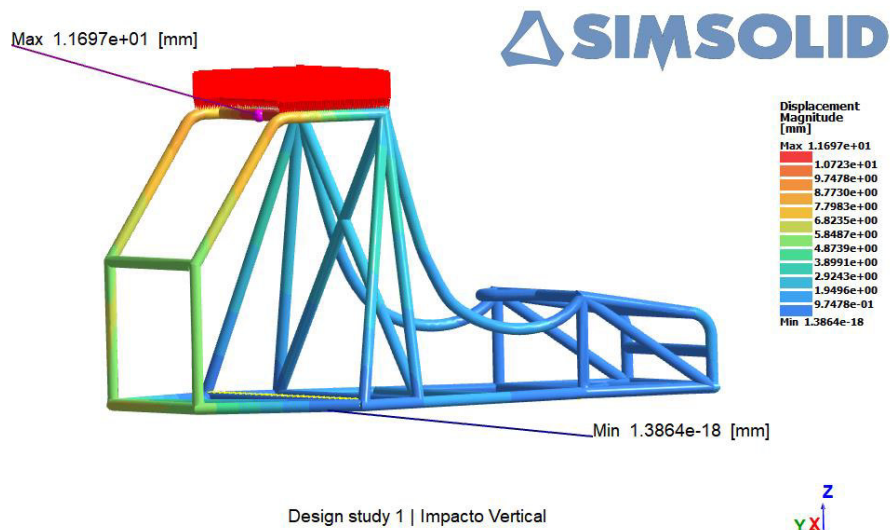
**Figura 26.** Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto vertical con Aluminio 6061 T.

