UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH
Escola Tècnica Superior d'Enginyeries
Industrial i Aeronàutica de Terrassa

Grau en Enginyeria en Vehicles Aeroespacials

Proyecto de un kart eléctrico

Memoria del proyecto

Autor: Jordi Vila Romero
Director: David González Diez
Fecha de entrega: 22-6-2016

Contenido

1.1 Objetivo 1

1.2 Alcance 1

1.3 Especificaciones básicas 2

1.4 Planificación 2

1.5 Justificación 4

2. Estado del arte 5

2.1 Situación actual del mercado 5

2.1.1 Descripción general del kart 5

2.2 Posibilidades de propulsión alternativa 6

2.2.1 Sistemas de combustible alternativo 6

2.2.2 Sistemas híbridos 6

2.2.3 Sistemas eléctricos 7

2.3 Tipos de baterías 7

2.4 Estudio de la competencia 8

3. Selección de los componentes 11

3.1 Justificación de la solución eléctrica 11

3.2 Especificaciones básicas 12

3.2.1 Justificación 13

3.3 Explicación de la instalación 13

3.4 Selección del motor 14

3.4.1 Comparativa con karts convencionales 14

3.4.2 Cálculo de potencia 14

3.4.3 Tipos de motor eléctrico 16

3.4.3.1 Motores de corriente continua 16

3.4.3.2 Motores de corriente alterna 18

3.5 Selección de las baterías 18

3.5.1 Baterías de plomo ácido 19

3.5.2. Baterías de Níquel-Cadmio 19

3.5.3 Baterías de Níquel-Hidruro Metálico 20

3.5.4 Baterías de Litio 20

3.5.4.1 Baterías LiPo 21

3.5.4.2 Baterías con cátodo de $LiCoO_2$ 21

3.5.4.3 Baterías con cátodo de $LiFePO_4$ 21

3.5.4.4 Baterías $LiMn_2O_4$ (LMO) y $LiNiMnCoO_2$ (NMC) 21

3.6 Selección del BMS 23

3.7 Selección del controlador 25
3.8 Selección del acelerador y freno 25
3.9 Selección del cargador 26
4. Modelo de simulación 27
4.1 Programa general 27
4.2 Ciclo de conducción 32
4.3 Control del vehículo 33
4.4 Componentes del vehículo 33
4.4.1 Modelo de baterías del vehículo eléctrico 36
4.4.2 Convertidor DC-DC 38
4.4.3 Inverter 38
4.4.4 Motor Permanent Magnet AC (PMAC) 39
4.4.5 Engranaje 41
4.4.6 Ruedas 41
4.5 Entorno 41
4.6 Conversión de fuerza resultante a velocidad 42
5. Propuesta definitiva 43
5.1 Propuesta de motor 43
5.1.1 Características principales de los motores 44
5.1.2 Simulación 1 45
5.1.2.1 Simulación 1: Motor Motenergy ME1114 45
5.1.2.2 Simulación 1: Motor Motenergy ME1115 47
5.1.2.3 Simulación 1: Motor MARS ME0913 49
5.1.2.4 Conclusiones simulación 1 51
5.1.3 Simulación 2 51
5.1.3.1 Simulación 2: Motor Motenergy ME1114 52
5.1.3.2 Simulación 2: Motor MARS ME0913 53
5.1.3.3 Conclusiones simulación 2 54
5.2 Propuesta de controlador 54
5.3 Propuesta del contenedor de baterías 56
5.3.1 Selección de la celda 56
5.3.2 Conexionado entre celdas 58
5.3.3 Distribución en el kart 59
5.3.4 Diseño del contenedor de baterías 59
5.4 Propuesta de BMS 61
5.5 Propuesta de cargador 62

5.6 Propuesta de acelerador y freno 63
6. Valoración económica 65
7. Modelo en 3D 67
7.1 Distribución de los componentes 67
7.2 Dimensiones y peso 69
7.2.1 Cálculo del peso total 69
7.2.2 Dimensiones 70
8. Futuros trabajos a realizar 73
9. Medio ambiente 74
10. Conclusiones 75
11. Agradecimientos 76
12. Bibliografía 77

