



TecnoCampus
Escola Superior
Politécnica

Centre adscrit a la



Universitat
Pompeu Fabra
Barcelona

Grado en Ingeniería Mecánica

DISEÑO DE CHASIS PARA UN FORMULA STUDENT
Memoria

RUBÉN FERNÁNDEZ CAÑIZARES
PONENTE: PABLO GENOVESE

PRIMAVERA 2024



TecnoCampus
Mataró-Maresme

Resum

En aquest treball de fi de grau es dissenya, simula i posa a prova un xassís tubular d'acer per al monoplaça de Formula Student "vCAT-24", que competirà al llarg de l'any 2024. El desenvolupament del treball involucra disseny i simulacions utilitzant SolidWorks com a eina principal, desenvolupant tant el xassís com els ancoratges necessaris en aquest, i, a més, es fabricaran dos prototips, una escala reduïda fabricat en acer i un altre a escala real en PVC abans de la construcció del xassís final. Com a resultat s'obté un dels xassissos tubulars més lleugers a tota la competició, fent així que el "vCAT-24" sigui realment competitiu.

Resumen

En este trabajo de fin de grado se diseña, simula y pone a prueba un chasis tubular de acero para el monoplaça de Formula Student "vCAT-24", que competirá a lo largo del año 2024. El desarrollo del trabajo involucra diseño y simulaciones utilizando SolidWorks como herramienta principal, desarrollando tanto el chasis como los anclajes necesarios en este, y, además, la fabricaron dos prototipos, uno en escala reducida fabricado en acero y otro a escala real en PVC antes de la construcción del chasis final. Como resultado se obtiene uno de los chasis tubulares más ligeros en toda la competición, haciendo así que el "vCAT-24" sea realmente competitivo.

Abstract

In this final degree project, a tubular steel chassis is designed, simulated, and tested for the Formula Student single-seater "vCAT-24", which will compete throughout the year 2024. The development of the work involves design and simulations using SolidWorks as the main tool, developing both the chassis and the anchors necessary for it, in addition, two prototypes were manufactured, one on a reduced scale made of steel and another on a full scale in PVC before the construction of the final chassis. As a result, one of the lightest tubular chassis in the entire competition is obtained, thus making the "vCAT-24" truly competitive.

ÍNDICE

Índice de ilustraciones.....	III
Índice de tablas.....	VII
Glosario de términos.....	VIII
1. Objetivos.....	1
1.1. Propósito.....	1
1.2. Finalidad.....	1
1.3. Objeto.....	1
1.4. Alcance.....	1
1.5. Contexto en las líneas de investigación y transferencia de conocimiento del TecnoCampus.....	2
2. Antecedentes y necesidades de información.....	4
2.1. Que es la Formula Student.....	5
2.1.2. Contexto histórico.....	8
2.2. Partes de un Formula Student.....	11
2.3. Normativa de competición.....	15
2.4. Estudio de patentes.....	18
2.5. Antecedentes de Chasis.....	20
2.5.1. Tipos de chasis en el sector de la automoción de competición.....	20
2.5.2. Tipos de chasis en la Formula SAE.....	23
2.5.3. Análisis de chasis vigentes.....	26
3. Objetivos y especificaciones técnicas.....	29
3.1. Objetivos.....	30
3.2. Especificaciones Técnicas.....	37
3.2.1. Estudio de materiales.....	37
4. Planteamiento de soluciones y diseño.....	41
4.2. Solución escogida.....	41

4.3. Selección de materiales.....	43
4.4. Estudio de requisitos estructurales y simulaciones.....	45
5. Diseño del chasis.....	45
5.1. Sección frontal.....	46
5.2. Sección de cabina.....	47
5.3. Sección posterior o de powertrain.....	49
5.4. Firewall y suelo del monoplaza.....	51
5.5. Disposición de tubos.....	53
5.6. Anclajes.....	54
5.7. Chasis completo.....	56
5.8. Iteraciones descartadas.....	63
6. Fabricación.....	66
7. Verificación de diseño.....	70
7.1. Simulaciones.....	71
7.2. SES.....	81
7.3. Pruebas físicas.....	83
8. Análisis técnico, medioambiental y económico.....	85
8.1. Análisis técnico.....	85
8.2. Análisis económico.....	88
8.3. Análisis medioambiental.....	90
8.4. Perspectiva de género.....	90
9. Planificación del trabajo.....	91
9.1. Análisis de riesgos y plan de contingencia.....	95
10. Futuros pasos.....	97
11. Conclusión.....	98
12. Bibliografía.....	100

Índice de ilustraciones.

Ilustración 1.1: Equipo TCM MotorSports 2024. Fuente Propia.	2
Ilustración 2.1: Formula Student Spain. Fuente: [20].	5
Ilustración 2.2: "Tilt Test" o prueba de vuelco. Fuente: [20].	6
Ilustración 2.3: Puntuaciones por prueba en competición. Fuente: [9].	7
Ilustración 2.4: Primer equipo ganador de la FSAE - Texas University. Fuente: [5].	8
Ilustración 2.5: Primera Formula Student Spain – 2010. Fuente: [20].	10
Ilustración 2.6: Honeycomb de aluminio. Fuente: Google imágenes.	12
Ilustración 2.7: Sistema de transmisión de potencia de un Formula SAE. Fuente: [19].	13
Ilustración 2.8: Paquete aerodinámico de un Formula SAE. Fuente: [18].	14
Ilustración 2.9: Formula SAE Rules 2012. Fuente: Formula SAE.	15
Ilustración 2.10: Triangulación Nodo-a-Nodo definida por normativa. Fuente: [9].	17
Ilustración 2.11: Normativa de jaulas antivuelco y seguridad de cabina. Fuente: [9]. ...	17
Ilustración 2.12: Sistema de freno con 4 pedales inventado por McLaren F1 Team. Fuente: [13].	18
Ilustración 2.13: Conjunto de carrocería y chasis independiente. Fuente: [10].	21
Ilustración 2.14: Chasis tubular de vehículo de carreras. Fuente: [11].	21
Ilustración 2.15: Chasis monocasco de vehículo común. Fuente: [12].	23
Ilustración 2.16: Chasis tubular de Formula SAE. Fuente: [14].	24
Ilustración 2.17: Chasis híbrido de Formula SAE. Fuente: [16].	24
Ilustración 2.18: Chasis monocasco de Formula SAE. Fuente: [16].	25
Ilustración 2.19: Chasis tubular de Universidad Politécnica de Salesiana. Fuente: [14]	26
Ilustración 2.20: Chasis tubular de Universidad de La Laguna. Fuente: [15].	27
Ilustración 2.21: Chasis tubular de Universidad de Cantabria. Fuente: [16].	27
Ilustración 2.22: Chasis monocasco de Escuela Técnica Superior de Ingeniería. Fuente: [17]	28
Ilustración 3.1: Triangulación nodo a nodo y disposición de miembros de la estructura primaria. Fuente: [9].	30
Ilustración 3.2: Requisitos de posicionamiento del volante y Front Hoop y Main Hoop. Fuente: [9]	33
Ilustración 3.3: Requerimientos de estructura de impacto lateral. Fuente: [9].	34
Ilustración 3.4: Plantillas necesarias para inspección de cockpit. Fuente: [9]	35

Ilustración 3.5: Requerimientos de distancias entre el casco y el Front Y Main Hoop. Fuente: [9]	35
Ilustración 3.6: Representación del piloto por normativa. Fuente: [9].....	36
Ilustración 3.7: Requisitos mínimos de sección. Fuente: [9].....	38
Ilustración 3.8: Tabla de cálculo adicional para tubo de 25.4 x 2.0. Fuente propia.	39
Ilustración 3.9: Tabla de cálculo adicional para tubo de 25.4 x 1.6. Fuente propia.	40
Ilustración 4.1: Formula SAE con chasis monocasco. Fuente: Formula SAE Media. ...	42
Ilustración 4.2: Formula SAE con chasis tubular. Fuente: Formula SAE Media.....	42
Ilustración 4.3: Propiedades químicas del E235. Fuente: [21].	44
Ilustración 4.4: Propiedades mecánicas del E235. Fuente: [21].	44
Ilustración 5.1: Sección frontal del chasis. Fuente propia.	46
Ilustración 5.2: Esquema lateral de la sección frontal. Fuente propia.	47
Ilustración 5.3: Sección de cabina. Fuente propia.	47
Ilustración 5.4: Jaulas antivuelco. Fuente propia.	48
Ilustración 5.5: Sección posterior. Fuente propia.	49
Ilustración 5.6: Ensamblaje de aerodinámica y powertrain. Fuente propia.....	50
Ilustración 5.7: Suelo del monoplaza. Fuente propia.	51
Ilustración 5.8: Composición del firewall. Fuente propia.	52
Ilustración 5.9: Fibra de vidrio utilizada en el firewall. Fuente: Subministrada por el patrocinador.	52
Ilustración 5.10: Disposición de tubos del chasis. Fuente propia.....	53
Ilustración 5.11: Disposición de anclajes en el chasis. Fuente propia.....	54
Ilustración 5.12: Ensamblaje sobre los anclajes del chasis. Fuente propia.	55
Ilustración 5.13: Pesos de los componentes mecánicos del monoplaza “aerodinámica”. Fuente propia.	56
Ilustración 5.14: Pesos de los componentes mecánicos del monoplaza “dynamics”. Fuente propia.	57
Ilustración 5.15: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Motor”. Fuente propia.	57
Ilustración 5.16: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Digital”. Fuente propia.	57
Ilustración 5.17: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Baterías”. Fuente propia.	58

Ilustración 5.18: Hoja de cálculo para dimensionado de sistema de frenada. Fuente propia.....	59
Ilustración 5.19: Diseño final del monoplaza. Fuente propia.....	60
Ilustración 5.20: Neumáticos Hoosier 21'. Fuente propia.	60
Ilustración 5.21: Ensamblaje de carrocería y paquete aerodinámico. Fuente propia.	61
Ilustración 5.22: Motor Emrax 228. Fuente propia.	62
Ilustración 5.23: Primera iteración del chasis. Fuente propia.....	63
Ilustración 5.24: Quinta iteración del chasis. Fuente propia.	64
Ilustración 5.25: Onceava y definitiva versión del chasis. Fuente propia.	65
Ilustración 6.1: Chasis tubular en proceso de fabricación. Fuente propia.	66
Ilustración 6.2: Fabricación del chasis con soldadura TIG. Fuente propia.	67
Ilustración 6.3: Planos de jaulas antivuelco. Fuente propia.	67
Ilustración 6.4: Ensamblaje de carrocería (sin lijar) sobre el prototipo de chasis. Fuente propia.....	68
Ilustración 6.5: Chasis real junto a chasis prototipo. Fuente propia.....	69
Ilustración 7.1: Condiciones de la simulación en Ansys. Fuente propia.	71
Ilustración 7.2: Deformaciones sobre la simulación en Ansys. Fuente propia.....	72
Ilustración 7.3: Esfuerzos máximos sobre la pieza simulada. Fuente propia.	72
Ilustración 7.4: Deformaciones en la simulación de impacto frontal. Fuente propia.....	73
Ilustración 7.5: Tensiones en la simulación de impacto frontal. Fuente propia.	73
Ilustración 7.6: Factor de seguridad en la simulación de impacto frontal. Fuente propia.	74
Ilustración 7.7: Deformaciones en la simulación de impacto trasero. Fuente propia.....	75
Ilustración 7.8: Tensiones en la simulación de impacto trasero. Fuente propia.	76
Ilustración 7.9: Factor de seguridad en la simulación de impacto trasero. Fuente propia.	76
Ilustración 7.10: Deformaciones en la simulación de impacto lateral. Fuente propia.....	77
Ilustración 7.11: Tensiones en la simulación de impacto lateral. Fuente propia.....	78
Ilustración 7.12: Factor de seguridad en la simulación de impacto lateral. Fuente propia.	78
Ilustración 7.13: Deformaciones en la simulación de vuelco. Fuente propia.....	79
Ilustración 7.14: Tensiones en la simulación de vuelco. Fuente propia.	79
Ilustración 7.15: Factor de seguridad en la simulación de vuelco. Fuente propia.....	80
Ilustración 7.16: Imagen sobre el SES en competición. Fuente: [25]	81

Ilustración 7.17: Primera página del SES presentado por TCMS. Fuente propia.	82
Ilustración 7.18: Pruebas de trapecios de suspensión sobre el chasis. Fuente propia. ...	83
Ilustración 7.19: Impact Attenuators de propiedad del equipo. Fuente propia.....	84
Ilustración 8.1: Patrocinios de Altarir y Cimworks. Fuente Propia.	85
Ilustración 8.2: Instalaciones de CIFA. Fuente: [22].....	86
Ilustración 8.3: Instalaciones de Elhco. Fuente: [23]	87
Ilustración 8.4: Tipos de patrocinadores de TCMS. Fuente: Propia/TCM MotorSports.	88
Ilustración 8.5: Presupuestos de TCMS para 2024. Fuente: Propia/TCM MotorSports.	89
Ilustración 9.1: RoadMap de TCMS. Fuente propia.	91
Ilustración 9.2: Documento de seguimiento de TCMS. Fuente propia.	94
Ilustración 9.3: Documento de documentación técnica de TCMS. Fuente propia.	95
Ilustración 10.1: Propuesta de chasis monocasco conceptual para futuros años. Fuente propia.	97
Ilustración 10.2: Propuesta de monoplaza completo "VCAT-25 EVO". Fuente Propia.	97
Ilustración 11.1: VoltCat 24 finalizado. Fuente propia.	99

Índice de tablas.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas. Fuente propia.	37
Tabla 3.2: Materiales propuestos; Fuente propia.....	39
Tabla 3.3: Especificaciones del tubo propuesto 1. Fuente propia.	39
Tabla 3.4: Especificaciones del tubo propuesto 2. Fuente propia.	40
Tabla 5.1: Pesos de los componentes mecánicos del monoplaza “chasis”. Fuente propia.	56
Tabla 5.2: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Low Voltage”. Fuente propia.	57
Tabla 5.3: Mejoras y reducciones de peso. Fuente propia.....	59
Tabla 5.4: Reparto de pesos. Fuente propia.	59
Tabla 9.1: Descripción del sistema PDCA. Fuente propia.....	92
Tabla 9.2: Sistema PDCA de TCMS para el año 2023-2024, departamento de chasis. Fuente propia.	93

Glosario de términos.

AIP	Anti Intrusion Plate
BOM	Lista de materiales o elementos necesarios para la construcción de un artículo.
CBOM	Lista de materiales con sus respectivos costes.
DBOM	Lista de materiales con sus respectivas descripciones.
ECU	Electronic Control Unit
FS	Formula Student
FSF	Formula Student France
FSG	Formula Student Germany
FSS	Formula Student Spain
IA	Impact Attenuator
IAD	Impact Attenuator Data
ISO	International Organization for Standardization
PCB	Printed Circuit Board
PDCA	Planificar, hacer, verificar, actuar. – Sistema de seguimiento de tareas.
SES	Structural Equivalency Spreadsheet (Documento necesario para competir en cualquier competición de FS).
SESA	SES Aprobado
STA	Asociación de Técnicos de Automoción
TFG	Trabajo de Fin de Grado
TIG	Tungsten Iner Gas. Método de soldadura.

TS	Tractive System
TSAC	Tractive System Accumulator Container
vCAT-24	Abreviación del nombre “VoltCAT-24”, monoplaça para 2024 de TCM MotorSports

1. Objetivos.

1.1. Propósito.

El TFG se centra en mejorar la competitividad del monoplaça vCAT-24 desarrollado por "TCM MotorSports" para la temporada 2024. El objetivo es que compita eficazmente en varias competiciones, equiparándose a equipos con mayores presupuestos y experiencia. El enfoque principal es no solo participar, sino ganar en el ámbito de los monoplazas de competición.

1.2. Finalidad.

El objetivo es lograr un chasis óptimo en resistencia y peso utilizando los mejores materiales de alta calidad. Se busca desarrollar el chasis tubular más ligero a nivel global en Formula Student se diseñarán anclajes personalizados para maximizar la eficiencia del monoplaça y lograr la máxima adaptabilidad del chasis a elementos de masa suspendida, como la suspensión y el paquete aerodinámico.

1.3. Objeto.

El objeto del proyecto es el chasis tubular de acero del monoplaça vCAT-24. A demás del chasis fabricado, también se incluirán diferentes anclajes para una perfecta integración con el resto del monoplaça. También se realizará un pequeño modelo a escala del chasis. Como objeto final, se obtendrá en ensamblaje total de monoplaça.

1.4. Alcance.

A lo largo de este TFG, se diseñará, simulará y fabricará el chasis tubular, así como los anclajes de la suspensión, y los componentes referentes a la ergonomía y la seguridad del monoplaça. También se fabricará una maqueta del chasis para realizar diversos ensayos. Se realizarán los planos necesarios para la construcción del chasis, es decir, los planos que son solicitados por los patrocinadores que se encargan de la fabricación. También se realizará el SES, documento necesario para participar en la competición.

1.5. Contexto en las líneas de investigación y transferencia de conocimiento del TecnoCampus.

La Formula SAE no tan solo es un proyecto que tienen algunos estudiantes como pasa tiempo, es mucho más que eso, es el proyecto o competición como más fama y reconocimiento en el ámbito tecnológico. Tanto es así, que se considera la cantera de ingenieros de la Formula 1. Este proyecto puede llegar a ser una insignia para el centro universitario, y como se está empezando a ver en muchos de estos, dar un prestigio extra a la universidad al tener un buen equipo de Formula SAE. Algunos ejemplos de esto son RennTeam, de la universidad de Stuttgart, o AMZ Razing, conformado por varios estudiantes de universidades suizas.



Ilustración 1.1: Equipo TCM MotorSports 2024. Fuente Propia.

En el caso de este TFG, la fabricación del chasis del monoplaza vCAT-24 marca un antes y un después en el desarrollo de este proyecto en nuestra universidad, ya que es el chasis que se montara en el primer monoplaza que se desarrolla en la historia del TecnoCampus. A demás de esto, y pese a que no se incluya en este TFG, también se han dejado las indicaciones y planos de un chasis monocasco de fibra de carbono para mejorar el coche en los próximos años.

A demás, el equipo TCM MotorSports, del que soy Team-Leader y Manager del Departamento de Mecánica, obliga a los integrantes a realizar dos documentos, uno con toda la documentación técnica de la pieza que se diseñe, y otro, al que llamamos “Documento de Seguimiento”, donde quedan registrados todos los fallos o problemas que se han tenido al diseñar la pieza y como se han solucionado estos, además de anotaciones sobre el diseño. De esta manera, los estudiantes que entren al equipo en los próximos años tendrán una “Guía” para no cometer los mismos fallos dos veces, y así, se consigue que el conocimiento del equipo y de los estudiantes del TecnoCampus sobre la Formula SAE se transmita de generación en generación de estudiantes.

2. Antecedentes y necesidades de información.

Para poder realizar este proyecto de manera adecuada, primero debemos comprender que es exactamente la Formula Student o Formula SAE; las competiciones que existen, la normativa, la historia de la competición, las diferentes pruebas que se realizan y a los diferentes equipos y monoplasas que participan en ellas.

Para ello, abordaremos apartados donde se definirán por completo todas las partes que componen un monoplasa de competición, y los reglamentos que los equipos tienen que seguir para poder desarrollarlos de forma adecuada.

También, y pese a que no sea algo que tenga gran relevancia en esta competición, abordaremos las patentes relacionadas con la Formula SAE. Este es un apartado que, como se ha comentado, es poco relevante, ya que todos los progresos tecnológicos que se realicen en un monoplasa pasan a ser públicos al acabar la temporada por contrato con la Formula SAE. De esta manera, cualquier desarrollo tecnológico que realicen los equipos, podrá ser utilizado al año siguiente para docencia o para el desarrollo de monoplasas de otros equipos.

2.1. Que es la Formula Student.

La Formula Student es una competición a nivel mundial que involucra a estudiantes universitarios o de posgrado, fomentando la innovación y la motivación en los estudiantes de ingeniería. En esta competición, los estudiantes deberán formar equipos que oscilan entre 30 y 80 personas para diseñar, construir y desarrollar un monoplaza de carreras estilo Formula. [1]



Ilustración 2.1: Formula Student Spain. Fuente: [20].

Pese a que esta competición está enfocada a los estudiantes de ingeniería, también pueden participar estudiantes de muchos otros grados, ya que los estudiantes forman escuderías similares a las de la Formula 1, es decir, que además de desarrollar el monoplaza, tienen que dar imagen a sus patrocinadores o tener buenos resultados en redes sociales, por lo que también necesitaran un equipo de empresa o de audiovisuales.

Esta competición se lleva a cabo en diversos países como Alemania, España, Japón, Brasil, Australia, entre otros muchos más, haciendo un total de 25 países en la actualidad. Siguiendo las normativas establecidas por la Formula SAE, estas competiciones pueden llegar a reunir cerca de 150 equipos y más de 3.000 estudiantes durante las semanas de competición, convirtiéndose así en eventos de gran magnitud. [2]

El principal propósito de la Formula Student es recrear una situación real de una competición automovilística profesional en la cual una empresa de competición contrata al equipo para desarrollar un prototipo de monoplace cuyos compradores hipotéticos serían corredores amateurs, con la diferencia principal de que en vez de correr rueda con rueda, en la Formula Student se realizan pruebas para comprobar las buenas prácticas de ingeniería realizadas en los monoplaces. En consecuencia, se requiere que el vehículo satisfaga un tipo de prestaciones elevadas en términos de aceleración, frenado y estabilidad, al mismo tiempo que debe ser sencillo de mantener, asequible y confiable. Aspectos adicionales como pueden ser la estética o el confort también son considerados.



Ilustración 2.2: "Tilt Test" o prueba de vuelco. Fuente: [20].

La victoria es para el equipo que logre obtener las puntuaciones más altas en cada uno de estos requisitos.

La competición se divide en dos eventos principales, las pruebas dinámicas y las pruebas estáticas, que quedan definidas en la siguiente imagen extraída de la normativa oficial;

	CV & EV	DC
Static Events:		
Business Plan Presentation	75 points	-
Cost and Manufacturing	100 points	-
Engineering Design	150 points	150 points
Dynamic Events:		
Skidpad	50 points	-
Driverless (DV) Skidpad	75 points	75 points
Acceleration	50 points	-
Driverless (DV) Acceleration	75 points	75 points
Autocross	100 points	-
Driverless (DV) Autocross	-	100 points
Endurance	250 points	-
Efficiency	75 points	-
Trackdrive	-	200 points
Overall	1000 points	600 points

Ilustración 2.3: Puntuaciones por prueba en competición. Fuente: [9].

Así pues, participar en esta competición brinda a los estudiantes una experiencia real y práctica en ámbitos como el diseño, la construcción, o las negociaciones propias de la industria automotriz o del motorsport. Además de esto, impulsa la capacidad de gestionar equipos y de trabajar en equipo bajo una presión inmensa para cumplir los plazos de entrega, y a su vez, ofrece a los estudiantes la libertad y flexibilidad necesaria para que expresen su creatividad e ingenio.

Por todo esto, la Formula Student no tan sólo es una competición, sino que es una oportunidad para el desarrollo de habilidades prácticas y la formación integral de futuros ingenieros en el sector de la ingeniería automotriz.

2.1.2. Contexto histórico.

Para poder conocer bien esta competición, debemos conocer también su historia, por lo que nos tenemos que remontar a sus primeras competiciones. La Formula Student fue creada en 1981 por la “Sociedad de Ingenieros Automotrices” (SAE), de donde proviene también el nombre de Formula SAE, concretamente en Estados Unidos, donde tomó por primera vez la victoria el equipo de la universidad de Texas. Fuentes: [4] [5]



Ilustración 2.4: Primer equipo ganador de la FSAE - Texas University. Fuente: [5].

En el año 1998, tres coches estadounidenses y cuatro coches británicos compitieron en un evento de demostración en el Reino Unido, siendo esta la primera competición fuera de los Estados Unidos. Esta competición se celebró en el campo de pruebas MIRA, el equipo Warwickshire UT Arlington (EE. UU.) fue el ganador, y la Universidad de Birmingham obtuvo la primera posición entre los equipos británicos. [2]

Después de su gran éxito en el Reino Unido, se ha ido repitiendo esta competición consecutivamente cada mes de junio de cada año. El primer Evento de Capacitación de Conductores tuvo lugar en “Three Sisters” cerca de Wigan. Este fue abierto a todos los equipos que habían acabado de construir su monoplaza y querían practicar en la pista antes del evento principal en julio. [2]

A partir del 2005, el programa anual de eventos del Formula Student se fue ampliando. Learn to Win se celebró en Silverstone, donde se incorporaron los primeros seminarios de un día para que los nuevos equipos aprendieran a construir su coche y a tener un buen rendimiento al final del año, así mismo, como la formación de los pilotos posibilitando que pudieran poner los coches de sus años anteriores en circulación. [2]

En 2008, se incorporó la categoría Clase 1A, patrocinada por Flybrid System y respaldada por EEMS, con un enfoque destacado en la reducción de emisiones de CO₂ y la disminución de la cilindrada del motor en los vehículos participantes. Posteriormente, se implementó una caja eléctrica estandarizada para todos los equipos de la Clase 1A. Esta caja eléctrica, diseñada para los vehículos eléctricos de dicha categoría, funciona como un medidor eléctrico especializado. Su función principal es medir con precisión la corriente y el voltaje que fluyen entre el almacenamiento eléctrico (la batería) y los motores de accionamiento durante el evento de resistencia. Este dispositivo se convierte esencialmente en un instrumento clave para determinar de manera exacta el consumo eléctrico de los vehículos, fortaleciendo así el enfoque en la eficiencia y sostenibilidad dentro de la competición. [2]

Desafortunadamente, en 2020, debido a la pandemia de COVID-19, la competición experimentó un traslado completo al formato en línea. Este cambio incluyó la implementación de simulaciones para medir tiempos y vueltas en lugar de realizar eventos dinámicos tradicionales. La situación generada por la pandemia llevó a que, en 2021, con el objetivo de superar las restricciones establecidas, la competición adoptara un enfoque híbrido. En este nuevo formato, los equipos que no pudieron reunirse en Silverstone participaron mediante presentaciones virtuales, permitiendo así la continuidad del evento en medio de las circunstancias provocadas por la pandemia. [2]

En el año 2010 se llevó a cabo por primera vez en España el evento de Formula Student Spain o FSS, organizado por la Asociación de Técnicos de Automoción (STA), en colaboración con instituciones públicas y destacadas empresas del sector automotriz. Este acontecimiento proporcionó a estudiantes de diversas universidades la oportunidad de exhibir los proyectos desarrollados a lo largo del curso. El escenario elegido fue el renombrado Circuito Barcelona-Catalunya, ubicado en Montmeló, ofreciendo así un marco excepcional para la inauguración de esta competición. Desde 2010, la Formula Student Spain se celebra anualmente en este circuito. [3]

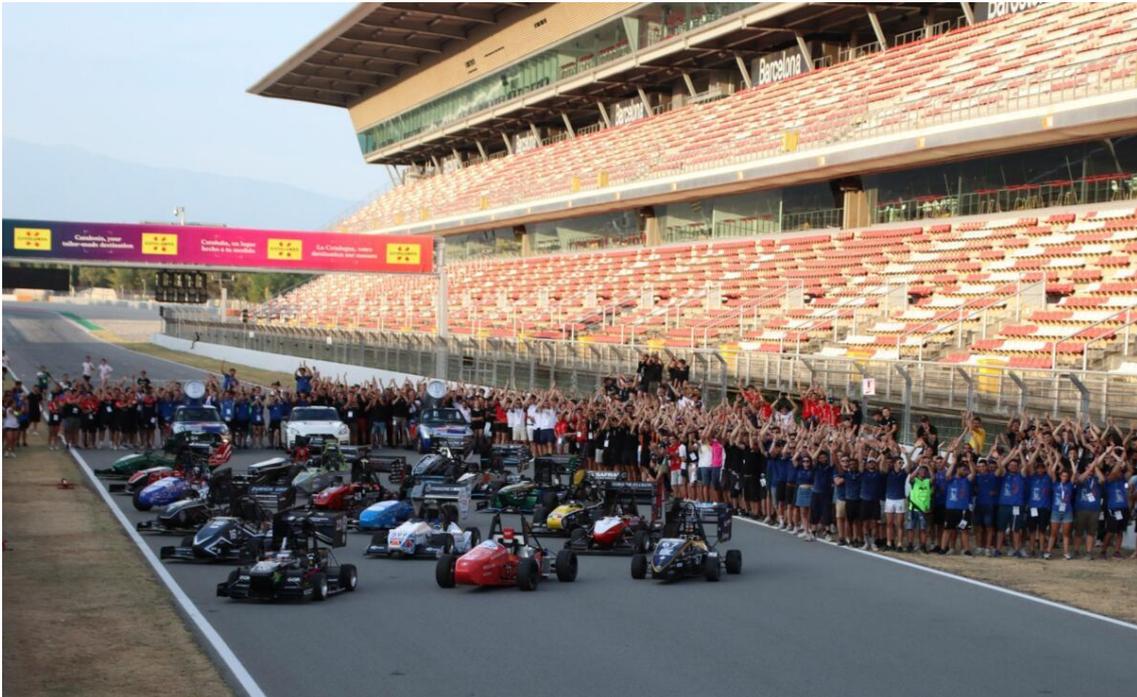


Ilustración 2.5: Primera Formula Student Spain – 2010. Fuente: [20].