**Fuente:** Propia.





**Figura 27.** Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises con Aluminio 6061 T.  
Fuente: Propia

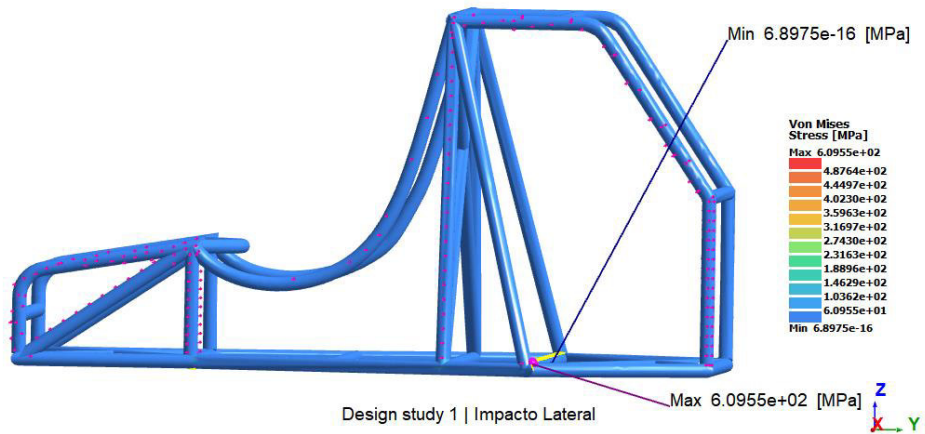


**Figura 28.** Desplazamiento para el análisis de impacto vertical con Aluminio 6061 T.  
Fuente: Propia

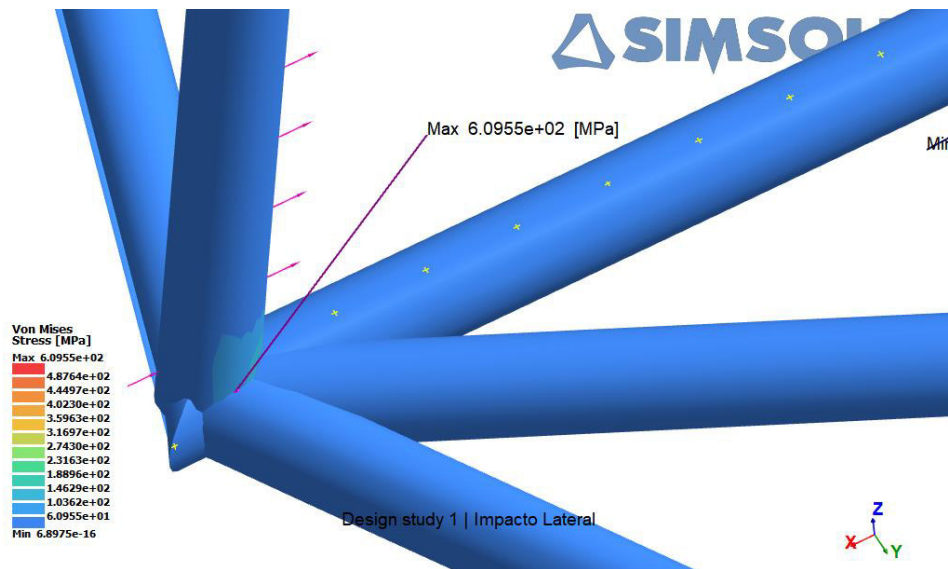
## 2. Análisis con cargas de impacto lateral

Se realiza un análisis de impacto lateral, aplicando una fuerza equivalente a 1,5 la carga del diseño del vehículo  $P = 439,5 \text{ Kg}$  en el lateral de la estructura. Debido al esfuerzo experimentado, se puede observar que la estructura tubular se ve afectada en la unión de los tubos en la parte inferior del chasis.

En la Figura 29 se muestran los esfuerzos de Von Mises provocados por la fuerza aplicada y los desplazamientos que sufre la estructura debido a los mismos, (Figura 31).



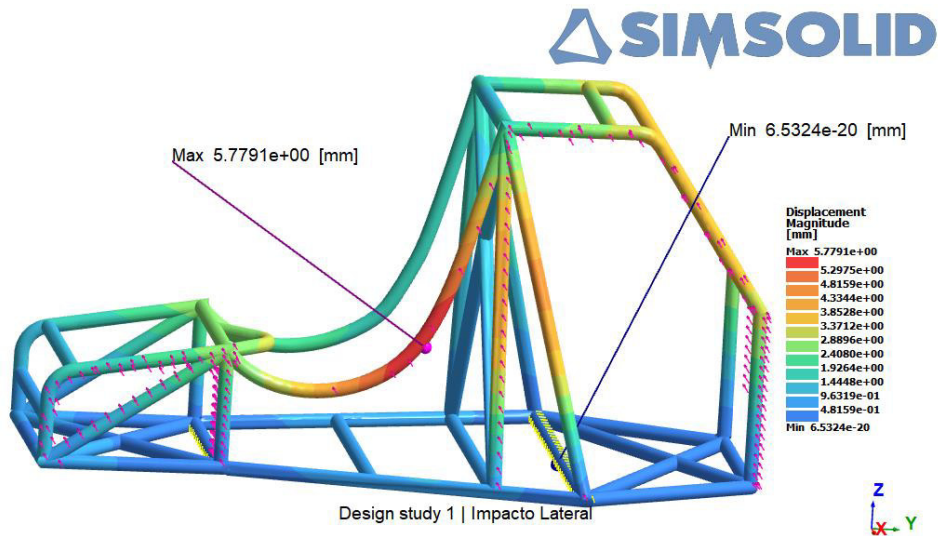
**Figura 29.** Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto lateral con Aluminio 6061 T.  
Fuente: Propia



**Figura 30.** Detalle del esfuerzo máximo de Von Mises con Aluminio 6061 T.  
Fuente: Propia

En la Figura 30, se puede observar que los esfuerzos máximos se sitúan en la unión de los tubos laterales con los tubos de la base de la carrocería.

- Esfuerzo máximo de Von Mises 609 MPa



**Figura 31.** Desplazamiento para el análisis de impacto lateral con Aluminio 6061 T.

**Fuente:** Propia.

En la Figura 31, al igual que para la representación de los esfuerzos, se puede observar que las regiones de mayor desplazamiento se encuentran en los tubos laterales del compartimento estructural.

