

Resumen

El proyecto realizado tiene como principal objetivo la creación de un nuevo diseño de estructura mecánica para un prototipo kart eléctrico, de manera que sea capaz de contener y sustentar todos sus elementos.

Para el desarrollo de este objetivo se ha seguido la siguiente estructura:

- Se ha efectuado una primera búsqueda de información del estado actual del mundo del karting, tanto de karts convencionales de gasolina como karts eléctricos. Estudiar la implantación del kart eléctrico en España y Europa, ha sido de utilidad para comprobar la competencia existente, la tecnología que desarrollan y las prestaciones de los vehículos de hoy en día.
- Para completar la información, se ha realizado una visita al “Electric karting Salou” que ha sido de mucha ayuda para comprobar de primera mano el funcionamiento de estos vehículos, obtener datos experimentales de sus prestaciones en el circuito y observar los componentes eléctricos y mecánicos que usan.
- El siguiente paso ha sido fijar unos requisitos que debe cumplir el diseño mecánico para lograr un comportamiento adecuado durante la conducción.
- Llegados a este punto se ha empezado con el diseño del chasis o bastidor. El orden seguido es: decidir las medidas principales, elegir el material usado y crear una adaptación del chasis convencional.
- Debido al cambio de chasis y de sistema de propulsión se ha modificado otros sistemas del kart como la dirección, la transmisión, la carrocería y se ha creado sujeciones para los componentes eléctricos.
- Para corroborar que se ha logrado alcanzar los requisitos mencionados y para comprender mejor el funcionamiento mecánico del kart, se ha realizado una serie de análisis mecánicos y también estudios de algunos elementos.
- Finalmente, se ha hecho un estudio económico y un estudio ambiental del diseño del prototipo planteado y se ha elaborado las conclusiones a las que se ha llegado mediante el proyecto.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
1. OBJETO	5
2. ALCANCE	6
3. MOTIVACIÓN	8
4. ESTADO DEL ARTE	9
4.1. Descripción general Kart.....	9
4.2. Historia del Karting.....	10
4.3. Implantación y aplicaciones del Karting en España.....	11
4.3.1. Kart convencional.....	11
4.3.2. Kart eléctrico.....	11
4.4. Estudio de la competencia.....	12
4.5. Legislación vigente.....	13
5. ESPECIFICACIONES BÁSICAS	14
6. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DE KART ELÉCTRICO	15
6.1. DISEÑO DEL KART	15
6.1.1. El prototipo.....	15
6.1.2. Desglose por sistemas.....	17
6.2. ANÁLISIS MECÁNICO	24
6.2.1. Estudio del chasis.....	24
6.2.2. Sistema de dirección	38
6.2.3. Estudio de fatiga del eje trasero	41
6.2.4. Sistema de transmisión.....	50
6.2.5. Sistema de frenado	53
6.2.6. Llantas y neumáticos.....	60
6.2.7. Soportes.....	64
7. ESTUDIO ECONÓMICO	68
8. IMPACTO AMBIENTAL	69
9. PLANIFICACIÓN	71
CONCLUSIONES	73

AGRADECIMIENTOS	74
BIBLIOGRAFÍA	75
Referencias bibliográficas	75
Bibliografía complementaria.....	76

1. OBJETO

El objeto principal de este proyecto es el de la realización del diseño conceptual de un prototipo de kart eléctrico con fines recreativos.

Este diseño abarca dos grandes áreas en las cuales se ha dividido el proyecto debido a su complejidad y extensión. Una parte consiste en el diseño mecánico y la otra en el diseño del sistema eléctrico.

En este caso, el documento explicado a continuación se refiere al desarrollo de la parte mecánica, que concretamente se centrará en el diseño del chasis adaptado a partir del de gasolina, así como el diseño o adecuación de otros sistemas mecánicos: dirección, transmisión y frenado. A todo esto se incluye un estudio del funcionamiento de los elementos del kart y análisis mecánicos que corroboren los requisitos del diseño.

2. ALCANCE

Para situar dicho proyecto en un contexto real, se ha supuesto una situación ficticia como la que se expone a continuación.

El compañero de proyecto (Miquel Balsells) y el propio autor de éste poseen la consultoría CMV que se encarga de realizar proyectos de ingeniería para otras empresas. En concreto, una empresa del mundo del karting les hace la petición de incluir un kart eléctrico en su gama de modelos.

El presente proyecto consiste en:

- Análisis de la situación del mercado de los karts y estudio del potencial presente en este nuevo concepto de karts.
- Necesidad de un proceso de familiarización con las tecnologías presentes hoy en día en este tipo de vehículos.
- Diseño de un prototipo de kart eléctrico.
- Simulación numérica del prototipo final para verificar el cumplimiento de sus prestaciones físicas y dinámicas.

Entonces, el proyecto finaliza con el diseño del primer prototipo de kart eléctrico y no se abarcan temas como:

- Evaluación exacta de los costes de fabricación del modelo.
- Construcción de un prototipo.
- Realización de un plan de industrialización y comercialización.

Miquel Balsells será el encargado del diseño de la parte eléctrica, realizando la elección de componentes y creando una simulación de las prestaciones del kart en circuito.

Concretamente, la parte de proyecto realizada por el autor se centrará en el diseño mecánico y por lo tanto los puntos principales serán:

- Estudio del funcionamiento de todos los sistemas del kart y descomposición de los elementos que los forman.
- Creación del diseño de bastidor adecuado a los componentes eléctricos y que presente un buen comportamiento dinámico durante la conducción.

- Adaptación del sistema de dirección, de transmisión y de la carrocería.
- Creación de soportes en función de los elementos eléctricos seleccionados y de su ubicación en el bastidor.
- Análisis de la rigidez del chasis mediante simulación asistida por ordenador intentando conseguir valores similares al kart de gasolina.
- Análisis dinámico del eje de tracción y del sistema de frenado.

Como ya se ha visto el alcance del proyecto conjunto, se entiende que la parte mecánica no va a incluir:

- Realización de planos 2D de los diseños creados. Toda la parte de diseño se va a realizar en 3D mediante programas de CAD.
- Construcción del chasis, de los soportes y elección de componentes para la dirección y la transmisión.
- Estudio del coste de fabricación del kart: material, corte, soldadura y montaje.

Estos puntos podrían formar parte de una extensión del proyecto. En caso de que se realizara el primer prototipo, se debería hacer los planos 2D de todas las piezas, enviar a construir el chasis por un profesional y realizar todo el cálculo de costes.

3. MOTIVACIÓN

Las motivaciones o razones que han resultado interesantes para realizar este proyecto conjunto del diseño de un kart eléctrico son diversas: personales, industriales, docentes...

Las motivaciones personales son las más importantes ya que hacen disfrutar del trabajo realizado y encontrarle sentido al esfuerzo realizado. El hecho de trabajar en un proyecto perteneciente al mundo de la automoción resulta muy atractivo ya que se considera muy formativo, pero poder realizarlo conjuntamente con otro compañero de ingeniería es más atractivo y satisfactorio.

En el ámbito docente, el trabajo en equipo es una competencia básica en la que un ingeniero debe desenvolverse con eficiencia. Siguiendo en éste ámbito, un proyecto como el diseño de un vehículo eléctrico implica una amplia variedad de conocimientos y tecnologías que se deben estudiar, por lo tanto se han puesto en práctica gran parte de conceptos adquiridos durante el grado.

La movilidad eléctrica es un sector que no para de crecer y evolucionar en el ámbito industrial, por lo tanto el uso de ésta como método de propulsión del kart resulta interesante. Además, hay dos motivos añadidos que hacen que esta tecnología resulte tan atractiva: la necesidad de reducir el impacto medio ambiental y el incremento de la concienciación social con el cuidado al medio ambiente. Actualmente, el mercado de automóviles eléctricos no para de crecer y cada vez es más común cruzarse con uno por la calle, por lo tanto no es raro esperar que en el mundo del karting suceda lo mismo.

4. ESTADO DEL ARTE

El mundo del karting es muy conocido porque hay mucha gente que lo practica como deporte o bien porque lo conocen como pasatiempo. No obstante, en este apartado se va a realizar una pequeña descripción del kart y de la evolución histórica que ha experimentado.

Dado que se va a crear un prototipo de kart eléctrico es importante analizar el kart desde el punto de vista de producto. Por lo tanto, se va a estudiar:

- el estado del mercado actual
- la competencia
- las aplicaciones
- las especificaciones técnicas
- la normativa por la cual se regulan.

4.1. Descripción general Kart

Como concepto general, el kart es un vehículo terrestre, mayormente monoplaça, compuesto por cuatro ruedas, con apenas carrocería y el cual no dispone de suspensión.



Figura 1. SodiKart RX 250 [1]

Los karts son vehículos de tracción trasera propulsados por un motor de gasolina, en su gran mayoría, o bien por un sistema alternativo como por ejemplo eléctrico. Las ruedas delanteras están destinadas a la dirección y se manejan mediante un volante de bajo ratio de giro, lo cual permite realizar giros cerrados, los que derivan algunas veces en derrapes.

Así pues un kart es un vehículo muy fácil de manejar ya que solo implica el accionamiento de dos pedales: acelerador y freno. Estos atributos los hace ideales para la competición y el ocio en circuitos específicos para ellos, ya que deben ser de corto recorrido y abundantes curvas por el rango de velocidades en el que trabajan.

4.2. Historia del Karting

Se cree que el conocido “Karting” empezó en la década de los 50 en una base aérea de Estados Unidos. El primer kart fue construido a base de piezas reaprovechadas de un avión así como de un motor de una cortacésped como método de propulsión, este no superaba los 50 Km/h.



Figura 2. Primer kart construido por Art Ingels en 1956 [2]

Esta práctica se empezó a popularizar entre las diferentes bases aéreas de Estados Unidos hasta que se trasladó a otros países. En los años sesenta irrumpió con fuerza en Inglaterra y Francia y así empezó a conquistar terreno europeo. Es en este punto cuando la FIA (Federación Internacional de Automovilismo) crea la CIK (Comisión Internacional de Karting). Finalmente en los años setenta el karting aterriza en España.

Desde los inicios hasta ahora los karts han experimentado mejoras tecnológicas que han llegado a vapulear las prestaciones iniciales, pasando de 50 km/h de velocidad punta hasta cerca de 200 km/h. Actualmente se están aplicando propulsores alternos a los motores de gasolina, como los eléctricos, pero todavía les queda terreno por recorrer a estas nuevas tecnologías.

Aunque se han creado múltiples kartings eléctricos por todo el mundo, la implantación de éstos en España es minoritaria, ya que solo existen dos kartings específicos para esta modalidad. El primero de ellos fue el de Salou creado el año 2013 y ha sido el que se ha visitado durante la realización del proyecto. Otra prueba de esta poca implantación es que todavía no existe una legislación específica que regule el uso de este tipo de vehículos.

4.3. Implantación y aplicaciones del Karting en España

En este punto se pretende estudiar el estado actual del mundo del karting en España indistintamente de la fuente de energía que requieran para comparar los usos y aplicaciones en ambos casos.

4.3.1. Kart convencional

Los karts convencionales son los más utilizados en España hoy en día, estos cuentan con más de 70 circuitos repartidos por todo el país donde practicar esta modalidad.

Además la RFEDA (Real Federación Española de Automovilismo) cuenta con una regulación propia para este tipo de vehículos así como de un campeonato propio, el “Campeonato de España de Karting”.

Dicho campeonato engloba una serie de categorías, las cuales engloban desde los karts menos potentes para los pilotos más jóvenes (Alevines) hasta los karts más potentes para los pilotos más experimentados (Categoría KZ-2).

El karting es la modalidad base para competiciones de mayor relevancia como por ejemplo la Fórmula 1, por eso el mundo del karting es tan conocido y hay tanta gente que lo practica.

Con esto, se muestra la gran implantación del karting “convencional” no solo en España sino también en el resto del mundo donde la CIK regula todos los campeonatos mediante reglamentaciones y legislaciones.

4.3.2. Kart eléctrico

Al contrario que los karts de gasolina, los eléctricos todavía están despegando en cuanto a la implantación, sobretodo en España que, como ya se ha comentado, solo tiene dos circuitos para esta modalidad: uno en Salou y otro en Palma de Mallorca.

Además, todavía no existen ningún organismo ni ninguna regulación específicos que regule los karts eléctricos ya sea para competición o bien para ocio, dado que la RFEDA no los contempla. Para encontrar algún tipo de reglamentación o legislación que regule el uso de este tipo de vehículos hay que ir al “Campeonato de Vehículos de Propulsión Alternativa” que organiza la FIA. Es aquí donde encontramos una categoría dedicada exclusivamente a los karts de movilidad eléctrica.

En el resto de Europa los karts eléctricos se encuentran en la misma situación, aunque en países como Francia, Suiza e Italia se ven favorecidos ya que cuentan con 24, 9 y 13 kartings eléctricos respectivamente.

No obstante, la popularidad de esta modalidad de karts se puede ver disparada por el campeonato de la Fórmula E, nacido en 2014 y que es la versión eléctrica de la F1. Además de popularizar la propulsión alternativa, va a suponer un avance en el desarrollo de éstas tecnologías.







Así pues, el mercado de vehículos eléctricos tiene mucho potencial y, en cuestión de tiempo, los kartings eléctricos serán cada vez más comunes.

4.4. Estudio de la competencia

Como en todo proceso de diseño de un producto se hace necesario evaluar y analizar los productos de la misma familia existentes en el mercado actual.

Este estudio resultará útil para tener una visión global de las compañías presentes en el mercado, las tecnologías aplicadas por estas compañías en los productos o las prestaciones que ofrecen estos al usuario, entre otras.

En la siguiente tabla se muestran 6 candidatos a la competencia de diferentes fabricantes y con datos de tecnología utilizada y características físicas como dimensiones y peso.

Modelo	Fabricante	Tipo motor	Tipo batería	Peso (kg)	Dimensiones (mm) (L x A x H)
SLC	Speed2Max 	AC	Plomo	200	2100x1350x800
ECOVOLT NG	BIZ Karts 	DC	LiFePO ₄	200	1900x1310x600
STINGER	Caroli kart 	DC	LiFePO ₄	195	1920x1300x600
SINUS ion	Rimo 	DC	LiFeMnPO ₄	170	2020x1390x600
STORM	Otl kart 	AC	Plomo	180	2060x1410x600
F1	Tom KART 	DC	Li-Ion	150	1950x1300x650

Como se puede ver en la tabla, las tecnologías usadas en el motor y las baterías son muy diferentes, esto implicará que la distribución y el diseño del chasis estarán muy ligados a la elección de componentes realizada por el compañero Miquel Balsells.

Para la elección de los componentes eléctricos era necesarios datos de las prestaciones de estos vehículos: velocidad, aceleración y autonomía, por lo que se realizó, entre otros motivos, una visita a un karting exclusivamente de karts eléctricos. De los datos recogidos y su posterior análisis se extraen los siguientes datos:

Modelo Kart	Velocidad máxima permitida karts	Velocidad máxima en circuito	Aceleración máx. en circuito	Autonomía
Eco Volt (BIZ Karts)	70 km/h	46 km/h	4,68 m/s ²	40 min

4.5. Legislación vigente

Como se ha mencionado repetidamente, actualmente en España no existe o no se ha encontrado ninguna ley que regule específicamente el uso ni fabricación de este tipo de vehículos, siempre que se usen en un circuito independientemente de los karts de gasolina. Es decir, para el diseño del prototipo no se estará restringido a ninguna normativa, aunque de cara al diseño mecánico del chasis se intentará seguir la normativa de la FIA.

Una restricción que si hay que cumplir, la cual es común a gran parte de los productos comercializados dedicados a la industria y a los servicios, es que todos los componentes que configuran el kart deben estar dotados de la marca CE¹ ("Conformité Européenne").

La FIA organiza una competición en la que se incluye los karts eléctricos, dentro del apartado de campeonatos de vehículos de propulsión alternativa, y en está sí que existe una reglamentación que controla el diseño y la seguridad de éstos. Aunque para un kart de ocio estas premisas no son de obligado cumplimiento se estudiará y se tendrán en cuenta algunos criterios descritos en ella para el diseño del kart.

¹ Marca CE: Certificado que garantiza que el producto cumple unos requisitos mínimos de seguridad establecidos por la Unión Europea.

5. ESPECIFICACIONES BÁSICAS

Una vez realizado un estudio del estado en el que se encuentra la evolución de este tipo de vehículos, se propondrá una especificación donde se fijarán unos ciertos objetivos cualitativos y cuantitativos, tanto de diseño como de prestaciones, que deberá seguir el prototipo final.

Se resumirá dicha especificación en una tabla que contendrá las siguientes columnas:

- **Parámetro:** Descripción del parámetro/objetivo a especificar
- **Mínimo:** Límite inferior del valor del parámetro en el prototipo final.
- **Valor límite:** Límite superior del valor del parámetro en el prototipo final
- **Justificación:** Breve justificación de los valores anteriormente presentados

Parámetro	Mínimo	Máximo	Justificación
Peso	150 kg	200 kg	Valor mínimo y máximo de los karts de la competencia.
Longitud	1800 mm	2100 mm	Valores mínimos y máximos de los karts eléctricos del mercado.
Amplitud	1250 mm	1410 mm	
Altura	600 mm	800 mm	
Higiene	-	-	Asegurar tecnología limpia (no manchas de aceite o humos).
Ruido	-	70 dB	Ruido inferior al de un kart gasolina.
Rigidez	-5% diferencia con chasis convencional	-	Asegurar que el comportamiento del chasis sea igual que el convencional.
Protección	-	-	Garantizar la protección del piloto respecto impactos y contacto con los componentes eléctricos.
Refrigeración	-	-	Garantizar la refrigeración de los componentes eléctricos.

6. DESCRIPCIÓN DEL PROTOTIPO DE KART ELÉCTRICO

En este apartado se describe el prototipo que se ha diseñado desde un punto visual hasta un punto más funcional. El objetivo es entender el porqué del diseño y el funcionamiento de éste.

Primero de todo se hará un desglose de todos los componentes que conforman el kart, explicando en cada uno cuál es su función principal y mostrando la forma que adoptan.

Finalmente se realizarán una serie de estudios mecánicos para corroborar que los elementos cumplen con las especificaciones requeridas.

- Análisis del bastidor
- Estudio del eje trasero
- Sistema de dirección
- Estudio de frenada

6.1. DISEÑO DEL KART

El objetivo de este apartado es conocer el diseño del prototipo que se ha realizado durante este proyecto. Un kart es un vehículo básico y fácil de entender, pero incluso así está compuesto de varios sistemas que permiten su funcionamiento. La explicación de éstos y que requisitos se han seguido para su creación, es lo que pretende desarrollar en este apartado.

El contenido se va a dividir de la siguiente manera:

- Resultado global del diseño.
- Desglose por sistemas según su funcionalidad.

6.1.1. El prototipo

La consultoría ha sido escogida para crear un diseño completo de un kart eléctrico partiendo desde cero, pero no solo se ha creado el vehículo en sí, sino que también, se ha creado una nueva marca de karts eléctricos, así pues el prototipo recibe el nombre de la consultoría CMV.