2.2. Partes de un Formula Student.

En este apartado vamos a adentrarnos en las partes y componentes de un monoplaza de Fórmula SAE, desglosándolo para comprender todos y cada uno de los conjuntos de piezas y así, comprender también como es uno de estos monoplazas.

Antes de comenzar, se deben conocer las especificaciones técnicas promedias de estos monoplazas, que tienen un peso de entre unos 160kg y 600kg dependiendo de factores como su chasis, su sistema de propulsión, o los materiales con los que se fabrican. Estos monoplazas, y pese que su aspecto los hace parecer pequeños por sus enormes paquetes aerodinámicos, miden unos 3 metros de largo, 1.5 metros de ancho y 1.3 metros de alto, y suelen ser propulsados por motores de unos 170CV (126,76KW) de potencia, aunque por normativa de competición quedan limitados a unos 107CV (80KW). Estos factores, hacen que los monoplazas alcancen los 100km/h en un intervalo de 0,95 segundos a 3,5 segundos.

En primer lugar, hablaremos del conjunto de piezas al que en nuestro equipo llamamos “Grupo Chasis”, que, además del chasis, como su nombre indica y del que se comentará más adelante, incorpora muchos otros componentes;

•**Chasis:** El chasis es la estructura principal del monoplaza, siendo así el esqueleto de todo el coche y, por lo tanto, una de las partes más importantes al desarrollar un monoplaza competitivo. Un chasis de Formula Student se divide en seis partes principales definidas por la normativa;

-Main Hoop (jaula antivuelco principal) [9]

-Front Hoop (jaula antivuelco frontal) [9]

-Roll Hoop Braces (soportes de las jaulas) [9]

-Front Bulckhead (estructura frontal del monoplaza) [9]

-Front Bulckhead Support System (sistema de soporte de la estructura frontal) [9]

-Impact Strucures (el resto de los elementos estructurales del chasis) [9]

Mas adelante entraremos en detalle sobre estas seis partes y sobre los tipos de chasis que se diferencian en la Formula Student.

•**Impact Attenuator:** El Impact Attenuator o IA, es una pieza compuesta por espuma (los modelos más antiguos) o por honeycomb de aluminio. Este dispositivo se coloca en la parte frontal del chasis, justo delante del AIP, y sirve para atenuar un impacto frontal en el monoplaza en caso de que este se produzca.

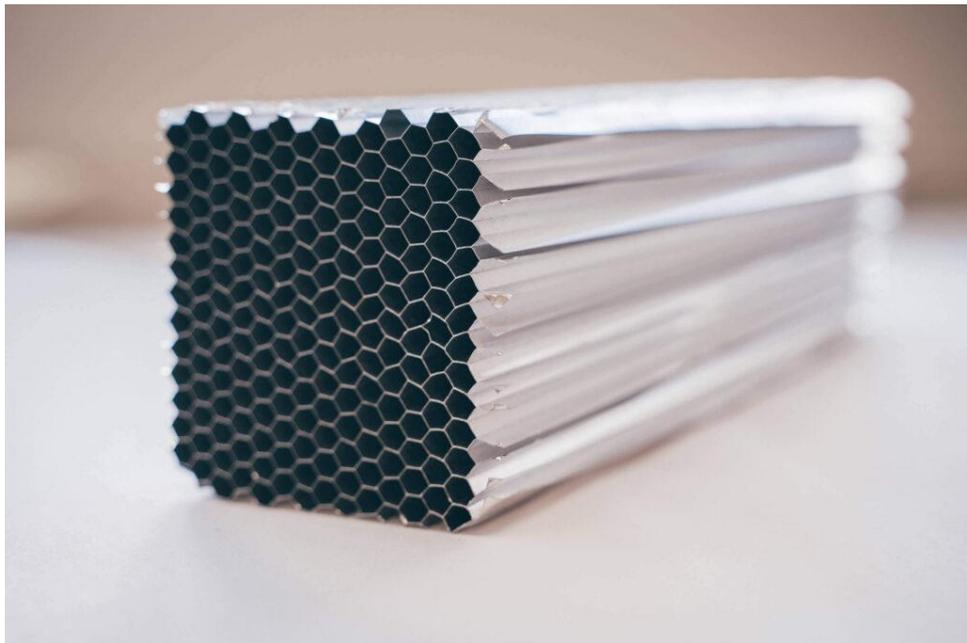


Ilustración 2.6: Honeycomb de aluminio. Fuente: Google imágenes.

•**Sistema de refrigeración:** Este grupo de piezas, compuesto principalmente por los dos radiadores, se encarga de refrigerar el motor y el inversor o “motor controller” de nuestro monoplaza. Los radiadores se colocan a los laterales del chasis, y quedan fijados en el interior de los pontones laterales de la carrocería.

•**Cockpit:** En este conjunto de piezas también conocido como “ergonomics” se encuentran todas las piezas de cabina y destinadas a la interacción con el pilot, es decir, el asiento, el volante y la pedalera.

•**Firewall:** Esta pieza es un “sandwich” de diferentes materiales, como aluminio, fibra de carbono y fibra de sintética para-aramida o “kevlar”, que se coloca detrás del asiento y formando una pared con la forma de la jaula antivuelco del monoplaza. La principal función de esta pieza es separar la cabina del compartimento del sistema de transmisión, protegiendo así al piloto de cualquier incidente como por ejemplo un incendio.

•**Anclajes:** En el grupo de chasis también se incluyen todos los anclajes del monoplaza, haciendo así que el chasis este en perfecta sincronía con el resto de los componentes del monoplaza.

En segundo lugar, hablaremos del “Powertrain” o sistema de potencia del monoplaza. Este incluye el motor, ya sea de combustión o eléctrico (en cuyo caso puede haber más de un motor), el diferencial o los reductores planetarios, dependiendo de la disposición de los o el motor, el inversor o “Motor Controller”, y, por último, en caso de un monoplaza de combustión un depósito de combustible, y en caso de un monoplaza eléctrico un paquete de baterías o TSAC.

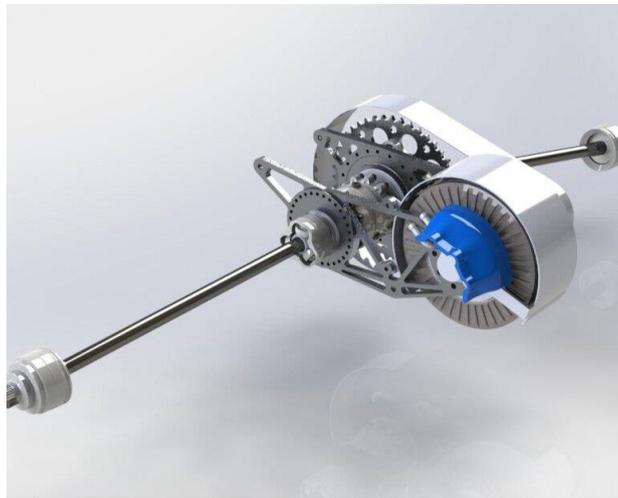


Ilustración 2.7: Sistema de transmisión de potencia de un Formula SAE. Fuente: [19].

Hablemos también de los grupos “Aerodynamics” y “Dynamics”, que se encargan respectivamente de toda la carrocería y elementos aerodinámicos del monoplaza, como los alerones o el fondo plano, y de todos los elementos móviles o de masa suspendida del monoplaza, como la suspensión, la dirección, los neumáticos o el sistema de frenada.

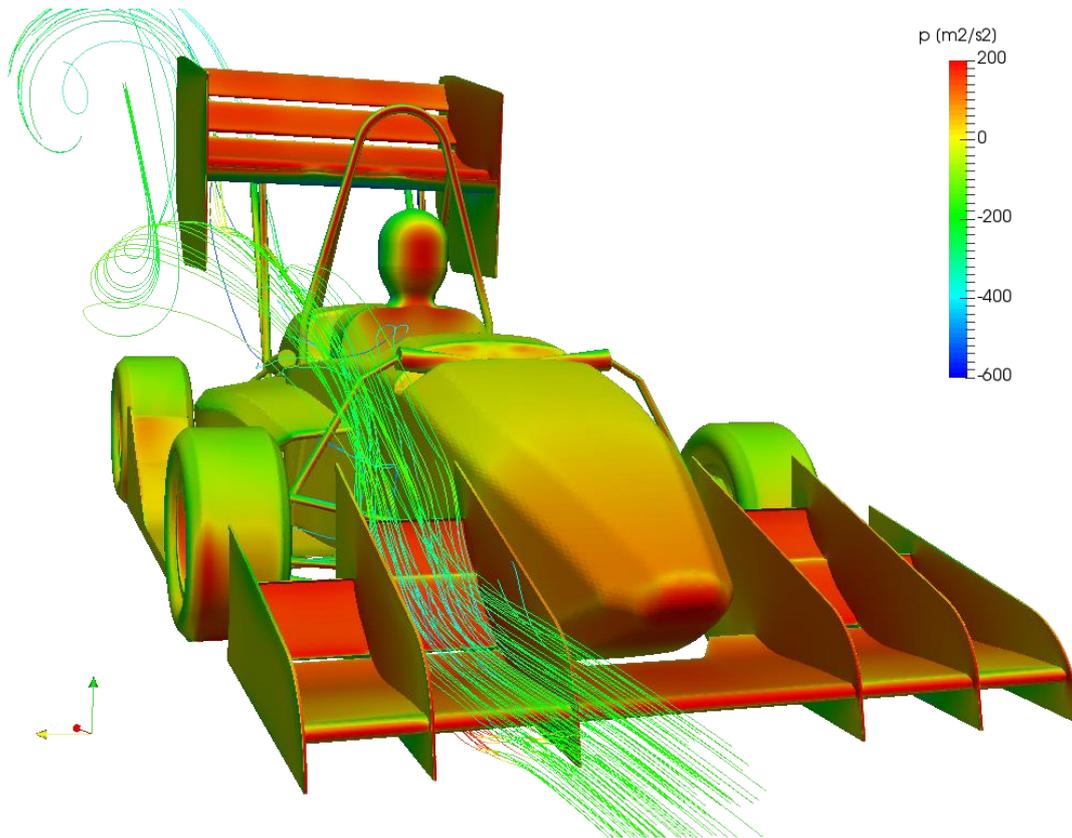


Ilustración 2.8: Paquete aerodinámico de un Formula SAE. Fuente: [18].

Por último, mencionar los grupos de “Electronics” y de “Digital”, donde se engloban todos los componentes de bajo voltaje del monoplaza, como las PCBs o Printed Circuit Boards, las baterías de bajo voltaje, los sistemas de seguridad y toda la programación de la ECU o Electronic Control Unit.

2.3. Normativa de competición.

La normativa de la competición es la parte más importante a la hora de desarrollar uno de estos monoplazas, ya que es la única normativa por la que se rige la competición, y que a su vez hace referencia a otras normativas como por ejemplo la ISO (International Organization for Standardization).

Cada competición tiene una normativa propia, pero en la mayoría de los casos las competiciones de cada país utilizan la normativa de la competición con más prestigio en su zona; en caso de los países de América (Norte y Sur), se utiliza la normativa de FSAE Michigan, y en caso de los países de Europa, incluyendo España, se utiliza la normativa de FSAE Germany, por lo tanto, será la que utilizemos para el desarrollo de nuestro chasis y, por lo tanto, de este TFG.



2012 Formula Student Rules	
Table of Contents	
PART A – ADMINISTRATIVE REGULATIONS	3
ARTICLE 1: FORMULA STUDENT OVERVIEW AND COMPETITION.....	3
ARTICLE 2: THE 2012 FORMULA SAE SERIES.....	5
ARTICLE 3: FORMULA SAE RULES AND ORGANISER AUTHORITY.....	5
ARTICLE 4: INDIVIDUAL PARTICIPATION REQUIREMENTS.....	5
ARTICLE 5: SAFETY RESPONSIBLE AND SAFETY ADVISOR.....	7
ARTICLE 6: VEHICLE ELIGIBILITY.....	8
ARTICLE 7: REGISTRATION.....	8
ARTICLE 8: VEHICLE DOCUMENTATION, DEADLINES AND PENALTIES.....	9
ARTICLE 9: PROTESTS.....	9
ARTICLE 10: QUESTIONS ABOUT THE FORMULA SAE RULES.....	13
PART B – TECHNICAL REGULATIONS	14
ARTICLE 1: VEHICLE REQUIREMENTS & RESTRICTIONS.....	14
ARTICLE 2: GENERAL DESIGN REQUIREMENTS.....	14
ARTICLE 3: DRIVER'S CELL.....	14
ARTICLE 4: COCKPIT.....	14
ARTICLE 5: DRIVERS EQUIPMENT (BELTS AND COCKPIT PADDING).....	15
ARTICLE 6: GENERAL CHASSIS RULES.....	15
ARTICLE 7: BRAKE SYSTEM.....	15
ARTICLE 8: POWERTRAIN.....	16
ARTICLE 9: FUEL AND FUEL SYSTEM.....	18
ARTICLE 10: EXHAUST SYSTEM AND NOISE CONTROL.....	18
ARTICLE 11: ELECTRICAL SYSTEM (<40V) and SHUTDOWN SYSTEM.....	19
ARTICLE 12: AERODYNAMIC DEVICES – as per 2012 FSAE Rules.....	20
ARTICLE 13: COMPRESSED GAS SYSTEMS AND HIGH PRESSURE HYD.....	20
ARTICLE 14: FASTENERS.....	22
ARTICLE 15: TRANSPONDERS.....	22
ARTICLE 16: VEHICLE IDENTIFICATION.....	22
ARTICLE 17: EQUIPMENT REQUIREMENTS.....	23
ARTICLE 18: Possible Future Rules Changes.....	24
ARTICLE 19: HIGH VOLTAGE ELECTRICAL SYSTEMS.....	24
ARTICLE 20: VEHICLE CONTROL SYSTEMS.....	34
ARTICLE 21: REQUIREMENTS OF THE (ELECTRICAL) SAFETY FORM.....	36
ARTICLE 22: ADDITIONAL SAFETY REQUIREMENTS.....	36
FS Appendix B1 - Wire Current Capacity (DC).....	40
FS Appendix B2 - Required Equipment for Vehicles with HV Electrics.....	41
FS Appendix B3 - Recommended Standards.....	42
PART C – STATIC EVENT REGULATIONS	43
ARTICLE 1: STATIC EVENTS, MAXIMUM SCORES + BUSINESS LOGIC CASE.....	43
ARTICLE 2: TECHNICAL INSPECTION.....	44
ARTICLE 3: COST, MANUFACTURING AND SUSTAINABILITY EVENT.....	46
ARTICLE 4: BUSINESS PRESENTATION EVENT.....	60
ARTICLE 5: DESIGN EVENT.....	60
FS Appendix C1 - Sustainability – Powertrain assemblies.....	70
PART D – DYNAMIC EVENT REGULATIONS	71
ARTICLE 1: DYNAMIC EVENTS AND MAXIMUM SCORES.....	71

1

© 2011, Mercedes incorporating elements of the Formula SAE and Formula Student rules by kind permission of SAE International 2012 Formula Student Rules

Ilustración 2.9: Formula SAE Rules 2012. Fuente: Formula SAE

Cada año es publicada una nueva normativa para asegurar la seguridad y actualización de la normativa de la competición. En este caso, utilizaremos la última versión de la normativa “FS-Rules_2024_v1.1” que podemos encontrar en la página oficial de Formula Student Germany, y que será la que se utilice en las competiciones europeas de 2024.

Analizaremos primero las normativas de clase “T”, que se refieren a los requisitos técnicos generales.

T1.1 Definiciones del Chasis. [9]

En este apartado de la normativa se definen las diferentes partes del chasis, quedando así definidos los siguientes conceptos;

·Chasis: El conjunto estructural fabricado que soporta todos los sistemas funcionales del vehículo. Este ensamblaje puede ser una sola estructura soldada, múltiples estructuras soldadas o una combinación de estructuras compuestas y soldadas.

·Carrocería: La superficie más exterior del chasis o cualquier pieza y cubierta del carenado.

·Cabina: El volumen que acoge al conductor, definido por la parte superior del vehículo, el cierre del piso, el lado interior de la carrocería, el mamparo delantero y el cortafuegos.

·Miembro del chasis: Una sola pieza mínima representativa de tubo continuo sin cortar o estructura equivalente.

·Front Bulkhead: Una estructura plana que define el plano delantero del chasis y proporciona protección para los pies del conductor (en vista frontal, junto con la Placa Anti-Intrusión (AIP), cubre los pies del conductor).

·Front Bulkhead support: Una estructura que define el lateral del chasis desde el frente mamparo de regreso a la parte superior de la estructura de impacto lateral superior y la parte inferior del aro delantero.

·Front Hoop: Una barra antivuelco situada encima de las piernas del conductor, cerca del volante.

·Impact Attenuator (IA): Un dispositivo deformable que absorbe energía ubicado delante del mamparo delantero.

·Main Hoop: Una barra antivuelco ubicada al lado o justo detrás del torso del conductor.

·Triangulación Nodo a Nodo: Una disposición de miembros de chasis proyectados sobre un plano, donde una carga coplanar aplicada en cualquier dirección, en cualquier nodo, da como resultado solo tracción o fuerzas de compresión en los miembros del chasis.

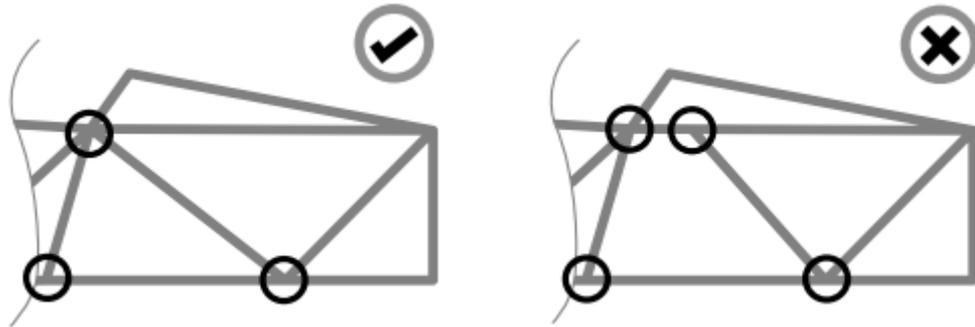


Ilustración 2.10: Triangulación Nodo-a-Nodo definida por normativa. Fuente: [9].

·Roll Hoops: Tanto el aro frontal como el aro principal se clasifican como “aros rodantes”.

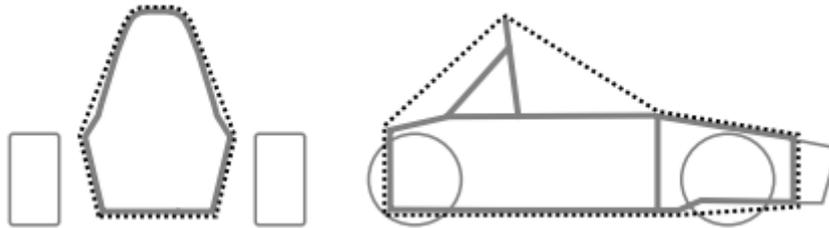


Ilustración 2.11: Normativa de jaulas antivuelco y seguridad de cabina. Fuente: [9].

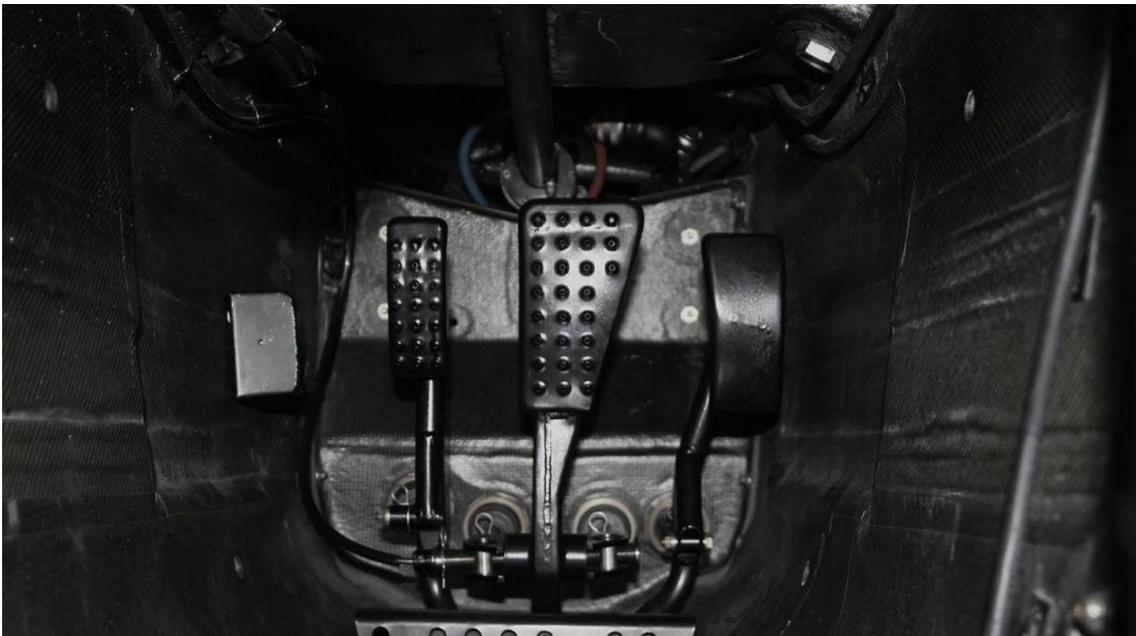
·Estructura de impacto lateral: El área del costado del chasis entre el aro delantero y el aro principal y desde el piso del chasis hasta la altura requerida por encima del nivel más bajo.

Teniendo estas definiciones del chasis, y a partir de este punto, nos fijaremos en el apartado de la normativa T3 “General Chassis Design”, donde se nos darán requerimientos sobre estructura, materiales y fuerzas que tiene que soportar el chasis, y cuyas normas mencionaremos más adelante.

2.4. Estudio de patentes.

Para comenzar a hablar de las patentes, primero cabe destacar que la Formula Student, así como en la Fórmula 1, no suele proteger sus tecnologías con patentes, y rechaza la realización de patentes en su competición (exceptuando casos excepcionales), ya que los diseños de los monoplazas, al final de cada temporada, pasan a ser públicos y a considerarse de libre acceso para la docencia o la consulta de información para otros equipos por normativa de la competición.

Uno de los motivos para que las competiciones de este estilo no tiendan a utilizar patentes es que en el caso de que un equipo decida proteger una de sus innovaciones mediante una patente, esto conllevaría a restringir el acceso de dicha innovación a otros competidores. Estos competidores podrían presentar objeciones y buscar la exclusión del equipo de la tecnología autorizada ante la entidad reguladora de la competición. Como resultado, la tecnología del equipo patentante quedaría prohibida en el contexto de la competición. Algunos casos famosos son la suspensión activa de Williams Racing o el sistema de frenada con cuatro pedales de McLaren F1 Team. [13]



*Ilustración 2.12: Sistema de freno con 4 pedales inventado por McLaren F1 Team.
Fuente: [13].*

Ahora sí, hablemos de como las patentes pueden afectar a este proyecto;

La Propiedad Industrial abarca diversas formas de derechos, como patentes, diseños industriales, marcas, nombres comerciales y topografías de semiconductores. Cada una de estas categorías cuenta con su propia legislación correspondiente. [8]

En esencia, una patente es un título que confiere el derecho exclusivo de explotar una invención específica, prohibiendo la fabricación o venta sin el consentimiento del titular. Este derecho puede aplicarse a entidades físicas, como productos o máquinas, así como a entidades no físicas, como procedimientos o sistemas productivos. Es crucial entender que una patente es un derecho negativo, no otorga la autorización para la fabricación o comercialización del producto patentado sin cumplir con las normativas legales vigentes. [8]

En consecuencia, para que una innovación sea patentable, debe cumplir con ciertos requisitos:

- En primer lugar, debe ser innovadora.
- En segundo lugar, debe implicar una actividad inventiva.
- En tercer lugar, debe ser susceptible a la actividad industrial.