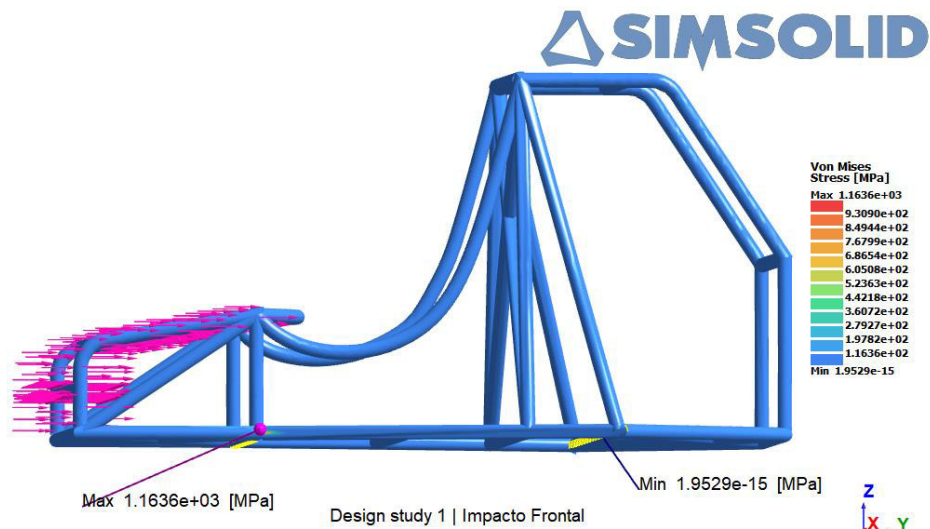
- Deformación máxima 6,53 mm

### 3. Análisis con cargas de impacto frontal

Se realiza un análisis de impacto frontal, se aplica una fuerza equivalente a 3 veces la carga de diseño del vehículo  $P = 439,5 \text{ Kg}$  en las barras frontales de la estructura.

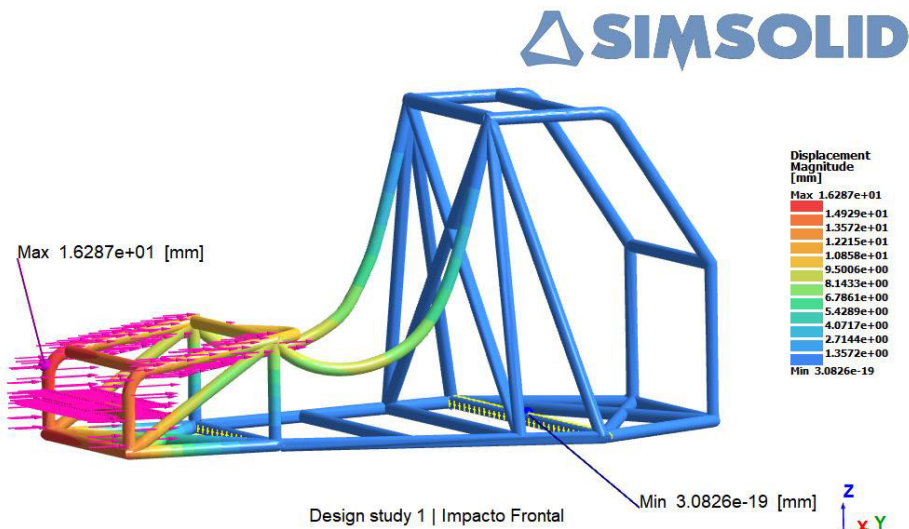
Debido a los esfuerzos que es sometido la estructura, se observó que el marco inferior tiende a doblarse, mientras que las barras superiores trabajan bajo condiciones de compresión.

La Figura 32 muestra los esfuerzos de Von Mises causados por las fuerzas aplicadas y los desplazamientos estructurales causados por estos esfuerzos se pueden observar en la Figura 33.



**Figura 32.** Esfuerzos de Von Mises para el análisis de impacto frontal con Aluminio 6061 T.  
Fuente: Propia

- Esfuerzo máximo de Von Mises 1163 MPa



**Figura 33.** Desplazamiento para el análisis de impacto lateral con Aluminio 6061 T.  
Fuente: Propia.

Al igual que para la representación de los esfuerzos se puede notar que la región con mayor desplazamiento se encuentra en la parte frontal, (Figura 33).