Resumen ilustraciones

Ilustración 3.1. Esquema de las fuerzas resultantes 15
Ilustración 3.2. Valores típicos para el coeficiente f_r (86) 16
Ilustración 4.3. Ejemplo de la introducción de datos 28
Ilustración 4.4. Ejemplo del subprograma de graficado de los datos obtenidos 29
Ilustración 4.5. Sistema de simulación, vista general 31
Ilustración 4.6. Bloque ciclo de trabajo 32
Ilustración 4.7. Bloque del control del vehículo 33
Ilustración 4.8. Sistema de los componentes del vehículo 35
Ilustración 4.9. Modelo de baterías del vehículo eléctrico 37
Ilustración 4.10. Bloque del convertidor DC-DC (izquierda), interior bloque modelo DC-DC funcional (derecha) 38
Ilustración 4.11. Bloque Inverter 38
Ilustración 4.12. Generación de las intensidades de entrada y salida del inverter 39
Ilustración 4.13. Modelo de motor ideal PMAC 40
Ilustración 4.14. Modelo de motor PMAC 40
Ilustración 4.15. Cálculo de la eficiencia del modelo de motor PMAC 41
Ilustración 4.16. Modelo de simulación del entorno 42
Ilustración 5.17. Motor Motenergy ME1114 (47) 44
Ilustración 5.18. Motor Motenergy ME1115 (49) 44
Ilustración 5.19. Motor MARS ME0913 (41) 44
Ilustración 5.20. Simulación 1. Velocidad y voltaje demandado a la batería. Motor ME1114 ... 45
Ilustración 5.21. Comprobación aceleración. Motor ME1114 46
Ilustración 5.22. Simulación 1. Estado de carga, corriente y ratio C. Motor ME1114 46
Ilustración 5.23. Simulación 1. Eficiencia. Motor ME1114 46
Ilustración 5.24. Simulación 1. Velocidad y voltaje demandado a la batería. Motor ME1115 ... 47
Ilustración 5.25. Comprobación aceleración. Motor ME1115 47
Ilustración 5.26. Simulación 1. Estado de carga, corriente y ratio C. Motor ME1115 48
Ilustración 5.27. Simulación 1. Eficiencia. Motor ME1115 48
Ilustración 5.28. Simulación 1. Velocidad y voltaje demandado a la batería. Motor ME0913 ... 49
Ilustración 5.29. Comprobación aceleración. Motor ME0913 49
Ilustración 5.30. Simulación 1. Estado de carga, corriente y ratio C. Motor ME0913 50
Ilustración 5.31. Simulación 1. Eficiencia. Motor ME0913 50
Ilustración 5.32. Simulación 2. Ciclo de conducción 1 51
Ilustración 5.33. Simulación 2. Ciclo de conducción 2 51
Ilustración 5.34. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Estado de carga. Motor ME1114 52
Ilustración 5.35. Simulación 2. Ciclo de conducción 2. Estado de carga. Motor ME1114 52
Ilustración 5.36. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Eficiencia. Motor ME1114 52
Ilustración 5.37. Simulación 2. Ciclo de conducción 2. Eficiencia. Motor ME1114 53
Ilustración 5.38. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Estado de carga. Motor ME0913 53
Ilustración 5.39. Simulación 2. Ciclo de conducción 2. Estado de carga. Motor ME0913 53
Ilustración 5.40. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Eficiencia. Motor ME0913 54
Ilustración 5.41. Controlador Kelly KLS96601-8080I/IPS (74) 55
Ilustración 5.42. Conexión de celdas en serie (77) 58
Ilustración 5.43. Conexión celdas en paralelo (77) 58
Ilustración 5.44. Diseño 3D celda de batería 59
Ilustración 5.45. Diseño 3D celda de batería 2 59

Ilustración 5.46. Diseño 3D contenedor de baterías cerrado 60
Ilustración 5.47. Diseño 3D tapa del contenedor de baterías..... 60
Ilustración 5.48. Diseño 3D contenedor de baterías abierto 60
Ilustración 5.49. Elithion Lithiumate Pro BMS (25) 61
Ilustración 5.50. Cargador Zivan NG7 (13) 63
Ilustración 5.51. Pedal Kelly 0-5K (55)..... 64
Ilustración 7.52. Distribución e identificación de los componentes en el diseño 3D del kart eléctrico..... 67
Ilustración 7.53. Vista aérea del diseño 3D del kart eléctrico. Distribución componentes 68
Ilustración 7.54. Vista en alzado del kart eléctrico 70
Ilustración 7.55. Vista de perfil del kart eléctrico 71
Ilustración 7.56. Vista en planta del kart eléctrico..... 71
Ilustración 7.57. Vista isométrica del kart eléctrico..... 72