En el contexto de este proyecto, el producto desarrollado no satisface los criterios de innovación ni de actividad inventiva, por lo tanto, no es susceptible de ser patentado.

2.5. Antecedentes de Chasis.

En este apartado analizaremos los diferentes tipos de chasis que existen en la Formula SAE y distinguiremos los distintos tipos de chasis que existen en el sector de la automoción de competición, así como algunos chasis que ya han sido fabricados por otros equipos dentro de la competición.

2.5.1. Tipos de chasis en el sector de la automoción de competición.

En el sector de la automoción enfocado a la competición, se distinguen tres tipos principales de chasis, ordenados del más antiguo y pesado al más moderno y con mejores prestaciones;

El chasis independiente; [10]

Este chasis, el más antiguo de los tres tipos, remonta su fabricación a los primeros vehículos a motor, y gracias a que ha persistido a lo largo del tiempo, continúa desempeñando un papel esencial en la fabricación, vehículos todo terreno o vehículos de competición cuyas carrocerías están compuestas principalmente por fibras.

Este sistema tiene como principal componente un bastidor robusto compuesto por vigas longitudinales y transversales, integrando todas las piezas mecánicas del automóvil, es decir, el motor, la suspensión, la dirección y la transmisión. Además, este tiene que soportar la estructura de la carrocería, que se coloca como “carcasa” del resto del coche. Una vez este bastidor tiene todos sus componentes incorporados, pasa a denominarse en conjunto como chasis. Por último, se fija la carrocería al chasis mediante tornillos, asegurando así que la unión entre ambos es sólida. Este diseño de chasis ha encontrado amplia aplicación en los Estados Unidos, especialmente en la fabricación de camionetas "pick-up" y en los icónicos vehículos de competición americanos conocidos como "hot rod".

Este sistema tiene como puntos fuertes su gran versatilidad, a la vez que una gran robustez y la capacidad necesaria para soportar tanto esfuerzos dinámicos como esfuerzos estáticos.



Ilustración 2.13: Conjunto de carrocería y chasis independiente. Fuente: [10].

El chasis tubular; [11]

El chasis tubular es una construcción compuesta por tubos huecos soldados entre sí, presentando así una robusta estructura diseñada para afrontar diversas cargas estáticas y dinámicas inherentes al uso del vehículo. Su diseño no solo se orienta a la resistencia de fuerzas mecánicas, sino que también se orienta a la salvaguarda del piloto en caso de escenarios de accidente. Este tipo de chasis es muy frecuente en vehículos de competición, sustituyendo en muchas de estas al chasis independiente.



Ilustración 2.14: Chasis tubular de vehículo de carreras. Fuente: [11].

Este chasis es famoso por su combinación entre una excepcional rigidez y un peso considerablemente ligero, sin embargo, es importante conocer que su principal desafío reside en la enorme complejidad del proceso de fabricación y diseño de este. La estructura se configura principalmente mediante la unión de perfiles tubulares a través de soldaduras permanentes, necesitando así un gran conocimiento y experiencia en los procedimientos de soldadura para fabricarse correctamente.

A pesar de esta dificultad, el chasis tubular es uno de los favoritos en el ámbito de la competición, donde los aspectos más importantes a conseguir son resistencia y ligereza.

El chasis monocasco o autoportante; [12]

Actualmente, entre los fabricantes de automóviles hay un tipo de chasis predominante; el chasis monocasco. Este tipo de chasis fusiona la carrocería y el bastidor en una única unidad. Esta estructura altamente rígida destaca principalmente por su gran capacidad de absorción de impactos y disipar la energía generada durante una colisión. La rigidez inherente proporciona una estabilidad excepcional al vehículo, garantizando así la seguridad en caso de accidentes, y una aumentada resistencia a la torsión en comparación con el chasis independiente.

Durante el proceso de fabricación de este tipo de chasis, el primer paso es realizar un análisis de las áreas más propensas a sufrir deformaciones o daños en caso de colisión. Se utilizan aceros de alta resistencia en estas zonas previamente identificadas, mientras que en otras áreas se emplean aceros de menor resistencia. Además, estos chasis incorporan una tecnología conocida como deformación programable, que implica la creación de pequeñas “estrellas” concentrando las tensiones en puntos específicos para lograr así una deformación planificada para disipar controladamente la energía.

En comparación con el chasis tubular o el chasis independiente, este tipo de chasis contribuye a reducir significativamente el peso, y a su vez, proporcionar un espacio interior más amplio. Pese a que este chasis muy comúnmente se fabrica de acero, hay algunas marcas líderes en la industria automotriz, así como muchas categorías de competiciones como la Formula 1, que fabrican estos chasis de fibra de carbono, ofreciendo así una mayor rigidez y una enorme reducción de peso gracias a la densidad de estos materiales compuestos. Fuera del ámbito de la competición, los monocascos de fibra de carbono solo se ven en automóviles de lujo debido a su elevadísimo coste.



Ilustración 2.15: Chasis monocasco de vehículo común. Fuente: [12].

2.5.2. Tipos de chasis en la Formula SAE.

En la Formula SAE se distinguen tres tipos principales de chasis muy similares a los mencionados anteriormente, pero con ligeras variaciones para hacerlos específicos para esta competición;

El primero es el chasis tubular, fabricado en la mayoría de los casos de tubos huecos de acero no aleado. Este es el chasis más común entre equipos noveles en la competición, ya que, pese a que su peso es mayor que los otros tipos de chasis, y que necesita una carrocería para cubrirse, este también es el más barato de fabricar.



Ilustración 2.16: Chasis tubular de Formula SAE. Fuente: [14].

El segundo tipo es el que conocemos como chasis “híbrido”, que consiste principalmente en un chasis monocasco de fibra de carbono desde el Main Hoop hacia delante, y un chasis tubular de acero desde el Main Hoop hacia detrás. Esto nos permite tener más facilidad a la hora de anclar piezas como el motor a la parte trasera del chasis, obteniendo un chasis más ligero gracias al monocasco de la parte delantera.



Ilustración 2.17: Chasis híbrido de Formula SAE. Fuente: [16].

Por último, el chasis monocasco, que es el más ligero de todos, este compuesto por un núcleo en sándwich de honeycomb de aluminio y fibra de carbono, con un laminado realizado posteriormente en fibra de carbono. Este chasis no necesita de carrocería, ya que el propio chasis le da la forma a esta, siendo también el más ligero de los tres, y, por lo tanto, también el más competitivo. La principal desventaja de este tipo de chasis es su elevado coste respecto a los demás.



Ilustración 2.18: Chasis monocasco de Formula SAE. Fuente: [16].

2.5.3. Análisis de chasis vigentes.

En lo que al chasis respecta, vamos a analizar algunos ya fabricados por otros equipos, divididos en los diferentes tipos de chasis, y haciendo hincapié en su peso, ya que es la característica principal que se quiere superar en este TFG.

Primero, analizaremos tres chasis tubulares;

El primero de ellos, de la Universidad Politécnica de Salesiana, diseñado en el TFG “*DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN CHASIS TUBULAR DE UN VEHÍCULO DE COMPETENCIA FORMULA SAE ELECTRICO*”, que obtiene un peso final de 36kg sin soldaduras. [14]

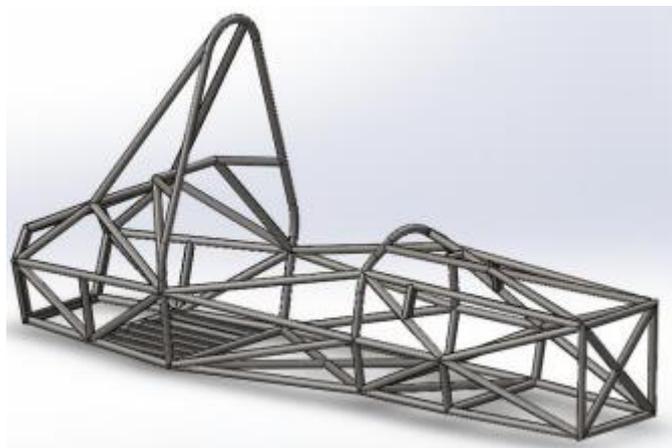


Ilustración 2.19: Chasis tubular de Universidad Politécnica de Salesiana. Fuente: [14]

El segundo, desarrollado por la Universidad de La Laguna en el TFG “*DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT*”, con un peso final de 112,5kg. [15]

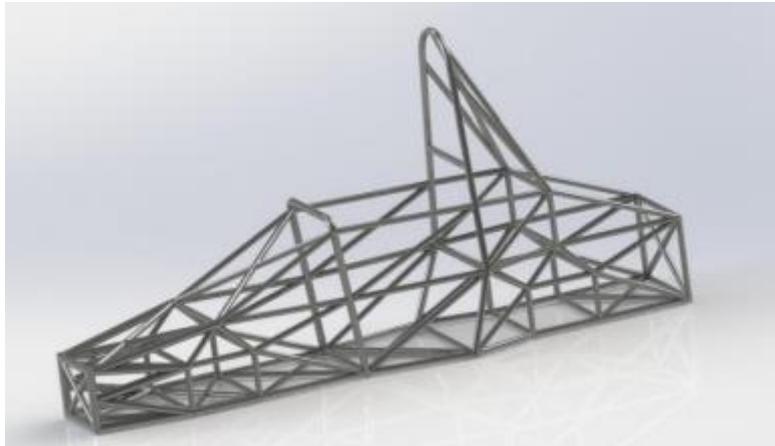


Ilustración 2.20: Chasis tubular de Universidad de La Laguna. Fuente: [15]

Y, por último, el chasis diseñado por la Universidad de Cantabria, en el TFG “*DISEÑO CHASIS TUBULAR DE UN VEHICULO PARA LA FORMULA STUDENT EDICIÓN 2023*”, que obtiene un peso final de unos 35kg sin soldaduras. [16]

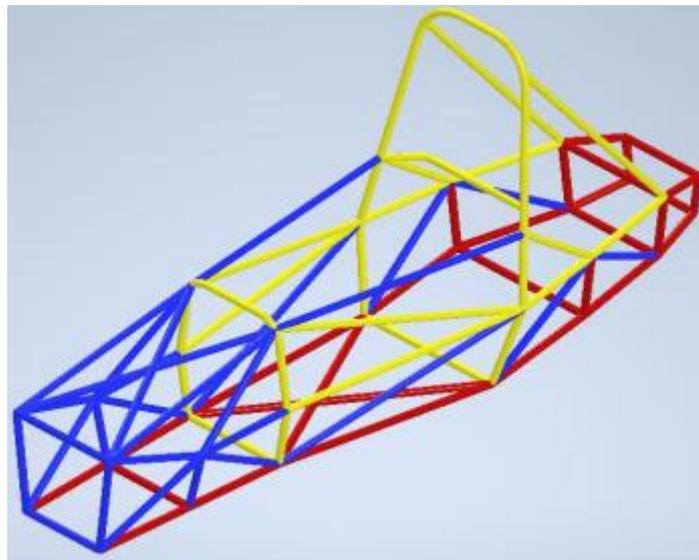


Ilustración 2.21: Chasis tubular de Universidad de Cantabria. Fuente: [16]

En segundo lugar, analizaremos un chasis monocasco;

Este chasis esta desarrollado por la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, en el TFG “Diseño y cálculo del chasis monocasco de un monoplaza de competición tipo fórmula”, donde se obtiene un peso final del chasis de 19kg. [17]



*Ilustración 2.22: Chasis monocasco de Escuela Técnica Superior de Ingeniería.
Fuente: [17]*

Por tanto, y después de haber realizado un análisis de los diferentes chasis existentes, observamos que el peso promedio de un chasis tubular de FSAE es de unos 45kg, mientras que el de un chasis monocasco es de aproximadamente 20kg.

3. Objetivos y especificaciones técnicas.

En este apartado detallaremos los objetivos de diseño para el chasis tubular. La principal fuente de referencia será la normativa especificada por la competición, por la que se proporcionaran las pautas esenciales que debe de cumplir el diseño. No obstante, más allá de la conformidad con los requisitos que establece esta, se aspira a que el diseño también sea competitivo, es decir, que tenga mejores características mecánicas que los chasis de los competidores.

Por ello, también se definirán las especificaciones técnicas esenciales, considerando cada aspecto del diseño para poder optimizar tanto el rendimiento como la eficiencia del chasis. Esto implica hacer un análisis detallado de todos los componentes que lo envuelven.

Para poder hacer un chasis realmente competitivo, se deberá de buscar un perfecto equilibrio entre el cumplimiento de la normativa y la optimización del diseño.

3.1. Objetivos.

La normativa vigente en 2024 establece una serie de exigencias que el chasis del monoplace tiene que cumplir para poder competir. Estas van desde requerimientos estructurales en el diseño, normas a cerca de los materiales que se deben utilizar, y simulaciones o pruebas que debe de superar el monoplace para ser valido.

A demás de esto, la normativa también define especificaciones que tienen que cumplir algunos componentes del chasis, como por ejemplo los anclajes o el cortafuegos. Por estos motivos, las especificaciones técnicas u objetivos de diseño del chasis se centrarán en la normativa.

Además, buscaremos lograr unas especificaciones técnicas que conviertan al chasis en uno realmente competitivo, y para ello, este deberá de ser más ligero que los demás, con las misma o mejor resistencia mecánica. El objetivo, por tanto, es mejorar las prestaciones del chasis en todos sus aspectos.

Para comenzar, y siguiendo el orden que establece la normativa de competición (solo la que afecta al chasis), hablaremos de la configuración general del vehículo [9]:

- Se requiere que el diseño y la fabricación del vehículo cumplan con los estándares de buenas prácticas de ingeniería.
- El vehículo debe poseer una configuración de rueda abierta, contar con un único asiento y una cabina abierta para el piloto, siguiendo un estilo de carrocería similar al de un vehículo de fórmula. Además, debe tener cuatro ruedas dispuestas de manera no lineal.
- Para la unión de elementos o barras, se debe emplear la triangulación nodo a nodo siempre que sea factible.

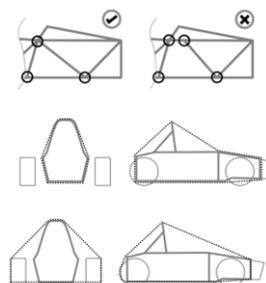
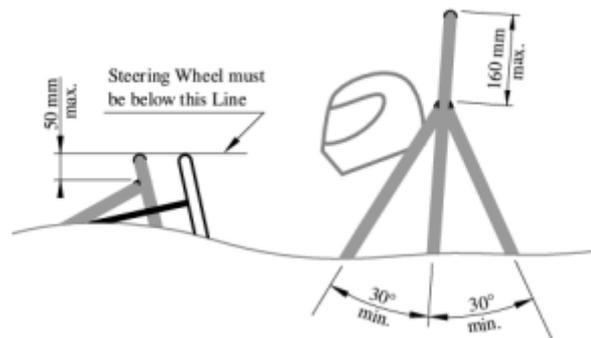


Ilustración 3.1: Triangulación nodo a nodo y disposición de miembros de la estructura primaria. Fuente: [9]

- La altura mínima al suelo de cualquier parte del vehículo, excluyendo los neumáticos e incluido el conductor, debe ser de 30 mm en posición estática.
- El vehículo debe contar con sistemas de suspensión delantera y trasera completamente operativos, incluyendo amortiguadores, con un recorrido útil de las ruedas no menor a 50 mm y un rebote mínimo de 25 mm con el conductor sentado.
- Todos los puntos de montaje de la suspensión deben ser visibles durante la inspección técnica, ya sea mediante visión directa o retirando cualquier cubierta.
- La distancia desde el volante hasta el aro delantero no debe exceder los 250 mm. Esta medida se toma horizontalmente en la línea central del vehículo, desde la superficie trasera del aro delantero hasta la parte más adelantada del volante con la dirección en cualquier posición.
- La distancia entre ejes del vehículo debe ser de al menos 1.525 mm.
- La vía menor del vehículo (ya sea delantera o trasera) no debe ser inferior al 75% de la vía mayor.
- La combinación de la vía y el centro de gravedad del vehículo debe garantizar una estabilidad adecuada en caso de vuelco.
- Ambos aros deben estar sólidamente integrados a la estructura primaria mediante triangulación nodo a nodo o métodos de unión equivalentes.
- El radio mínimo de cualquier curva, medido en la línea central del tubo, debe ser al menos tres veces el diámetro exterior del tubo. Las curvas deben ser suaves y continuas, sin indicios de ondulación o rotura de la pared. Se debe mantener el momento de inercia mínimo en todas las zonas, incluyendo las curvas de los tubos fabricados.
- En un plano perpendicular al eje longitudinal del vehículo y a través de los puntos extremos inferiores del aro antivuelco, ninguna parte de la estructura primaria puede quedar por debajo de los 30 mm de los puntos extremos del aro antivuelco.

- El aro principal debe ser fabricado a partir de un solo tubo de acero continuo, sin cortes y de sección cerrada.
- En la vista lateral, la sección del aro principal situada por encima de su punto de fijación superior a la estructura de impacto lateral no debe inclinarse más de 10° con respecto a la vertical.
- Cualquier curva en el aro principal por encima de su punto de fijación superior a la estructura primaria, en la vista lateral, debe ser reforzada con tubos conectados a un nodo en la estructura de soporte del arriostramiento del aro principal, cumpliendo con los requisitos correspondientes.
- En la vista lateral, cualquier sección del aro principal por debajo del punto de fijación superior a la estructura de impacto lateral debe inclinarse hacia delante o no más de 10° hacia atrás.
- El aro delantero debe tener una construcción de sección continua y cerrada.
- Si el aro delantero consta de más de una pieza, debe estar respaldado por una triangulación nodo a nodo o una construcción equivalente.
- En la vista lateral, ninguna parte del aro delantero puede inclinarse más de 20° con respecto a la vertical.
- El aro principal debe contar con refuerzos hacia delante o hacia atrás mediante tubos a cada lado de este.
- En la vista lateral, el aro principal y los tirantes del aro principal no deben ubicarse en el mismo lado de una línea vertical coincidente con la parte superior del aro principal.
- Los tirantes del aro principal deben fijarse al aro principal a una altura no inferior a 160 mm por debajo de la superficie superior del aro principal.
- El ángulo incluido formado por el aro principal y los tirantes del aro principal debe ser de al menos 30° .
- Los tirantes del aro principal deben ser rectos.

- Los extremos inferiores de los tirantes del aro principal deben apoyarse en el punto de fijación superior del aro principal a la estructura de impacto lateral y en el punto de fijación inferior del aro principal a la estructura de impacto lateral mediante una estructura triangulada de nodo a nodo o una estructura compuesta equivalente.
- Si algún elemento que se extienda fuera de la estructura principal está sujeto a los tirantes del aro principal, se requerirá un refuerzo adicional para prevenir las cargas de flexión en situaciones de vuelco.



*Ilustración 3.2: Requisitos de posicionamiento del volante y Front Hoop y Main Hoop.
Fuente: [9]*

- El componente superior debe establecer la conexión entre el aro principal y el aro delantero.
- Este componente superior debe situarse a una altura que oscile entre 240 mm y 320 mm por encima del punto más bajo en el interior del chasis, entre el aro delantero y el principal.
- El componente inferior debe establecer la conexión entre la parte inferior del aro principal y la parte inferior del aro delantero.

- El travesaño diagonal debe formar una estructura triangular entre los travesaños superior e inferior, ubicados entre los aros.

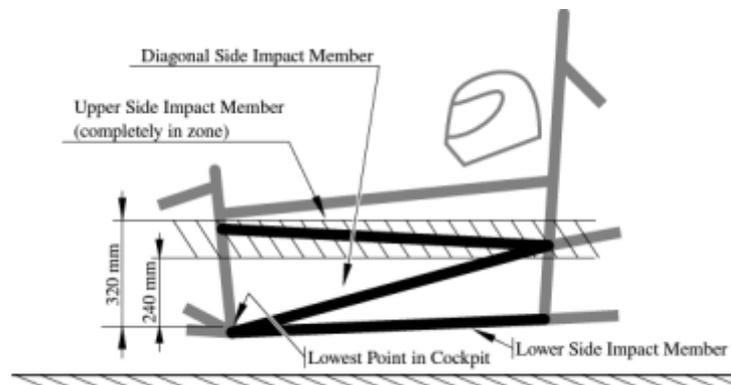


Ilustración 3.3: Requerimientos de estructura de impacto lateral. Fuente: [9]

- El habitáculo debe poseer una sección transversal interna lo suficientemente amplia para permitir que la plantilla, representada en la ilustración 17 a la derecha, se desplace desde la abertura del habitáculo hasta un punto situado 100 mm detrás de la cara del pedal más posterior en posición inoperativa. La plantilla tiene capacidad de movimiento vertical.
- La abertura de la cabina debe tener un tamaño adecuado para que la plantilla, mostrada a la izquierda en la ilustración 17, se desplace verticalmente desde la abertura de la cabina hasta debajo del elemento de impacto lateral superior cuando se mantiene horizontalmente. La plantilla puede moverse hacia adelante y hacia atrás.
- Los pedales ajustables deben encontrarse en su posición más adelantada.
- Los pies y las piernas del conductor deben estar completamente dentro de la estructura primaria cuando el conductor esté sentado de manera normal y sus pies toquen los pedales.

- En las vistas lateral y frontal, no debe haber ninguna parte de los pies o las piernas del conductor que sobresalga por encima o por fuera de esta estructura.

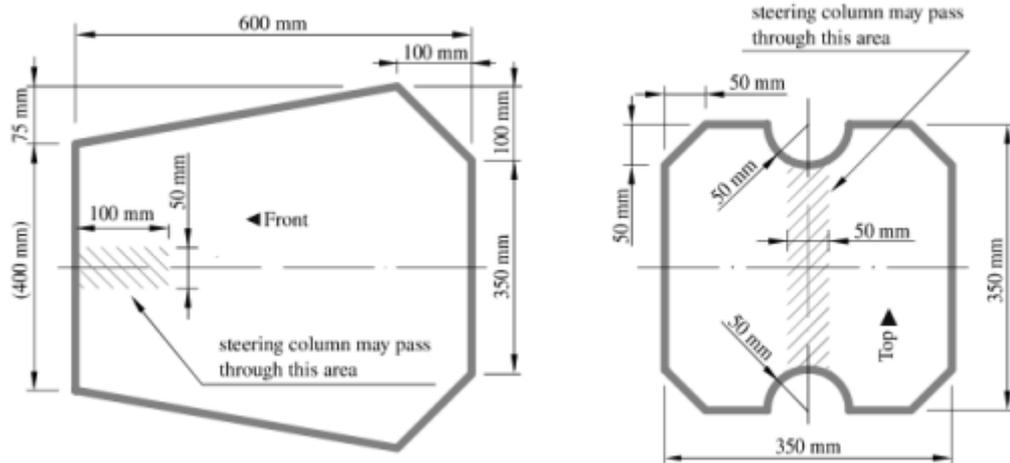


Ilustración 3.4: Plantillas necesarias para inspección de cockpit. Fuente: [9]

- Mantener una separación mínima de 50 mm entre el casco y la línea que conecta los puntos más elevados de los arcos principal y frontal.
- Garantizar una separación mínima de 50 mm entre el casco y la línea que une el punto más alto del arco principal y el punto inferior del refuerzo del arco principal.
- En caso de que los refuerzos del arco principal estén diseñados hacia la parte frontal, el casco no debe superar el plano formado por el arco principal.

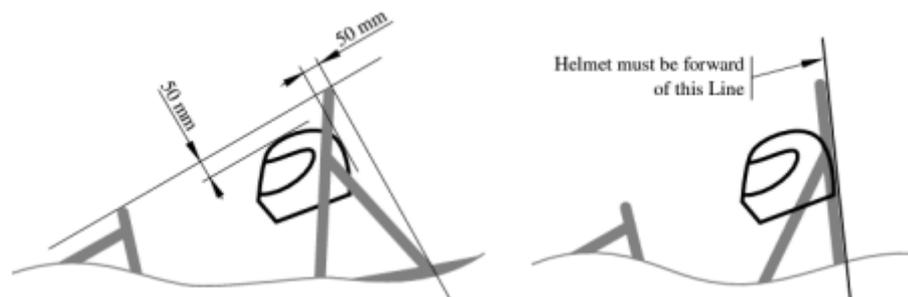


Ilustración 3.5: Requerimientos de distancias entre el casco y el Front Y Main Hoop. Fuente: [9]

Por último, la normativa establece unos valores y pautas para la cabina, que quedan definidas por un esquema en dos dimensiones del piloto;

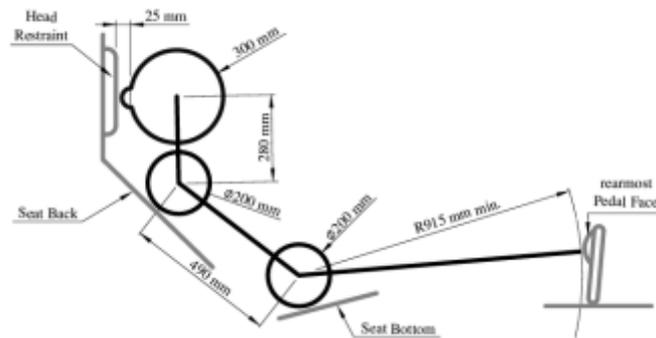


Ilustración 3.6: Representación del piloto por normativa. Fuente: [9]

3.2. Especificaciones Técnicas.

Como se ha comentado en apartados anteriores, las especificaciones técnicas se verán definidas por los objetivos que se quieren cumplir, esto implica que deberán atenerse a la normativa de la competición.

Las especificaciones técnicas quedan definidas por el apartado “3.1. Objetivos” y en la siguiente tabla:

Especificaciones técnicas
1. Peso inferior a 35kg.
2. Longitud total del chasis de 2500mm.
3. Ancho máximo del chasis inferior a 800mm.
4. Habitáculo de powertrain dimensionado para baterías y sistema de transmisión de TCMS.
5. Firewall con cumplimiento de normativa.
6. Chasis con cumplimiento de normativa.
7. Anclajes adaptados a la suspensión de TCMS.

Tabla 3.1: Especificaciones técnicas. Fuente propia.

3.2.1. Estudio de materiales.

Por último, se definirán las restricciones a cerca de los materiales dadas por la normativa, y se realizara los estudios de las opciones posibles.

Los requisitos establecidos en la normativa son los siguientes [9];

- La tubería de acero debe estar fabricada con acero al carbono no aleado, con un contenido máximo del 0.3% de carbono, 1.7% de manganeso y 0.6% de cualquier otro elemento. Cualquier otro grado de acero se considera un material alternativo y debe someterse a pruebas y presentación de documentación adicionales.