Figura 3. Vista isométrica trasera del prototipo CMV.

Como se puede observar en la figura anterior se ha escogido el color rojo para la carrocería y un azul eléctrico para el chasis. Como ya se ha comentado anteriormente el vehículo ha sido concebido para el uso recreativo, por lo tanto ha sido imprescindible dotarlo de un parachoques.

Todos los elementos del kart, carrocería, chasis, soportes... han sido especialmente diseñados para esta configuración ya que dependen del sistema de elementos eléctricos. De todos modos se ha procurado crear un diseño de bastidor y carrocería polivalente con otras configuraciones.



Figura 4. Vista isométrica frontal del prototipo CMV.

Este prototipo ha sido diseñado para un público adulto, tanto por sus características motoras como sus dimensiones, se clasifica como un kart de categoría junior-senior, es decir es apto para usuarios a partir de los 16 años.

En esta última figura de la parte delantera se puede ver el emblema o logotipo de la empresa que luce en el frontal de la carrocería.



Figura 5. Logotipo consultoría CMV.

6.1.2. Desglose por sistemas

Para entender cómo funciona un kart, como se desplaza, hay que entender el funcionamiento de cada una de sus piezas. Como se puede ver en la siguiente figura, aun siendo un vehículo sencillo está compuesto por muchas piezas.

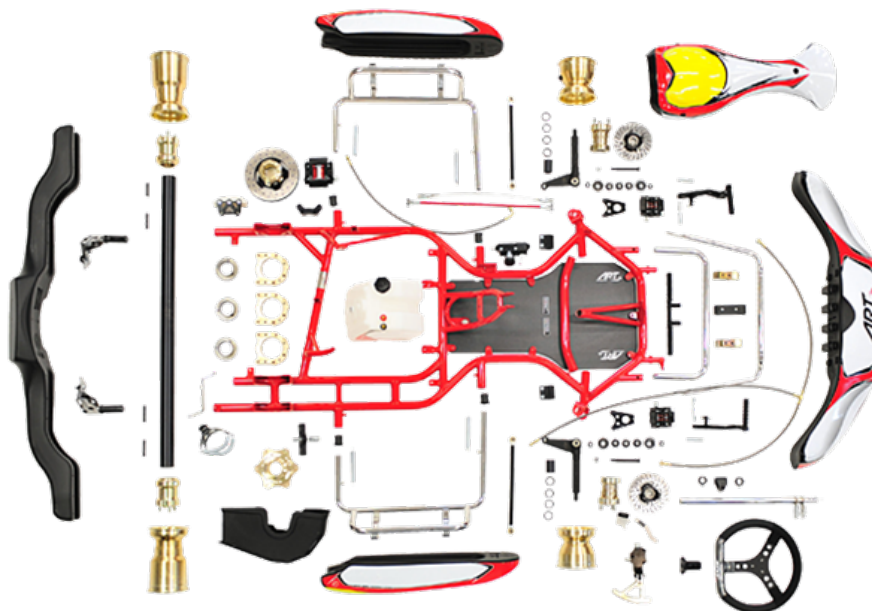


Figura 6. Elementos de un kart de la escudería francesa ART Grand Prix [3]

Para facilitar la explicación del funcionamiento de todas las partes se va a dividir el kart en cinco sistemas diferentes según las funciones básicas de un kart que son:

- Avanzar.
 - Sistema eléctrico.
 - Sistema de transmisión.
 - Ruedas.
- Dirigir.
 - Sistema de dirección.
- Frenar.
 - Sistema de frenado.
- Sustentar.
 - Chasis.
 - Soportes.
- Proteger.
 - Carrocería.
 - Parachoques.

Sistema eléctrico

Todos los elementos del sistema eléctrico están comentados con detalle en la parte eléctrica del proyecto de diseño de un kart eléctrico del compañero Miquel Balsells. Por lo tanto, en este apartado no se pretende justificar la elección de los componentes usados, sino ubicarlos en el chasis siguiendo una buena distribución del peso.

Para dotar al kart de movimiento se necesita un propulsor, para ello se ha escogido un motor de corriente continua Agni 143, que genera el campo magnético mediante un estator de imanes permanentes. Éste, mediante un soporte personalizado, se ha situado en la parte derecha para compensar la distribución de peso y reducir la altura del centro de gravedad del vehículo.



Figura 7. Motor Agni 143 y logotipo de la marca [4]

El controlador eléctrico regula la intensidad que se suministra al motor en función del recorrido del pedal del acelerador, el escogido para el prototipo es el Kelly KTZ72401.

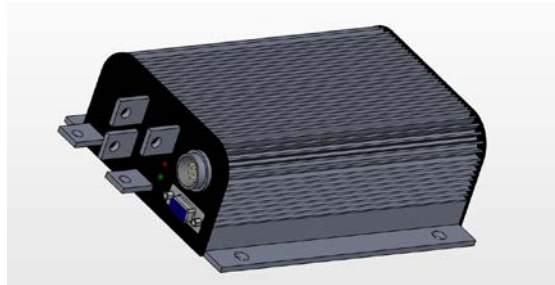


Figura 8. Controlador Kelly 72401.

La fuente de energía eléctrica son las baterías de fosfato de hierro-litio (LiFePO₄), en concreto para este prototipo se han usado las celdas CALB (BAT-CA040FI).



Figura 9. Celda de fosfato de hierro-litio de la marca CALB [5]

El conjunto consta de 24 celdas situadas en dos conjuntos a ambos lados del chasis. En concreto se ha situado en el lado izquierdo un conjunto de 4x4 celdas y en el lado derecho un conjunto de 4x2 celdas.

Las baterías están controladas por un BMS que administra la carga de las celdas para que no se produzcan descompensaciones. Este controlador consta de dos elementos ambos de la marca EV Power.

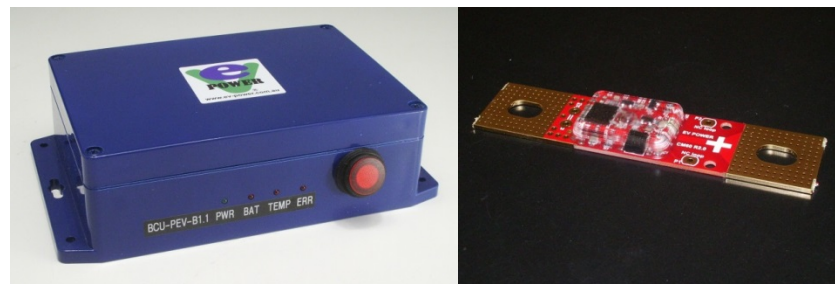


Figura 10. EV Power BCU-PEV-2.x unidad master y EV Power CBM060 unidad slave [5]

En la siguiente imagen se puede ver la distribución de estos elementos en el kart ya

montado.

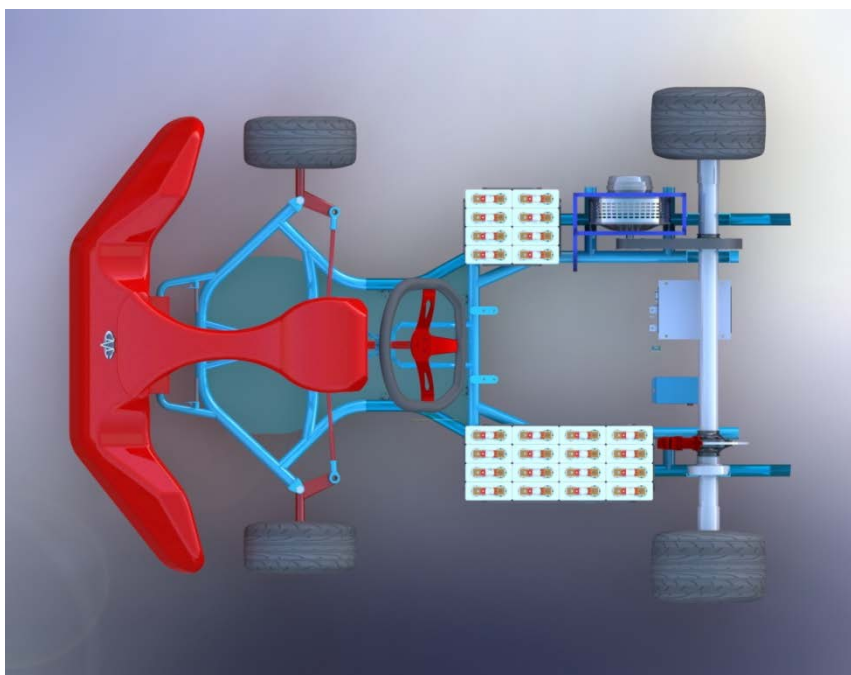


Figura 11. Vista en planta de la distribución de los elementos eléctricos.

Para controlar el encendido y apagado del kart se ha creado un panel de control situado detrás del volante con interruptores y luces de indicación.



Figura 12. Panel de control montado entre la carrocería y el volante.

Sistema de transmisión

El sistema de transmisión consiste de un piñón que transfiere el par motor a la correa y ésta se lo pasa a la corona que está ligada al eje trasero. Finalmente el eje trasero transmite el movimiento giratorio a las ruedas dotando al prototipo de tracción.

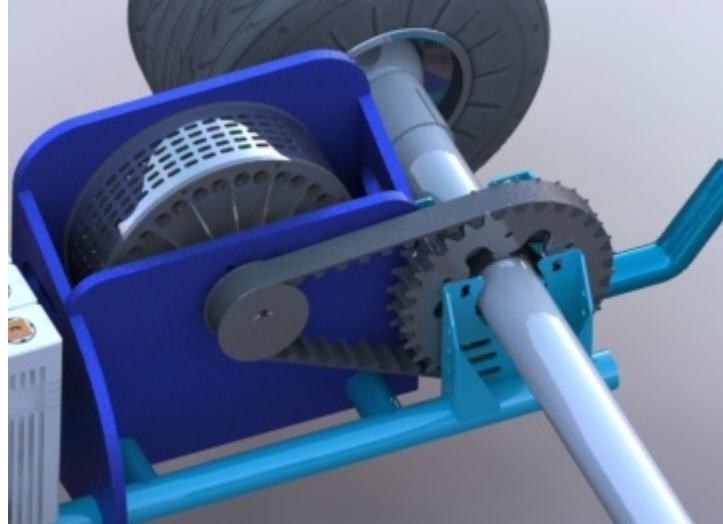


Figura 13. Sistema de transmisión montado en el prototipo.

Ruedas

Uno de los inventos más antiguos y que revolucionó el movimiento es la rueda, que permite que el prototipo se desplace por encima del circuito. Las ruedas están compuestas por las llantas, que están unidas al eje de rotación, y los neumáticos, encargados de estar en contacto con el asfalto para dar una buena adherencia.



Figura 14. Rueda trasera y delantera de la marca VEGA de un kart [6]

Sistema de dirección

El sistema de dirección permite al piloto guiar al vehículo para lograr la trazada deseada.

Con un sistema de dirección preciso y ágil el conductor percibe mejor las reacciones del kart con el asfalto y se logra una mayor sensación del pilotaje. Está formado por: volante, columna de dirección, bieleta, tirantes, rótulas y brazos de dirección.

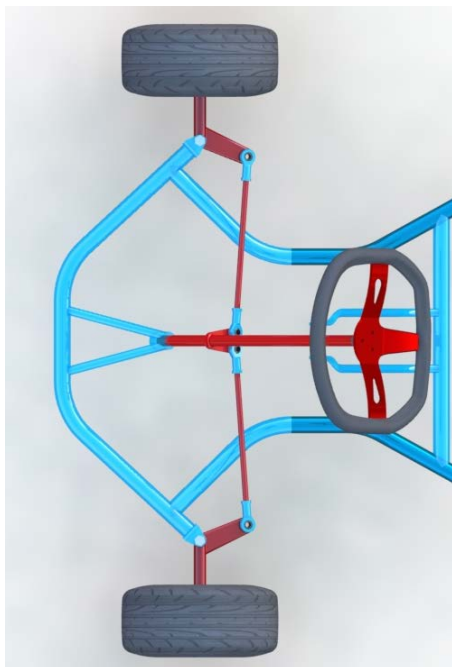


Figura 15. Vista del sistema de dirección del prototipo.

Sistema de frenado

Todo vehículo propulsado y direccionado necesita un sistema de frenado. En este caso consta de un simple disco de freno perforado unido al eje trasero mediante unas mordazas y una pinza unida al chasis que con la ayuda de una bomba permite la desaceleración del kart en cuanto el usuario acciona el pedal del freno.

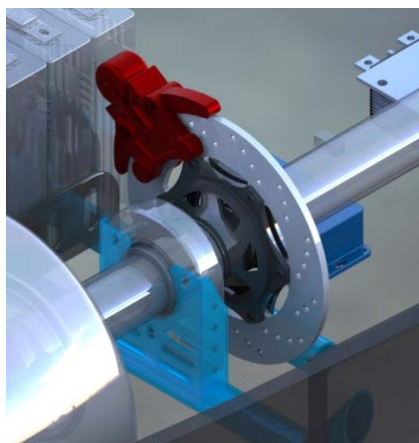


Figura 16. Ubicación del disco perforado y la pinza de freno.

Chasis

El chasis es el esqueleto del kart, permite unir todos los elementos y está diseñado para soportar todos los esfuerzos producidos durante la conducción.

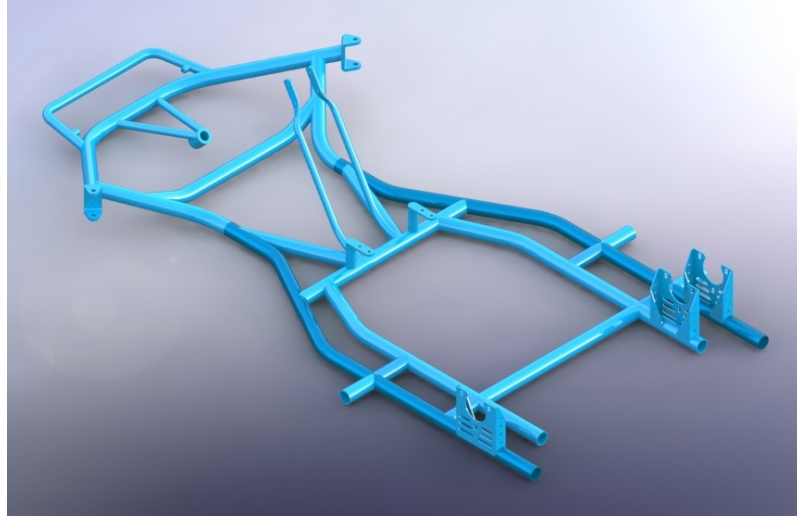


Figura 17. Chasis del kart eléctrico

Soportes

Para contener los elementos eléctricos se han diseñado tres soportes específicos: soporte de motor, soporte de baterías y el soporte de los controladores (Kelly y BMS).

Carrocería

En este tipo de productos lo que suele impactar más al principio es la carrocería ya que es el elemento más estético y que le aporta carácter al kart. La carrocería consta de 5 piezas: el frontal, las dos cubiertas laterales, la cubierta trasera y la cubierta de dirección. En este caso tiene tres importantes funciones: reducir la carga aerodinámica, contener los elementos eléctricos y a la vez proteger al piloto de éstos mismos. Con instalaciones eléctricas es obligatorio tomar precauciones para evitar incidentes que puedan perjudicar al usuario.



Figura 18. Lateral izquierdo y elemento trasero de la carrocería.

Como se puede ver en la figura X se ha tallado un panel en la carrocería para favorecer la ventilación de dichos elementos y evitar su sobrecalentamiento.

Parachoques

El parachoques envolvente, junto con el sistema de fijaciones al chasis, es el elemento principal de protección. Como ya se ha comentado este vehículo ha sido concebido principalmente para uso y disfrute en un ámbito recreativo, no de competición, por lo tanto es imprescindible velar por la seguridad del piloto. Con este sistema se consigue transmitir los choques al chasis sin importar la dirección en la que se produzcan. Además se consigue proteger las ruedas para evitar que el kart se levante del suelo.

6.2. ANÁLISIS MECÁNICO

Una vez entendidos los diferentes elementos o sistemas que conforman el prototipo es preciso analizar los elementos mecánicos de un modo más detallado. Éste análisis determinará si el diseño cumple con las especificaciones comentadas en el punto anterior.

En concreto se van a realizar los siguientes estudios:

- Diseño del chasis
- Análisis a flexión y torsión del chasis
- Dimensionamiento sistema de dirección
- Estudio de fatiga del eje trasero
- Relación y tipo de transmisión
- Estudio de frenada
- Tipos de neumáticos y llantas
- Diseño de soportes

6.2.1. Estudio del chasis

Diseño del chasis

En este apartado se explicará en que se ha basado el diseño del chasis, forma y dimensiones, y se analizará mecánicamente para corroborar que cumple con las especificaciones de rigidez que requiere.

Primero de todo, como ya se ha comentado anteriormente, los karts eléctricos no están

legislados porque es un género que está emergiendo recientemente. Solo hay un apartado en el reglamento de la FIA, pero éste no es de obligado cumplimiento en el caso de los karts destinados al ocio. Por este mismo motivo se ha decidido que no se haría un prototipo para la competición sino para el ocio, pero de todos modos se ha intentado seguir la normativa que propone la FIA para los karts de gasolina convencionales.

Entonces el diseño del chasis eléctrico será una adaptación del chasis de un kart de gasolina como el que se puede ver en la siguiente figura.

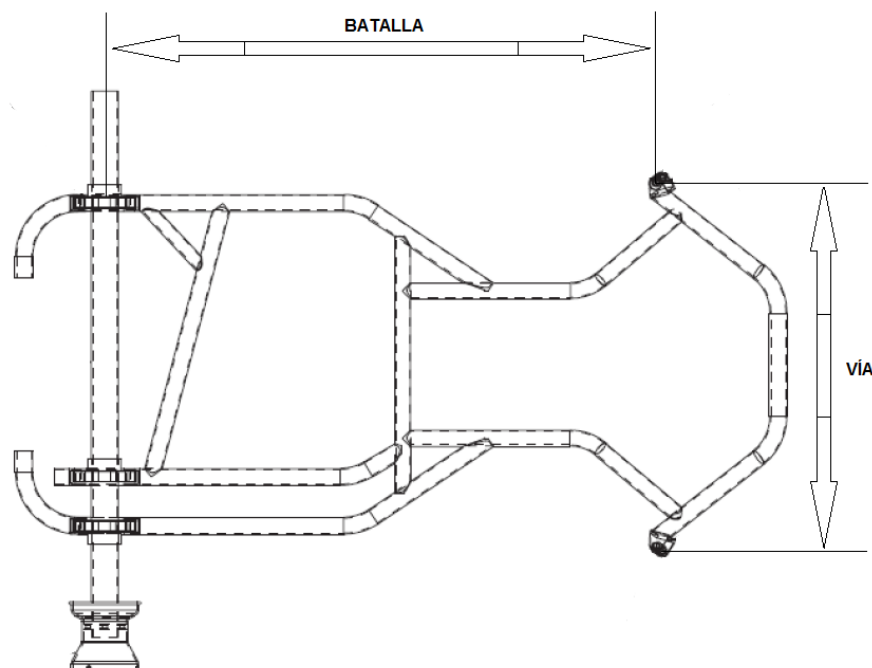


Figura 19. Plano reglamentario del chasis con las dimensiones principales [7]

Como se ve en la figura también están señaladas las dimensiones principales que definen un chasis: la batalla, indica la distancia entre ejes, y la vía, indica la distancia entre ruedas. Según la reglamentación de la FEDA y FIA estas deben pertenecer al siguiente rango de valores:

Dimensión	Mínimo	Máximo
Batalla	1010 mm	1070 mm
Vía	674 mm	714 mm

Para escoger las medidas del bastidor se han seguido dos criterios: disminuir el radio de giro para mayor maniobrabilidad y lograr un chasis resistente para aguantar los golpes.