Según (Beltrán, 2009) en su estudio de “Diseño de un vehículo todo terreno” el valor obtenido en la deformación es de 4,4 mm con una carga de 50800 [N], en el presente estudio el análisis de impacto frontal con una carga de 12921,3 [N] se obtuvo una deformación de 16,28, por lo cual la rigidez del chasis se ve afectada.

- Deformación máxima 16,28 mm.

**Tabla 21.** Resultados obtenidos.

<b>MATERIAL</b>	<b>Pruebas</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Deformación máxima (mm)</b>
Acero A36	Impacto Vertical	575	4,05
	Impacto Lateral	568	1,98
	Impacto Frontal	791	3,74
Aluminio 6061T	Impacto Vertical	1151	11,69
	Impacto Lateral	609	6,53
	Impacto Frontal	1163	16,28

Fuente: Propia

### 3.1.2. Factor de aprovechamiento.

#### ➤ ACERO A36

El factor de aprovechamiento de la estructura en la simulación en cada carga de impacto sobrepasa el 100%, teniendo en cuenta el límite elástico del material utilizado para el análisis de la estructura (Tabla 16). Este hecho demuestra que la carga asume una dimensión estructural negativa, ya que, en la conexión de la estructura, los valores de tensión se obtienen dentro del límite de ductilidad del material, pero sin superar los 550 MPa que supondrían la rotura.

**Tabla 22.** Factor de aprovechamiento de las pruebas realizadas a los materiales.

<b>MATERIAL</b>	<b>Pruebas</b>	<b>Esfuerzo máximo (MPa)</b>	<b>Factor de aprovechamiento (%)</b>
Acero A36	Impacto Vertical	575	104,55
	Impacto Lateral	568	103,27
	Impacto Frontal	791	143,82
Aluminio 6061T	Impacto Vertical	1151	371,29
	Impacto Lateral	609	196,45
	Impacto Frontal	1163	375,16

Fuente: Propia

#### 1. Prueba de impacto vertical

En la prueba vertical se tiene un factor de aprovechamiento del 104,55%, estos esfuerzos máximos no indican un diseño incorrecto, ya que la deformación no es excesiva y no se producirá la rotura.

Finalmente, cabe señalar que, este análisis no brinda una representación real de las fuerzas que experimentará la estructura del vehículo en caso de un vuelco real, y el

mejor enfoque es realizar un estudio dinámico, pero dadas las limitaciones de utilizar un análisis estático, podría ser más correcto anclar el refuerzo del arco central y aplicar los pesos de todos los elementos individualmente a la ubicación ideal de la estructura.

## **2. Prueba de impacto lateral**

En la prueba lateral se obtiene un factor de aprovechamiento del 103,27%, estos esfuerzos máximos no indican un diseño incorrecto, ya que la deformación no es excesiva (1.98mm) y no se producirá la rotura.

## **3. Prueba de impacto frontal**

En la prueba lateral se obtiene un factor de aprovechamiento del 143,82%. El valor de factor de aprovechamiento es alto y es debido a que la barra frontal es relativamente corta, y aunque la tensión se distribuye por toda la barra delantera, la fuerza puntual sigue siendo grande.

### **➤ ALUMINIO 6061 T**

Los valores de factores de aprovechamiento en las pruebas de impacto vertical, frontal y lateral usando el material Aluminio 6061 T sobrepasan los valores admitidos, este hecho indica que el dimensionamiento de la estructura para esta hipótesis de carga es negativo, dado que en las conexiones de la estructura se alcanzan valores de esfuerzo fuera del límite plástico del material, superando el esfuerzo máximo admitido de 310 MPa (Tabla 22) por lo que la estructura fallaría.