- Las propiedades del acero utilizadas para los cálculos deben ser:

- Resistencia no soldada para cálculos continuos de material:

- Módulo de Young (E) = 200 GPA

- Límite elástico (Sy) = 305 MPa

- Límite de rotura (Su) = 365 MPa

-Resistencia soldada para material discontinuo como cálculos de juntas:

·Límite elástico (S_y) = 180 MPa

·Límite de rotura (S_u) = 300 MPa

·Por último, los requisitos mínimos de sección se definen en la siguiente imagen:

Item or application	Minimum wall thickness	Minimum cross sectional area	Minimum area moment of inertia
Main and front hoops, shoulder harness mounting bar	2.0 mm	173 mm ²	11 320 mm ⁴
Impact structures, front bulkhead, roll hoop bracing, driver's restraint harness attachment (except as noted above)	1.2 mm	119 mm ²	8509 mm ⁴
Front bulkhead support, main hoop bracing supports	1.2 mm	91 mm ²	6695 mm ⁴

Ilustración 3.7: Requisitos mínimos de sección. Fuente: [9]

Con estos datos, podemos hacer un estudio de los materiales que podemos utilizar, y los diámetros de tubo que podemos utilizar;

·El estudio de materiales queda definido en la siguiente tabla, donde se marcarán en verde las mejores opciones;

Materiales Propuestos						
Material	Densidad	Modulo Elástico	Limite Elástico	Límite de Tracción	Precio	Cumplimiento de Normativa.
ASTM A500 B	7850 kg/m ³	?	315 Mpa	400Mpa	0,45 - 0,68/kg	?
SAE 1020	7860 kg/m ³	207 Gpa	210 MPa	380Mpa	0,65/kg	OK
Acero a36	7850 kg/m ³	200 GPa	250 Mpa	400 - 550 Mpa	0,37/kg	OK
AISI 1015	7870 kg/m ³	200 GPa	325 Mpa	385 Mpa	0,36/kg	OK
AISI 4130	7850 kg/m ³	205 Gpa	460 MPa	731 MPa	0,43/Kg	NO
AISI 1020	7900 kg/m ³	200 Gpa	351,57 Mpa	420,5Mpa	0,36/kg	OK

AISI /SAE 1010	7870 Kg/m ³	205 Gpa	305 Mpa	365 Mpa	0,63/kg	OK
-------------------	---------------------------	---------	---------	---------	---------	----

Tabla 3.2: Materiales propuestos; Fuente propia.

·Por último, para determinar el tamaño de los tubos, tenemos que calcular el diámetro exterior de los tubos a partir de la pared, el área de la sección transversal y el momento de inercia del área.

·Diámetro del tubo para el aro principal, el aro delantero y la barra de montaje del arnés para hombros:

El tubo propuesto tiene un diámetro exterior de 25,4 mm y un espesor de pared de 2,0 mm. Después de realizar los cálculos del área de la sección transversal y del momento de inercia del área, se obtienen los siguientes resultados:

	Espesor de pared minimo	Área de sección transversal	Momento de inercia del área	Diámetro exterior
Normativa	2.0 mm	175 mm ²	11329 mm ⁴	x
Propuesto	2.5 mm	179.85 mm ²	11930.31 mm ⁴	25.4 mm

Tabla 3.3: Especificaciones del tubo propuesto 1. Fuente propia.

Notation	Value	Unit
A	179.856179418	mm ²
I _z	11930.3100212455	mm ⁴
I _y	11930.3100212455	mm ⁴
C _z	12.7	mm
C _y	12.7	mm
Q _z	658.1166666667	mm ³
Q _y	658.1166666667	mm ³
S _z	939.3944898619	mm ³
S _y	939.3944898619	mm ³
J	23860.620042491	mm ⁴

Ilustración 3.8: Tabla de cálculo adicional para tubo de 25.4 x 2.0. Fuente propia.

·Diámetro del tubo para la estructura de impacto lateral, el mamparo delantero, el refuerzo del aro antivuelco y el accesorio del arnés de sujeción del conductor y el diámetro del tubo para el soporte del mamparo delantero y los soportes del aro principal:

El tubo propuesto tiene un diámetro exterior de 25,4 mm y un espesor de pared de 1,6 mm. Después de realizar los cálculos del área de la sección transversal y del momento de inercia del área, se obtienen los siguientes resultados:

	Espesor de pared mínimo	Área de sección transversal	Momento de inercia del área	Diámetro exterior
Normativa	1.2 mm	119 mm ²	8509 mm ⁴	x
Propuesto	1.6 mm	119.98 mm ²	8530.28 mm ⁴	25.4 mm

Tabla 3.4: Especificaciones del tubo propuesto 2. Fuente propia.

Notation	Value	Unit
A	119.9804864934	mm ²
I _z	8530.2833932232	mm ⁴
I _y	8530.2833932232	mm ⁴
C _z	12.7	mm
C _y	12.7	mm
Q _z	455.06621175	mm ³
Q _y	455.06621175	mm ³
S _z	671.6758577341	mm ³
S _y	671.6758577341	mm ³
J	17060.5667864463	mm ⁴

Ilustración 3.9: Tabla de cálculo adicional para tubo de 25.4 x 1.6. Fuente propia.

4. Planteamiento de soluciones y diseño.

En este apartado se llevará a cabo la selección de una solución clave que servirá como punto de partida para iniciar el diseño del chasis. Además, se abordará el definir los materiales que se utilizarán en la construcción del chasis, considerando sus propiedades y características específicas.

También se planificarán y detallarán las pruebas o simulaciones a las que el chasis deberá someterse, con el objetivo de garantizar su rendimiento óptimo, resistencia estructural y seguridad.

4.2. Solución escogida.

Teniendo en cuenta todos los apartados previamente tratados, la solución escogida será un chasis tubular de acero. Por ello, en este apartado se expondrán los motivos de la decisión;

La decisión de que tipo de chasis desarrollar es una de las soluciones más complicadas para un equipo de Formula SAE, ya que el chasis es el principal miembro estructural del monoplaça, y tiene que soportar todas las cargas que se pongan sobre él. Por ello, la selección del chasis para el monoplaça de cada temporada suele ser una de las primeras decisiones de los equipos, y el coche entero se construye alrededor de este.

La incorporación de tecnologías avanzadas en la industria automotriz ha dado lugar a la proliferación del chasis monocasco, mayormente confeccionados en fibra de carbono u otros compuestos innovadores. Este enfoque ha ganado prominencia especialmente en el ámbito de los vehículos de alta gama y de competición debido a su distintiva fortaleza, su capacidad para resistir deformaciones, combinada con su increíble ligereza, lo que los hace más eficientes y conseguir mejores aceleraciones. Su principal desventaja es que la fabricación de un chasis monocasco de fibra de carbono es un proceso significativamente más caro y complejo que el de un chasis tubular.



Ilustración 4.1: Formula SAE con chasis monocasco. Fuente: Formula SAE Media.

Por otro lado, el chasis tubular, también conocido por su utilización en un amplio abanico de competiciones en el mundo del motor, es una opción más fiable, económica y sencilla de fabricar, por lo que encaja a la perfección con los objetivos de TCM MotorSports para esta temporada; Un coche fiable, económico y que asegure un buen inicio en la competición al equipo.



Ilustración 4.2: Formula SAE con chasis tubular. Fuente: Formula SAE Media.

4.3. Selección de materiales.

Para seleccionar el material utilizado en el chasis, se empleará la información recogida en la *Tabla 3.2*, de la que se extraen las siguientes conclusiones;

Las propiedades de los aceros A36 o AISI 1015 hacen que descartemos estos aceros, ya que, pese a admitir muy bien la soldadura, presenta propiedades menores que los otros aceros propuestos.

En el caso del ASTM A500 Clase B, queda descartado por falta de información acerca de su aleación y características mecánicas, ya que no se puede verificar que cumpla con la normativa.

El resto de los materiales presentan mejores propiedades mecánicas, dividiéndolos de la siguiente manera:

SAE/AISI 1020: Este acero posee un mayor contenido de carbono, y es aplicado comúnmente en la construcción de estructuras de mediana resistencia. Su resistencia máxima a tracción es de 194,7 MPa y su límite elástico es de 294.8 MPa.

SAE/AISI 1010: Este es un acero medio al carbono entre 0,08% y 0,013%. Sus bajos porcentajes de carbono definen el material como relativamente blando y poco resistente, pero también lo hacen muy dúctil. Su resistencia máxima a tracción es de 320 MPa y su resistencia a fluencia es de 180MPa.

SAE/AISI 4130: El acero grado SAE 4130 pertenece a los aceros de alta resistencia con baja aleación. Este es el acero más utilizado por los mejores equipos de la Formula SAE, ya que sus características mecánicas y su precio son óptimos para el chasis del monoplaça. Su principal inconveniente es el incumplimiento de la normativa, y para hacer que este sea legal se deberán presentar los documentos especificados en T 3.3.2 y T 3.3.3.

Finalmente, y debido a que el patrocinador que proporciona al equipo el tubo no contaba con estos materiales, utilizaremos el acero E235, que es muy similar al SAE 1020.

Las características químicas y mecánicas de este material quedan definidas en las siguientes ilustraciones:

C % max.	P % max.	S % max.	Mn %	Si % max.
0,17	0,045	0,045	1,2 max.	0,35

Ilustración 4.3: Propiedades químicas del E235. Fuente: [21].

	Supply Condition						
	+U	+A	+N	+AR	+C	+LC	+SR
Rm - Tensile strength (MPa)	390	315	340 - 480	340 - 360	480 - 490	440	420 - 440
Re - Elastic limit (MPa) (+N)	300		235	195 - 235			325 - 350
A - Fracture elongation (%)	7	25	25	40	6	10	14 - 16

Ilustración 4.4: Propiedades mecánicas del E235. Fuente: [21].

4.4. Estudio de requisitos estructurales y simulaciones.

Por último, se definirán también los requisitos estructurales estandarizados para la FSAE (proporcionados en el SES), y para el cumplimiento de la normativa de esta;

·En la estructura de impacto lateral, se debe de soportar una carga de 7.0 kN orientada desde el exterior de la estructura hacia el piloto, aplicada sobre todos los miembros estructurales que estén dentro del área principal de impacto lateral, y con una deformación admisible máxima de 25mm.

·En la superficie frontal, trasera y los soportes de ambas, se debe de soportar una carga con dirección desde la parte frontal y trasera del chasis hacia el centro de este, y aplicada sobre los puntos de unión de la placa anti-intrusión de 150 kN.

5. Diseño del chasis.

En el presente apartado se observará detalladamente el proceso de diseño del chasis tubular y sus componentes, el cual se llevará a cabo utilizando el software SolidWorks. A través de esta sección, se expondrá cómo el chasis evoluciona a través de diversas iteraciones, permitiendo así una optimización gradual de su estructura y funcionalidad. Se analizarán los criterios y metodologías empleadas para la selección de los tubos adecuados para cada parte del chasis, considerando factores como la resistencia, el peso, la flexibilidad y las normativas específicas de la competición. Este análisis busca no solo justificar las decisiones de diseño tomadas, sino también proporcionar una comprensión profunda de las consideraciones técnicas y teóricas que subyacen al desarrollo del chasis.

Ilustración 5.2: Esquema lateral de la sección frontal. Fuente propia.

5.2. Sección de cabina.

En el diseño de un chasis tubular para un vehículo de competición de Formula SAE, la sección de cabina, también conocida como "cockpit", emerge como un elemento central y crítico en términos de seguridad y rendimiento. Ubicada entre el Front Hoop y el Main Hoop, esta sección del chasis alberga al piloto y, por ende, representa el epicentro de la estructura. Compuesta por dos jaulas antivuelco, el main hoop y el front hoop, esta área está diseñada mediante una triangulación nodo a nodo, siguiendo las regulaciones de la competición.

Además de proporcionar un espacio seguro para el piloto, la sección de cabina integra elementos como los soportes para los cinturones de seguridad y el firewall.



Ilustración 5.3: Sección de cabina. Fuente propia.

5.3. Sección posterior o de powertrain.

La sección de cabina, situada entre el Main Hoop y la parte posterior del monoplace, desempeña un papel esencial en el diseño del chasis. Este bloque estructural no solo aloja el conjunto de “powertrain”, incluyendo el motor y la batería del monoplace, sino que también actúa como un escudo protector ante posibles impactos. La relevancia de esta sección se magnifica dado que el powertrain constituye uno de los componentes principales del vehículo.

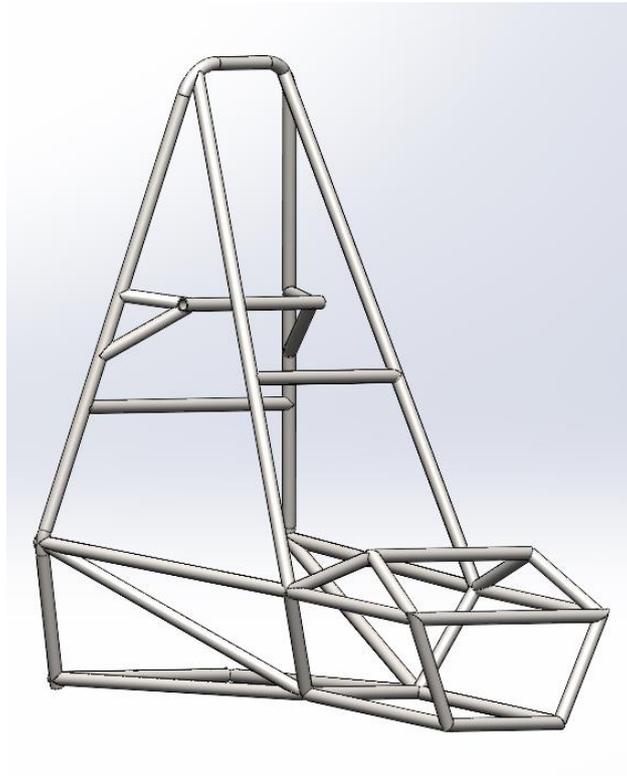


Ilustración 5.5: Sección posterior. Fuente propia.

Además de albergar el powertrain, la sección posterior soporta las cargas generadas por la suspensión trasera y la transmisión, ya que el diferencial se encuentra integrado en su interior.

Un aspecto distintivo de esta sección son los "Main Hoop Bracings", dos tubos diseñados para sostener la jaula antivuelco principal, así como el alerón trasero y el reposacabezas del piloto. Al soportar el alerón trasero, estos componentes deben ser diseñados para soportar las cargas aerodinámicas generadas por el mismo.

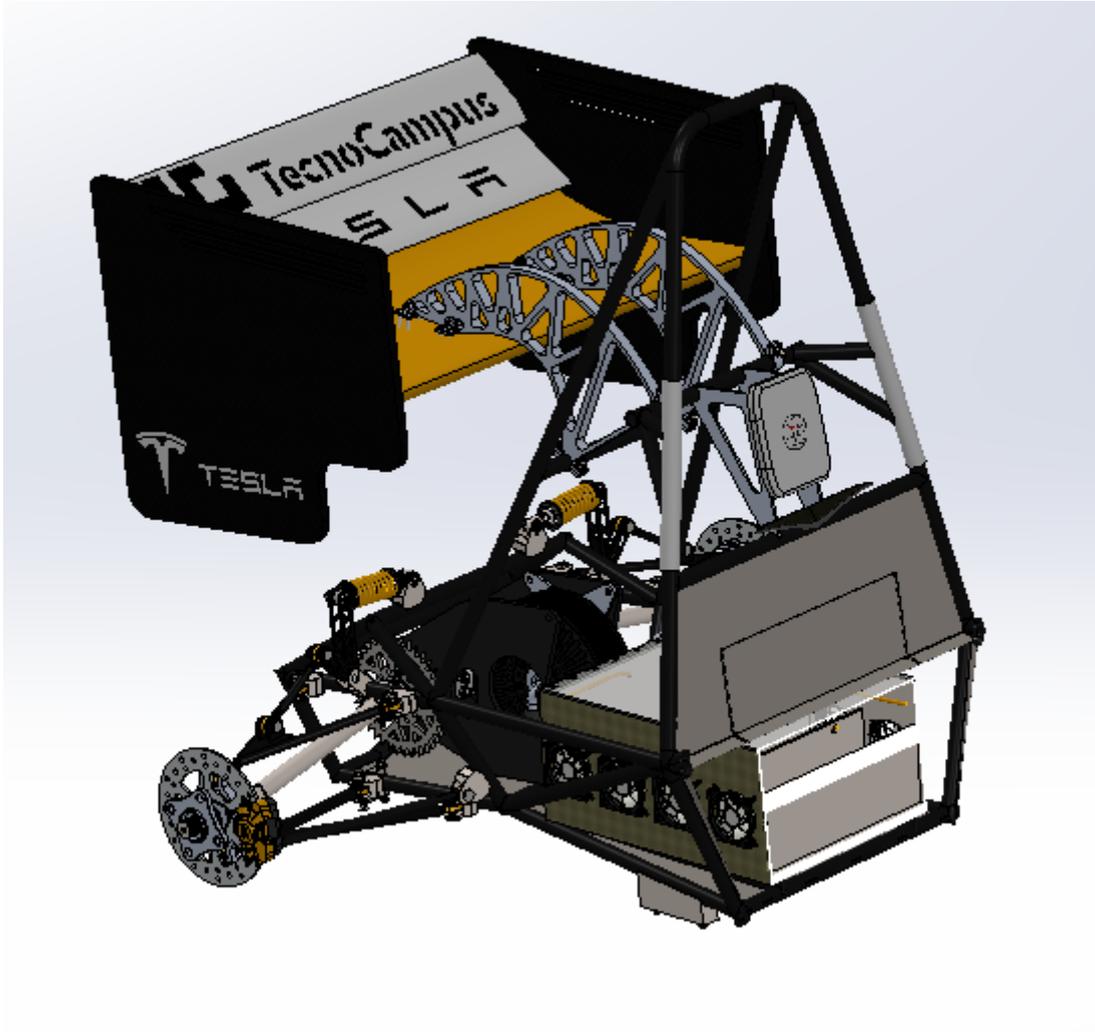


Ilustración 5.6: Ensamblaje de aerodinámica y powertrain. Fuente propia.

5.4. Firewall y suelo del monoplaza.

El suelo del monoplaza se divide en dos secciones distintas: la sección posterior, confeccionada en planchas de acero para garantizar su soldadura a la estructura primaria del chasis, sirve como plataforma de soporte para el conjunto del powertrain. En contraste, la sección delantera, destinada al piloto, presenta un suelo fabricado en fibra de carbono obtenido gracias al presupuesto destinado por la universidad Tecnocampus Mataró, dispuesto sobre pequeñas pletinas y refuerzos de acero, proporcionando así una combinación óptima de resistencia y ligereza.

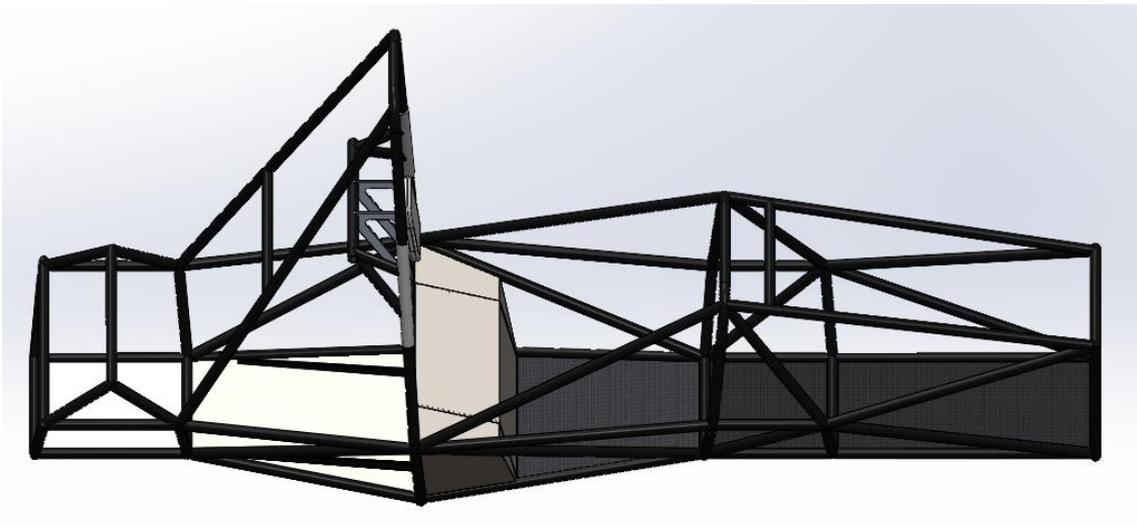


Ilustración 5.7: Suelo del monoplaza. Fuente propia.

El firewall, por otro lado, emerge como uno de los componentes más cruciales del monoplaza, no solo debido a las estrictas regulaciones que debe cumplir, sino también por su función fundamental en la seguridad del piloto en caso de un fallo en el powertrain. Este componente está compuesto por una plancha de acero soldada al chasis, complementada por una lámina de aluminio en un lado y una capa de fibra de carbono en el otro.

Además, se incluye un orificio para la convección de aire y otra plancha de aluminio para reforzar la protección. Es importante destacar que este firewall ha sido sometido a la evaluación y aprobación por parte de la Formula SAE, habiendo cumplido exitosamente con los rigurosos estándares de seguridad establecidos.

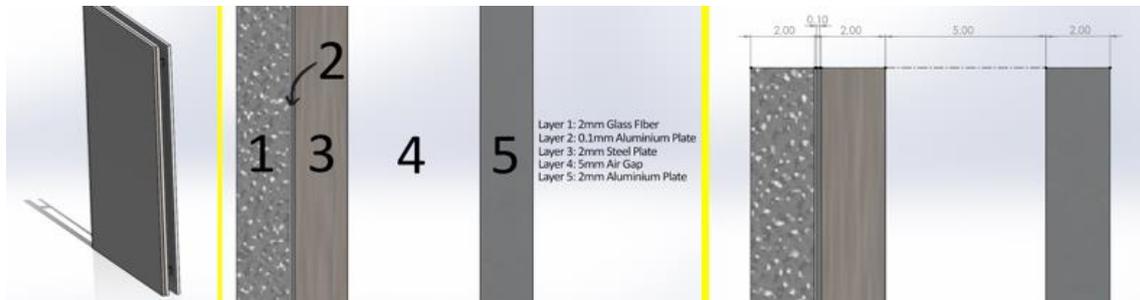


Ilustración 5.8: Composición del firewall. Fuente propia.

En el firewall, la lámina de fibra de vidrio se utiliza como aislante térmico y material ignífugo, por lo que no es válida cualquier fibra ni laminado. La fibra utilizada, también aprobada por la FSAE, es la siguiente;

Categories: Polymer, Thermoplastic, Nylon (Polyamide PA), Nylon 66 (PA66), Nylon 66, Glass Fiber Filled, Flame Retardant			
Material Notes: Self extinguishing (UL-94 V-0) 30% glass fiber reinforced polyamide 6.6 for component with high stiffness and dimensional stability Information provided by Polyam Ram On Ind.			
Vendors: No vendors are listed for this material. Please click here if you are a supplier and would like information on how to add your listing to this material.			
Physical Properties		Metric	English
Density		1.60 g/cc	0.0578 lb/in ³
Water Absorption		4.0 %	4.0 %
Moisture Absorption at Equilibrium		1.4 %	1.4 %
Linear Mold Shrinkage		0.0020 - 0.0040 cm/cm	0.0020 - 0.0040 in/in
Mechanical Properties		Metric	English
Hardness, Rockwell R		122	122
Tensile Strength, Yield		135 MPa	19600 psi
Elongation at Break		2.0 %	2.0 %
Flexural Strength		210 MPa	30500 psi
Flexural Modulus		8.50 GPa	1300 ksi
Izod Impact, Notched		1.00 J/cm	1.07 ft-lb/in
		@Temperature 23.0 °C	@Temperature 73.4 °F
Electrical Properties		Metric	English
Volume Resistivity		1.00e+15 ohm-cm	1.00e+15 ohm-cm
Surface Resistance		1.00e+12 ohm	1.00e+12 ohm
Dielectric Constant		3.8	3.8
Dielectric Strength		70.0 kV/mm	1700 kV/in
Thermal Properties		Metric	English
Melting Point		256 °C	493 °F
Maximum Service Temperature, Air		120 °C	248 °F
		200 °C	392 °F
Deflection Temperature at 0.45 MPa (65 psi)		250 °C	482 °F
Deflection Temperature at 1.8 MPa (264 psi)		240 °C	464 °F
Flammability, UL94		V-0	V-0
		@Thickness 3.00 mm	@Thickness 0.118 in

Ilustración 5.9: Fibra de vidrio utilizada en el firewall. Fuente: Subministrada por el patrocinador.

5.5. Disposición de tubos.

Para la fabricación del chasis se han utilizado dos tipos de tubo de acero E235. Estos tubos, con diámetros de 25mm y diferentes espesores de pared, son requisitos tanto normativos como estratégicos para garantizar la integridad y resistencia del chasis.

El tubo de 25x2.70mm se ha reservado específicamente para componentes críticos como las jaulas antivuelco y los soportes de los cinturones de seguridad. Su mayor espesor de pared proporciona una mayor resistencia y capacidad de absorción de energía en caso de impacto, cumpliendo así con los estándares de seguridad establecidos por las regulaciones de la competición.

Por otro lado, el tubo de 25x2.05mm ha sido empleado en el resto de la estructura del chasis. Esta elección se basa en consideraciones de peso, rigidez y funcionalidad, permitiendo una distribución óptima de las cargas y una respuesta dinámica adecuada del vehículo en pista.

La disposición de estos tubos, como se muestra en la imagen adjunta, evidencia claramente la diferenciación entre los tubos de 25x2.05mm y los de 25x2.70mm, observando a la izquierda los tubos de 2.05mm de pared, y a la derecha los de 2.70mm de pared.

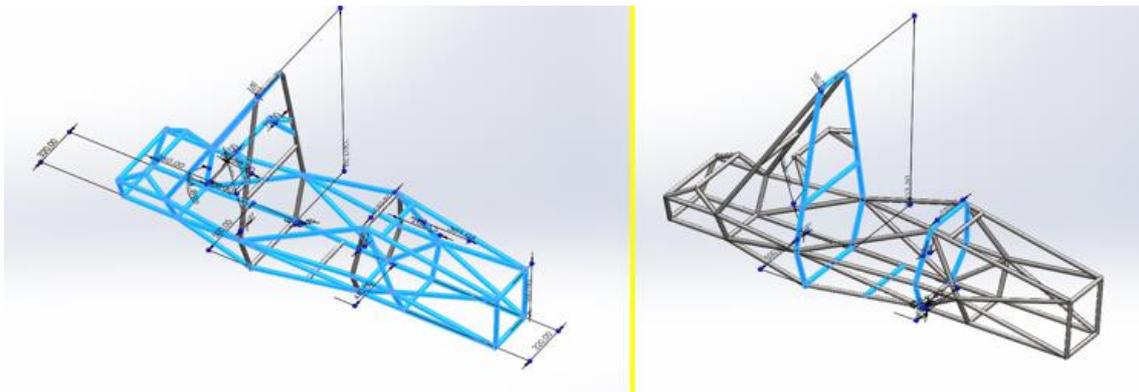


Ilustración 5.10: Disposición de tubos del chasis. Fuente propia.