Como es sabido el punto fuerte de un motor eléctrico es que proporciona una aceleración muy rápida ya que la entrega de par motor es casi instantánea, para potenciar esta característica en circuito es necesario lograr un buen paso por curva, para ello se ha decidido reducir el radio de giro y reducir la longitud del brazo de dirección.

Para la batalla se ha decidido escoger el valor mínimo, 1010 milímetros, para satisfacer los dos primeros criterios. En cambio, para poder cumplir con el tercer objetivo se ha escogido una vía de 714 milímetros. Aunque con este valor no se favorece la reducción del radio de giro, es importante para reducir la longitud del brazo de dirección al cual irá unido la rueda. Un brazo menor ofrece una menor resistencia al giro porque el efecto de palanca es menor, y para el piloto resulta más cómoda la conducción.

Una vez decididas las medidas hay que definir el diseño. Antes de todo se ha realizado una búsqueda de información de otros modelos y también se ha hecho una visita al karting de Salou, uno de los únicos kartings eléctricos de España por el momento.



Figura 20. Fotografía de los karts repostando el día de la visita.

En la visita se pudo comprobar la diferencia en la conducción y en las prestaciones de los karts eléctricos respecto los de gasolina. Además, se pudo ver cómo eran los chasis y cómo estaban distribuidos los componentes eléctricos, que ha servido para tener una primera idea. En este caso los karts utilizados eran los de la casa BIZ Karts como el que se puede ver en la siguiente figura.



Figura 21. Model Bizkarts adult del Electric karting Salou.

Básicamente, la principal adaptación del chasis es aplicar simetría en la parte trasera del chasis para poder ubicar así los componentes más pesados en los laterales, como se puede ver en la figura X a continuación.

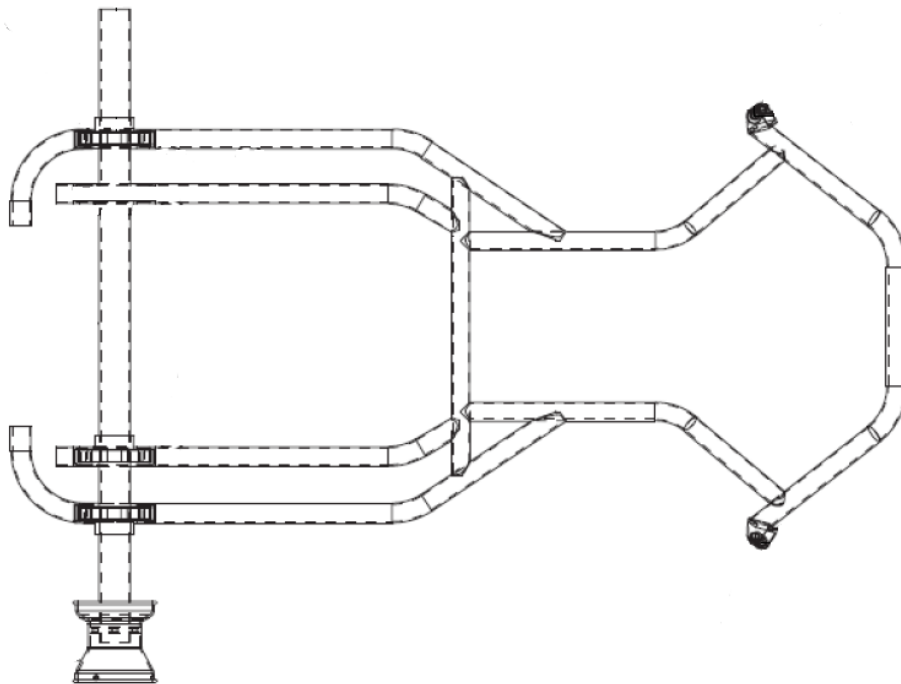


Figura 22. Ejemplo de la modificación del chasis.

El primer diseño en 3D del chasis es el reflejado en la siguiente figura.

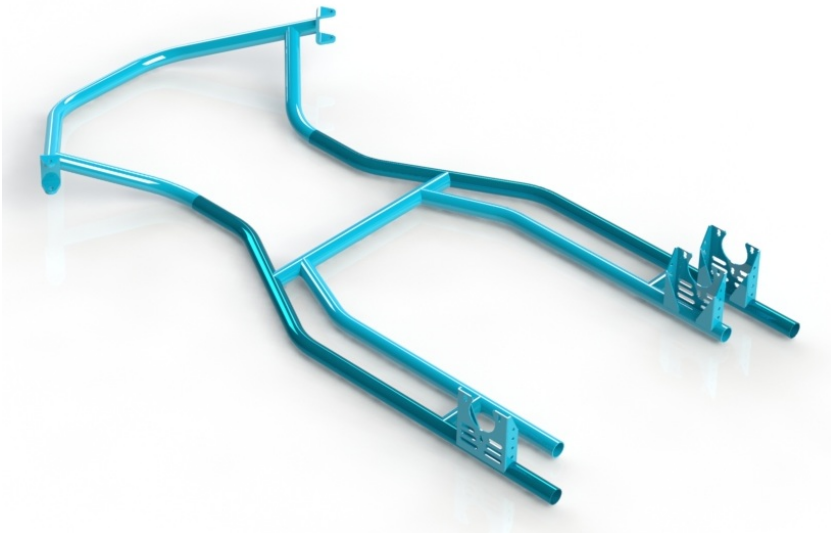


Figura 23. Primer diseño del chasis

Después de unos primeros análisis de rigidez, era necesario añadir un travesaño frontal y las crucetas para cumplir con el requisito de rigidez torsional.

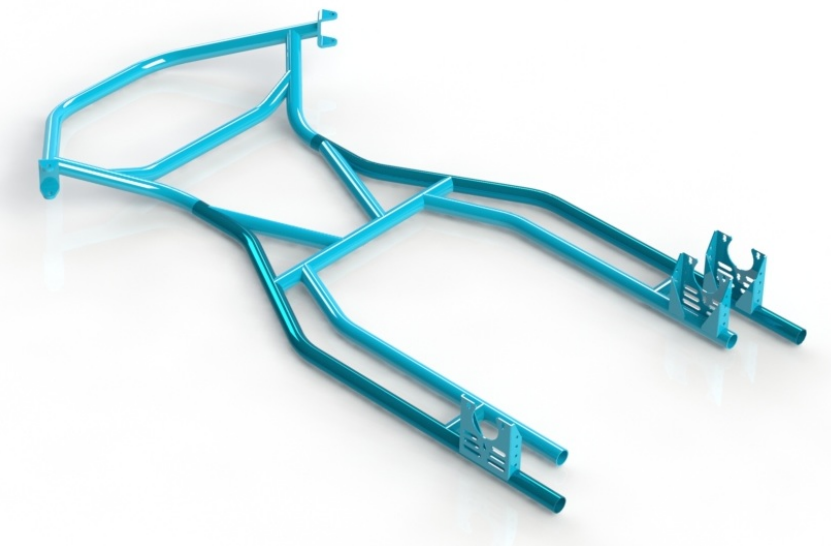


Figura 24. Diseño de chasis reforzado para torsión.

Finalmente, con todo el análisis realizado y con todos los componentes seleccionados y ubicados el resultado del diseño final del chasis del prototipo CMV es el siguiente:

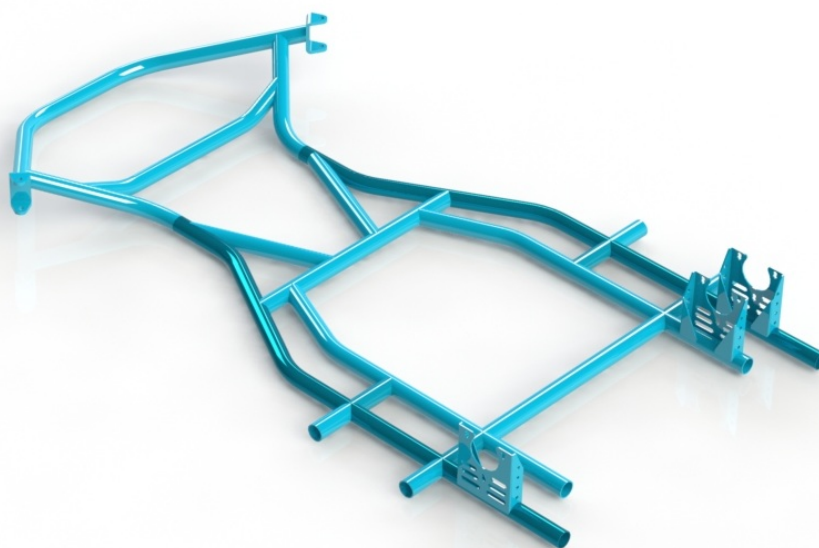


Figura 25. Chasis final del prototipo CMV.

Como se puede ver se ha reforzado la parte trasera con un travesaño y tubos de enlace entre los tubos laterales y los laterales auxiliares para garantizar la resistencia de la estructura frente colisiones con otros karts.

Material y requisitos

Como ya se ha comentado en el desglose por partes, el chasis tiene diferentes funcionalidades muy importantes, no solo la de unir todos los elementos, sino también soportar todos los esfuerzos que se producen durante la conducción. Es por eso que éste debe ser sólido y rígido, para soportar el peso del conductor y componentes, las fuerzas de reacción que reciben las ruedas e incluso posibles impactos con otros karts.

En cuanto a solidez, la reglamentación de la FEDA y FIA definen que el cuadro o chasis debe ser de construcción de acero tubular y sección cilíndrica y que los elementos deben estar unidos por soldadura, no puede ser desmontable o que pueda perder elementos durante el movimiento. Además las partes auxiliares deben estar sólidamente fijadas.

A continuación se muestra una tabla con las propiedades mecánicas principales del acero utilizado para este diseño:

Material	Acero estructural
Densidad	7850 kg·m ⁻³
Módulo de Young	2,00 · 10 ¹¹ Pa
Coefficiente de Poisson	0,30
Esfuerzo cortante	7,69 · 10 ¹⁰ Pa

Por lo que hace a la sección, los chasis de gasolina que se han encontrado suelen ser la mayoría de unos 32 mm de diámetro exterior con un espesor de 2 mm. Dado que el nuevo cuadro es más elaborado, se ha escogido una sección tubular de 30 mm con 2 mm de espesor para intentar reducir peso sin perder rigidez.

Por otro lado, la elasticidad del material es la única que define la rigidez, no hay ningún requisito mínimo ni máximo, y puesto que es un vehículo sin suspensiones, éste será un factor a tener muy en cuenta.

Primero de todo hay que definir que supone decir que un chasis es rígido o no. La rigidez es la capacidad de resistencia de un cuerpo a doblarse o torcerse por la acción de fuerzas exteriores que actúan sobre su superficie (RAE). La propia definición ya indica que habrá que estudiar cómo reacciona el prototipo tanto a flexión como a torsión, pero ahora es importante conocer el efecto que tiene sobre la conducción.

La rigidez adecuada para un chasis depende de muchos factores: tipo de circuito, tipo de asfalto, piloto y estilo de conducción, calidad de los neumáticos, reparto de pesos... pero el principio básico es que un cuadro más rígido favorece el derrape o deslizamiento, mientras que un menos rígido o más blando potencia el agarre. Es posible variar el comportamiento del chasis añadiendo barras estabilizadoras o tirantes para evitar por ejemplo los botes de los neumáticos en las curvas debido al exceso de agarre, o en caso contrario prescindir de estos elementos para promover el agarre en caso de asfalto deslizante o lluvia. También se puede distinguir entre rigidez de la parte delantera y de la parte trasera para evitar efectos de subviraje o sobreviraje en función del estilo de pilotaje.

En un equipo de competición tener en cuenta todos estos efectos puede ser determinante para mejorar en la clasificación pero para un uso recreativo es demasiado. En este caso lo deseado es que el cuadro no se deforme ya que hay mucha variedad en el tipo de usuarios. Por lo tanto, se requiere que el chasis sea rígido y como no se dispone de ningún valor especificado lo que se va a realizar es una comparación con un chasis de un kart de gasolina comercializado.

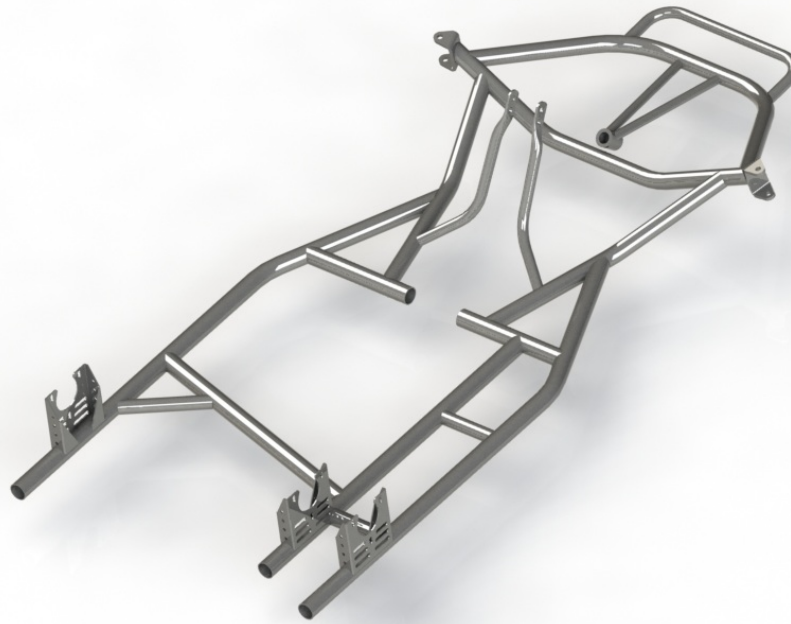


Figura 26. Vista isométrica del chasis gasolina usado en la comparación.

El análisis mecánico consiste de dos simulaciones numéricas: simulación a flexión y simulación a torsión. Ya que no se dispone de recursos para realizar ensayos empíricos, se va a utilizar el software de simulación ANSYS Workbench 14.5 para el estudio de estructuras estáticas sometidas a esfuerzos exteriores.

No se realizarán estudios de la integridad del chasis simulando choques laterales, frontales o traseros porque se considera que si el chasis cumple con los requisitos de rigidez es viable para el prototipo de uso recreativo. El análisis de integridad podría formar parte de una extensión del proyecto.

Los pasos a definir para elaborar estos estudios son:

- Tipo de análisis
- Geometría
- Mallado
- Condiciones exteriores
- Cargas exteriores

Como ya se ha comentado el análisis será de tipo estático y las geometrías ya se han mostrado en las figuras 25 y 26. El mallado para ambas será el mismo, siguiendo un método de malla estándar y sin refinado de malla, ya que la geometría es compleja y se valorará el

comportamiento general, no la deformación de zonas concretas. El resto de puntos dependerán de cada tipo de simulación.

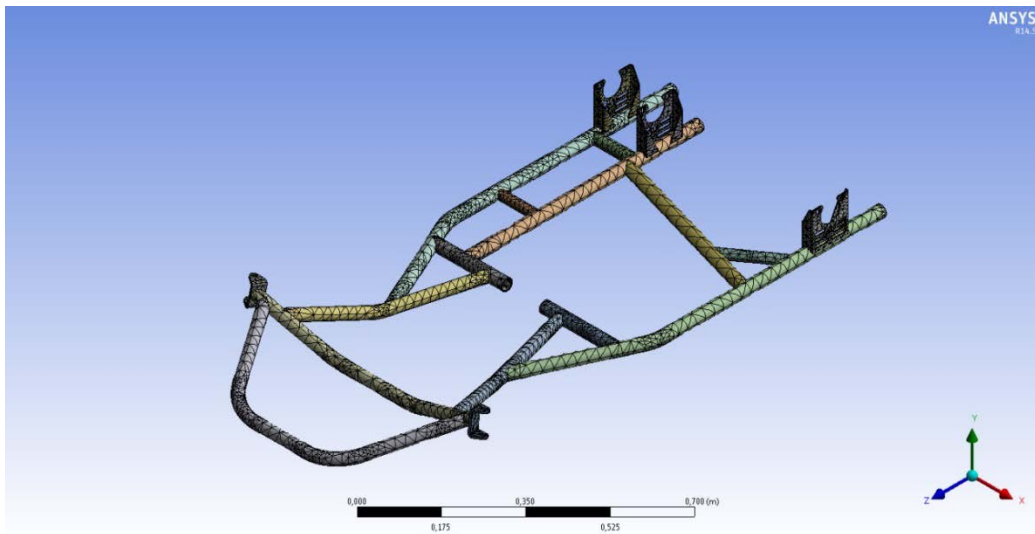


Figura 27. Método de mallado del chasis del kart de gasolina

Simulación a flexión

En este caso se simulará la flexión que recibe el chasis debido a la carga del usuario y de los componentes. La rigidez a flexión se mide en función de la carga y de la deformación según la ecuación:

$$K_{flex} = \frac{F_{flex}}{\delta_y}$$

Dónde:

K_{flex} es la constante o cociente de rigidez a flexión.

F_{flex} es la fuerza o carga que provoca la flexión en la estructura.

δ_y es la deformación o desplazamiento obtenido en dirección de la carga.

Las condiciones iniciales que se han definido para el estudio son:

- Fijación de los 2 soportes del eje trasero y de las 2 horquillas delanteras, es decir, se bloquean los seis grados de libertad por los 4 puntos del chasis que están en contacto con los ejes de las ruedas.
- Aplicación de la carga en el tubo transversal del chasis situado cerca del centro del chasis. Para ambos cuadros se va a aplicar una carga de 1500 N, unos 150 kg

aproximadamente, que es el peso de un usuario medio junto con el resto de componentes del kart.