Resumen tablas

Tabla 2.1. Comparativa diversos fabricantes 9
Tabla 2.2. Comparativa prestaciones 10
Tabla 3.3. Especificaciones básicas 12
Tabla 3.4. Tabla características baterías Li-Po 22
Tabla 5.5. Datos utilizados para la simulación de los motores 45
Tabla 5.6. Comparativa entre modelos de controlador 55
Tabla 5.7. Tabla de características de la celda SLPB100216216H 56
Tabla 5.8. Tabla de características de la celda WB-LYP40AHA 57
Tabla 5.9. Características principales Elithion Lithiumate Pro BMS. (70) 62
Tabla 6.10. Resumen de las horas de ingeniería 65
Tabla 6.11. Resumen del coste en Software utilizado 65
Tabla 5.12. Resumen de precios de la solución propuesta 66
Tabla 7.13. Tabla peso total del kart eléctrico 70

1. Definición del trabajo

1.1 Objetivo

El objetivo del trabajo es realizar el diseño de un kart eléctrico, partiendo de la tecnología actual que hay en el mercado de la automoción e intentar utilizar esos avances a menor escala para sustituir los actuales karts con motor de combustión.

Se realizará un vehículo enfocado al mercado de alquiler, es decir, al mundo del karting de ocio. Por ello será un vehículo con prestaciones medias-altas pero, que podría adaptarse a un uso de competición debido a los márgenes que nos puede ofrecer un motor eléctrico.

El objetivo final de este trabajo es el diseño de un kart eléctrico que permita la fabricación de un prototipo y posterior fabricación en serie del mismo, con la intención de poder vender este kart a cualquier empresa que, actualmente, esté usando karts propulsados con motores de combustión convencionales, con el fin de facilitarles una alternativa de futuro.

1.2 Alcance

El alcance del trabajo queda definido en los puntos expuestos a continuación:

- Análisis de la situación actual del mercado de los karts y del potencial de nuestro producto.
- Estudio de las posibles tecnologías para propulsar tanto karts como otro tipo de vehículos eléctricos a día de hoy. Posibilidades de propulsión y los diferentes tipos de baterías.
- Elección, ubicación y configuración de todos los componentes que formen parte de la instalación de nuestro kart en función de los cálculos realizados previamente.
- Diseño del contenedor de las baterías en función de las necesidades de almacenamiento determinadas previamente.
- Adaptación del chasis del vehículo en función de los componentes eléctricos escogidos.
- Representación en 3D de todas las soluciones escogidas en un diseño preliminar del kart.
- Valoración exacta de los costes de fabricación del modelo.

No se tendrá en cuenta:

- Realizar modificaciones en los componentes existentes. La finalidad es sólo adaptar las opciones encontradas a nuestro proyecto.
- Se realizará la adaptación del chasis del vehículo sin realizar un análisis exhaustivo de éste.
- No se realizará el cálculo del metraje definitivo de cables necesario para la instalación.

1.3 Especificaciones básicas

Las especificaciones básicas que deberá cumplir nuestro kart una vez haya sido realizado el proyecto serán especificaciones que nos permitan mejorar lo que, actualmente, está ofreciendo la competencia en este sector.

Por tanto, el proyecto requerirá de un estudio previo del sector para poder establecer unos márgenes y unos objetivos determinados de los siguientes aspectos.

- Autonomía
- Potencia
- Velocidad máxima
- Peso
- Precio

1.4 Planificación

A continuación, se muestra el diagrama de Gantt que presenta la planificación de las tareas programadas, a lo largo de las semanas disponibles, para la correcta realización del trabajo.