5.6. Anclajes.

Los anclajes están destinados a fijar componentes como la dirección y la suspensión, proporcionando una base sólida para los trapecios que sostienen las ruedas, las barras de empuje de la suspensión y los muelles. Asimismo, los anclajes también aseguran la posición adecuada del reposacabezas del piloto y el asiento, elementos críticos para la comodidad y la seguridad del conductor.

En la disposición del chasis, como se muestra en la siguiente imagen, los anclajes se encuentran ubicados para optimizar la distribución de cargas y garantizar la estabilidad y el rendimiento del vehículo en pista. Estos anclajes se integran de manera precisa en la estructura del chasis, proporcionando puntos de conexión robustos y confiables para los diversos sistemas y componentes del monoplaza.

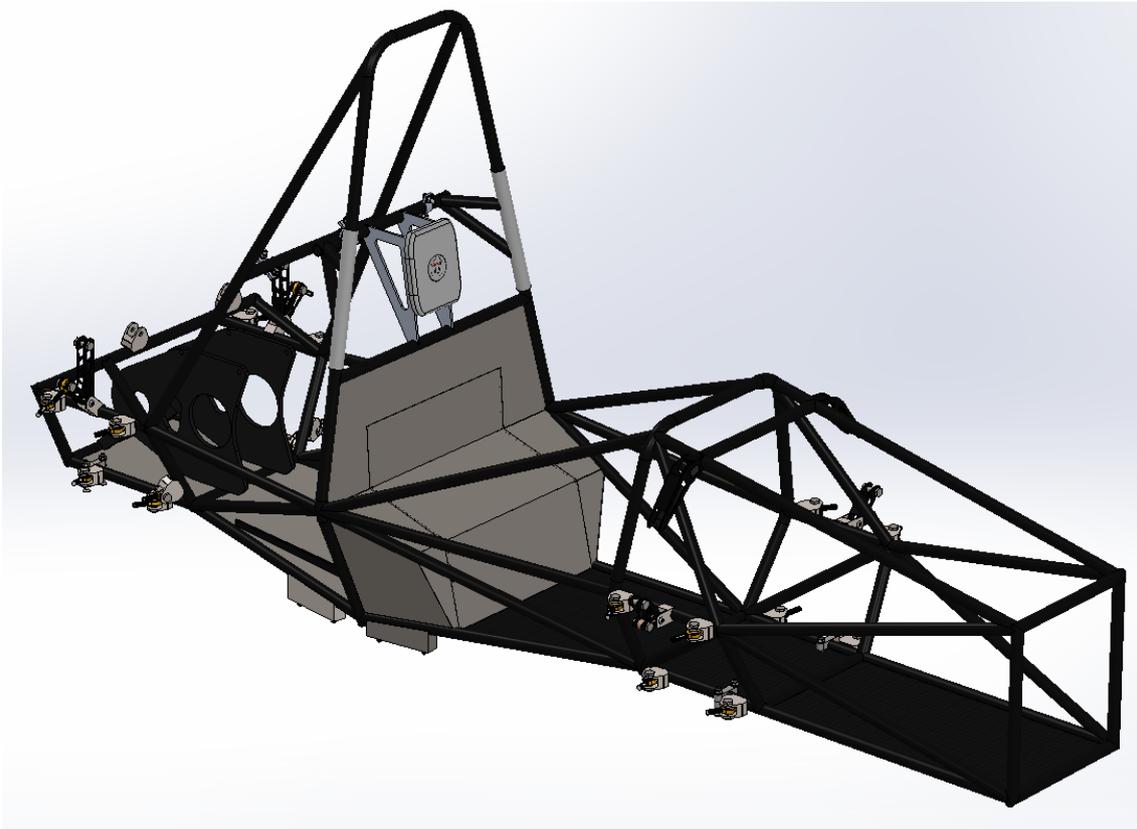


Ilustración 5.11: Disposición de anclajes en el chasis. Fuente propia.

Cuando se ensamblan todos los componentes del conjunto dinámico del monoplaza, el chasis adopta su forma final, como se muestra a continuación.

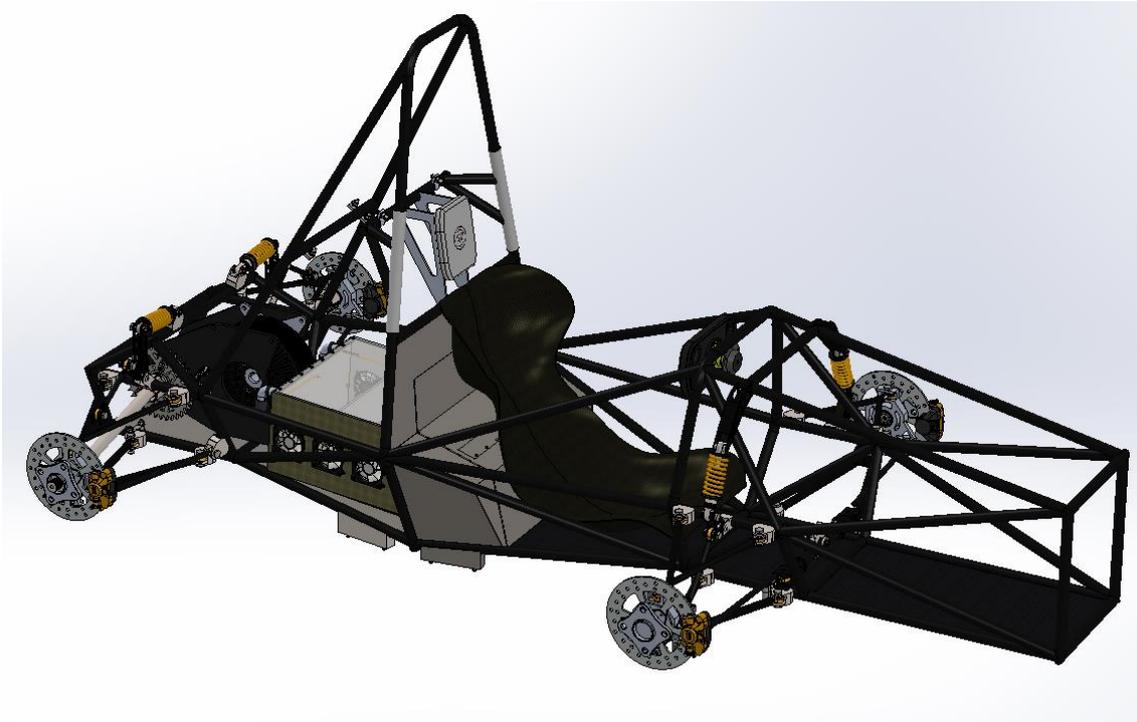


Ilustración 5.12: Ensamblaje sobre los anclajes del chasis. Fuente propia.

5.7. Chasis completo.

Tras la conclusión del diseño del chasis, se ha logrado alcanzar un peso final de 38.56 kg, incluyendo tanto la soldadura como los anclajes, situándolo como uno de los chasis tubulares más livianos dentro del ámbito de la Formula SAE. No obstante, es importante destacar que este peso podría haber sido reducido mediante la modificación de la configuración de los tubos. Lamentablemente, esta opción no estuvo disponible debido a que los patrocinadores del equipo no pudieron suministrar los tubos necesarios.

A partir de esta fase, se ha desarrollado una propuesta integral para el monoplaza completo, con el objetivo de optimizar completamente su rendimiento en conjunto con el chasis. Este proceso incluyó la creación de hojas de cálculo detalladas, en las cuales se incorporaron todos los pesos de los componentes del monoplaza, así como su distribución de masas, la capacidad de deceleración máxima y la carga aerodinámica.

Chasis			
Componente	Peso (1 comp)	N° Comp.	Peso total
Chasis Tubular	38,56	1	38,56
Suelo coche (ACERO)	22,4	1	22,4
Radiadores	2,26	2	4,52
Anclajes suspension	0,25	26	6,5
Anclajes radiador	0,25	2	0,5
Asiento	2,7	1	2,7
Anclajes asientos		2	0
Accumulator Box	38,2	1	38,2
Anclajes AB		2	0
Anclajes Powertrain		1	0
Impact Attenuator	0,8	1	0,8
Firewall	19,2	1	19,2
Pedal Freno	4,162	1	4,162
Pedal Acelerador	1,1	1	1,1
Tornillería total (aprox)	0,07	100	7

Tabla 5.1: Pesos de los componentes mecánicos del monoplaza "chasis". Fuente propia.

Aeros			
Componente	Peso (1 comp)	N° Comp.	Peso total
Alerón Delantero	2,8	1	2,8
Alerón Trasero	8,7	1	8,7
Fondo Plano	8,8	1	8,8
Anclaje Alerón Delantero	0,65	2	1,3
Anclaje Alerón Trasero	1,3	2	2,6
Carrocería	14,8	1	14,8
Anclajes Fondo Plano	0,25	4	1
Anclajes Carrocería	0,2	22	4,4

Ilustración 5.13: Pesos de los componentes mecánicos del monoplaza "aerodinámica". Fuente propia.

Dynamics			
Componente	Peso (1 comp)	N° Comp.	Peso total
Volante	0,446	1	0,446
Caja direccion	0,6	1	0,6
Columna direccion	1	1	1
Buje	1,2	4	4,8
Mangueta	0,4	4	1,6
Discos de Freno	0,28844	4	1,15376
Pinzas	0,6	4	2,4
Trapecios	0,5	8	4
Barillas de Empuje (Fibra C.)	0,16	4	0,64
Barillas de Empuje (Acero)	0,22	4	0,88
Muelles	0,8	4	3,2
Depósito Líquido Frenos	0,51947	2	1,03894
Neumáticos	5,44	4	21,76
Llandas	3,5	4	14
Diferencial	12,7	1	12,7
Palieres	6,3	2	12,6
Juntas homocineticas	2,9	2	5,8
Cojinetes	0,666	6	3,996
Juntas de pivote	0,16	32	5,12

Ilustración 5.14: Pesos de los componentes mecánicos del monoplaza “dynamics”.
Fuente propia.

LV			
Componente	Peso (1 comp)	N° Comp.	Peso total
Bateria LV	4,82	1	4,82
PCB de seguridad	0,3	1	0,3
Cableado	0,5	1	0,5

Tabla 5.2: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Low Voltage”.
Fuente propia.

Motor			
Componente	Peso (1 comp)	N° Comp.	Peso total
Motor	12,3	1	12,3
Inversor	8,5	1	8,5
Cableado	0,4427	1,5	0,66405
Bomba del motor + dip	5,3	1	5,3
Transmisión	10	1	10

Ilustración 5.15: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Motor”.
Fuente propia.

Digital			
Componente	Peso (1 comp)	N° Comp.	Peso total
Placa digital	0,6	1	0,6
Ecu	1,5	1	1,5
Mangueras	3	1	3
Display	0,2	1	0,2
Arduinos	0,2	2	0,4

Ilustración 5.16: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Digital”.
Fuente propia.

Baterías			
Componente	Peso (1 comp)	Nº Comp.	Peso total
Celdas	0,068	480	32,64
Cableado	0,4427	1	0,4427
Ems	0,1	5	0,5
AIRS	0,5	2	1

*Ilustración 5.17: Pesos de los componentes electrónicos del monoplaza “Baterías”.
Fuente propia.*

A partir de aquí, también pueden empezar a dimensionarse otros componentes como la dirección, el sistema de frenada o el sistema de transmisión de potencia;

BRAKE TORQUE	
PAD COEFFICIENT OF FRICTION (μ) (estimated):	VALUE
ROLLING RADIUS OF TYRE FRONT:	266,7 mm
ROLLING RADIUS OF TYRE REAR:	266,7 mm
WHEEL RIM MANUFACTURER, SIZE AND MODEL (FRONT):	OZ Formula Student Alluminium 4H wheel
WHEEL RIM MANUFACTURER, SIZE AND MODEL (REAR):	OZ Formula Student Alluminium 4H wheel
VEHICLE DATA	
C.G. HEIGHT:	400 mm
WHEELBASE:	1550 mm
VEHICLE MASS:	355,14 kg
STATIC FRONT AXLE LOAD:	109,86 kg
STATIC REAR AXLE LOAD:	260,58 kg
FRONT DOWNFORCE AT V_{MAX} :	28,5 kg
REAR DOWNFORCE AT V_{MAX} :	80,01 kg
MAX. DECELERATION:	1,6 G
MAX. SPEED:	140 kph
FRONT BRAKE PRESSURE [MAX.]:	VALUE bar

Ilustración 5.18: Hoja de cálculo para dimensionado de sistema de frenada. Fuente propia.

En su etapa de diseño inicial, el monoplaza logró obtener un peso total de aproximadamente 270kg, pero al implementar algunas mejoras como el suelo de carbono, este se vio reducido en 45kg.

Peso total Chasis	145,642	Reduccion de peso	
Peso total Aerós	44,4	Caja de baterías acero	38,2
Peso total Dynamics	97,7347	Caja de baterías aluminio	13,2
Peso total LV	5,62	Suelo en acero	22,4
Peso total Motores	36,76405	Suelo en fibra de carbono	1,7
Peso total Baterías	34,5827	Suelo en aluminio	11,4
Peso total Digital	5,7		
Peso total eCAT-24	370,44345		
Peso total sobre el eje delantero	68,88634		
Peso total sobre el eje trasero	219,60675		
Masa estática	288,49369		
Masa suspendida	81,94976		
Piloto	70	Peso reducido	45,7
Peso total con Piloto	440,44345	Peso máximo	324,74345

Tabla 5.3: Mejoras y reducciones de peso. Fuente propia.

Reparto de pesos (%)	
Frontal	29,65683966
Trasero	70,34316034
Reparto de pesos (kg)	
Frontal	109,86182
Trasero	260,58163

Tabla 5.4: Reparto de pesos. Fuente propia.

Por último, queda hacer que el resto del monoplaza sea óptimo y encaje a la perfección con el chasis, obteniendo la siguiente propuesta de diseño para el conjunto total del monoplaza;



Ilustración 5.19: Diseño final del monoplaza. Fuente propia.

El diseño final del chasis arrojó una masa total de 324,58 kg, con dimensiones que lo sitúan con una longitud de 3 metros, un ancho de 1,5 metros y una altura de 1,2 metros. Destacando entre los monoplazas de primer año, este vehículo se distingue por integrar un paquete aerodinámico completo en la Formula SAE. Además, está diseñado para montar neumáticos Hoosier de 21 pulgadas, lo que contribuye a su rendimiento óptimo en pista.



Ilustración 5.20: Neumáticos Hoosier 21'. Fuente propia.

La carrocería mayoritariamente está fabricada en fibra de vidrio, mientras que los alerones y el fondo plano son de fibra de carbono. Se emplean otras fibras, como el kevlar, para los laminados del asiento y la cabina, garantizando así una combinación de resistencia y ligereza para mejorar el desempeño global del monoplaza.



Ilustración 5.21: Ensamblaje de carrocería y paquete aerodinámico. Fuente propia.

La distancia entre ejes se establece en 1.5 metros, mientras que la suspensión cuenta con un recorrido total de 5 cm, lo que resulta en una altura del monoplaza respecto al suelo de 5 cm en reposo, variando entre 3 y 8 cm durante su funcionamiento. Esta configuración busca optimizar la estabilidad y la capacidad de manejo del vehículo en diferentes condiciones de pista.

El motor Emrax 228, con una potencia de 170 CV, se ha seleccionado como la unidad de propulsión principal. Se espera que, gracias a las baterías patrocinadas por Tesla y ensambladas y diseñadas por el equipo, el monoplaza alcance una autonomía de 23 km, superando así la distancia máxima de carrera establecida en 21 km.



Ilustración 5.22: Motor Emrax 228. Fuente propia.

5.8. Iteraciones descartadas.

Cabe destacar que la versión del chasis que se ha analizado en los apartados anteriores no representa el primer diseño elaborado, sino que es el producto de once iteraciones anteriores desarrolladas a lo largo de este TFG. En este apartado, examinaremos dos de estas iteraciones para comprender cómo ha evolucionado el chasis desde su versión inicial hasta su forma final, con el objetivo principal de reducir su peso.

La primera iteración diseñada se centró en cumplir con las especificaciones técnicas establecidas por la normativa. En esta iteración, se observa una mayor triangulación entre los nodos, una jaula antivuelco más alta y más refuerzos entre el Front Bulkhead y el Front Hoop. De esta versión fue también la primera en la que se realizó un informe con las simulaciones utilizadas para la mejora y el desarrollo de las iteraciones venideras, este informe será incluido en los anexos.

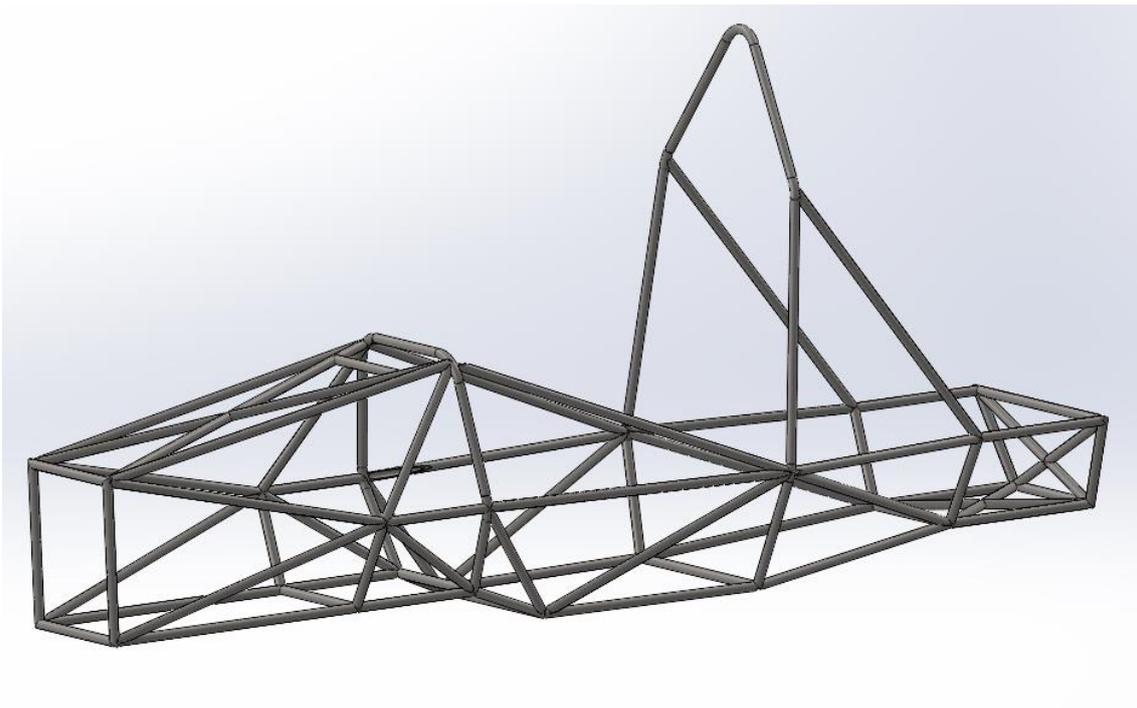


Ilustración 5.23: Primera iteración del chasis. Fuente propia.

La siguiente iteración que se examinará es la quinta, donde se introdujeron cambios en algunos de los nodos triangulados. Aquí se puede apreciar una jaula antivuelco más baja y cuadrada que la anterior, así como la incorporación del reposacabezas y de los soportes de la suspensión trasera. De esta versión, pese a estar descartada, se realiza también un estudio con simulaciones para argumentar los próximos cambios en el diseño en el SES y ante los inspectores en la competición. Este documento, pese a estar en inglés, también será incluido en los anexos.

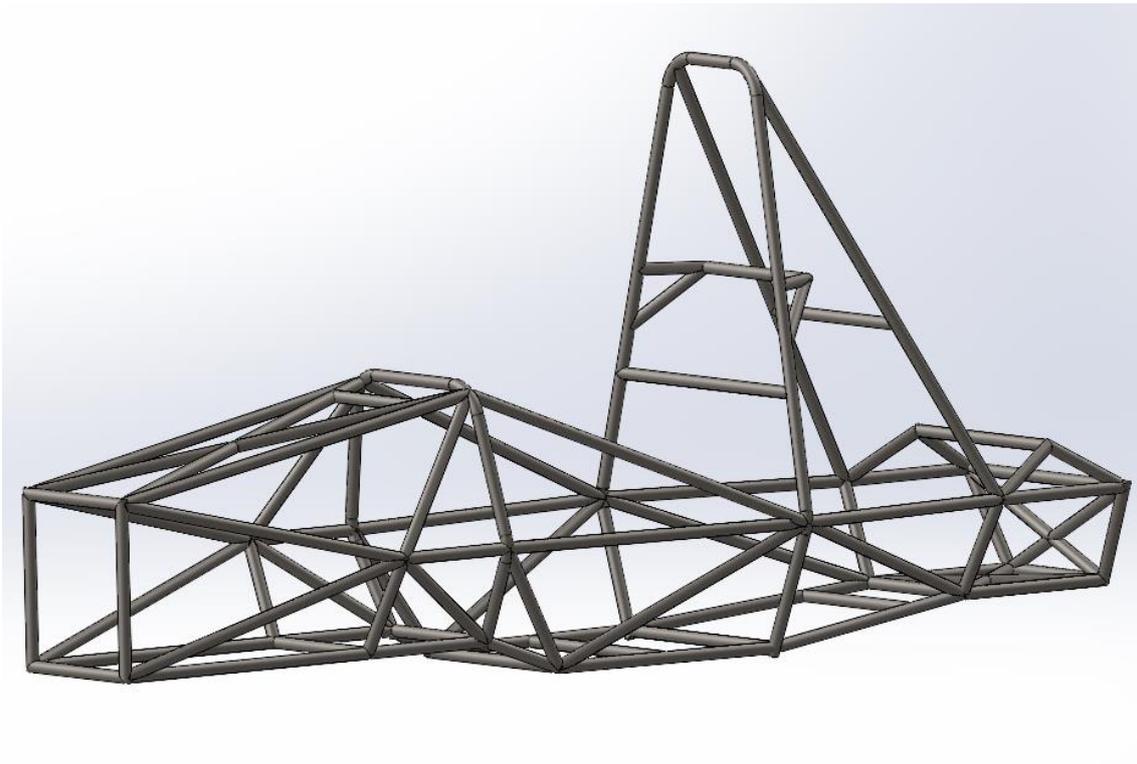


Ilustración 5.24: Quinta iteración del chasis. Fuente propia.

Esta versión evolucionó hacia la versión final después de varias iteraciones, experimentando modificaciones significativas. Se eliminaron los refuerzos entre el Front Bulkhead y el Front Hoop, ya que las simulaciones indicaron que no eran necesarios. Además, se eliminó el nodo inferior del Front Hoop debido a que no cumplía con la normativa al no tener la curvatura requerida, siendo reemplazado por una triangulación directa entre las dos jaulas antivuelco. Asimismo, se suprimieron algunos refuerzos en la parte posterior del monoplaza.

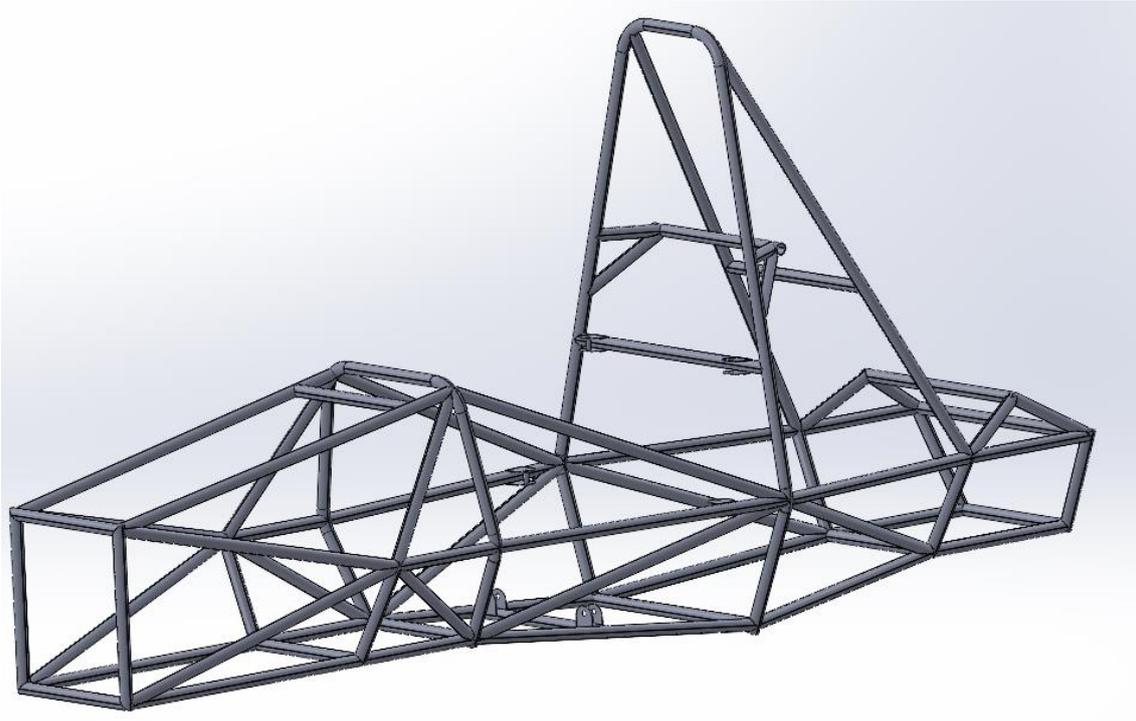


Ilustración 5.25: Onceava y definitiva versión del chasis. Fuente propia.

6. Fabricación.

La fabricación del chasis se llevó a cabo en las instalaciones de nuestro patrocinador CIFA, donde se empleó la técnica de soldadura TIG para unir los distintos nodos del chasis. Antes de hacer el cordón de soldadura completo, se punteó el chasis completamente para poder hacer las verificaciones correspondientes sobre este, y una vez hechas, se realizó la soldadura al completo.