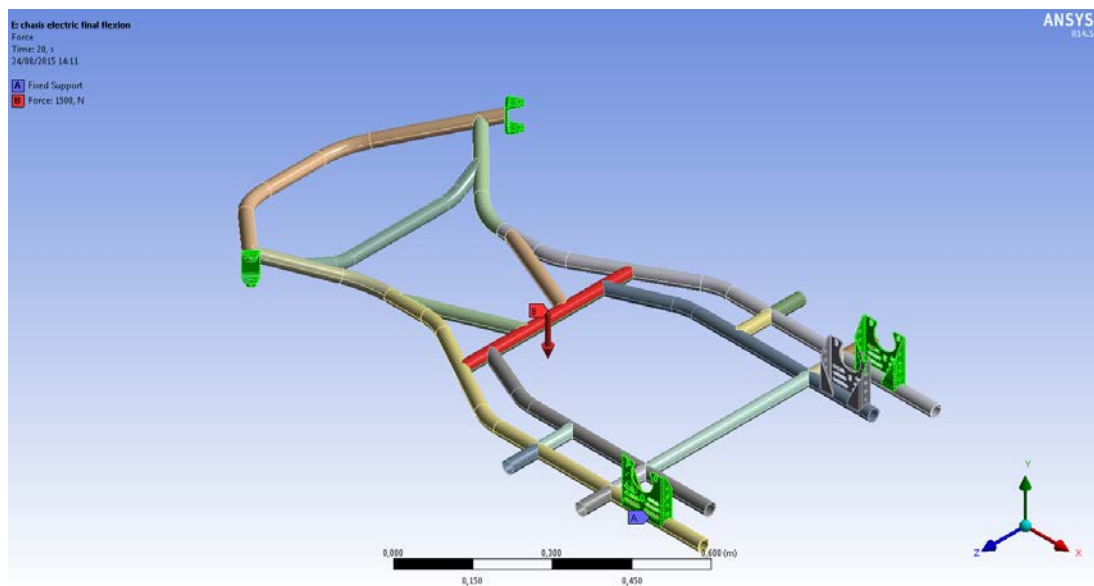


Figura 28. Vista de las condiciones y cargas exteriores para el chasis del kart eléctrico.

Resultados de la flexión

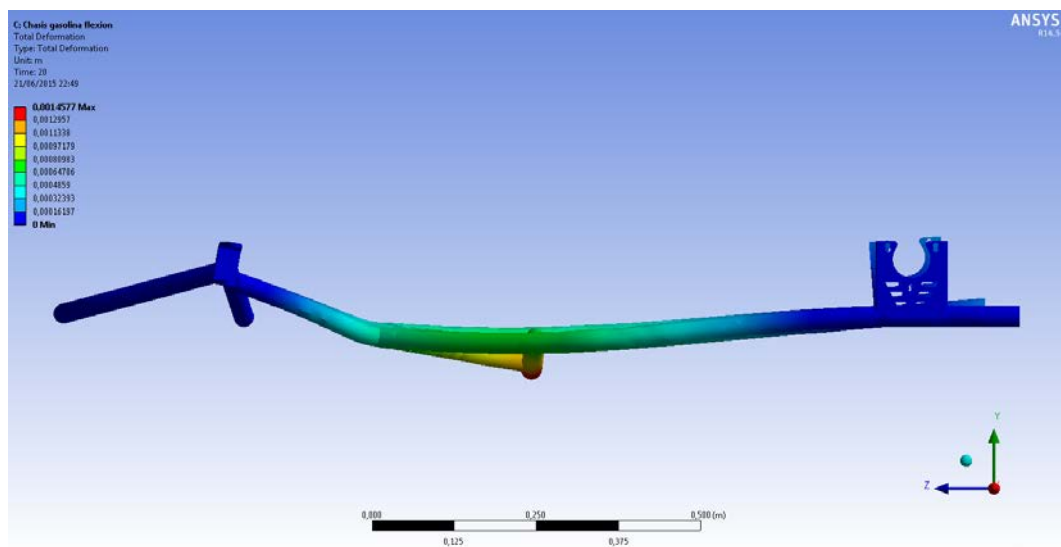


Figura 29. Vista lateral de la deformación del chasis gasolina sometido a flexión.

En esta figura se puede ver que la parte que sufre mayor deformación es el punto de aplicación de la fuerza, por eso se ha medido el desplazamiento en tres puntos de la barra transversal. El desplazamiento medio obtenido es de $\delta_y = 0,95 \text{ mm}$, por lo tanto la constante de rigidez a flexión toma el valor de:

$$K_{flex} = 1,58 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Ahora es necesario estudiar el nuevo bastidor diseñado para realizar la comparativa.

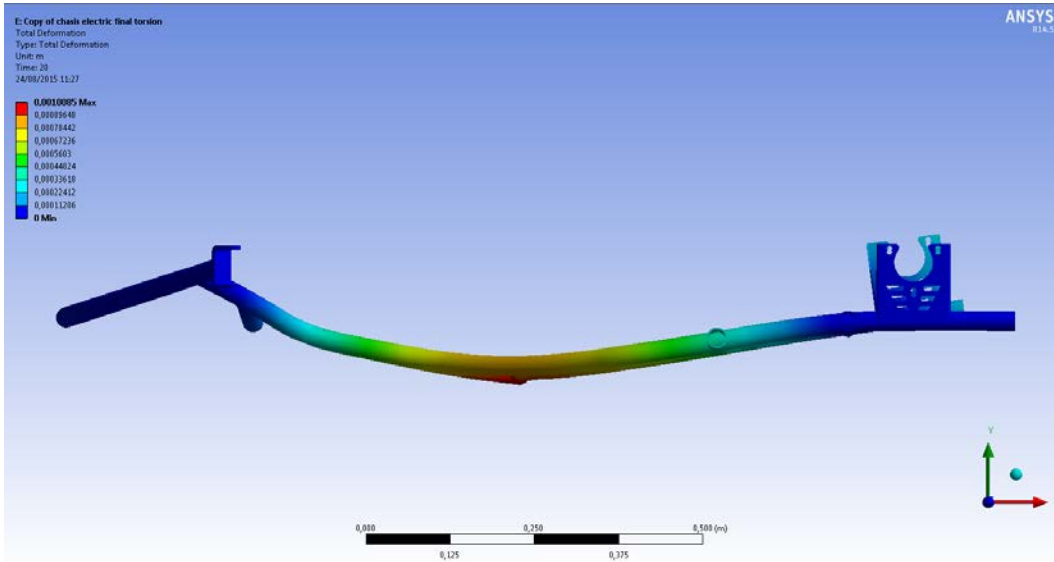


Figura 30. Vista lateral de la deformación del chasis eléctrico sometido a flexión.

El valor de desplazamiento medio obtenido en este otro caso es $\delta_y = 0,91 \text{ mm}$, por lo cual la constante de rigidez a flexión queda de la siguiente manera:

$$K_{flex} = 1,65 \cdot 10^6 \text{ N/m}$$

Comparando ambos resultados se puede determinar que el diseño de chasis eléctrico es más resistente a flexión que el de gasolina, en concreto más de un 40%.

Gasolina	Eléctrico	Diferencia relativa
$1,58 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	$1,65 \cdot 10^6 \text{ N/m}$	4,46 %

Este incremento es debido a dos razones principales:

- El chasis eléctrico es más corto que el de gasolina.
- El nuevo diseño es más complejo y está más reforzado.

Este comportamiento beneficia al nuevo diseño ya que éste está sometido a mayor carga, el peso de los componentes es superior en el caso del kart eléctrico.

Simulación a torsión



En este caso se simulará la torsión del chasis simulando posibles fuerzas que podría recibir al tomar una curva. La rigidez a torsión se mide en función del momento y de la deformación según la ecuación:

$$K_{tors} = \frac{M_{tors}}{\theta_z}$$

Dónde:

K_{tors} es la constante o cociente de rigidez a torsión.

M_{tors} es el momento que provoca la torsión en la estructura.

θ_z es el ángulo girado provocado por la acción del momento.

Las condiciones iniciales que se han definido para el estudio son:

- Fijación de los 2 soportes del eje trasero, es decir, se bloquean los seis grados de libertad de éstos.
- Aplicación de la carga en las horquillas delanteras, en concreto se ha aplicado una fuerza vertical positiva de 500 N en un lado y una fuerza vertical negativa de 500 N en el otro lado. Es decir, el momento torsor se define por el par de fuerzas y la distancia de aplicación (la vía).

$$M_{tors} = F_v \cdot vía$$

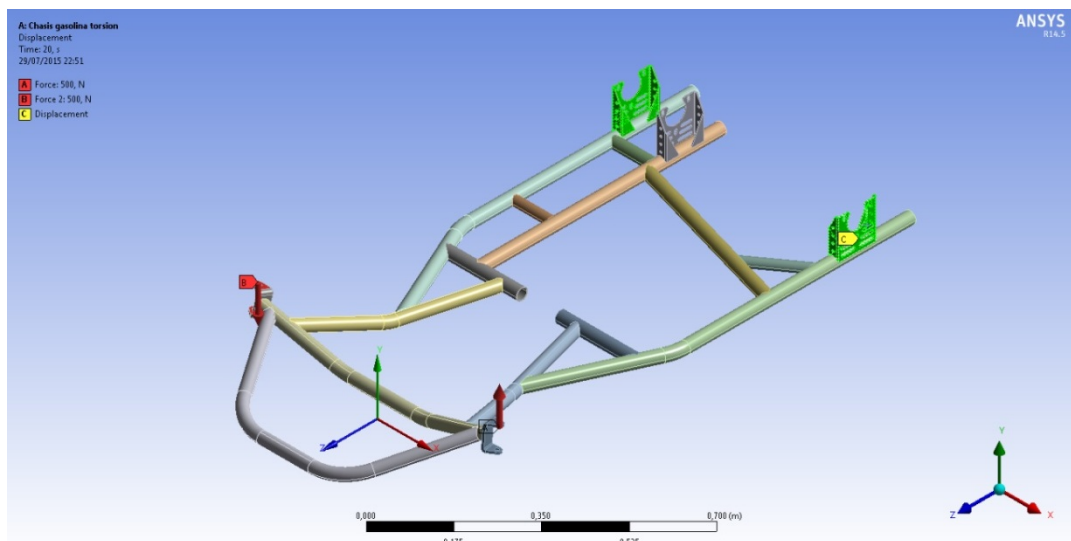


Figura 31. Vista de las condiciones y cargas exteriores para el chasis del kart de gasolina.

Resultados de la torsión

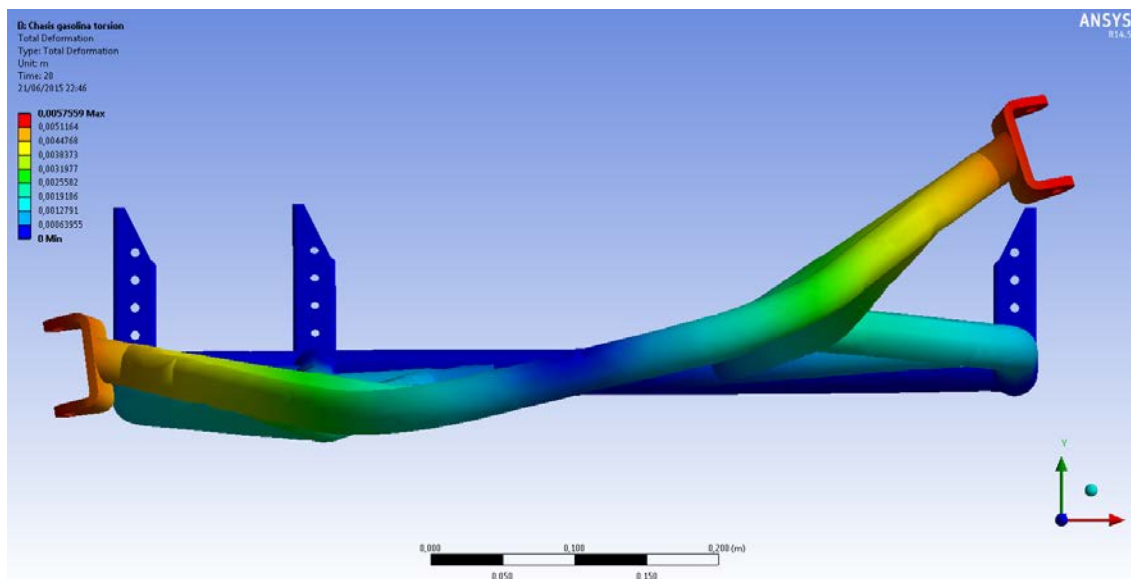


Figura 32. Vista frontal de la deformación del chasis gasolina sometido a torsión.

En esta imagen se puede ver el giro provocado por el par de fuerzas y que la deformación máxima se concentra en su punto de aplicación. Con el desplazamiento de estos puntos se puede calcular el ángulo de giro de la siguiente manera:

$$\theta_z = \tan^{-1} \left(\frac{\text{desplaz. max}}{\text{vía}/2} \right)$$

Por lo tanto para el bastidor del kart gasolina se obtienen los siguientes resultados:

Chasis	Gasolina	
Fuerza vertical	F_v	500 N
Vía		680 mm
Momento torsor	M_{tors}	$3,40 \cdot 10^2$ Nm
Desplazamiento máximo		5,76 mm
Angulo de giro	θ_z	$1,69 \cdot 10^{-2}$ rad
Rigidez a torsión	K_{tors}	$2,01 \cdot 10^4$ Nm/rad

El siguiente paso es analizar el comportamiento del bastidor del prototipo.

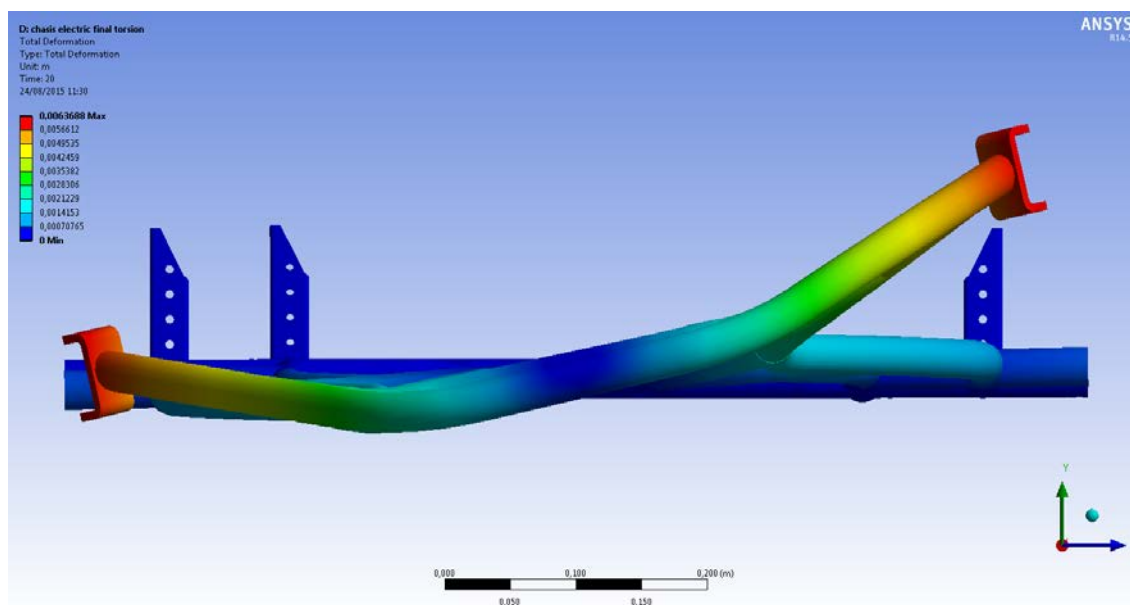


Figura 33. Vista frontal de la deformación del chasis eléctrico sometido a torsión.

En este otro caso los valores obtenidos son los siguientes:

Chasis	Eléctrico	
Fuerza vertical	F_v	500 N
Vía		714 mm
Momento torsor	M_{tors}	$3,57 \cdot 10^2$ Nm
Desplazamiento máximo		6,37 mm
Angulo de giro	θ_z	$1,78 \cdot 10^{-2}$ rad
Rigidez a torsión	K_{tors}	$2,00 \cdot 10^4$ Nm/rad

Como se puede observar el comportamiento en cuanto a torsión es muy similar, de hecho, tomando el valor de rigidez del chasis gasolina como el valor original, la diferencia de rigidez a torsión es inferior al 1%.

Gasolina	Eléctrico	Diferencia relativa
$2,01 \cdot 10^4$ Nm/rad	$2,00 \cdot 10^4$ Nm/rad	-0,36 %

Con este resultado se puede afirmar que el bastidor diseñado cumple con las exigencias mecánicas deseadas.

6.2.2. Sistema de dirección

A todo apasionado al mundo del motor le gusta un vehículo potente, con lo cual es necesario un buen sistema de dirección que permita al conductor dibujar la trazada y que le transmita todas las sensaciones del asfalto. En este apartado se va a comentar el sistema de dirección, de que elementos consiste y que requisitos debe cumplir.

En cuanto a sistemas de dirección hay que diferenciar entre dos tipos: de cremallera o de bieleta. El sistema de cremallera es más utilizado en vehículos como los turismos debido a una reducción de los esfuerzos al girar por la gran desmultiplicación que ofrece, ya que son vehículos pesados. En cambio, el sistema de bieleta es el usado en el mundo del karting y otros vehículos de competición ligeros ya que es más directo, simple y económico. El ratio de giro de cada sistema puede variar ya que depende del dimensionamiento de varios componentes. En este tipo de vehículos se busca una relación de 3:1 o 4:1, es decir, por cada 3 o 4 grados de giro del volante, las ruedas giran un grado. Se requiere este ratio porque es necesario realizar giros cerrados a altas velocidades. En cambio para un turismo con sistema de cremallera el ratio de giro es de 15:1 o 20:1, no es necesaria una dirección tan directa sino una más precisa.

Una vez sabido el sistema de dirección utilizado, hay que diferenciar las partes que lo componen y sus funciones:

- Volante: Es el elemento en contacto con el piloto, con el que se controla el grado de giro del vehículo.
- Columna de dirección: Se encarga de transmitir el giro del volante a la bieleta y también de soportar los esfuerzos de torsión generados por el piloto y por las reacciones debidas a la conducción.
- Bieleta: Es una pletina unida a la columna de dirección que transforma el movimiento giratorio en movimiento lineal. En función de la dimensión de la pletina aumenta o disminuye el ratio de giro.
- Tirantes: Encargados de transmitir el movimiento lineal de la pletina a los brazos de dirección.
- Brazo de dirección: Como su nombre indica traduce el movimiento de todo el sistema en un giro de la rueda. Está unido al chasis mediante un perno y una horquilla que le permiten pivotar.
- Rótulas: Son las encargadas de enlazar la bieleta, los tirantes y los brazos de dirección. Transmiten el movimiento lineal y a la vez permiten que la articulación pueda pivotar.



Figura 34. Elementos del sistema de dirección.

El requisito que debe cumplir este sistema es que el centro de giro de todas las ruedas converja en el mismo punto. Si esto no se produce el kart no gira o al girar derrapan las ruedas añadiendo esfuerzos al chasis y aumentando el desgaste de éstas. Para cumplir este requisito indispensable habrá que dimensionar los brazos de dirección. El criterio que se va a seguir para el éste dimensionado es el criterio de la geometría de Ackermann.