## **3.2. Conclusiones**

- El principal objetivo del proyecto, el cual es diseñar y simular el vehículo biplaza de acuerdo con los requerimientos establecidos, se cumplió de forma satisfactoria.
- El acero ASTM A-36 es el material adecuado para la fabricación de la estructura del vehículo tipo buggy porque los esfuerzos máximos obtenidos y la deformación máxima en cada prueba son favorables con respecto al Aluminio 6061 T.
- Para la selección del material se tomaron en cuenta los criterios más relevantes como peso, precio, disponibilidad y propiedades mecánicas del material, y a través de un análisis de criterios ponderados se revalida que las opciones óptimas, de acuerdo con las valoraciones realizadas, son el Acero ASTM A36, y el Aluminio 6061 T.

- Como resultado del análisis estructural realizado en SimSolid, es posible observar la ubicación de los mayores esfuerzos de Von Mises, siendo estos en intersecciones o conexiones.
- El diseño de la estructura del chasis se realizó a través de estudios ergonómicos para el uso en el sector del turismo, con protecciones laterales y fácil acceso a la cabina tanto del piloto como de su acompañante.
- El software de simulación Altair Inspire SIMSOLID permite realizar trabajos de simulación sin emplear grandes recursos informáticos. En este caso particular de simulación el tiempo de análisis tomó minutos, y al generar diferentes distribuciones para diferentes casos de carga de impacto, los tiempos de simulación no cambian.
- El uso de software de diseño es de gran ayuda en la realización de este tipo de proyectos ya que reduce el tiempo de diseño.
- El diseño de la estructura del vehículo biplaza tipo buggy garantiza que el vehículo tenga la capacidad para transportar a dos personas de 70 kg cada una de manera cómoda y segura.

### **3.3. Recomendaciones**

- Se recomienda cambiar la geometría del material, para observar como podrían variar los esfuerzos de Von Mises.
- La facultad de Ingeniería Mecánica deberá realizar la gestión para implementar estudios sobre simulación utilizando el software SimSolid ya que es un programa versátil que no usa altos recursos computacionales.
- La construcción del vehículo tipo buggy es de forma artesanal, no se dispone de normas para la construcción por lo que se recomienda promover la creación de normas que regulen este proceso.
- Para trabajos futuros se recomienda reforzar la parte superior de la estructura del vehículo tipo buggy ya que en una volcadura este lugar es el más afectado.
- Analizar los concentradores de esfuerzos en las soldaduras, ya que pudo haber afectado los resultados de las pruebas de impacto.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Goelke, M. (Diciembre de 2021). *Altair University*. Obtenido de <https://altairuniversity.com/free-ebook-simulation-revolution-with-simsolid/>
- 1323:2009, N. I. (s.f.). *Vehículos automotores. Carrocerías de buses*. (Vol. 1). Quito, Ecuador. Obtenido de <https://www.normalizacion.gob.ec/buzon/normas/n-te-inen-1323-1.pdf>
- Adanaque, A. A., & Flores, G. P. (2016). Análisis estructural del chasis de un vehículo buggy biplaza todo terreno de uso turístico. Lima, Perú: (Bachelor's thesis), Universidad Tecnológica del Perú.
- Altair-HyperWorks. (2020). *Altair SimSolid*. Obtenido de <https://bit.ly/30ATbhd>
- Altair-SimSolid. (2019). *Fast Start Training Guide*. Obtenido de <https://www.simsolid.com/simsolid-demo-models/SIMSOLID-FastStartTrainingGuide.pdf>
- Aluminio, C. (2019). *Cedal Aluminio*. Obtenido de <http://www.cedal.com.ec/index.php/es/categorias-de-productos/perfileria-de-aluminio.html>
- Beltrán Díaz, A., & Ejarque Martínez, P. (2009). Diseño de un vehículo todoterreno. *Diseño de un vehículo todoterreno*.
- Bermeo, M. H., & Calle, B. E. (2014). Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehículo monoplace para la competición en la formula SAE. Cuenca, Azuay, Ecuador : (Bachelor's thesis) Universidad Politécnica Salasiana .
- Bolaños, Y., & Cruz, M. S. (2021). Análisis comparativo del desempeño en vehículos monoplace tipo Buggy entre motor de encendido provocado y motor eléctrico. Ibarra, Imbabura, Ecuador: (Bachelor's thesis) Universidad Técnica del Norte.
- Cabrera, R. V., & Márquez, F. P. (2014). Diseño y construcción de un chasis tubular para un vehículo de competición tipo supercrosscar. Cuenca, Azuay, Ecuador: (Bachelor's thesis) Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca.
- Chiquesi, A. P., & Dos Santos, P. T. (2020). Uso do método dos elementos finitos para o cálculo dos deslocamentos em treliças. Belo Horizonte, Brasil: Universidade de Araraquara (UNIARA) .
- Espín, & Hidalgo. (2012). Construcción de un Buggy con un motor de motocicleta de 200cc de 4 tiempos. Quito, Ecuador: (Bachelor's thesis) UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA EQUINOCCIAL.
- Giannelli, V. (2019). Análisis estructural di un sistema di scarico per autoveicoli mediante metodo numerico meshless. Torino, Italia. Recuperado el 2021, de <https://webthesis.biblio.polito.it/14162/1/tesi.pdf>
- Guasumba, J. (2019). *Análisis estructural de chasis tubular tipo Jaula Nissan Tiida sometido a prueba de impacto lateral basado en simulación por el Método de Elementos Finitos*.
- HONDA. (2021). *HONDA*. Obtenido de <https://motos.honda.com.ec/producto/xr250-tornado-14#ficha>