Ilustración 6.1: Chasis tubular en proceso de fabricación. Fuente propia.

La soldadura TIG, también conocida como soldadura de gas inerte de tungsteno, es un proceso de soldadura por fusión reconocido por sus propiedades especiales que permiten la producción de cordones de soldadura precisos y de alta calidad.

Este método es ampliamente utilizado en diversos sectores industriales, incluyendo la industria aeronáutica y aeroespacial, debido a su capacidad para lograr uniones robustas y confiables [24].



Ilustración 6.2: Fabricación del chasis con soldadura TIG. Fuente propia.

Por otro lado, las jaulas antivuelco fueron curvadas por nuestro patrocinador ROIG Curvadors. Este proceso de curvado garantiza la resistencia y la forma adecuada de las jaulas para cumplir con los estándares de seguridad requeridos en la competición de Formula SAE.

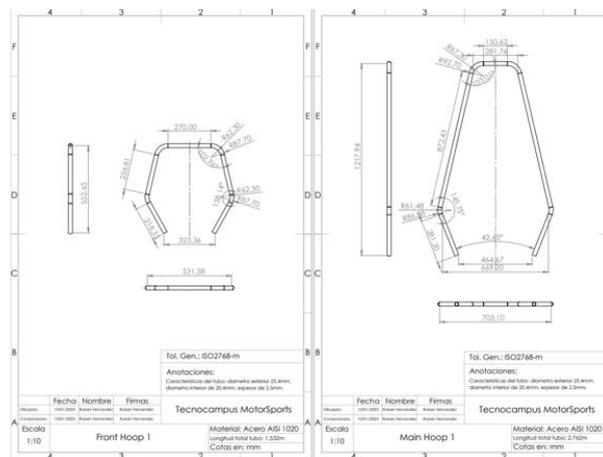


Ilustración 6.3: Planos de jaulas antivuelco. Fuente propia.

Por último, sea realiza el montaje de la carrocería sobre el chasis para ver si encaja correctamente;



*Ilustración 6.4: Ensamblaje de carrocería (sin lijar) sobre el prototipo de chasis.
Fuente propia.*

A demás de todo esto, y previamente a la fabricación del chasis real, se fabricó un modelo idéntico en policloruro de vinilo o PVC para poder realizar el prototipaje de otras piezas del monoplaza.



Ilustración 6.5: Chasis real junto a chasis prototipo. Fuente propia.

7. Verificación de diseño.

Una vez finalizado el diseño del chasis, es fundamental verificar su correcto funcionamiento antes de proceder con la implementación en el monoplaza. Este proceso de verificación se llevará a cabo mediante diversas simulaciones y pruebas físicas.

En primer lugar, se realizarán simulaciones computacionales para evaluar el rendimiento estructural del chasis bajo diferentes condiciones de carga y escenarios de conducción. Estas simulaciones permitirán identificar posibles áreas de debilidad o estrés excesivo en la estructura, así como optimizar el diseño para mejorar su resistencia y durabilidad.

Además, se buscará la aprobación del SES, el cual establece estándares de seguridad y rendimiento para los vehículos de competición. La aprobación del SES es crucial para garantizar que el chasis cumpla con los requisitos de seguridad establecidos por la competición.

Adicionalmente, se llevarán a cabo pruebas físicas sobre el chasis para validar su comportamiento en condiciones reales. Estas pruebas pueden incluir pruebas de carga estática y dinámica, pruebas de choque y vibración, entre otras. El objetivo de estas pruebas es confirmar que el chasis cumple con los estándares de rendimiento y seguridad requeridos para la competición.

7.1. Simulaciones.

En este apartado se simularán diferentes escenarios relevantes para la fabricación y verificación del chasis. Entre los escenarios considerados se incluyen el paso por curva, la distribución del peso de los componentes del coche y el piloto, así como los impactos frontal y lateral, entre otros.

La primera simulación se realizará utilizando Ansys con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos con las simulaciones posteriores que se llevarán a cabo en SolidWorks. Las simulaciones restantes se ejecutarán empleando SolidWorks debido a su interfaz más intuitiva y su mayor eficiencia para realizar análisis estructurales. Esto permitirá una evaluación más fluida y detallada de los diferentes aspectos del diseño del chasis.

Análisis torsional en Ansys:

En la primera simulación se aplicará una fuerza de torsión de 1500 Newtons en cada dirección sobre los trapecios de la suspensión para realizar un análisis torsional sobre la parte frontal del chasis.

Lo primero que se hará será convertir el modelo de SolidWorks a formato .stp para poder importarlo a Ansys. Luego, se definirán las vigas a simular, así como los trapecios de la suspensión sobre los que se aplicarán las fuerzas.

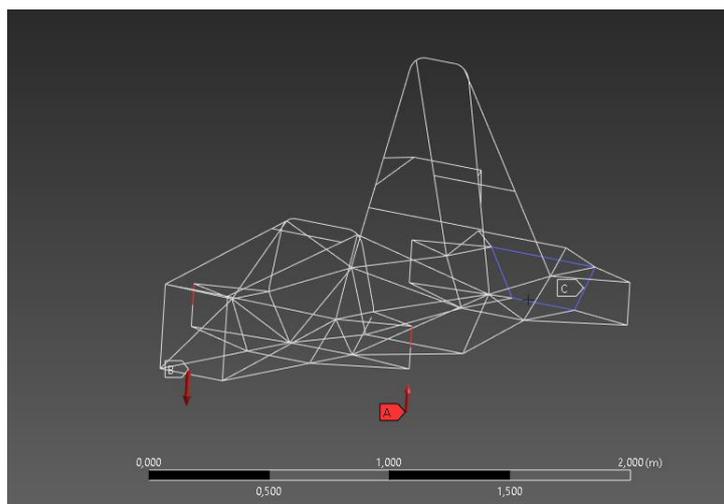


Ilustración 7.1: Condiciones de la simulación en Ansys. Fuente propia.

Finalmente, se establecerán las condiciones de la simulación y se realizará el mallado, obteniendo los siguientes resultados:

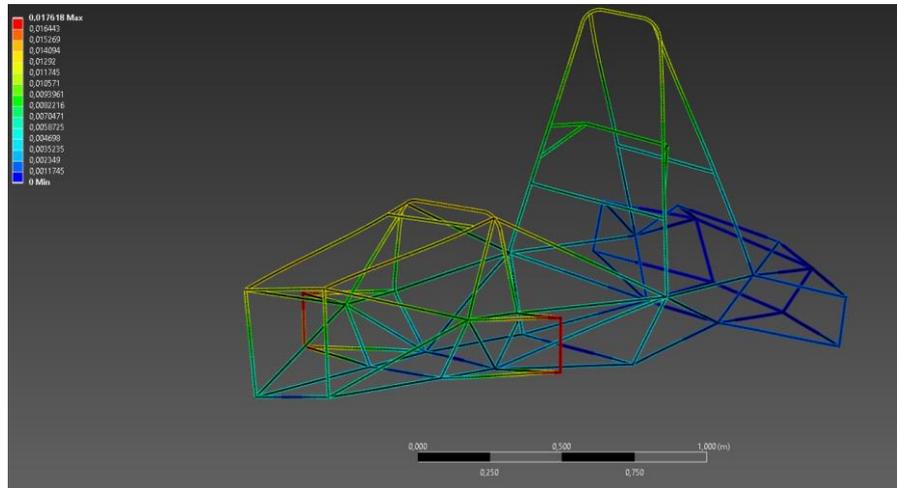


Ilustración 7.2: Deformaciones sobre la simulación en Ansys. Fuente propia.

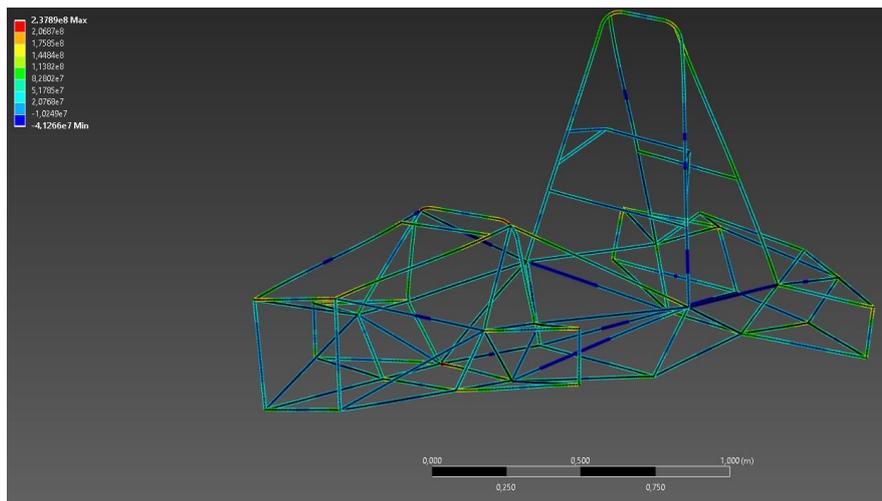


Ilustración 7.3: Esfuerzos máximos sobre la pieza simulada. Fuente propia.

Como se puede observar en este primer análisis, el chasis no se rompe ni presenta deformaciones permanentes bajo esta prueba. De todas maneras, el objetivo de este análisis era observar sus deformaciones bajo este tipo de fuerzas.

Análisis de impacto frontal en SolidWorks:

Se realiza una simulación de impacto frontal, aplicando la fuerza de la gravedad y 5000 N de impacto frontal en cada nodo del Front Bulkhead, es decir, un total de 20.000 Newtons. Las fuerzas aplicadas en esta simulación corresponden a los estándares establecidos por la FSAE. Según los resultados de la simulación, se observa una deformación principalmente en el Main Hoop. La parte frontal, donde se sitúa el piloto, apenas sufre deformaciones y en ningún punto de la estructura del chasis se supera el límite elástico del material.

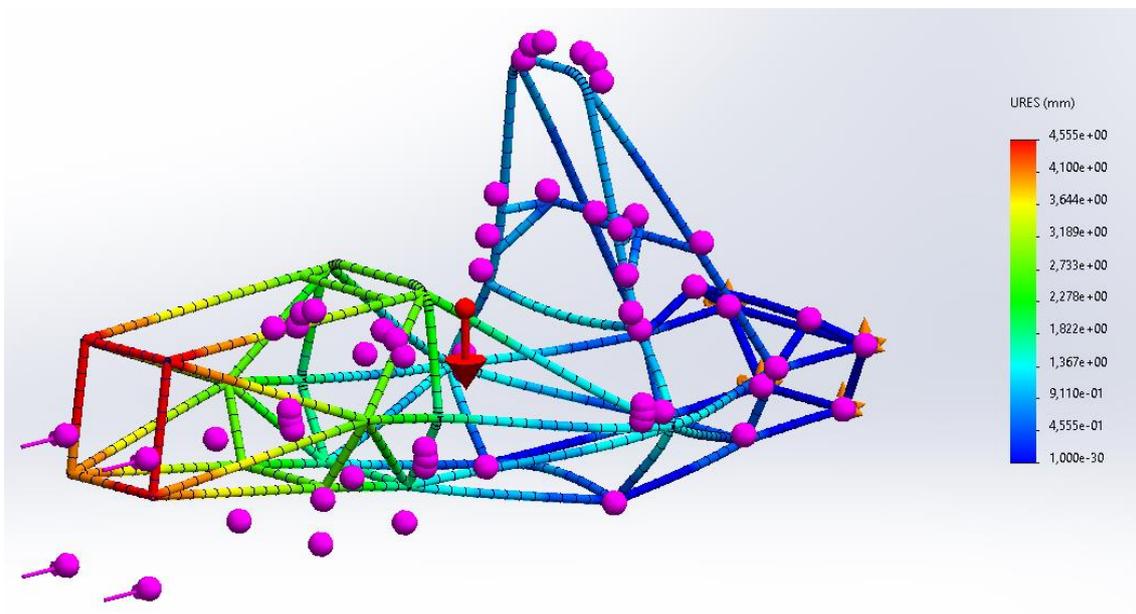


Ilustración 7.4: Deformaciones en la simulación de impacto frontal. Fuente propia.

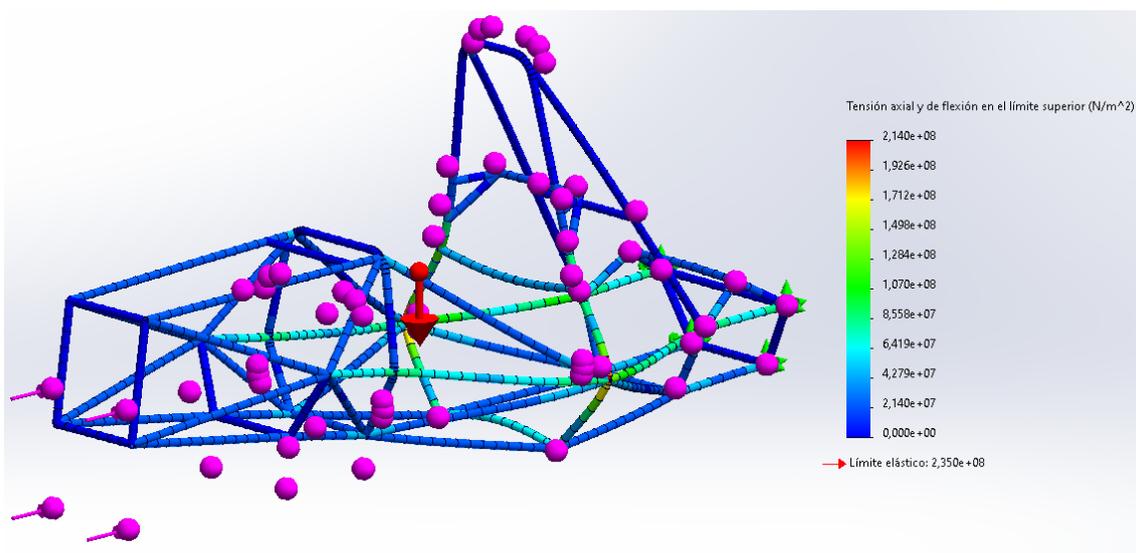


Ilustración 7.5: Tensiones en la simulación de impacto frontal. Fuente propia.

Se puede observar que el factor de seguridad es superior a 3 en prácticamente toda la pieza, con un valor mínimo de 1,098 en los nodos laterales de la jaula antivuelco, los cuales están diseñados para absorber el impacto y deformarse en caso de colisión.

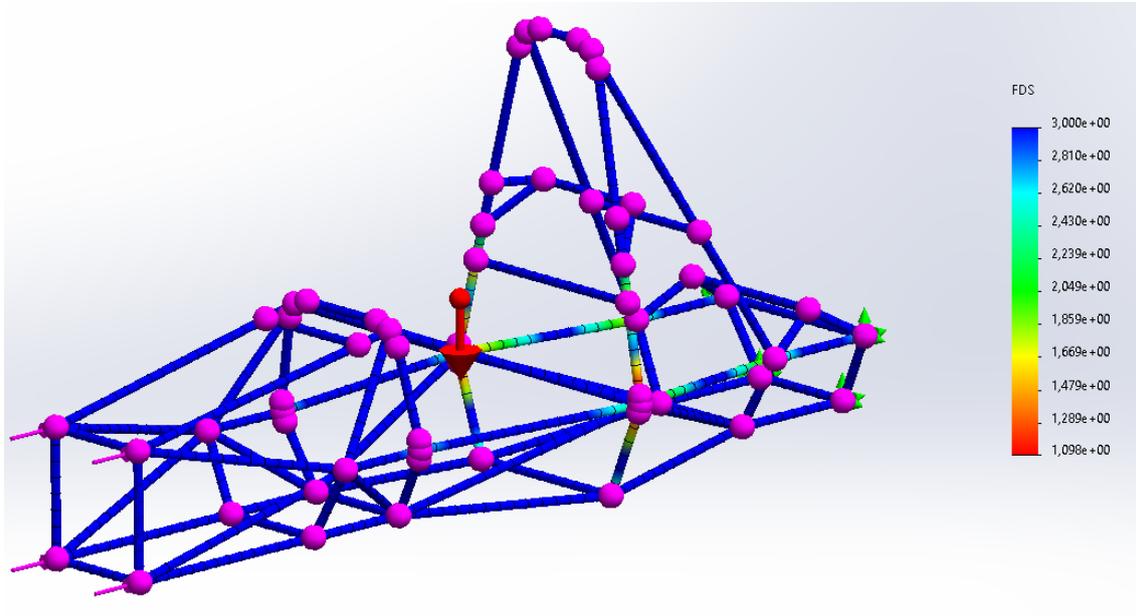


Ilustración 7.6: Factor de seguridad en la simulación de impacto frontal. Fuente propia.

Análisis de impacto trasero en SolidWorks:

Se ha llevado a cabo una simulación de impacto trasero, y, como en la anterior simulación, aplicando tanto la fuerza de la gravedad como 5000 N de impacto en cada nodo de la estructura posterior del chasis, totalizando 20.000 Newtons. Las fuerzas utilizadas en esta simulación se basan en los estándares de la FSAE. Los resultados muestran que la deformación se concentra principalmente en el Main Hoop. La parte frontal del chasis, donde se ubica el piloto, apenas presenta deformaciones y el material del chasis no excede su límite elástico en ninguna zona.

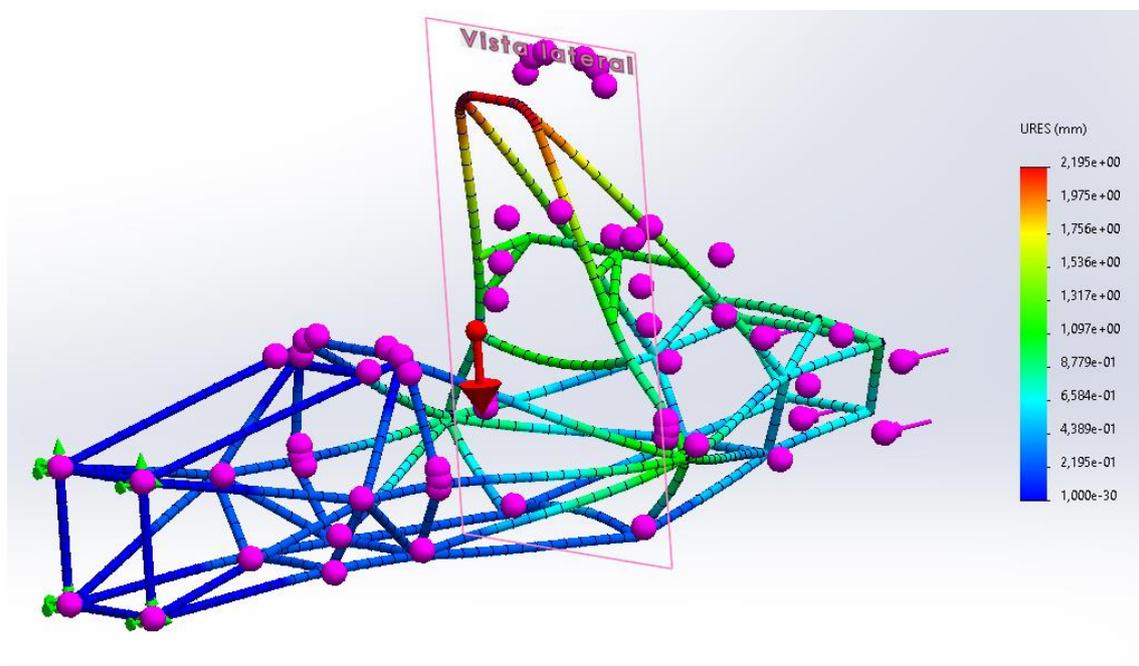


Ilustración 7.7: Deformaciones en la simulación de impacto trasero. Fuente propia.

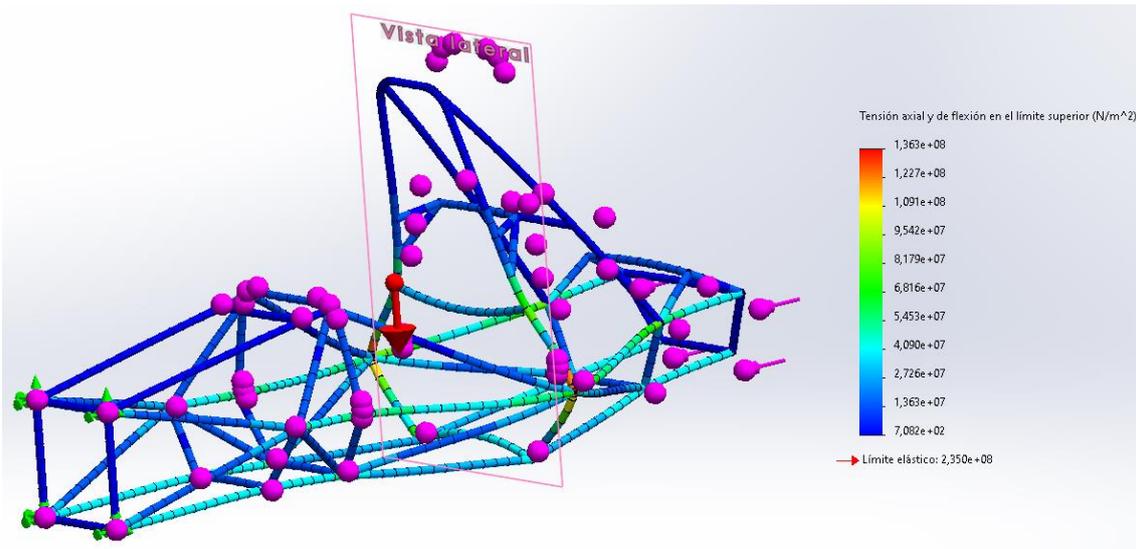


Ilustración 7.8: Tensiones en la simulación de impacto trasero. Fuente propia.

El factor de seguridad observado es superior a 3 en la mayor parte de la estructura, con un valor mínimo de 1,724 en los nodos laterales de la jaula antivuelcos, diseñados específicamente para absorber el impacto y deformarse en caso de colisión.

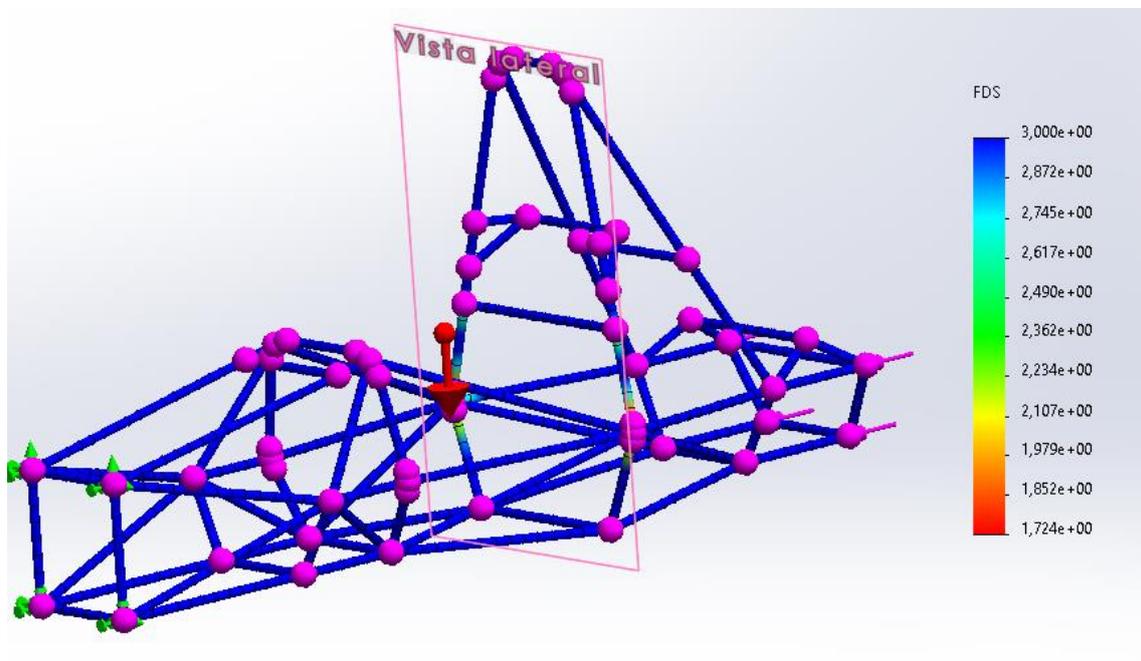


Ilustración 7.9: Factor de seguridad en la simulación de impacto trasero. Fuente propia.

Análisis de impacto lateral normativo en SolidWorks:

Se ha realizado una simulación de impacto lateral, aplicando la fuerza de la gravedad y 7500 N de impacto en cada lado, tal como lo exige la normativa de FSG. Los resultados de la simulación muestran que la deformación se concentra principalmente en los nodos de refuerzo de impacto lateral. Según la normativa, en esta simulación, las fuerzas aplicadas a los nodos de impacto lateral, sostenidas por el front hoop, no deben superar el límite elástico de la pieza, y como se puede observar en los resultados de tensiones, este límite no se excede.

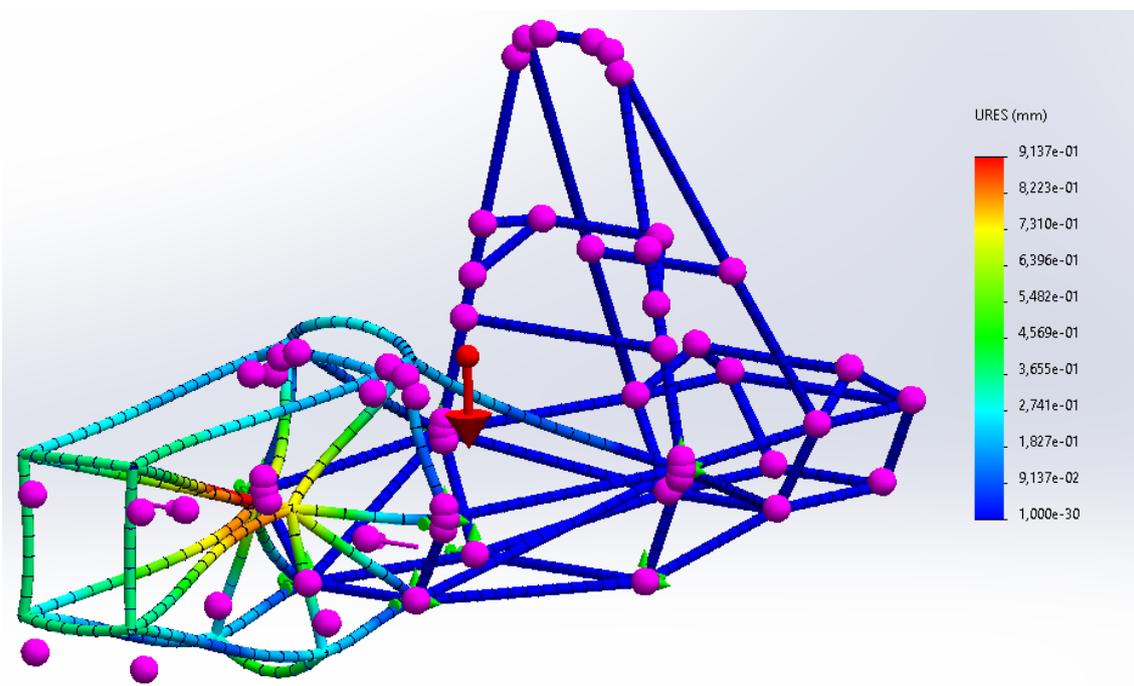


Ilustración 7.10: Deformaciones en la simulación de impacto lateral. Fuente propia.