Cuando un vehículo de cuatro ruedas toma una curva cada rueda tiene su centro de giro en dirección a su propio eje, por lo tanto, las ruedas traseras tienen la posición del eje fija y las delanteras tienen el eje móvil. Además las ruedas delanteras giran diferentes grados ya que tendrán diferentes velocidades de giro, la rueda exterior gira menos que la rueda interior.

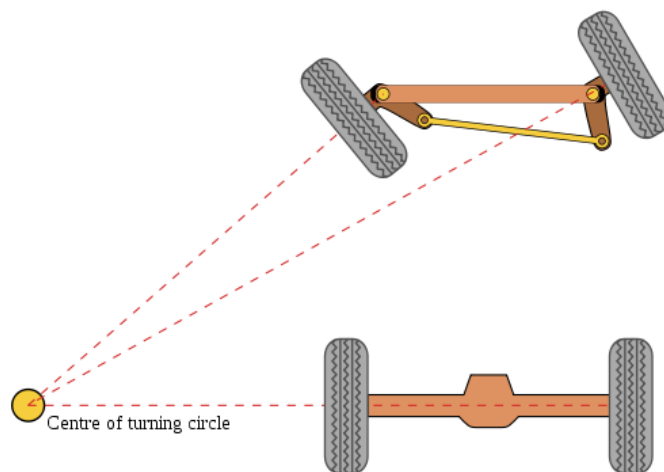


Figura 35. Centro de giro de un vehículo de 4 ruedas [8]

Como se puede ver en la figura éste es el giro deseado en un vehículo de 4 ruedas y para lograrlo hay que cumplir la geometría de Ackermann. Los brazos de dirección y los tirantes deben formar un trapecio con el eje delantero de tal manera que la prolongación de los brazos de dirección se entrecruce en el centro del eje trasero. Con la figura X se entenderá mejor el concepto:

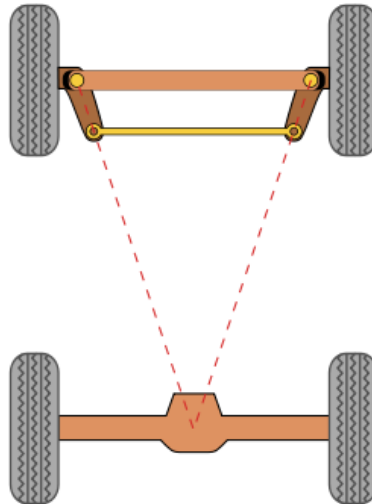


Figura 36. Criterio de Ackermann [8]

Por lo tanto, conociendo la longitud entre ejes (batalla) y entre ruedas delanteras (vía) ya se puede dimensionar el brazo de dirección, en concreto se va a dimensionar el ángulo que forma el propio brazo y que se muestra en la figura 37.

$$\alpha = 180 - \beta$$

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\text{batalla}}{\text{vía}/2} \right)$$

Como se ha visto en el apartado anterior:

$$\text{batalla} = 1010 \text{ mm}$$

$$\text{vía} = 714 \text{ mm}$$

Entonces:

$$\beta = 70,5^\circ$$

$$\alpha = 109,5^\circ$$

En la siguiente figura se puede ver el resultado final del brazo de dirección izquierdo

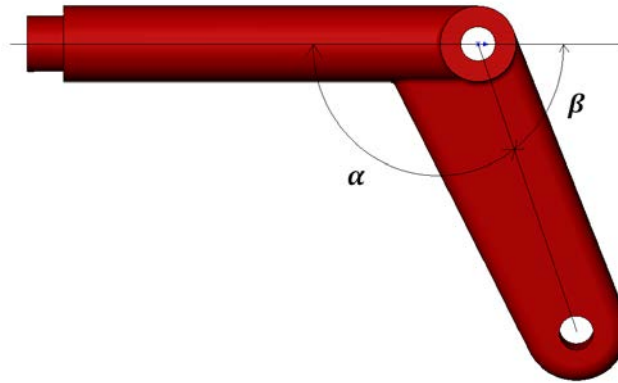


Figura 37. Brazo de dirección izquierdo

6.2.3. Estudio de fatiga del eje trasero

El eje trasero del prototipo es el mismo que se utiliza en karts convencionales y sus dimensiones principales son:

Dimensión	mm
Diámetro	50
Espesor	2
Longitud	1040

El reglamento de la RFEDA y la FIA solo indican el espesor mínimo a emplear en función del diámetro del eje y, para este caso el espesor mínimo es de 1,9 mm.

El eje trasero está sujeto al chasis mediante rodamientos, de manera que el único grado de libertad que tiene es la rotación sobre su propio eje. En un instante determinado, los esfuerzos que recibe el eje, ya sea por el peso o la tracción de las ruedas, harán que éste sufra unas ciertas tensiones. En el siguiente instante, las mismas tensiones se encontraran en puntos diferentes del eje porque éste habrá rotado. Por este motivo es importante estudiar la fatiga del eje trasero.

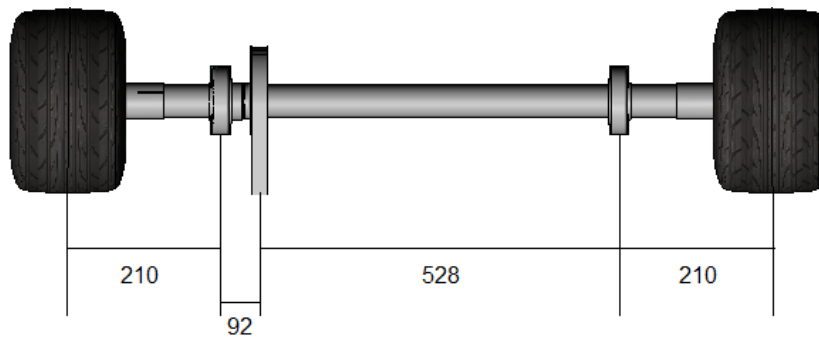


Figura 38. Medidas del eje trasero del prototipo.

A continuación se van a mostrar los esfuerzos que recibe dicho eje.

El eje trasero debe soportar una parte del peso del kart, aproximadamente entre el 50% y el 60% del peso total. Así pues, suponiendo una masa total de 250 kg, kart y piloto, y un reparto de peso del 55% sobre el eje trasero ($m_{et} = 250 \cdot 0,55$), las fuerzas del eje en este plano son las siguientes:

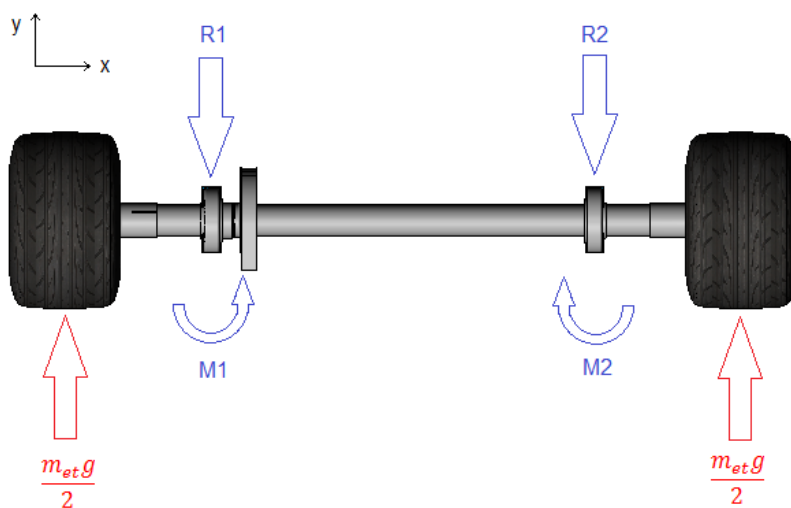


Figura 39. Diagrama de fuerzas del eje debido al peso.

Si se resuelve el sistema de ecuaciones se obtiene:

$$\frac{m_{et}g}{2} = 675 \text{ N}$$

$$R_1 = R_2 = -675 \text{ N}$$

$$M_1 = -M_2 = 141,75 \text{ Nm}$$

El diagrama de momento flector (M_z) correspondiente es el siguiente:

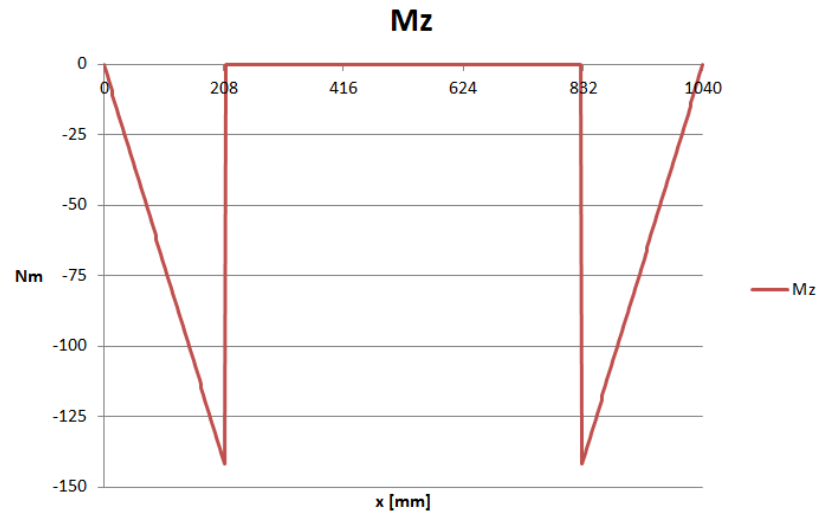


Figura 40. Diagrama de momento flector M_z en el plano XY.

Otro esfuerzo que debe soportar es el debido a la torsión en su propio eje, ya que la corona ejerce un par sobre el eje y las ruedas se contraponen a este par.

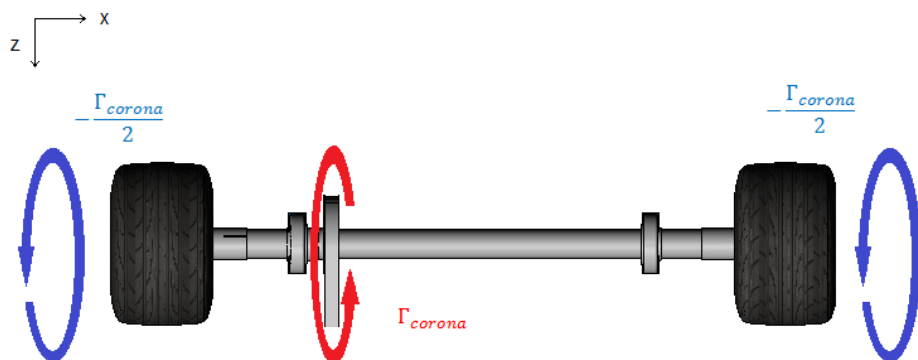


Figura 41. Diagrama de momentos de rotación del eje trasero del prototipo.

El par motor máximo obtenido en el simulador de la parte eléctrica del proyecto es $\Gamma_{motor} = 60,93 \text{ Nm}$, por lo tanto, con la relación de transmisión podemos conocer los valores de los esfuerzos:

$$\Gamma_{corona} = 3 \cdot \Gamma_{motor} = 182,79 \text{ Nm}$$

$$-\frac{\Gamma_{corona}}{2} = -91,395 \text{ Nm}$$

El diagrama del momento torsor (Mx) es el siguiente:

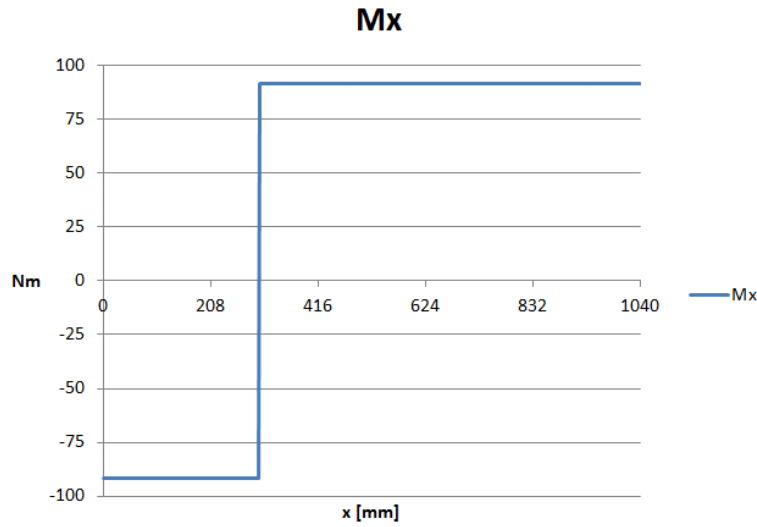


Figura 42. Diagrama de momento torsor Mx en el plano XZ.

Finalmente, debido a la tracción de las ruedas y la tensión de la correa, el eje recibe fuerzas en el eje z que también lo hacen flexionar:

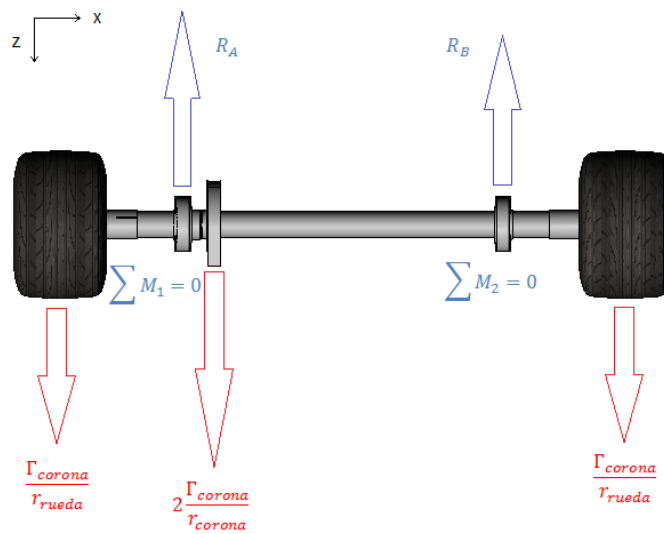


Figura 43. Diagrama de fuerzas debido a la tracción y la tensión de la correa.

El resultado de resolver el sistema de ecuaciones es el siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\Gamma_{corona}}{r_{rueda}} &= 1308,45 \text{ N} & 2 \frac{\Gamma_{corona}}{\Gamma_{corona}} &= 3046,5 \text{ N} \\ R_A &= -3902,89 \text{ N} & R_B &= -1760,51 \text{ N} \end{aligned}$$

El diagrama de momento flector (M_y) es el siguiente:

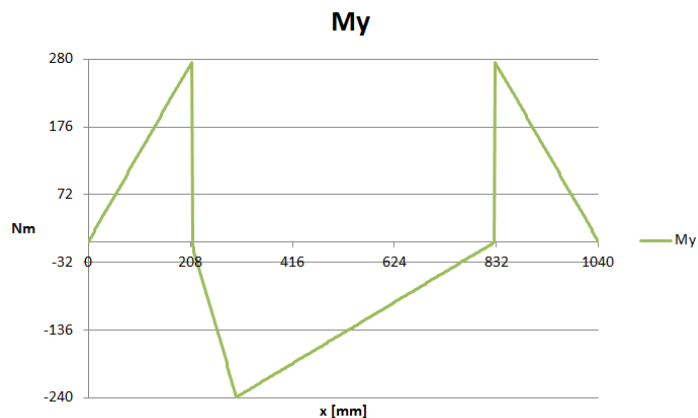


Figura 44. Diagrama de momento flector M_y en el plano XZ.

Si se sobreponen los tres diagramas se podrá determinar la sección crítica del eje, es decir, la que recibe mayor acumulación de esfuerzos.

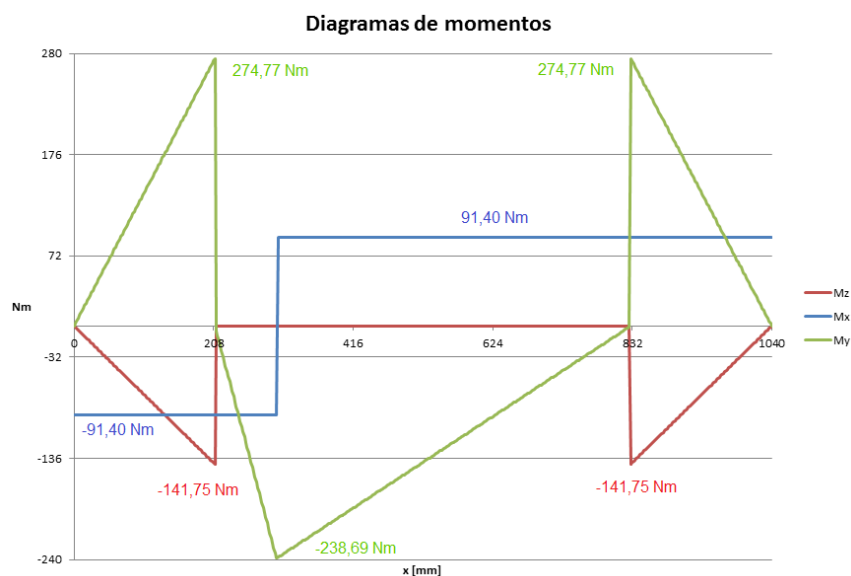


Figura 45. Diagrama de momentos acumulados en el eje trasero.

Como se puede ver en el gráfico, los dos puntos con mayor acumulación de momento son los soportes del eje, entonces éstas serán las secciones críticas.

De todos modos, el momento torsor producirá menores tensiones ya que los ejes tubulares reaccionan muy bien a estos esfuerzos debido a su momento de inercia. Además, éste momento es constante y por eso el estudio de fatiga se va a centrar en las tensiones producidas por el resto.

En la siguiente figura se puede observar cómo se distribuyen las tensiones generados por estos dos momentos flectores.

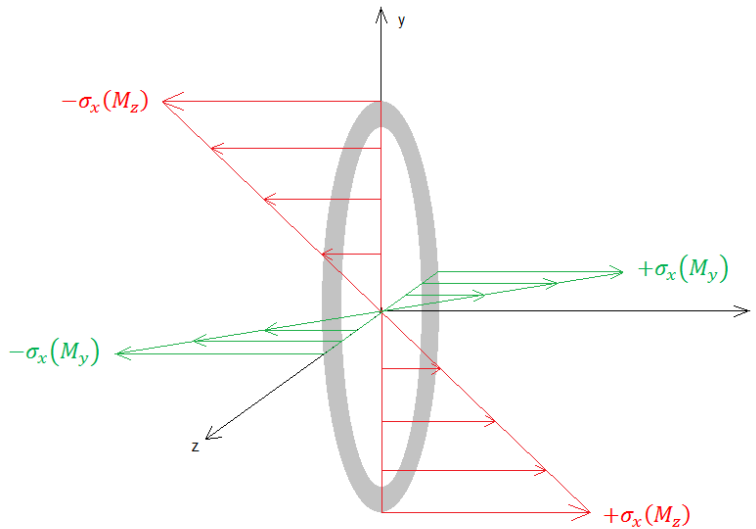


Figura 46. Distribución de tensiones en la sección crítica.