- INNEO-ALTAIR. (s,f). *Altair-SimSolid*. Obtenido de <https://bit.ly/3kJUpOo>
- IPAC. (2019). Catálogo IPAC. Obtenido de [http://www.ipac-acero.com/revista-digital/CatalogoIPAC\\_2019.pdf](http://www.ipac-acero.com/revista-digital/CatalogoIPAC_2019.pdf)
- Jaramillo, S. A. (2018). Análisis estructural y rediseño de un chasis tubular de un vehículo buggy. Guayaquil, Guayas, Ecuador: (Bachelor's thesis), Espol.
- López Cisneros, J. A., & Silva Gavidia, A. D. (2010). Diseño y construcción de un vehículo monoplace de modalidad fórmula básica en pavimento para monoplaces para competencias por gravedad. Quito.
- Martinez, F. I. (2017). Diseño de un chasis tubular para un Carcross. Bachelor's thesis.
- Martínez, F. M. (2018). Análisis mediante elementos finitos del comportamiento de perfiles combinados de estructuras de autobuses. (Bachelor's thesis).
- Mora, G. A., & Suconota, K. F. (2017). Diseño y construcción del chasis tubular del vehículo híbrido tipo Buggy 4 x 4 para la carrera de Ingeniería Automotriz. Riobamba, Chimborazo, Ecuador: (Bachelor's thesis) Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- Pauta, P., & Villacís, J. (2012). Diseño y construcción de un vehículo biplazado estructura tubular con motor monocilíndrico yamaha yfm 200. Cuenca, Ecuador: (Bachelor's thesis) Universidad del Azuay.
- Riba, C. (2002). Diseño Concurrente. España: Edicions de la Universitat Politècnica de Catalunya.
- Salinas, R. (2015). *AutoBild.es*. Obtenido de <https://www.autobild.es/reportajes/asi-nacio-buggy-original-una-historia-fascinante-252629>
- Souz, E. F. (2016). Análise estrutural de um chassi de um veículo do tipo buggy. Paraná, Paraná, Brasil: (Bachelor's thesis) Universidade Tecnológica Federal do Paraná.
- Studio, I. (2020).
- Tipanluisa, L. E., Remache, A. P., & Reina, S. W. (2017). Emisiones Contaminantes de un Motor de Gasolina Funcionando a dos Cotas con Combustibles de dos Calidades. *Información tecnológica*, 28(1), 03-12.
- Tutorica. (2020). *Tutorica*. Obtenido de <https://tutorica.com/blog/nociones-basicas-de-la-fisica-del-movimiento-de-los-vehiculos/>
- Wong, J. Y. (1978). *Theory of Ground Vehicles*. Ottawa.