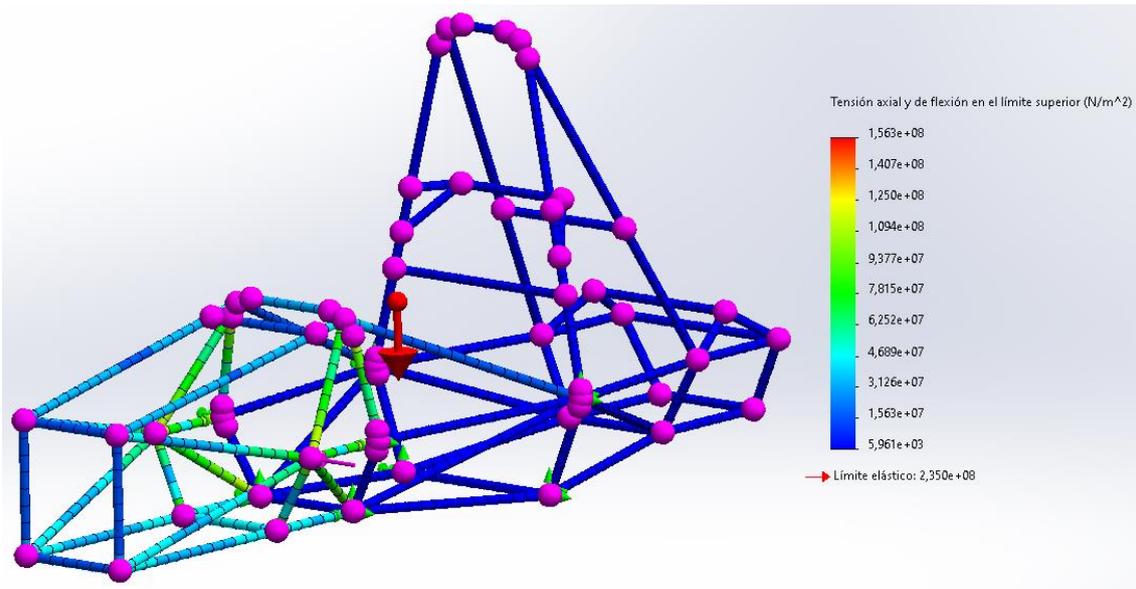


Ilustración 7.11: Tensiones en la simulación de impacto lateral. Fuente propia.

El factor de seguridad observado es superior a 3 en casi toda la estructura, con un valor mínimo de 1,504 en los nodos laterales de la estructura absorción de impactos.

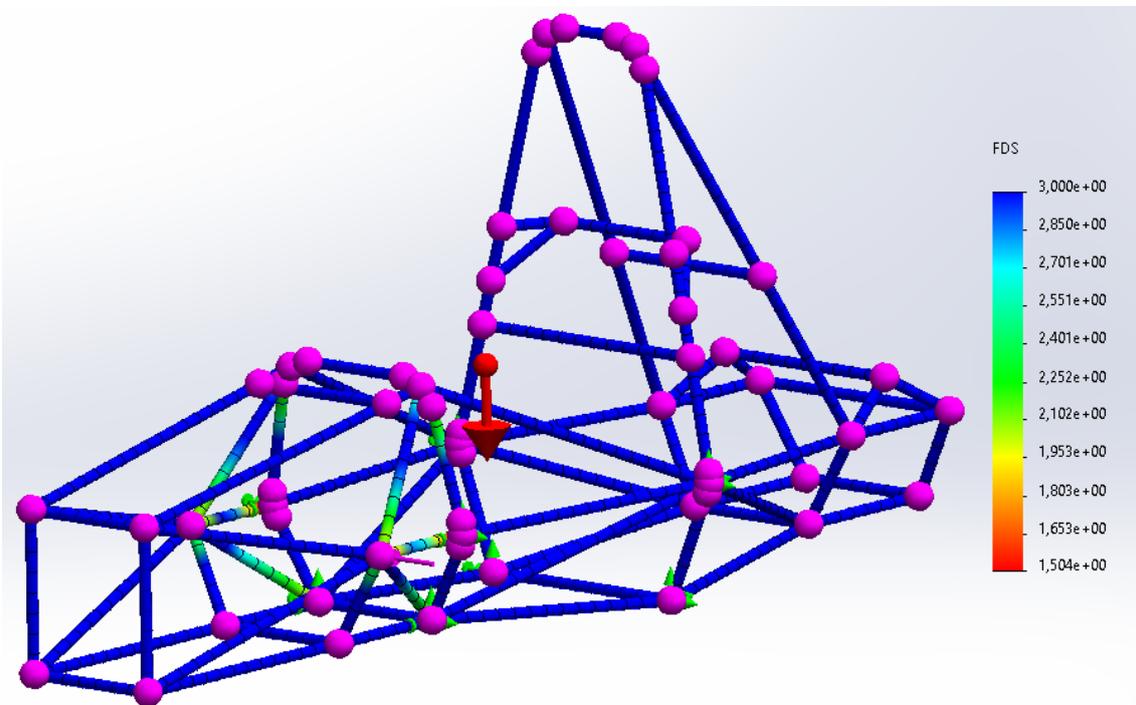


Ilustración 7.12: Factor de seguridad en la simulación de impacto lateral. Fuente propia.

Análisis de impacto por vuelco en SolidWorks:

Se ha realizado una simulación del impacto recibido en caso de vuelco del monoplaza, aplicando una fuerza total de 8000 Newtons sobre la jaula antivuelco, que incluye tanto el peso del coche como la fuerza generada por el impacto.

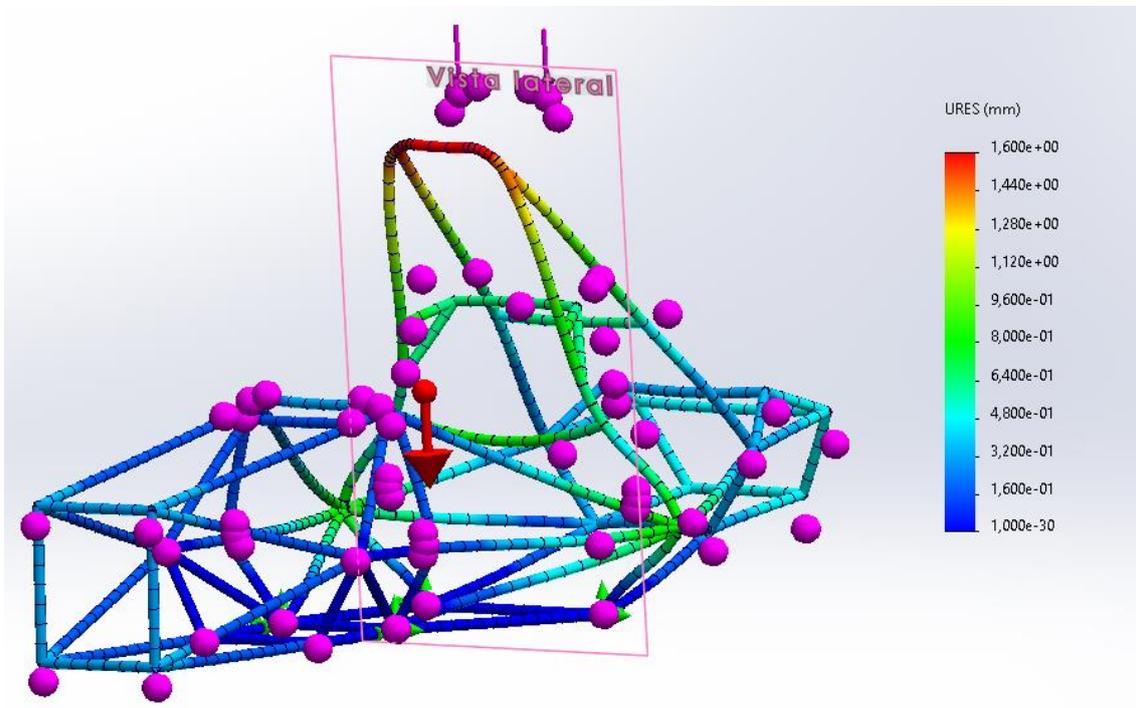


Ilustración 7.13: Deformaciones en la simulación de vuelco. Fuente propia.

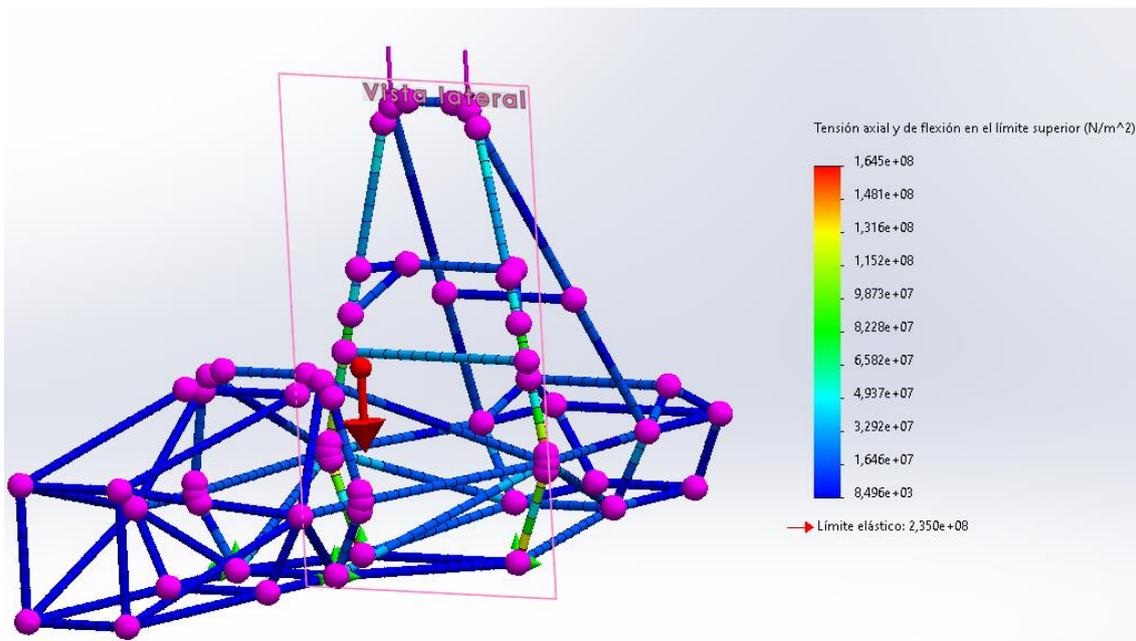


Ilustración 7.14: Tensiones en la simulación de vuelco. Fuente propia.

Los resultados muestran que el factor de seguridad es superior a 3 en casi toda la estructura, con un valor mínimo de 1,428 en los nodos inferiores de la jaula antivuelco. Estos nodos están diseñados para soportar y distribuir la fuerza del impacto, asegurando la integridad del chasis y la seguridad del piloto en caso de vuelco.

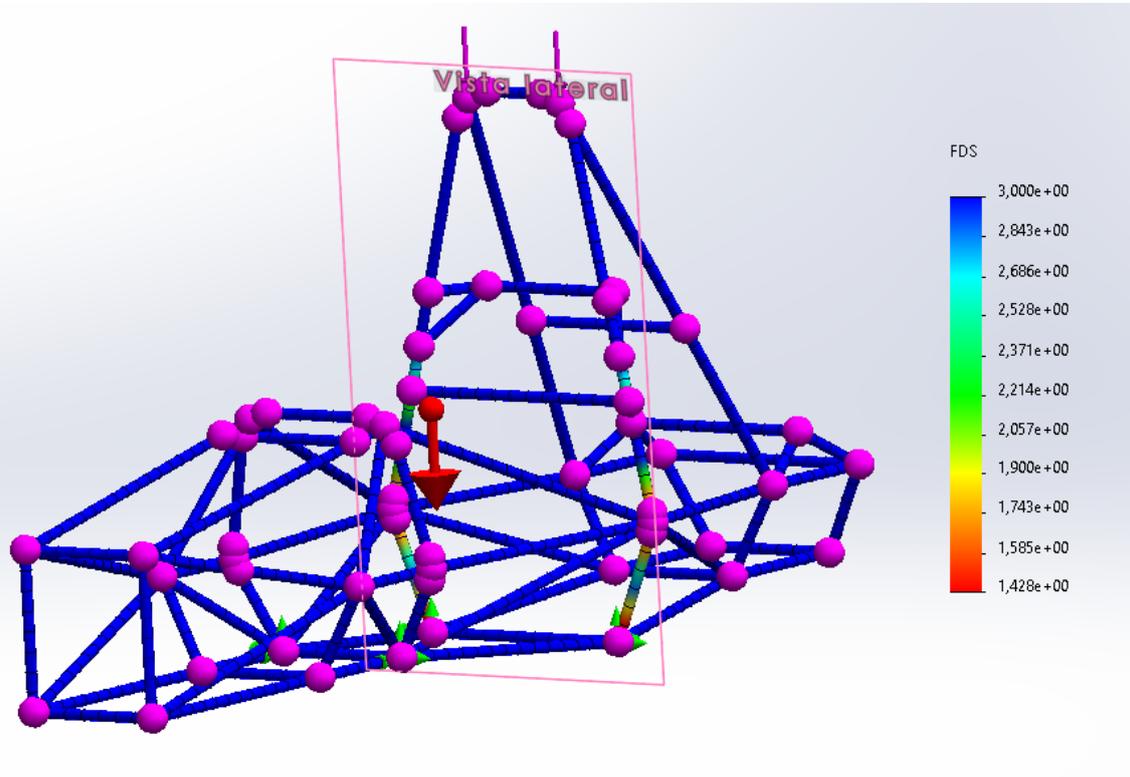


Ilustración 7.15: Factor de seguridad en la simulación de vuelco. Fuente propia.

Se observa que los resultados de las simulaciones cumplen tanto con los valores establecidos en este TFG como con los valores establecidos por la normativa de Fórmula SAE. Por lo tanto, se puede concluir que el chasis diseñado es válido para la competición.

7.2. SES

El Structural Equivalency Spreadsheet (SES) es una herramienta utilizada en competiciones de ingeniería como Formula SAE para evaluar y comparar la seguridad y el rendimiento de diferentes diseños de chasis. Este tipo de hoja de cálculo permite a los equipos demostrar que sus diseños cumplen con los requisitos de seguridad establecidos por la competición, incluso si difieren en su construcción o materiales utilizados.

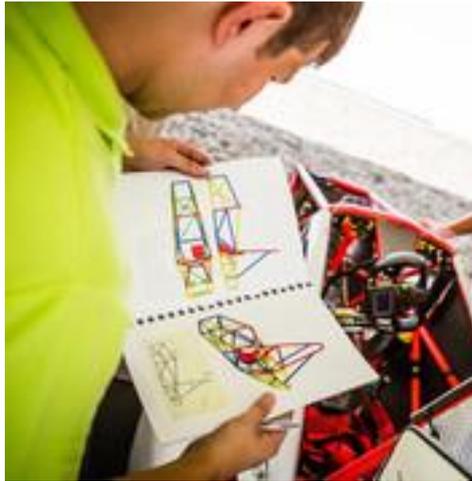


Ilustración 7.16: Imagen sobre el SES en competición. Fuente: [25]

La SES, que será incluido en los Anexos de este trabajo, generalmente incluye información detallada sobre la geometría del chasis, los materiales utilizados, los puntos de sujeción y otros aspectos relevantes para la integridad estructural del vehículo. Los equipos deben completar la SES proporcionando datos precisos y verificables sobre su diseño de chasis, lo que permite a los organizadores de la competición evaluar su equivalencia estructural con respecto a un diseño de referencia o estándar.

Con relación al chasis desarrollado en este Trabajo de Fin de Grado, se ha llevado a cabo exitosamente la realización y aprobación del Structural Equivalency Spreadsheet (SES) por parte de la competición. Este proceso ha confirmado que el diseño del chasis cumple con los estándares de seguridad y rendimiento requeridos para participar en la competición Formula SAE.

2024 FS STRUCTURAL EQUIVALENCY SPREADSHEET (SES) V1.1 - COVER SHEET

This form must be completed and submitted by all teams no later than the date specified in the Action Deadlines on specific event website. The Technical Committee will review all submissions which deviate from the FS rules and reply with a decision about the requested deviation. All requests will have a confirmation of receipt sent to the team. Structural Equivalency Spreadsheets (SES) must be submitted electronically in Microsoft Excel Format (*.xls). The submissions must be named as follows: schoolname_ses.xls using the complete school name. Please submit as described in the Action Deadlines for each event.

In the event that the FS Technical Committee requests additional information or calculations, teams have seven days from the date of request to submit the requested information.

University Name: Tecnocampus Mataró Marese | Car No.(s) & Event(s): 73 & FSS/FSPT
 Team Contact: Ruben Fernandez | Email Address: rfernandez@tecnocampus.cat
 Faculty Advisor: Josep Lopez Zarbau | Email Address: jlopez@tecnocampus.cat
 Powertrain Type: Electric Vehicle

IS proof of equivalency for your design required for any of the rules?
 No. Chassis does not deviate from baseline requirements

Baseline Material Used	Alternative Material Used	Rule No.	Rule Description	Design Description and/or Material Name	Tube and Laminate Equivalency										Tube 1			Tube 2			Tube 3			Composite													
					ET / Safety Factor	Alloy	Yield	UTS	Yield BS	Welded	UTS BS	Max. bending load at 1175	Max. deflection at 1175	Energy absorbed during bending	Tube Material	Tube Type	Outer Dimension	Inner Dimension	Wall Thickness	Tube Material	Tube Type	Outer Dimension	Inner Dimension	Wall Thickness	Tube Material	Tube Type	Outer Dimension	Inner Dimension	Wall Thickness	Material	Shell Thickness	Inner Shell Thickness	Core Thickness	Panel Height	General Notes		
YES	NO	T3.8	Main Roll Hoop Tubing	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.77																	
YES	NO	T3.9	Front Roll Hoop Tubing	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.77																	
YES	NO	T3.10	Main Roll Hoop Bracing Tubing	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.05																	
YES	NO	T3.10.5	Main Hoop Bracing Support - Tube Frames	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.05																	
YES	NO	T3.11	Front Hoop Bracing - Tube Frames	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.05																	
YES	NO	T3.13	Front Bulkhead - Tube Frames	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.05																	
YES	NO	T3.14	Front Bulkhead Support - Tube Frames	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.05																	
YES	NO	T3.15	Side Impact Structure - Tube Frames	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.05																	
YES	NO	T4.5	Shoulder Harness Bar	Material: E235	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.70																	
YES	NO	T3.17.3	Impact Attenuator anti-intrusion Plate	Material: Steel	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	Steel	Round	25.4	2.70																	
N/A	N/A	T3.11/T3.5	Front Hoop Bracing - Monocoques	N/A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA																					
N/A	N/A	T3.13/T3.5	Front Bulkhead - Monocoques	N/A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA																					
N/A	N/A	T3.14/T3.5	Front Bulkhead Support - Monocoques	N/A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA																					
N/A	N/A	T3.15/T3.5	Side Impact Structure - Monocoques - Side	N/A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA																					
N/A	N/A	T3.15/T3.5	Side Impact Structure - Monocoques - Floor	N/A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA																					
N/A	N/A	T3.10.5/T3.5	Main Hoop Bracing Support - Monocoques	N/A	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA																					

Ilustración 7.17: Primera página del SES presentado por TCMS. Fuente propia.

Ahora, se aguarda con expectativas positivas que el chasis también supere la revisión técnica en las competiciones programadas a lo largo del verano de 2024. Esta revisión técnica, que será llevada a cabo por los organizadores de la competición, garantizará que el chasis cumpla con todos los requisitos técnicos y reglamentarios antes de participar en las carreras.

7.3. Pruebas físicas.

Para validar la funcionalidad y el correcto diseño y fabricación del chasis, se han llevado a cabo diversas pruebas físicas. Estas pruebas se han estructurado en dos etapas principales:

En primer lugar, se realizaron pruebas de verificación de geometría para asegurar que el chasis cumpla con las especificaciones de diseño original y las regulaciones de la competición. Estas pruebas incluyeron el ensamblaje del conjunto de dirección y suspensión delantera, así como la pedalera, para verificar su adecuado funcionamiento y su ajuste dentro de los límites de diseño establecidos.



Ilustración 7.18: Pruebas de trapecios de suspensión sobre el chasis. Fuente propia.

En segundo lugar, se realizaron pruebas de seguridad para evaluar la integridad y la eficacia de los sistemas de seguridad del chasis. Esto incluyó pruebas de impacto para verificar la resistencia del impact attenuator, las estructuras de impacto, los cinturones de seguridad y el firewall. Específicamente, se destacan las pruebas de impacto frontal realizadas en el Impact Attenuator Data (IAD), cuyos resultados se adjuntarán en los anexos del trabajo.

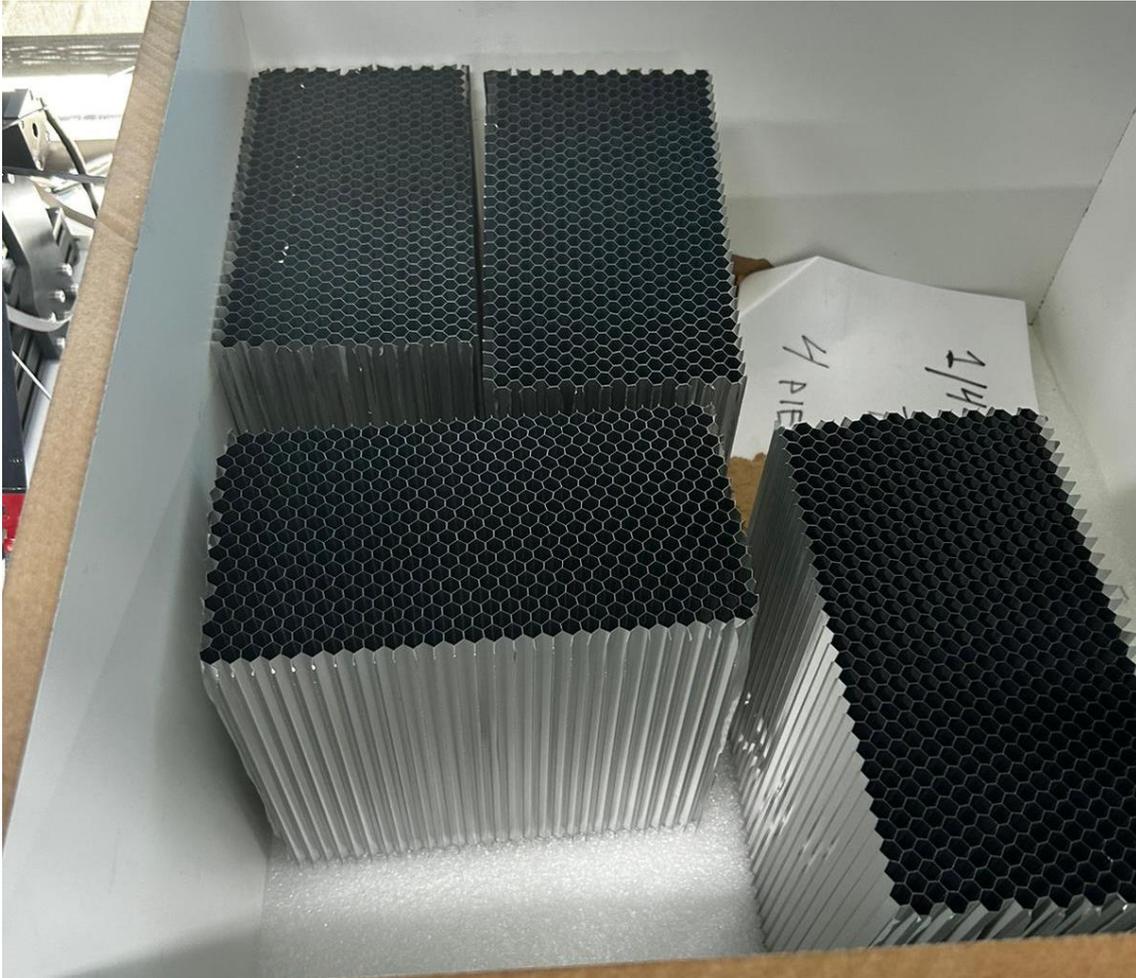


Ilustración 7.19: Impact Attenuators de propiedad del equipo. Fuente propia.

8. Análisis técnico, medioambiental y económico.

Ahora, se analizarán las diferentes caras de este proyecto; técnica, medioambiental y económica. Para ello, se verán los recursos necesarios como el software que se utilizara para diseñar el chasis, los presupuestos del equipo y los métodos de fabricación del chasis, o los deshechos que se generarán al fabricarlo.

8.1. Análisis técnico.

En este apartado se analizará la técnica de este proyecto. Para ello, lo dividiremos en tres secciones; diseño, fabricación y tratamiento.

•**Diseño:** Para poder diseñar el chasis tubular, se requerirá y utilizará SolidWorks como principal herramienta CAD y CAE, aunque, de todas maneras, se utilizaran otros softwares de soporte como HyperWorks, de la empresa Altair, o Ansys.

Estas licencias se consiguen gracias a la colaboración del equipo TCM MotorSports con las dos empresas que las suministran; Cimworks y Altair.



Ilustración 8.1: Patrocinios de Altair y Cimworks. Fuente Propia.

•**Fabricación:** Para poder llevar a cabo la fabricación del chasis, se cuenta con la colaboración de un patrocinador Diamante, lo que significa que su aportación tiene un valor igual o superior a los 10.000 euros.

Este patrocinador es CIFA, una empresa que se dedica al diseño, suministro y construcción in situ de instalaciones farmacéuticas, destacando en la especialización de Clean Utilities y también abordando Black Utilities y otros sistemas de procesamiento. Con un equipo interno de ingenieros, la empresa ofrece soluciones integrales llave en mano, ya sea para proyectos que implican nuevas instalaciones o para iniciativas de expansión y renovación.