Estas tensiones se producen en planos diferentes y por lo tanto las tensiones máximas de tracción y compresión se encuentran en el plano intermedio, es lo que se denomina flexión desviada. La tensión máxima sufrida por el eje se calcula de la siguiente manera:

$$|\sigma_x \text{máx}| = \frac{\sqrt{M_y^2 + M_z^2}}{W}$$

Dónde:

$$M_y = 274,77 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

$$M_z = -141,75 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

$$W = \frac{I_z}{y_{\text{max}}} = \frac{I_y}{z_{\text{max}}} = \frac{\pi}{32} \frac{D^4 - d^4}{D} = \frac{\pi}{32} \frac{50^4 - 46^4}{50} = 3480,38 \text{ mm}^3$$

Entonces la tensión máxima de la sección crítica es:

$$|\sigma_x \text{máx}| = 88,83 \text{ MPa}$$

De hecho en la misma sección se producen tensión máxima de compresión y de tracción, por lo tanto la tensión máxima y mínima son:

$$\sigma_x \text{máx} = -\sigma_x \text{mín} = 88,83 \text{ MPa}$$

Por lo tanto el estado en que se encuentran los esfuerzos en el eje trasero se puede representar mediante un movimiento oscilante:

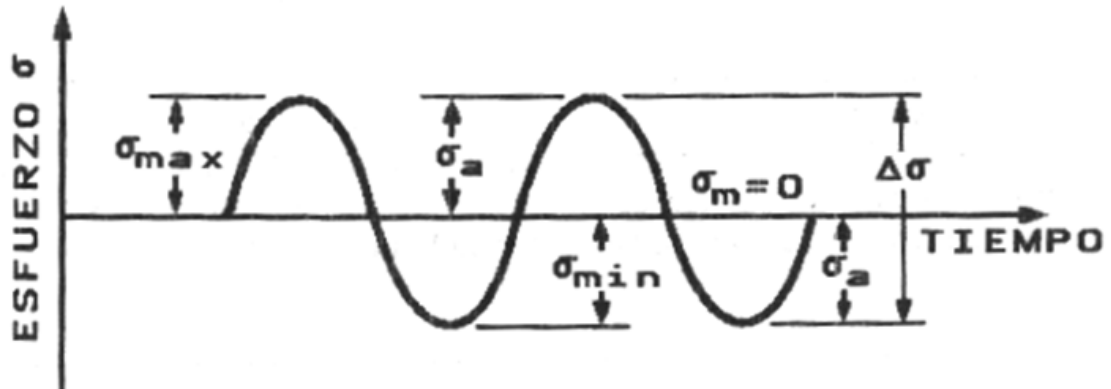


Figura 47. Oscilación de los esfuerzos debido a la rotación del eje [9]

En este caso, se dice que la relación del movimiento es de inversión completa ya que las tensiones máximas y mínimas son iguales pero de signos diferentes.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = -1$$

Una vez conocidos los valores en la sección crítica, se va a utilizar el teorema de Soderberg para analizar la fatiga del eje.

$$\sigma_a = \sigma_f \left(1 - \frac{\sigma_m}{\sigma_{yt}} \right)$$

Dónde:

σ_a es la tensión alterna, la amplitud de oscilación: $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} = 88,83 \text{ MPa}$

σ_m es la tensión media: $\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} = 0$

σ_{yt} es la tensión de resistencia a la tracción, en el caso de acero estructural es de 250 MPa.

σ_f es la tensión de fatiga.

La tensión media, incluso habiendo una tensión constante provocada por el momento torsor, se puede considerar cero porque experimentalmente “la torsión no afecta a la fatiga hasta que la resistencia de la fluencia a torsión se exceda aproximadamente un 50%”². Es decir, si

² George Sines, Diseño en Ingeniería Mecánica, Diseño de elementos mecánicos p. 732.

la tensión constante de torsión no supera el 50% del límite máximo a esfuerzo cortante (S_e), entonces se puede menospreciar:

$$\tau_{torsión} \geq 0,5 \cdot S_e \quad \rightarrow \quad \sigma_m = 0$$

$$\tau_{torsión} = \frac{M_x D}{I_0 2} = 13,13 \text{ MPa}$$

Dónde:

$$M_x = 91,40 \cdot 10^3 \text{ Nmm}$$

$$I_0 = \frac{\pi}{32} (D^4 - d^4) = 1,74 \cdot 10^5 \text{ mm}^4$$

Más adelante se muestra el valor de S_e y se comprueba que éste es superior a 26 MPa, aceptando así la premisa.

Si aislamos la tensión de fatiga de la ecuación del teorema de Soderberg, se obtiene:

$$\sigma_f = \sigma_a = 88,83 \text{ MPa}$$

En el siguiente diagrama se distinguen las dos zonas en las que se puede encontrar el eje:

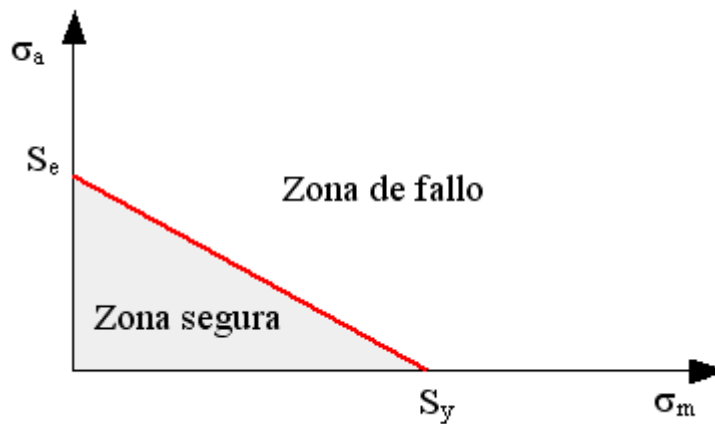


Figura 48. Diagrama de las zonas de trabajo de Soderberg [10]

Para determinar en qué situación se encuentra el eje, hay que determinar el valor de S_e o límite a la fatiga.

$$S_e = C_s C_t C_c C_{te} C_{ed} S'_e$$

Dónde:

C_s es el factor de superficie: $C_s = 4,51 \cdot \sigma_{ut}^{-0,265}$ por mecanizado en frío.

C_t es el factor de tamaño: $C_t = \left(\frac{d}{7,62}\right)^{-0,1133}$ si $2,79 \leq d \leq 51$ mm

C_c es el factor de carga, en este caso es 1 porqué se trata de cargas de flexión.

C_t es el factor de temperatura, 1 en este caso porque se trabaja por debajo de 450 °C.

C_{ed} es el factor de efectos diversos, se considera 1 en este caso ya que no hay presencia de corrosión, apriete, puntos de concentración de tensiones...

S'_e es el límite de fatiga de una probeta, en este caso de acero estructural: $S'_e = 0,5\sigma_{ut}$

Si se conoce que la resistencia última a la tracción (σ_{ut}) del acero estructural es de 460 Mpa, entonces se obtiene un valor del límite a la fatiga:

$$C_s = 0,8883$$

$$C_t = 0,8080$$

$$S'_e = 230 \text{ MPa}$$

$$S_e = 165,08 \text{ MPa}$$

Se puede concluir que la situación del eje se encuentra en la zona de trabajo según el criterio de Soderberg ya que se cumple que la tensión de fatiga (σ_f) es inferior al límite de resistencia a la fatiga (S_e).

Además, en caso de inversión completa ($R=-1$), Soderberg define el factor de seguridad de la siguiente manera:

$$FS = \frac{S_e}{K_f \cdot \sigma_a}$$

K_f es el factor de discontinuidades, que en este caso es 1 ya que no las hay. Entonces el factor de seguridad del eje es:

$$FS = 1,86$$

Como el valor es superior a 1 se reafirma que el eje se encuentra en la zona de trabajo y por lo tanto no se van a producir deformaciones debido a la fatiga.

6.2.4. Sistema de transmisión

El sistema de transmisión, como bien indica su nombre, es el encargado de transmitir el movimiento rotatorio del motor al eje que está unido a las ruedas, para que el vehículo pueda avanzar.

El parámetro de diseño más importante en este sistema es la relación de transmisión, ésta indica el número de vueltas que da el eje por cada vuelta del motor. La mayoría de automóviles están dotados de una caja de cambios que permite cambiar dicha relación en función de las necesidades de cada momento. Por ejemplo, con relaciones o marchas más cortas se consigue mayor par pero menor velocidad, perfecto para iniciar el movimiento, y viceversa, con relaciones o marchas más altas, adecuado para tramos de velocidad elevada. Pero no todos los karts tienen cambio de marchas, y en concreto el prototipo CMV solo posee una sola relación de transmisión.

En la parte de diseño eléctrico-electrónico de un kart eléctrico hecha por Miquel Balsells, se ha realizado un simulador de un kart dando vueltas en un circuito para estudiar todos los parámetros del motor: velocidad, aceleración, consumo... y también para escoger la relación de transmisión óptima para el prototipo. Los karts sin cambio de marchas suelen tener una relación entre 3 y 5, y para éste diseño se ha fijado en 3 porque se adaptaba mejor a las condiciones del circuito y también se logra cumplir con las especificaciones de velocidad máxima y aceleración del kart.

Una vez escogida la relación de transmisión hay que seleccionar los componentes que permitirán hacer esta relación posible. El sistema de transmisión está formado por tres elementos:

- Piñón o polea pequeña: Es el engranaje pequeño que une el motor con el resto del sistema y transfiere su movimiento y par mecánico.
- Cadena o correa: Si los engranajes no están en contacto directo es necesario un elemento de unión que comunique el movimiento de uno a otro, y de ello se encarga la correa o cadena. La diferencia entre éstas, principalmente, es el material que las forma.
- Corona o polea grande: Unida al eje trasero del kart mediante el porta-coronas es el engranaje grande que gira a la velocidad de las ruedas y permite así el avance.

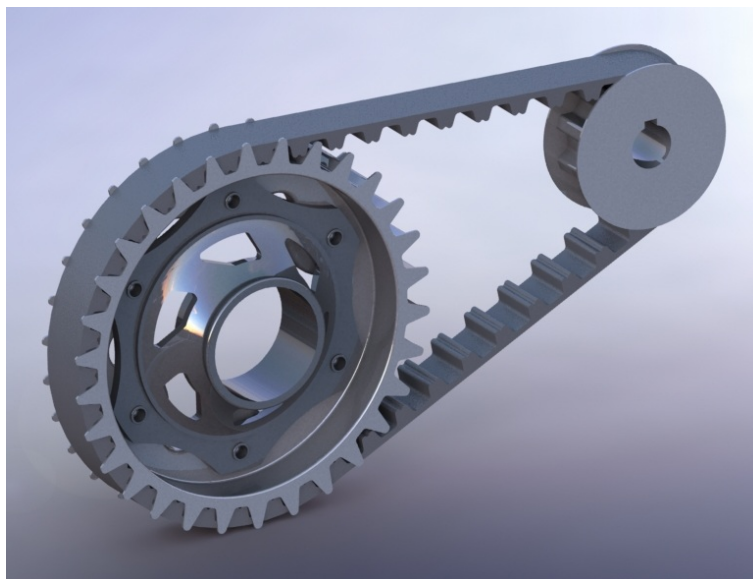


Figura 49. Elementos del sistema de transmisión del prototipo CMV.

El elemento a comentar es la cadena o correa ya que los demás componentes dependen de ella. Ambas están diseñadas para transmitir el movimiento mecánico entre ruedas dentadas, la principal diferencia es el material de construcción.

Las cadenas metálicas están formadas por eslabones unidos mediante pernos y las correas están hechas de cable metálico o de fibra y recubiertas de goma. Para tomar la decisión de que combinación utilizar fue importante la información obtenida durante la visita al karting eléctrico de Salou. La principal razón que dieron los propietarios fue que la cadena metálica precisa de mayor mantenimiento mediante el uso de aceites engrasantes que podían ensuciar las instalaciones y los pilotos.

También se ha realizado una tabla comparando las propiedades de cada una:

	Correa	Cadena
Ruido	BAJO	ALTO
Limpia	SÍ	NO (engrasada)
Durabilidad	MEDIA-ALTA	ALTA
Mantenimiento	NO	SÍ (engrasar y tensar)
Precio sistema	65-90 €	45-65€

Con la información de la visita y la conclusión que se obtiene de la tabla comparativa se puede ver que la correa de distribución es mejor opción. Aunque en la tabla aparezca que la cadena tiene mayor durabilidad, esta depende de su mantenimiento y eso también añade un coste. Una cadena puede durar la vida del motor pero si el mantenimiento es el adecuado, en cambio una correa puede sufrir desgaste y es probable que haya que realizar algún

recambio. No obstante, cada vez los materiales usados son mejores y por eso su vida útil se ve aumentada.

El siguiente paso es decidir qué tipo de correa es el adecuado para el prototipo. Las correas de distribución convencionales no son aptas para éstos casos porque funcionan mediante fricción por lo cual no son capaces de transmitir pares demasiado elevados ya que patinarían. Para la transmisión de un motor de kart es necesaria una correa dentada que transfiera el movimiento mediante la interferencia mecánica de los elementos dentados. Hay cuatro tipos de dentados principales:

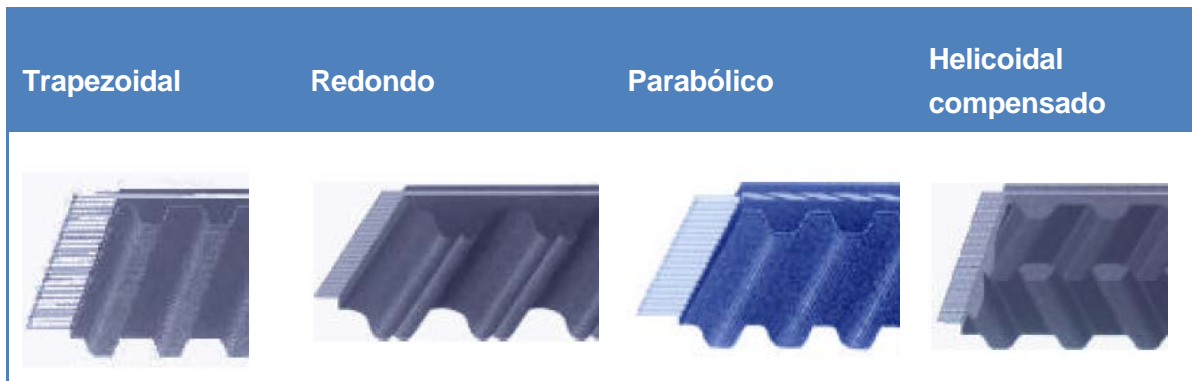


Figura 50. Correas dentadas del catálogo de DINAMICA Distribuciones S.A [11]

El dentado helicoidal compensado es la mejor opción porque con este tramado la correa no se desplaza lateralmente y es capaz de transmitir pares muy elevados ya que, al igual que el dentado parabólico, éste es el mejor para estas condiciones. Estos dos modelos están por encima de las exigencias de un sistema de transmisión de un kart y además son más caros que el resto.

El dentado trapezoidal y redondo son los dentados más universales, aunque el redondo ofrece mayor rendimiento. Por lo tanto, para el prototipo se ha escogido este segundo tipo de dentado.

La correa seleccionada es la 480 8MBH de la marca DINAMICA que está formada por cable de fibra de vidrio, que le aporta una excelente resistencia al estiramiento, y la parte dentada está formada de tejido de nylon y caucho.

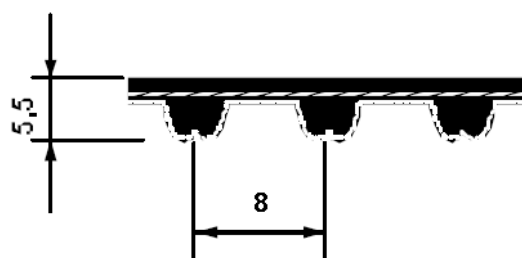


Figura 51. Dentado de la correa 480 8MBH [11]

Finalmente, para cumplir con la relación deseada los engranajes siguen la siguiente ecuación:

$$i = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{M_2}{M_1} = \frac{Z_2}{Z_1}$$

Dónde:

i es la relación de transmisión.

ω_n es la velocidad de giro del engranaje n .

M_n es el momento que transmite el engranaje n .

Z_n es el número de dientes del engranaje n .

Viendo la ecuación que siguen los engranajes es más fácil entender lo comentado anteriormente, que con relaciones pequeñas se transmite poca velocidad y mucho par y viceversa. Si se entiende que el engranaje 1 es la polea pequeña que gira a la velocidad del motor y que el 2 es la polea grande que gira a la velocidad del eje de las ruedas traseras, escogiendo el número de dientes de una ya es posible diseñar o seleccionar la otra. Por lo tanto, si se escoge una polea pequeña de 10 dientes:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{Z_{pol.grande}}{Z_{pol.pequeña}} = 3 \\ Z_{pol.pequeña} = 10 \end{array} \right\} \boxed{Z_{pol.grande} = 30}$$

Las poleas del prototipo han sido diseñadas especialmente para el modelo, pero el mismo proveedor de correas también ofrece estos elementos.

6.2.5. Sistema de frenado

En este apartado se va a explicar en qué consiste el sistema de frenado de un kart. Todo vehículo debe tener un sistema para detenerlo, ya sea para desacelerar para tomar una curva o bien para quedarse parado del todo. También es uno de los principales sistemas de seguridad.

Primero de todo se van a comentar diferentes tipos de sistemas de frenado como frenos de tambor, de pinzas y de disco. Una vez conocidos se va a escoger cual va a ser el utilizado por el prototipo y se explicara el sistema más en detalle. Finalmente se realizará un cálculo de los esfuerzos que se generan en una frenada.

Para empezar hay que distinguir entre tres tipos de sistemas de frenado diferentes:

- Freno de tambor: En este tipo de frenos la fricción se genera por un par de zapatas que están en el interior de un tambor giratorio unido al eje o directamente a la rueda. Es utilizado tanto en turismos como en motocicletas, aunque se usa para modelos más económicos.



Figura 52. Freno de tambor descubierto [12]

- Freno de llanta: La fricción se genera directamente en la llanta mediante unas almohadillas de goma que ejercen presión sobre ella. Normalmente se activan con una palanca y un cable de acero. El ejemplo más común son los frenos de bicicleta.



Figura 53. Sistema de frenado de una bicicleta DURA-ACE [13]

- Freno de disco: Consiste en un disco unido al eje de la rueda que se frena mediante la fricción de dos pastillas que comprimen el disco. Estos frenos son los más utilizados tanto en coches y motos de uso cotidiano como de competición.



Figura 54. Disco y pinza de freno [14]

En los kartings los frenos más utilizados son los de disco de freno, pero hay varias configuraciones posibles para este sistema. Los discos de freno pueden ir situados en:

- 4 discos de freno, uno en cada rueda
- 2 discos de freno, ambos situados en el eje trasero
- 1 disco de freno, situado en el eje trasero

La manera de conducir más eficiente y veloz para un kart es prescindiendo del uso del freno, para un kart cualquier maniobra que suponga una desaceleración excesiva supone una pérdida de tiempo, ya sea por frenar o derrapar. Con una relación de transmisión corta se alcanza menor velocidad, por eso con la configuración de un solo freno trasero ya se logra un buen nivel de frenado. Además es el sistema más usado en karts de recreo.

El siguiente paso es explicar el funcionamiento de todas las partes del sistema:

- La frenada se inicia cuando el piloto activa el pedal de freno tensando un cable que va dirigido a la bomba de freno.
- Esta bomba hidráulica mediante un pistón genera presión en el líquido de frenos que va conectado a las pinzas de freno.
- Las pinzas de freno consisten en unos pistones que ejercen la presión recibida por la bomba hidráulica.
- Finalmente, las pastillas de freno montadas sobre las pinzas comprimen el disco que está girando y transforman la energía cinética de éste en calor debido a la fricción.
- El disco tiene que soportar tanto las tensiones que se generan como el aumento de temperatura, por eso hay diferentes tipos de discos: macizos, perforados o ventilados. Para un kart suelen usarse discos sólidos o perforados ya que son más económicos.



Figura 55. Disco de freno macizo, perforado y ventilado [15]

Entonces para el prototipo CMV se ha escogido un sistema a de freno de un solo disco perforado situado en el eje trasero. El disco tiene un diámetro de 200 mm y un espesor de 6 mm y está fabricado de acero.

Las pastillas de freno y su material también es un factor a tener en cuenta ya que de ello dependerá la capacidad de frenada y la durabilidad de éstas.

Antes de estudiar la composición de las pastillas hay que conocer los requisitos básicos:

- Coeficiente de fricción adecuado y estable. No debe variar en función de temperatura y presión.
- Equilibrio entre resistencia al desgaste y abrasión.
- Buena compresibilidad y estable tanto en frío como en caliente.
- Capacidad de absorción de vibraciones e imperfecciones.

A pesar de que su composición está formada por 15 o 20 componentes distintos, estas se clasifican en tres tipos:

- Cerámicas: Hechas de cerámica y fibra de cobre, trabajan muy bien a altas temperaturas y tienen una muy buena recuperación. Adecuadas para deportes de alta competición.
- Orgánicas: Compuestas de grafito, resinas y fibras. Alta calidad y adherencia al frenar pero menor durabilidad.
- Metálicas: Materiales metálicos como el hierro, de alta duración y poca variación entre trabajo en seco o mojado.



Figura 56. Ejemplo tipos de pastillas de freno: cerámica, orgánica y metálica [16] [17] [18].

En un prototipo de kart diseñado para uso recreativo lo deseado es unas pastillas de freno polivalentes, duraderas y económicas; por lo tanto el modelo que más se ajusta a estas características es el metálico o también conocido como ferodo. En concreto el coeficiente de fricción medio que tienen las pastillas de freno son de $\mu_{pastilla} = 0,3$ en contacto con el disco.

Finalmente se va a estudiar que esfuerzos recibe el disco de freno, que es la parte más delicada de todo el sistema, bien sean esfuerzos de tensión o de compresión.

Primero de todo, de la simulación realizada por el compañero Miquel Balsells se extraen los siguientes datos (ya en unidades SI) necesarios para el estudio:

Datos de la simulación		
Velocidad máxima del kart	V_{kart}	16,31 m/s
Massa total (kart + piloto)	m_T	250 kg
Velocidad rotación eje trasero	W_{eje}	116,49 rad/s

Tensión del disco

La desaceleración máxima que se puede conseguir es justo antes de que los neumáticos se deslicen sobre el pavimento. Se va a suponer el peor caso posible para el cálculo. Se tomará el máximo coeficiente de fricción del neumático ($\mu_{neum} = 1,2$) y que el reparto de peso del eje trasero es constante e igual a 2/3 de la masa del kart. La ecuación de frenada es la siguiente:

$$a_{fren\ max} \cdot m_T = \mu_{neum} \cdot N = \mu_{neum} \cdot \frac{2}{3} m_T \cdot g$$

Sabiendo que g es la constante gravitatoria 9,81 m/s², el valor de la aceleración de frenada máxima es:

$$a_{fren\ max} = 0,8g = 7,85\ m/s^2$$

El siguiente paso es calcular la fuerza que reciben las ruedas al frenar:

$$F_{ruedas} = m_T \cdot a_{fren\ max} = 1962\ N$$

Igualando el par realizado por las ruedas con el realizado por el disco, se obtiene la fuerza horizontal que recibe el disco:

$$F_{ruedas} \cdot r_{rueda} = F_{disco} \cdot r_{med\ disco}$$

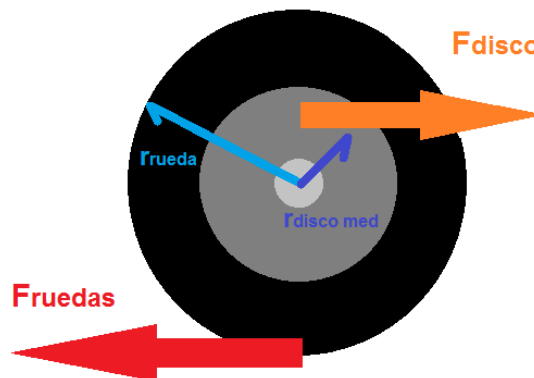


Figura 57. Diagrama de fuerzas en el sistema ruedas y disco de freno.

Donde radio de la rueda es de 0,14 m y el radio medio del disco es el punto medio donde actúa la pinza de freno y es de 0,09 m. Con estos valores, se obtiene la siguiente fuerza media del disco:

$$F_{disco} = F_{ruedas} \cdot \frac{r_{rueda}}{r_{med\ disco}} = 3010,20\ N$$

Con la sección transversal del disco se puede calcular la tensión normal que recibe en estas condiciones:

$$\sigma_x = \frac{F_{disco}}{S_{trans}} = \mathbf{28,67\ MPa}$$

Dónde:

$$S_{trans} = (r_{exterior} - r_{interior}) \cdot e = (100 - 82,5) \cdot 6 = 105\ mm^2$$

Como ya se ha comentado anteriormente el material que compone el disco de freno es el acero y en la siguiente tabla se obtiene cuál es su resistencia a la tracción:

Material	Acero
Resistencia a la tracción	$2,5 \cdot 10^8\ Pa$

Dado que el este valor de resistencia es casi diez veces superior al valor de tensión obtenido, se puede determinar que no es suficiente para generar deformaciones en el disco de freno.

Compresión del disco

Para calcular la fuerza de compresión de las pastillas se utilizó la ecuación de la energía disipada al frenar:

$$\dot{W}_{disipada} = 2F_p \cdot \mu_{pastilla} \cdot v_{med\ disco}$$

Sabiendo que la velocidad media del disco es la velocidad de rotación del eje por el radio medio del disco:

$$\dot{W}_{disipada} = 2F_p \cdot \mu_{pastilla} \cdot \omega_{eje} \cdot r_{med\ disco}$$

Es necesaria la ecuación de la energía de desaceleración para poder aislar el valor de la fuerza de compresión:

$$\dot{W}_{desaceleración} = m_T \cdot a_{fren} \cdot v_{kart}$$

Igualando las energías se puede determinar el valor de la fuerza:

$$\dot{W}_{disipada} = \dot{W}_{desaceleración}$$

$$F_p = \frac{m_T \cdot a_{fren} \cdot v_{kart}}{2 \cdot \mu_{pastilla} \cdot w_{eje} \cdot r_{med\ disco}} = 5016,15 \text{ N}$$

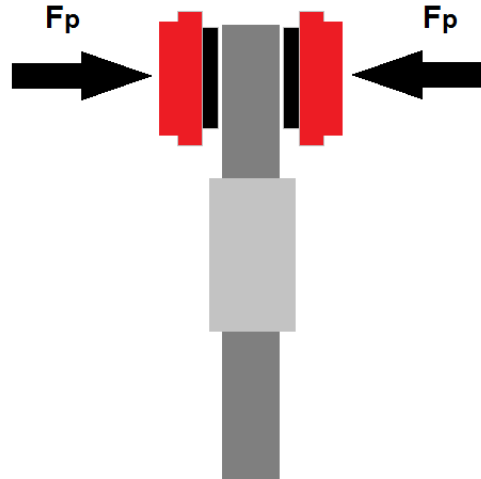


Figura 58. Diagrama de fuerzas de compresión de las pinzas sobre el disco.

Finalmente es necesario dividir por la superficie de la pastilla de freno para obtener el valor de la presión que ejercen:

$$P_p = \frac{F_p}{S_p} = 3,26 \text{ MPa}$$

La superficie sobre la cual actúan las pastillas es $S_p = 1536,5 \text{ mm}^2$

El acero es más resistente a la compresión que a la tracción, por lo tanto en este caso se puede ver que el disco no va a sufrir deformaciones. Simplemente este valor es interesante en cuanto a determinar la presión que debe generar la bomba de freno.

El sistema completo de freno utilizado es el de la casa Karts Francis con referencia [KFS4634].

En éste proyecto solo se ha dimensionado a nivel dinámico ya que los componentes elegidos para el prototipo se encuentran actualmente en el mercado, pero el cálculo de la carga térmica que recibe el disco sería interesante para una extensión del proyecto, ya que al tener mayor peso el kart, la disipación térmica también es más elevada.

6.2.6. Llantas y neumáticos

Un kart es un vehículo de 4 ruedas y cada una de estas está formada por una llanta y un neumático:

- Llanta: Es la parte rígida que va unida al eje o buje y su función es hacer de base del neumático y permitir el giro de la rueda.
- Neumático: Es la parte blanda de goma que está en contacto directo con el asfalto y su función es lograr una buena adherencia para tener tracción y no patinar en las curvas.

Para cada kart se usan dos juegos de ruedas uno delantero y otro trasero ya que las medidas son diferentes. Las medidas de las ruedas se expresan de la siguiente manera:

$$A \times B - C$$

Dónde:

A es el diámetro del neumático en pulgadas.

B es el ancho de banda de rodadura del neumático en pulgadas.

C es el diámetro de la llanta en pulgadas.

Así pues los neumáticos más comunes son:

Neumático	Medidas (pulgadas)	Medidas (mm)
Delantero	10x4,0 – 5	254x101,6 – 127
	10x4,5 – 5	254x114,3 – 127
Trasero	11x6,0 – 5	279,4x152,4 – 127
	11x7,1 – 5	279,4x180,34 – 127

Normalmente para mayor agarre, en seco se escogen los neumáticos con mayor ancho de banda y en mojado con menor ancho de banda, ya que con menor ancho el drenaje del agua es mejor.

El diámetro máximo de la llanta es de 5 pulgadas por reglamentación de la RFEDA y FIA.

La presión del aire dentro del neumático es un factor que va muy ligado al agarre de los neumáticos y con tamaños diferentes se aplica presiones diferentes:

Neumático	Presión (bar) ³
Delantero	0,7 – 1,1
Trasero	0,75 – 1,2

No obstante, la presión varía con la temperatura y durante la marcha del kart los neumáticos se calientan. Además, encontrar la presión adecuada depende de muchas variables: del piloto y su estilo de conducción, de la superficie del asfalto, del clima, del casi y la distribución de peso, etc.

El siguiente paso es elegir el tipo de llanta a usar en función del material. Principalmente el material usado debe tener tres propiedades físicas:

- **Baja densidad:** El material debe ser ligero ya que reducir el peso de las ruedas es muy importante para favorecer una buena aceleración del kart, ya que el motor debe vencer la inercia de las ruedas y estas giran a altas velocidades.
- **Buena rigidez:** Como ya se ha comentado debe tener una buena rigidez para soportar bien los esfuerzos recibidos durante el pilotaje y no deformarse.
- **Alta conductividad térmica:** Una buena conductividad térmica permite que la temperatura acumulada por los neumáticos, debido a la fricción y rodadura con el asfalto, se disipada. Esto favorece la conducción ya que la temperatura altera la presión de los neumáticos.

Los dos materiales más usados son el aluminio y el magnesio:

Material	Densidad	Rigidez	Cond. térmica
Aluminio	2698 kg/m ³	2,6·10 ⁴ MPa	237 W/(K·m)
Magnesio	1738 kg/m ³	1,7·10 ⁴ MPa	156 W/(K·m)

El magnesio presenta menor densidad, pero el aluminio es mejor en rigidez y conductividad térmica. No obstante, se utilizan mucho las llantas de aleación de magnesio ya que la reducción de peso es entorno al 35% y permite acelerar más rápido. Además, se aconsejan para condiciones de lluvia ya que mantienen mejor la temperatura de los neumáticos. Pero para un kart de ocio el factor más importante es el precio, y las llantas de magnesio son más caras:

³ Las unidades de presión del Sistema Internacional es el Pa, pero en cuanto a presión del aire del neumático la unidad más usada en España. 1 bar = 10⁵ Pa.

Material	Precio
Juego de llantas de aluminio	140 – 150 €
Juego de llantas de magnesio	180 – 200 €



Figura 59. Llanta de aluminio y llanta de magnesio de la marca Douglas [19]

Para terminar con las ruedas y empezar a rodar por el asfalto hay que hablar de los neumáticos. Éstos están formados principalmente de caucho pero hay que distinguir entre sus partes:

- **Banda de rodadura:** Es la parte superior del neumático y es la que proporciona el agarre en la pista. El dibujo de la banda depende de si el neumático es de seco o de lluvia. La dureza de esta parte juega un papel importante ya que entran en juego términos de agarre y durabilidad. Una banda de rodadura blanda ofrece mayor agarre y a la vez mayor desgaste y al contrario, una más dura presenta menor agarre pero mayor durabilidad.
- **Perfil o lateral:** Esta parte debe ser más rígida y menos elástica porque soporta grandes fuerzas laterales durante la conducción, debe contrarrestar oscilaciones y evitar la deformación del neumático. Normalmente incluye la información del neumático: compuesto, medidas, fabricante...
- **Carcasa o armazón:** Es la parte interior del neumático y sirve de soporte, por lo tanto debe ser rígido para evitar que se deforme. Está formado por capas de cuerda de rayón, nylon o polyester.
- **Talón:** Es la parte que está en contacto con la llanta. La función principal del talón es formar una conexión rígida con la llanta para transmitir bien los esfuerzos de la conducción y garantizar el sellado para que no se produzcan pérdidas de presión del aire.

Como ya se ha comentado en la banda de rodadura se distinguen diferentes tipos de neumático en función de las condiciones del asfalto:

- Slick: Son los neumáticos de seco y no presentan dibujo en la banda de rodadura. Toda la superficie está dedicada al agarre y la tracción.
- Lluvia: Cuando el neumático pasa por encima del asfalto mojado a cierta velocidad es posible que se pierda el contacto con éste y por lo tanto el kart planea sobre el agua o patina. Por este motivo es importante que la banda de rodadura del neumático de lluvia tenga capacidad suficiente para drenar el agua asegurando el contacto entre la goma y el pavimento.



Figura 60. Neumático slick y neumático de lluvia de la marca Hoosier [20]

El agarre de los neumáticos depende de muchos factores: compuesto de la goma, presión del aire, temperatura y el estado del asfalto. El coeficiente de fricción es la medida de este agarre y la fuerza máxima de agarre de un neumático, es decir antes de que se deslice, se expresa de la siguiente manera:

$$F = \mu_{neumático} \cdot N$$

La N es la fuerza normal que recibe la rueda del suelo y es igual al peso por la gravedad. En función del repartimiento del peso cada rueda tendrá un agarre mayor o menor. El reparto de pesos puede variar lateralmente y entre ejes, habitualmente el reparto lateral es del 50 – 50, es decir, las ruedas de un lateral reciben el mismo peso que las del otro lateral. El objetivo es que el centro de masas esté centralizado, aunque el reparto de pesos entre eje delantero y trasero puede llegar al 40 – 60. Colocar el centro de gravedad más cercano al eje trasero favorece a la tracción de las ruedas traseras. Por lo tanto, una distribución del 45 – 55 sería una buena opción ya que de este modo no se pierde tanto agarre en las ruedas directrices.

El coeficiente de fricción de un neumático en el rango de velocidades del prototipo (velocidad máxima entre 50 km/h y 60 km/h) es el que se muestra en la siguiente tabla:

Neumático	Seco	Húmedo
Nuevo	0,8 – 1,2	0,5 – 0,8
Usado	0,6 – 0,8	0,45 – 0,7

Ahora se entiende mejor porqué se ha utilizado un coeficiente de fricción del neumático de 1,2 en el apartado del sistema de frenado, porque el caso de frenada más exigente es con un neumático nuevo de calidad y en seco.

Las ruedas utilizadas para el prototipo son las formadas por los neumáticos VEGA SL4 y las llantas de aluminio Douglas 41130V y 41180V ya que se ajustan al precio y prestaciones que requiere el prototipo.

6.2.7. Soportes

Este apartado incluye la descripción de las estructuras usadas para conectar los elementos eléctricos escogidos por el compañero Miquel Balsells y que se han comentado en el apartado de desglose. Esta configuración de elementos es totalmente nueva, por lo tanto la ubicación de éstos junto con los soportes se ha pensado y diseñado desde cero. En concreto se van a comentar los siguientes soportes:

- Soporte motor
- Soporte de baterías
- Soporte de controladores

Soporte de motor

En el desglose ya se ha mostrado el motor eléctrico utilizado en este prototipo, el Agni 143. Este motor tiene un diámetro exterior de 206 mm y un peso de 11 kg, con estas características es importante pensar la ubicación ya que interesa que el centro de gravedad del kart sea bajo y centrado.

Inicialmente, como ya se ha visto en otros modelos de kart eléctrico, se iba a colocar el motor en la parte posterior y así dejar los espacios laterales para las baterías, pero de este modo el motor quedaba muy elevado porque tendría que haber ido por encima del eje trasero. Finalmente se ubicó en el lado derecho del kart cercano a la rueda posterior para minimizar la distancia entre engranajes y así disminuir la longitud de la correa.

El soporte del motor se ha construido específicamente para este modelo y sigue las

siguientes características:

- Dos paneles abiertos para permitir la rotación de las partes móviles del motor.
- Sujeción frontal y posterior mediante tornillos de 6 mm de diámetro.
- Dos placas laterales para asegurar la estabilidad y evitar vibraciones.
- 7 puntos de anclaje a los tubos del chasis mediante una parte inferior atornillada a la superior.
- Todas las placas de aluminio son de 10 mm de grosor.