CIFA opera bajo rigurosos estándares de calidad, implementa buenas prácticas de documentación y cuenta con personal altamente cualificado para llevar a cabo los servicios de construcción in situ. [22]



Ilustración 8.2: Instalaciones de CIFA. Fuente: [22].

CIFA se encargará de proporcionarnos las instalaciones necesarias, ya que para soldar el chasis se requiere de soldadura TIG, y no tan sólo eso, sino que el equipo será asesorado y formado por sus profesionales en la soldadura.

•**Tratamiento:** El chasis este fabricado de acero E235, por lo que este acero, al no ser inoxidable, requiere de algún tipo de tratamiento para evitar su deterioro. De esto se encargará el patrocinador Elhco, o Electroless Hard Coar S.A.

Elhco se especializa en tratamientos técnicos de superficie y recubrimientos metálicos, ofreciendo una amplia gama de servicios que incluyen níquel químico, níquel químico-teflón, zinc-níquel, níquel electrolítico, dorados, plateados y estañados. La empresa se destaca por sus tratamientos de preparación de piezas y pintura industrial. Sus servicios abarcan desde el tratamiento de piezas metálicas como parte de la preparación previa, hasta su intervención en el post-proceso de recubrimiento.



Ilustración 8.3: Instalaciones de Elhco. Fuente: [23]

8.2. Análisis económico.

Como tal, la parte del chasis dentro del proyecto de Formula Student es “coste cero”, ya que el equipo no tiene que pagar las piezas para este, sino que todo se obtiene por valor de patrocinio.

Los patrocinadores esenciales para la fabricación del chasis han sido Transmesa, que nos ha proporcionado los tubos de acero con valor de Patrocinio Plata (1.000 – 4.999 euros), CIFA Pure Engineering, que realiza la soldadura del chasis por valor de Patrocinio Diamante (más de 10.000 euros) y por último Elhco, que realiza el tratamiento térmico del chasis por valor de Patrocinio Oro (de 5000 a 9.999 euros).

PRINCIPAL*	Aportación de más de 20.000€.
DIAMANTE	Aportación de más de 10.000€.
ORO	Aportación desde 5.000€ hasta 9.999€.
SOFTWARE	Licencias de software para el diseño o testeo del monoplaza.
PLATA	Aportación desde 1.000€ hasta 4.999€.
BRONCE	Aportación de 500€ hasta 999€.
FORMATIVO	Formación para los miembros del equipo en aspectos referentes al diseño, construcción o cualquier otro aspecto relacionado con el proyecto.

Ilustración 8.4: Tipos de patrocinadores de TCMS. Fuente: Propia/TCM MotorSports.

De todas maneras, el equipo sí que se hace cargo de algunas de las compras que no se pueden obtener mediante patrocinio. Estas compras se realizan gracias a los patrocinadores económicos.

Pressupost

ITEM	PREU	DESCOMPTE	PREU FINAL
Tubs Xassís	700€	100%	0€
Doblegat dels tubs	700€	100%	0€
Equipació del taller	12.000€	100%	0€
Impressora 3D	10.600€	100%	0€
Soldadures industrials	12.000€	100%	0€
ECU	2.938€	20%	1.898€
Components electrònics	1.000€	100%	0€
Fibra de vidre	150€	0%	150€
Blumeprot	10.000€	100%	0€
Material Impressora	3.000€	100%	0€
Motor	4.500€	?	4.500€
Bateries	5.000€	?	5.000€
Inversor	2.000€	?	2.000€
Direcció	2.000€	?	2.000€
Llantes	700€	?	700€
Neumàtics	5.000€	?	5.000€
Transmissió	6.000€	?	6.000€
Inscripcions a competició	2.500€/competició	0%	7.500€
Altres*	8.000€	?	8.000€
Logística	6.000€	?	6.000€
Gestoria	4.000€	45%	2.040€
Màrqueting	1.000€	0%	1.000€
Imprevistos		10%	10.000€
TOTAL COTXE	111.788€		59.768€
TOTAL ACONSEGUIT:	54.088€		
TOTAL RESTANT:	57.700€**		
TOTAL EN LLICENCIES:	332.325€		
TOTAL EN PATROCINIS:	386.413€		

* Altres: Fibra de carboni, frens, fibra de vidre, suspensió, impact, volant, seient, sistemes de seguretat, cables, ESO...

**Preu subjecte a canvis per: Descomptes de patrocini, pujada de preus o items no contemplats.

Ilustración 8.5: Presupuestos de TCMS para 2024. Fuente: Propia/TCM MotorSports.

8.3. Análisis medioambiental.

En cuanto al análisis medioambiental respecta, no tiene gran influencia en este proyecto, ya que solo se fabrica una única pieza de cada para el monoplaça. De todas maneras, el material excedente se guarda y reutiliza para futuras reparaciones o próximas modificaciones en el chasis.

A demás, una de las características principales de la Formula SAE es que incita a los equipos competidores a hacer monoplaças cada vez más sostenibles, por eso, desde este 2024 en FS Germany, queda cerrada la categoría de combustión, y se añade la categoría de combustibles alternativos (hidrogeno, biocombustible, ...).

Por último, en el anexo “Tablas de viabilidad medioambiental” quedan definidas algunas características más de este apartado.

8.4. Perspectiva de género.

En este apartado se identifican las diferentes desigualdades que se pueden generar en el proyecto con el género como causante.

El chasis tubular está diseñado sobre la plantilla de piloto de la normativa (previamente mencionada), y se ha tratado al piloto como un objeto más dentro del monoplaça. Este está diseñado para una persona de entre 1,60 cm y 1,80 cm de altura, con un peso de entre 60 y 75 kg, independientemente de su género. Por lo tanto, al ser unas condiciones físicas alcanzables para un gran número de personas, tanto hombres como mujeres, y ser tratados como personas o incluso como “objetos” dentro del monoplaça, este proyecto no discrimina por género.

No se ha tenido en cuenta el género del piloto porque el chasis es una parte del monoplaça de competición, que tiene como objetivo principal ser competitivo, y va a ser utilizado por un grupo muy reducido de personas a las que se acredite como pilotos. Por eso, solo se tienen en cuenta las condiciones físicas de dichas personas, y la ergonomía de la cabina solo busca ser adaptable a las condiciones físicas que se requieren para que el monoplaça sea eficiente.

En este caso, las cualidades del piloto quedan restringidas a la mencionadas anteriormente para mantener un buen balance de pesos dentro del monoplaça.

9. Planificación del trabajo.

Para planificar este TFG, se utilizarán los mismos métodos de planificación y fechas que en el equipo TCM MotorSports, ya que al estar implantados en el equipo principalmente por mí, se ha podido conllevar las fechas de entrega de la Formula SAE con las fechas de entrega del TFG.

Se utilizarán principalmente dos métodos; el primero de ellos es un roadmap definido en un documento Project. El segundo de ellos el sistema de seguimiento PDCA, que se explicara a lo largo de este apartado.

•**Roadmap en Project:** El roadmap en Project está destinado a una organización general del equipo, por lo que se indican solamente tareas de alta importancia, con duraciones muy largas o con dependencia para otros grupos de trabajo dentro del equipo.

Como se puede ver en la imagen a continuación, en el roadmap están indicadas solamente las tareas de fabricación en lo que al chasis refiere, ya que el resto de las tareas, al tener una duración menor a 20 días, se indican en el sistema PDCA.

Id	Modo de tarea	Nombre de tarea	Duración
1		Dep. Org y Finanzas	356,75 días?
2		Business Plan	204,75 días?
3		Cost and Manufacturing	356,75 días?
4		Dep. Mecanica	220 días
5		Gurpo Chasis	120 días
6		Cockpit	60 días
7		Distribucion cockpit	20 días
8		Diseño asiento	1 ms
9		Aislamiento cockpit	1 ms
10		Pedallera y volante	1 ms
11		Refrigeracion	120 días
12		Diseño sistema de refrigeracion motor	1 ms
13		Pruebas sistema de refrigeracion motor	3 mss
14		Implementacion de refrigeracion a motor	1 ms
15		Sistema de refrigeracion de baterias	2 mss
16		Caja de baterias	2 mss
17		Pruebas con sistema de refrigeracion de baterias	2 mss
18		Impact attenuator	120 días
19		Diseño impact attenuator	4 mss
20		Pruebas impact attenuator	2 mss
21		Chasis tubular	100 días
22		Corte tubos	40 días
23		Ensamblaje chasis	3 mss
24		Grupo Aerodinamica	160 días
25		Diseño	100 días
26		Estudio de materiales	1 ms
27		Diseño de aleron delantero	3 mss
28		Diseño de aleron trasero	3 mss
29		Diseño de fondo plano	3 mss
30		Diseño de puntos de anclaje a chasis	1 ms
31		Fabricacion	80 días
32		Fabricacion aleron delantero	3 mss
33		Fabricacion aleron trasero	3 mss
34		Fabricacion fondo plano	3 mss

Ilustración 9.1: RoadMap de TCMS. Fuente propia.

•**Sistema PDCA:** Para explicar este sistema, primero se debe conocer el significado de sus siglas;

P: Planificar (plan): En este punto, se planificará la tarea, y se le asignan a esta una descripción detallada de la tarea, un departamento en el equipo (en este caso se asigna al encargado de dicho departamento), una fecha de entrega, y por último la o las personas responsables de realizar dicha tarea.

D: Hacer (do): Este punto significa que la tarea planificada está hecha, pero todavía no ha sido revisada por el encargado del departamento responsable.

C: Verificada (check): Este apartado significa que la tarea ya ha sido verificada y aprobada por el encargado del departamento responsable.

A: Actuar (act): Este apartado se utiliza cuando la tarea está mal hecha, y al ser revisada por el encargado se encuentran fallos en ella, por lo que se debe de actuar para corregirla.

P	Planificada	Tarea empezada o en curso.
D	Hecha	Tarea finalizada (sin revision del manager).
C	Verificada	Tarea verificada y aprobada por el manager.
A	Actuar (rehacer)	Tarea mal hecha y se tiene que replanificar.

Tabla 9.1: Descripción del sistema PDCA. Fuente propia.

Conociendo estos términos, a continuación, se explicará cómo utilizar el sistema de manera adecuada:

El encargado del departamento responsable, o en este caso, la persona que realiza el TFG, planifica una tarea, por ejemplo, “Diseñar la sección frontal del chasis”. En este punto, se marca la casilla “P” en la tabla donde se representa el PDCA, lo que significa que esta tarea ya tiene una descripción (ej: diseñar el módulo frontal del chasis tubular, desde el main hoop hasta el front bulckhead), tiene una persona a cargo, y tiene una fecha de entrega.

Una vez se acaba la tarea, se marca la casilla “D”, indicando así que la persona responsable de la tarea la ha finalizado, pero está todavía pendiente de ser revisada o verificada (ej: se ha diseñado la sección frontal del chasis, pero todavía no se ha simulado y por lo tanto no se sabe si la pieza es válida).

A partir de aquí hay dos caminos posibles;

La casilla “C”, que se marcara solamente si la pieza ha pasado las verificaciones correspondientes y es validada, por lo tanto, la tarea se da por finalizada.

O la casilla “A”, que se marca en caso de que la tarea no se haya acabado a tiempo, o en caso de que al verificarla está presente errores que indiquen que la tarea se ha realizado mal, en cuyo caso, se hace una anotación del error que ha habido para que no se vuelva a cometer y quede un registro, y la tarea se replanifica en una casilla diferente en la tabla, es decir, que vuelve a la fase “P”.

En la siguiente tabla, se muestra el sistema PDCA que ha seguido el departamento de chasis, y, por lo tanto, que se han seguido también para el desarrollo de este TFG a lo largo de este trimestre.

Chasis			P	D	C	A
Persona	Encargado	Tarea				
Ruben Fernandez	Ruben Fernandez	Planos de corte chasis frontal	X	X	X	
Ruben Fernandez	Ruben Fernandez	Planos de corte chasis trasero	X	X	X	
Ruben Fernandez	Ruben Fernandez	Rellenar el SES (cuando este disponible, seguramente en Setiembre)	X			
Robert Fernandez						
Santiago Steegman						
Santiago Steegman	Ruben Fernandez	Diseño de impact attenuator	X	X	X	
Robert Fernandez						
Santiago Steegman	Ruben Fernandez	Fabricacion Impact attenuator	X			
Robert Fernandez						
Sergi Masvidal	Ruben Fernandez	Diseño de asiento y moldes de madera	X			X
Sergi Cristobal						
Sergi Masvidal	Ruben Fernandez	Fabricacion asiento y moldes de madera	X			X
Sergi Cristobal						
Santiago Steegman	Ruben Fernandez	Buscar patrocinador para Impact Attenuator.	X	X	X	
Robert Fernandez						
Ruben Fernandez	Ruben Fernandez	Diseño y fabricacion de suelo y paredes aislantes.	X			
Sergi Masvidal	Ruben Fernandez	Colocacion de pedalera, volante, etc...	X	X		
Sergi Cristobal						
Robert Fernandez	Ruben Fernandez	Ensamblaje de placas anti intrusion, suelo, anclajes u otras soldaduras a parte de la soldadura del chasis.	X			
Dibane Balde						
Ruben Fernandez	Ruben Fernandez	Fabricacion de version final del volante.	X	X	X	
Sergi Cristobal						

Tabla 9.2: Sistema PDCA de TCMS para el año 2023-2024, departamento de chasis.

Fuente propia.

A demás de estos dos métodos, se emplearán dos documentos de seguimiento (que están implementados también en el equipo TCMS);

El primero, al que se llama Documento de Seguimiento, sirve para marcar las fechas de las sesiones de trabajo, y hacer un seguimiento de estas. Este documento está pensado para que futuros miembros del equipo tengan un registro de los problemas que han tenido en el diseño los miembros anteriores, y de esta manera, no se cometan los mismos errores.

(Copiar plantilla de página para cada sesión de trabajo realizada, es decir, siempre en el mismo documento)

Nombre o nombres de los participantes:
 Día: DD.MM.AAAA
 Trabajo realizado:

Errores cometidos o problemas durante la sesión:

1. Error o problema número 1.

Solución a los errores:

1. Solución al problema número 1.

Ilustración 9.2: Documento de seguimiento de TCMS. Fuente propia.

El segundo, al que se llama Documento de documentación técnica, se utiliza para documentar todos los aspectos de la pieza que se esté diseñando, debido a que, para competir, es requerido un informe de ingeniería de la pieza realizada, así como un BOM, CBOM Y DBOM.

TODOS los documentos tienen que contener los siguientes puntos, debido a que, sin cualquiera de estos puntos, el coche no puede pasar la inspección técnica ni el Cost and Manufacturing event.

1. **Introducción.**
Que pieza o conjunto se va a trabajar, breve explicación de la pieza.
2. **Diseño.**
 - 2.1. **Iteraciones de diseño fallidas.**
Explicación muy breve de fallos y modificaciones hechas en cada iteración.
 - 2.2. **Diseño definitivo**
Planos o imágenes del CAD del diseño definitivo y explicación breve de como se ha llegado hasta él. Justificación de porque el diseño es como es.
 - 2.3. **Cálculos realizados.**
 - 2.4. **Simulaciones.**
Simulaciones necesarias para validar que la pieza no se rompa o cumpla la normativa. Añadir un texto o justificación de porque las simulaciones sí son válidas.
 - 2.5. **Selección de materiales.**
Explicación y justificación de los materiales seleccionados.
 - 2.6. **Validación del CAD respecto a la normativa.**

Ejemplo:

Norma	Caso	Validación.
EV. 2.11.4	Distancia mínima al suelo 3cm.	Cumple.
...	...	No cumple.
...	...	No cumple.

3. Prototipado de la pieza (esto no hace falta documentarlo, pero sí hacerlo)

4. Validación final de ensamble respecto a la normativa sobre el prototipo.

Ejemplo:

Norma	Caso	Validación.
EV. 2.11.4	Distancia mínima al suelo 3cm.	Cumple.
...	...	No cumple.
...	...	No cumple.

5. CBOM Y DBOM.

Tabla con pieza o conjunto y sus piezas correspondientes, donde se incluya breve descripción de la pieza y su coste. (EN CASO DE QUE LA PIEZA SEA PATROCINADA ESPECIFICARLO)
 Aquí se tienen que incluir TODAS las piezas.

Pieza	Coste	Descripción.
Conjunto suspensión.		
Trapezio delantero superior	20 €	Trapezio superior de soporte para rueda y suspensión en la rueda delantera.
Amortiguador.	600 €	Amortiguador del conjunto de suspensión.
Muelle.		Muelle del amortiguador.
Tornillo M10 x4 unidades	5€/unidad	Tornillos métrica 10 que soportan los brazos de suspensión (4 unidades)

Ilustración 9.3: Documento de documentación técnica de TCMS. Fuente propia.

9.1. Análisis de riesgos y plan de contingencia.

En relación con los riesgos asociados a este proyecto, se identifica una extensa lista de posibles contratiempos. Estos pueden ser algunos de ellos; Errores en el diseño, pérdida de un patrocinador, la falta de presupuesto, incumplimientos de fechas, o la no aprobación por parte del SES o la inspección técnica realizada por la competición.

Sin embargo, el ámbito del MotorSports presenta características distintivas respecto a otros sectores industriales, donde incluso los equipos más destacados asumen riesgos significativos.

El diseño de monoplazas en plazos tan ajustados, con tres meses dedicados al diseño, tres a la fabricación y tres a las pruebas en circuito, conlleva inherentemente la búsqueda constante de mejoras respecto a los equipos competidores. En este contexto, los riesgos mencionados son parte integral de la realidad diaria de las escuderías de FSAE. La superación de estos riesgos se suele alcanzar mediante la confianza y el compromiso del equipo para cumplir con los plazos establecidos, así como la disposición a dedicar las horas necesarias para solucionar cualquier error que surja.

Es importante destacar que cualquier fallo relacionado con estas características puede tener graves consecuencias, desde la falta de competitividad del vehículo hasta la imposibilidad de participar en la competición. Este escenario es común al tratar de superar a los competidores en plazos de tiempo extremadamente ajustados. No obstante, como reza el dicho popular, "quien no arriesga, no gana", y en esta competición, todos los equipos buscan alcanzar la victoria, lo que implica asumir y superar los riesgos inherentes al proceso de diseño, fabricación y competición, cosa que también lleva a muchos equipos a no poder competir algunas temporadas por fallos de diseño en sus monoplazas.

Por último, en el Anexo “Planificación en Project” se incluirá un documento en Project con la planificación de desarrollo del chasis para este TFG, de todas maneras, en este no se incluirá un “Plan de contingencia”, ya que el plan de contingencia consiste en, si al inicio del mes de abril no está acabado el nuevo chasis, utilizar el modelo de chasis anterior. Esto es debido a que se tiene que fabricar y diseñar un monoplaza completo en apenas 9 meses, y prácticamente no hay tiempo de margen para replanificar tareas a gran escala, como por ejemplo el diseño del chasis, por lo tanto, si esta no se cumple en los plazos asignados, se utilizara el modelo anterior para asegurar que el monoplaza pueda competir.

En nuestro caso, siendo el primer monoplaza, y con el escaso presupuesto del equipo para este año, el único plan de contingencia posible es alargar un año más la etapa de fabricación, y correr también un año después.

10. Futuros pasos.

Dando por finalizado este TFG, es inevitable considerar cómo contribuirá al desarrollo continuo del equipo TCM MotorSports en los años venideros. Gracias a este trabajo, ahora se cuenta con uno de los chasis tubulares más ligeros de la Formula SAE. Sin embargo, no se puede concluir sin proponer un nuevo tipo de chasis: el chasis monocasco.



Ilustración 10.1: Propuesta de chasis monocasco conceptual para futuros años. Fuente propia.

Con este nuevo diseño, se lograría reducir el peso del chasis a unos 20 kg y sería factible integrar un paquete aerodinámico complejo directamente en la estructura del chasis. Por tanto, como parte de la finalización de este TFG, se propone al equipo la idea de desarrollar un chasis monocasco conceptual para el monoplaza "VCAT-25 EVO", que representa el diseño conceptual del monoplaza para los años futuros.



Ilustración 10.2: Propuesta de monoplaza completo "VCAT-25 EVO". Fuente Propia.

11. Conclusión.

Después de realizar extensos análisis de antecedentes y estudiar la historia de la Formula Student, se decidió fabricar un chasis tubular para el equipo TCM MotorSports. Esta opción fue elegida debido a los costes y presupuestos reducidos del equipo en comparación con un chasis monocasco, que resultaría considerablemente más caro. El objetivo era desarrollar una solución eficaz y económica que permitiera al equipo competir en la Formula SAE.

A lo largo del proyecto, se realizaron 11 iteraciones de diseño del chasis, lo que permitió optimizar y refinar el modelo para obtener uno de los chasis tubulares más ligeros de toda la Formula SAE. Cada iteración incorporó mejoras basadas en análisis y pruebas, culminando en un diseño final que no solo cumplió, sino que superó las inspecciones técnicas establecidas por la competición, como el SES (Structural Equivalency Spreadsheet). El ensamblaje del chasis se realizó con éxito, confirmando la precisión y viabilidad del diseño.

Se llevó a cabo un análisis económico hipotético para evaluar la viabilidad del proyecto. Este análisis demostró que, en el contexto actual, el proyecto es viable gracias al apoyo de los patrocinadores y a la estructura de costes asumida por el equipo. No obstante, también se concluyó que el proyecto no podría ser comercializado, ya que la fabricación y venta de chasis de este tipo no sería rentable en un mercado donde los equipos prefieren diseñar y construir sus propios chasis.

Para el desarrollo del chasis, se emplearon varios programas de software de diseño asistido por computadora (CAD) y análisis de elementos finitos (CAE), como SolidWorks y ANSYS. Estas herramientas permitieron realizar simulaciones detalladas y análisis de rendimiento, asegurando que el chasis no solo fuera funcional, sino también eficiente y seguro. Las simulaciones incluyeron pruebas de impacto y análisis de estrés, confirmando que el diseño cumplía con los estándares de seguridad y rendimiento requeridos.

Gracias a este TFG, se ha adquirido una valiosa experiencia en la gestión de un proyecto de ingeniería dentro de un sector tan exigente y singular como el MotorSport. Los desafíos enfrentados, tanto en términos de diseño como de gestión, han sido numerosos y variados. Desde la conceptualización inicial hasta la iteración final del diseño, se han superado retos técnicos y logísticos que han permitido consolidar habilidades esenciales para futuros proyectos en este campo.



Ilustración 11.1: VoltCat 24 finalizado. Fuente propia.

12. Bibliografía.

- [1] TCM MotorSports “Temporada 2024 – ESP”, <https://tcmotorsports.es/>
- [2] Institution of Mechanical Engineers “History of Formula Student”, <https://www.imeche.org/events/formula-student/about-formula-student/history-of-formula-student>
- [3] Formula Student Spain “Evolution of Formula Student Spain”, <https://www.formulastudent.es/home/formula-student/>
- [4] Archivo: University of Texas at Arlington Mechanical Engineering students (not identified) win First Place trophy with race car and \$1,000, [https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:University_of_Texas_at_Arlington_Mechanical_Engineering_students_\(not_identified\)_win_First_Place_trophy_with_race_car_and_\\$1,000_\(10002858\).jpg](https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:University_of_Texas_at_Arlington_Mechanical_Engineering_students_(not_identified)_win_First_Place_trophy_with_race_car_and_$1,000_(10002858).jpg)
- [5] Wikipedia “Formula Student”, https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_Student
- [6] El Mundo “Así es la Formula 1 Universitaria”, <https://www.elmundo.es/motor/2017/06/29/5954de06e5fdea08048b457d.html>
- [7] Adrian Newey “How To Build A Car: The Autobiography of the World’s Greatest Formula 1 Designer”, 2 Noviembre 2017.
- [8] Ministerio de Industria y Turismo “¿Qué es una patente?”, <https://www.oepm.es/es/invenciones/como-proteger-las-invenciones/conceptos-basicos/que-es-una-patente/>
- [9] FSAE Germany “Formula Student Rules 2024, Version 1.1.”, https://www.formulastudent.de/fileadmin/user_upload/all/2024/rules/FS-Rules_2024_v1.1.pdf
- [10] David Plaza “Chasis independiente o de escalera: qué es y cuáles son sus ventajas”, <https://www.motor.es/que-es/chasis-independiente-escalera#:~:text=El%20chasis%20de%20escalera%2C%20tambi%C3%A9n,escalera%2C%20de%20ah%C3%AD%20su%20nombre.>

- [11] Milton Sael Cuellar Yañeza, Marcelo López Parrab, Osiris Ricardo Torresc “Análisis del proceso de diseño y fabricación del chasis tubular para Vehículo Fórmula SAE”
- [12] Wikipedia “Monocasco”, <https://es.wikipedia.org/wiki/Monocasco>
- [13] Javier Rubio “Cuando McLaren volvió locos a sus rivales con un sistema que costaba 50 dólares”, https://www.elconfidencial.com/deportes/formula-1/2017-11-03/mclaren-dennis-ferrari-hakkinen-formula-1_1471553/
- [14] Vicente Ricardo Álvarez Salazar “Diseño y construcción de un chasis tubular de un vehículo de competencia Formula SAE eléctrico”
- [15] Carlos Calvo Martín de Bernardo “DISEÑO Y ANÁLISIS DE UN CHASIS TUBULAR PARA UN PROTOTIPO DE FÓRMULA STUDENT”
- [16] Francisco Cagigas Quintana “DISEÑO CHASIS TUBULAR DE UN VEHICULO PARA LA FORMULA STUDENT EDICIÓN 2023”
- [17] Fernando Portero Ruiz “Diseño y cálculo del chasis monocasco de un monoplaça de competición tipo fórmula”
- [18] Archivo publico Simscale “FSAE Full Car Aerodynamics”, https://www.simscale.com/projects/pfernandez/fsae-workshop-s2-full_car_aerodynamics/
- [19] Edinburgh University Formula Student, <https://www.eufs.co/driverless>
- [20] Formula Student Spain, <https://www.formulastudent.es/>
- [21] Tubos Mecánicos “Carbon Steel E235”, <https://tubosmecanicos.es/en/carbon-steel/e235>
- [22] Cifa Pure Engineering Website, <https://cifa.es/>
- [23] Elhco Website, <https://elhco.com/>

- [24] SOLDADURA TIG., <https://www.lorch.eu/es/productos/soldadura-manual/soldadura-tig#:~:text=%C2%BFQu%C3%A9%20es%20la%20soldadura%20TIG,la%20industria%20aeron%C3%A1utica%20y%20aeroespacial>.
- [25] FSG WEBSITE, <https://www.formulastudent.de/>