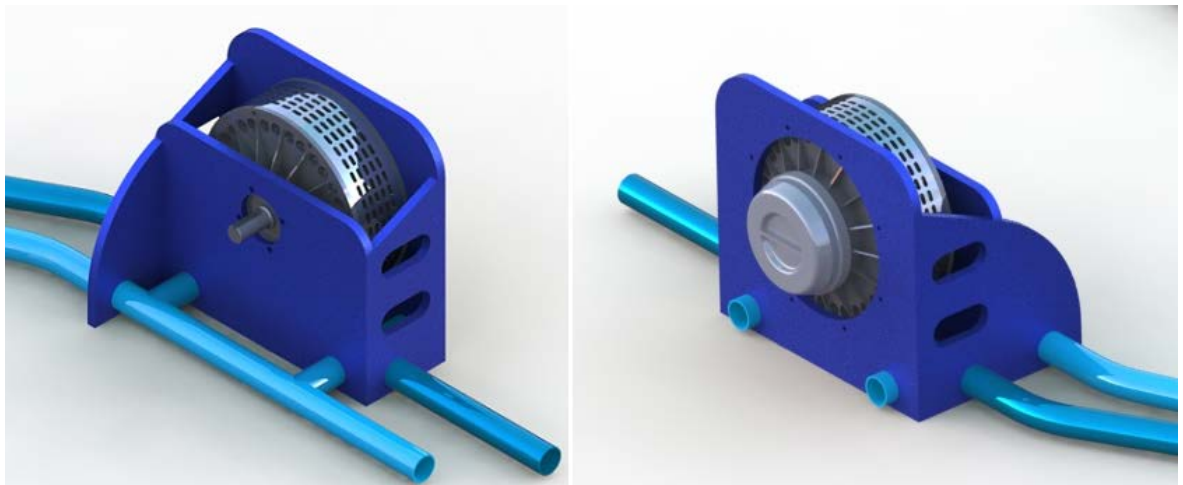


Figura 61. Vistas isométricas del soporte motor y del motor colocados en el chasis.

Soportes baterías

Las baterías son la fuente de energía del motor, es como el depósito de gasolina en un kart convencional. En éstos se coloca el depósito entre el soporte de la columna de dirección y la misma columna, pero su capacidad es de un máximo de 8 – 9 litros de gasolina. En cambio, para suministrar los 72 V necesarios para el motor se necesitan 24 celdas con las siguientes características:

Celda	Voltaje	Peso	Dimensiones
CALB (BAT-CA040FI)	3,2 V	1,5 kg	46 x 116 x 181 mm

Esto implica que las 24 celdas ocupan un volumen de 23,18 litros y un peso de 36 kg, entonces hay que buscarles otra ubicación.

Los laterales del chasis ofrecen una superficie adecuada y reforzada ya que hay doble tubo en cada lado. Pero no hay el mismo espacio ya que a la derecha se encuentra el motor, por

lo tanto no se pueden hacer dos bloques de celdas del mismo tamaño. Otra opción era colocar algunas celdas en la parte trasera logrando conjuntos de celdas más compactos en los laterales, pero eso implicaba retrasar el centro de gravedad y alargar la carrocería y el parachoques.

Definitivamente, la distribución es la siguiente:

- Conjunto de 4x2 celdas en el lado derecho.
- Conjunto de 4x4 celdas en el lado izquierdo.

De este modo el reparto lateral de pesos queda en 23 kg en el lado derecho (contando el motor) y 24 kg en el lado izquierdo.

El último paso es diseñar dos soportes que contengan cada conjunto y los unan al chasis. Para ellos se ha creado una especie de bandeja con soportes a cada lateral para que el conjunto de celdas se mantenga compacto y no haya movimiento entre ellas. También se ha realizado un diseño lo más abierto posible ya que los elementos eléctricos y en especial las baterías tienden a aumentar su temperatura, por lo que la refrigeración es un factor importante. El material escogido es el aluminio porque es más ligero que el acero y es un buen conductor térmico, para favorecer la disipación del calor.

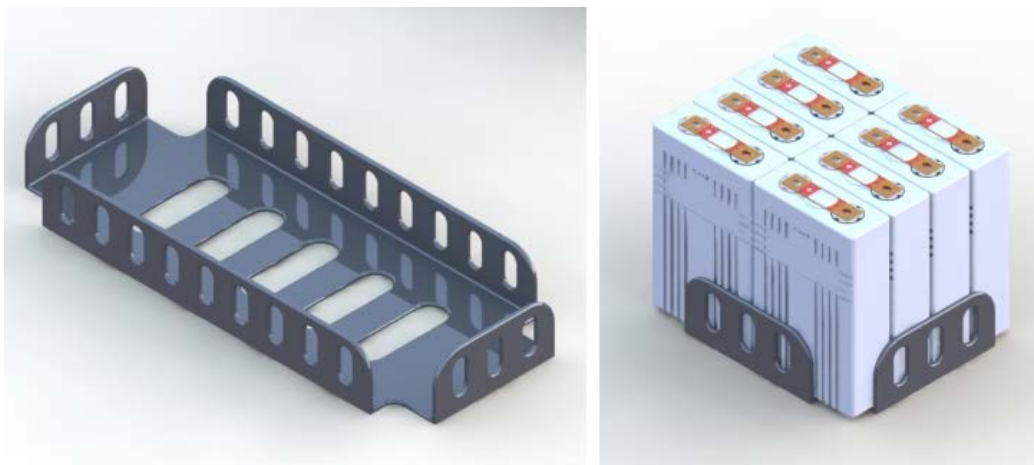


Figura 62. Soporte izquierdo y conjunto de baterías del lado derecho del prototipo.

Soporte controladores

Una vez distribuidos todos los elementos pesados y de mayor volumen era necesario colocar el controlador Kelly y la unidad master del BMS. El lugar más cercano al motor y baterías es el situado justo detrás del asiento del conductor y por debajo del eje trasero,

espacio suficiente para los controladores.

El problema es como sujetar el soporte y como refrigerar los componentes, ya que el Kelly necesita cierta convección para no llegar a temperaturas demasiado altas. La solución encontrada es hacer un soporte en el cual:

- La mitad del Kelly está abierta por debajo y este se fija bocabajo para aprovechar al máximo la convección, porque si no entre asiento y carrocería no recibiría suficiente ventilación.
- La otra mitad está cubierta por todos lados pero con orificios para permitir la circulación del aire.
- La sujeción es mediante la utilización de los tubos laterales auxiliares del chasis.

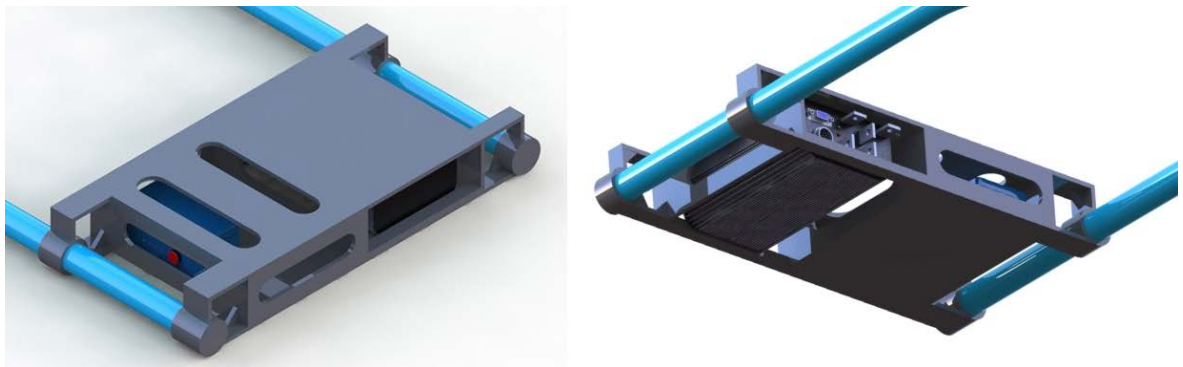


Figura 63. Vistas del soporte de controladores y el controlador Kelly.

7. ESTUDIO ECONÓMICO

Nuestra consultoría ha aceptado el proyecto de diseño conceptual de un nuevo modelo de kart eléctrico a través de una empresa externa. El estudio económico consistirá fundamentalmente en la facturación de la consultoría en concepto de: horas trabajadas, gastos en viajes, compra de normativa o de licencias de software.

De esta forma, se presenta dicha factura, dónde se detallarán:

- Horas de ingeniería: Se desglosarán todas las horas dedicadas en subgrupos según la tarea realizada. Se detallará también el precio por hora facturado por cada una de ellas, así como el coste final de cada uno de los conceptos.
- Licencias de software: Se calculará el precio de las licencias de CAD y FEA en función de las horas de uso.
- Otros conceptos: Se detallará el precio dedicado a la visita al Karting de Salou.

HORAS DE INGENIERÍA			
Concepto	Horas	Precio/hora	Coste total
Búsqueda de información general	15	30 €	450 €
Análisis de mercado	10	30 €	300 €
Búsqueda de información especializada	50	40 €	2000 €
Diseño 3D Asistido por Ordenador	120	50 €	6000 €
Análisis de Elementos Finitos	40	80 €	3200 €
Redacción del informe	50	25 €	1250 €
Reuniones	15	30 €	450 €
Trabajo de campo (visitas y dietas)	10	60 €	600 €
HORAS DE INGENIERÍA	310		14250 €
LICENCIAS			
Concepto	Horas	Precio/hora	Coste total
Licencia SolidWorks 2014-2015	120	1,65 €	198 €
Licencia ANSYS Workbench v14.5	40	2,15 €	86 €
LICENCIAS	160		284 €
OTROS			
Concepto			Cost total
Trayecto			60 €
Visita Electric Karting Salo Material medición			50 €
Tandas realizadas			40 €
OTROS			150 €
TOTAL			14684 €

8. IMPACTO AMBIENTAL

Cada vez la sociedad está más concienciada con el cuidado del medio ambiente y con el impacto que tienen sobre él, por estos motivos actualmente se intenta que los productos que salen al mercado sean lo más sostenible posible.

Atendiendo a esto, se ha procurado diseñar un kart eléctrico que no contenga componentes con productos tóxicos o peligrosos para el medio ambiente. Aun así, la fabricación y utilización de este kart no estará exenta de emisiones de productos contaminantes a la atmósfera, ni de producción de productos radioactivos.

Dos motivos principales son los que dan explicación a esto, motivos los cuales están fuera del alcance de los diseñadores:

- Emisiones en la producción y transporte de componentes: Durante el proceso de fabricación y el transporte de los componentes, se generaran emisiones de CO₂ y otros productos contaminantes en cantidades difícilmente cuantificables.
- Impacto ambiental por el uso de los karts: La producción de energía eléctrica genera emisiones de productos contaminantes en la atmósfera porque, en España como en la mayoría de países, la energía eléctrica proviene de fuentes no renovables.

En el estudio de Mayo de 2015 realizado por el grupo WWF sobre las emisiones de productos contaminantes, se extrae que por kWh de energía eléctrica generado se producen:

Producto	Cantidad (g/kWh)
Dióxido de carbono (CO₂)	170
Dióxido de azufre (SO₂)	0,380
Óxidos de nitrógeno (NO_x)	0,263
Residuos radiactivos	0,263·10 ⁻³

Según el simulador realizado por el compañero de proyecto Miquel Balsells, el prototipo consume 0,033 kWh en una vuelta al circuito (300 m/vuelta), entonces la emisión indirecta de CO₂ que supone es de 18,7 g/km.

No ha sido posible hallar las emisiones de CO₂ de un kart convencional para verificar que el eléctrico es realmente sostenible. No obstante, un kart eléctrico no produce emisiones directas de ningún tipo y eso es muy importante ya que se evita la inhalación de humos

perjudiciales para la salud en las instalaciones, sobre todo en los kartings indoor.

El ruido es otro tipo de contaminación o impacto en el medio ambiente, en este caso acústico. Aunque no se ha puede medir el ruido que produciría el prototipo, sí que hay diversos estudios que muestran la diferencia de decibelios entre kart eléctrico y convencional.

Tipo	Decibelios
Kart gasolina	80 – 90 dB
Kart eléctrico	60 – 70 dB

Teniendo en cuenta que la escala del dB es logarítmica y que aproximadamente un aumento de 3 dB en esta escala equivale al doble de ruido, se puede tener una idea de la gran diferencia entre unos y otros.

Evidentemente los karts de gasolina producen mucho ruido por culpa del motor de combustión y de los tubos de escape, en cambio los motores eléctricos apenas producen ruido. En la visita al karting está fue una de las primeras sensaciones que resultaron totalmente diferente después de estar acostumbrado a uno convencional, prácticamente produce más ruido el chillido de los neumáticos al derrapar.

9. PLANIFICACIÓN

Tarea / Semana	Febrero '15			Marzo '15			Abril '15			Mayo '15			Junio '15			Julio '15			Agosto '15			Sep. '15								
	S-1	S-2	S-3	S-4	S-5	S-6	S-7	S-8	S-9	S-10	S-11	S-12	S-13	S-14	S-15	S-16	S-17	S-18	S-19	S-20	S-21	S-22	S-23	S-24	S-25	S-26	S-27	S-28	S-29	
Inicio proyecto																														
Búsqueda información																														
Estado del arte																														
Información general																														
Información especializada																														
Diseño y análisis mecánico																														
Diseño 3D prototipo																														
Simulación chasis																														
Estudio fatiga																														
Estudio frenada																														
Solución y redacción memoria																														
Diseño solución																														
Estudio económico																														
Impacto ambiental																														
Redacción proyecto																														
Presentación proyecto																														
Fin proyecto																														

Conclusiones

Una vez completado el proyecto es importante sintetizar los resultados obtenidos y también ofrecer posibles nuevos objetivos o estudios a realizar.

El primer objetivo antes de embarcarse en el desarrollo del diseño mecánico, era comprender el funcionamiento y la composición del kart, que se ha logrado con el estudio y búsqueda de información de cada uno de los sistemas que lo conforman.

El principal objetivo del proyecto era realizar un diseño mecánico de un kart eléctrico, el cual, como se ha podido comprobar con las imágenes del prototipo mostradas durante todo el ejercicio, se ha conseguido.

Por otra parte, repasando las especificaciones que se requerían desde el principio, se ha cumplido con todas: bien por cuestiones de diseño, elección de componentes o análisis realizados que las han corroborado.

Durante el documento se ha expresado más de una vez posibles acciones o estudios que se podrían realizar a continuación de este proyecto, como por ejemplo:

- Analizar la integridad del chasis con simulación de impactos.
- Estudio de la carga térmica que recibe el disco de freno.
- Elaboración de planos 2D de todos los elementos.
- Construcción del kart y cálculo de costes.

Finalmente, hay que recalcar que se han puesto en práctica muchos conocimientos aprendidos durante el grado y aptitudes necesarios para realizar un trabajo de estas dimensiones. Todo esto junto con el trabajo en equipo son características importantes para un ingeniero.

Agradecimientos

Primero de todo, hay que agradecer al director del proyecto Emilio Angulo toda la ayuda recibida durante todo el período de desarrollo. La dirección, el interés y la predisposición han sido factores clave para la superación de este trabajo. Ha sido de gran apoyo en todos los momentos en que se han generado dudas, ya que con su experiencia y conocimiento en el campo ha logrado disiparlas todas.

En segundo lugar, agradecer a todo el equipo de “Electric Karting Salou” por la atención y la amabilidad ofrecida. La información adquirida en la visita, ya sea por la recolección de datos como por la entrevista con el propietario de las instalaciones, ha sido imprescindible para la realización de ambas partes del proyecto.

Finalmente, y no menos importante, agradecer al coautor del proyecto Miquel Balsells por la información aportada de su parte, la ayuda para entender los aspectos técnicos de los componentes y por el trabajo en equipo realizado.

Bibliografía

Referencias bibliográficas

- [1] [<http://www.bizkarts.com/new-karts/electric-karts/ecovolt-ng/>, Agosto 2015]
- [2] [<http://www.formula1-dictionary.net/karting.html>, Agosto 2015]
- [3] [<http://curva1kart.com.ar/noticias/?p=37578>, Agosto 2015]
- [4] [<http://www.asmokarts.com/index.cfm?pageID=24>, Agosto 2015]
- [5] [<http://ev-power.com.au/webstore/index.php>, Agosto 2015]
- [6] [<http://lawnmowertiresshop.net/Go-Kart-Tires.html>, Agosto 2015]
- [7] [http://www.rfeda.es/docs/anuario/2015/anuario14_15.pdf, Marzo 2015]
- [8] [https://es.wikipedia.org/wiki/Geometr%C3%ADa_de_Ackermann, Junio 2015]
- [9] [<http://slideplayer.es/slide/3957418/>, Agosto 2015]
- [10] [http://www.mecapedia.uji.es/criterio_de_Soderberg.htm, Agosto 2015]
- [11] [<http://www.dinamica.net/es/productos/transmision-de-potencia>, Julio 2015]
- [12] [<http://www.homologar.com/spa/item/tuning-frenos.html>, Agosto 2015]
- [13] [http://www.cicloscampuzano.com/puentes_de_freno_dura..ace.html, Agosto 2015]
- [14] [<http://www.ro-des.com/mecanica/discos-de-freno-que-son-como-funcionan-y-su-mantenimiento/>, Agosto 2015]
- [15] [<http://www.aficionadosalamecanica.net/frenos-3.htm>, Agosto 2015]
- [16] [<http://www.brakepads.cn.es/1-2-low-copper-ceramic-brake-pads.html>, Agosto 2015]
- [17] [<http://www.distribuidorwunderlich.es/recambios/870-pastillas-de-freno-delantero-de-material-organico-wunderlich.html>, Agosto 2015]
- [18] [<http://www.mecanicaymotores.com/las-pastillas-de-freno.html>, Agosto 2015]
- [19] [http://www.kartsfrancis.com/tienda/index.php?cPath=25_61, Agosto 2015]

[20] [<https://www.hoosiertire.com/karttire.htm>, Agosto 2015]

Bibliografía complementaria

Fabricantes karts eléctricos

[<http://otlkart.es/go-kart/serie-storm.html>, Agosto 2015]

[<http://www.ekc-karts.com/es/tkarts>, Agosto 2015]

[<http://speed-2-max.fr>, Agosto 2015]

[<http://www.carolimotor.com/stinger-electric>, Agosto 2015]

[<http://www.sodikart.com/es/kart-lrx.html>, Agosto 2015]

Legislación

[<http://www.rfeda.es/tecnica/reglamentos.asp>, Agosto 2015]

[[http://www.fia.com/sport/regulations?f\[0\]=field_regulation_category%3A75](http://www.fia.com/sport/regulations?f[0]=field_regulation_category%3A75), Agosto 2015]

Sistemas de transmisión

[<http://www.zonagravedad.com/modules.php/modules.php?name=News&file=print&sid=753>, Junio 2015]

Teoría de Soderberg

[“Metodología para el análisis a fatiga mediante el código pro engineer: aplicación a un eje ferroviario”, Eva Marco Esteban, 2010]

Otros

[WILLIAM D. CALLISTER, Jr. *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales 1*, Editorial Reverté, Barcelona, 2007]

[UNIVERSIDAD DE CÓRDOVA, *Análisis de ruidos de motores eléctricos aplicando intensimetría sonora*, 2012]

[TOBY STRINGER, *Noise impact assessment*, Worcester (Massachusetts), 2010]