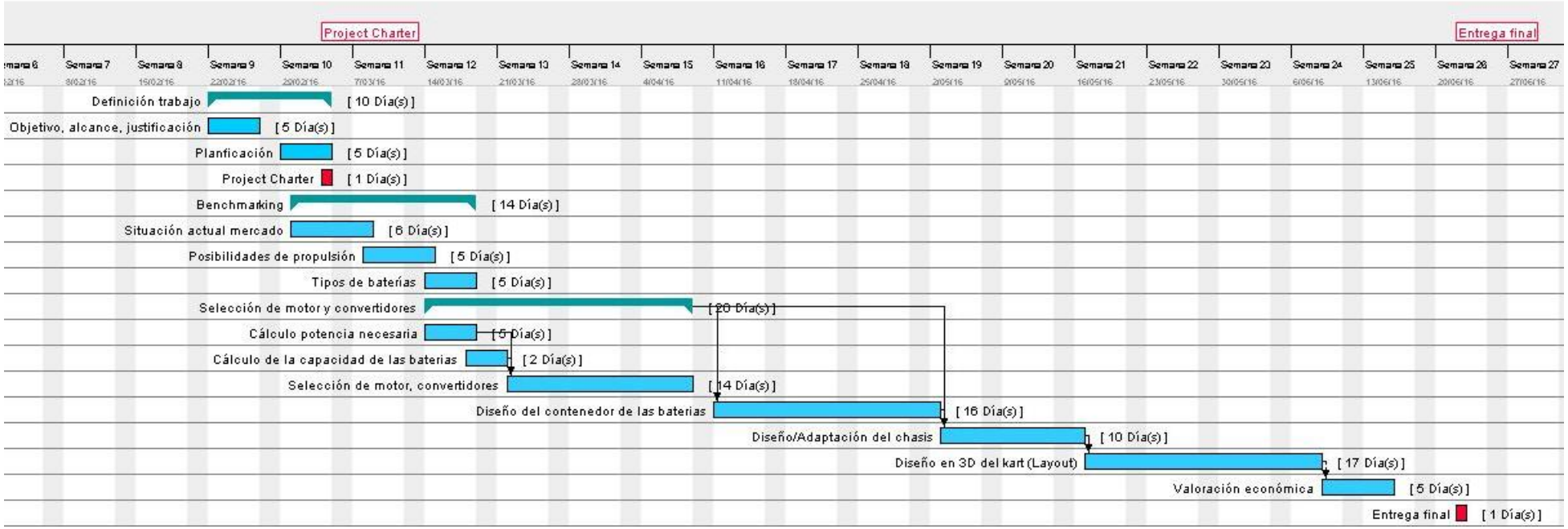

Ilustración 1.1. Planificación

1.5 Justificación

El hecho de realizar este trabajo ha sido, principalmente, el gran interés que despierta en mí el mundo de la automoción. Por ello, la realización de un trabajo de final de grado relacionado con este mundo era la mejor manera de tener motivación para ello.

Son muchos los factores que influyen en un trabajo de estas características. Las tecnologías aplicadas y los conceptos teóricos necesarios para estas suponen el poder aplicar los conocimientos de diferentes campos adquiridos a lo largo del grado. Es necesario buscar un equilibrio entre los diferentes aspectos como la potencia, la autonomía o la solución más económica para llegar al punto óptimo que buscamos, que no es otro que el karting de ocio.

Además, y como punto más importante, el hecho de escoger la propulsión eléctrica para impulsar el kart supone un acercamiento en la concienciación del impacto medioambiental que tienen estos y, por tanto, una manera de poder introducir a pequeña escala este necesario cambio. La idea es realizar un kart que nos permita reducir tanto las emisiones de partículas nocivas como son el CO_2, NO_X, etc. como el impacto acústico respecto los karts convencionales.

Por tanto, la justificación de este trabajo se basa en una oportunidad de negocio que se está incrementando, sobretodo en estos últimos años. La base de la propulsión eléctrica es fundamental para un nuevo modelo de negocio que será el futuro en la automoción, ya sea, como ayuda de los motores convencionales como se está realizando actualmente o puramente, eléctricos. Por ello, el mundo de los karts también está empezando a mirar hacía este tipo de propulsión y, ahí, es dónde este proyecto quiere enfocarse.

Ilustración 1.2. EcoVolt NG Electric Kart (65)

2. Estado del arte

Aunque el kart es mayoritariamente conocido por la población se hace obligatorio hacer una breve introducción de sus orígenes, la situación actual del mercado del karting y que nos propone lo que sería nuestra competencia en el mercado.

Además se hará una exposición de las posibles alternativas de propulsión, a la actual propulsión de combustión llamada comúnmente "convencional", que pueden existir para un kart y también un estudio de los posibles tipos de baterías que podríamos utilizar.

2.1 Situación actual del mercado

La historia del kart se remonta a los años 50 cuando en una base militar de Pasadena (California, Estados Unidos) se monta el llamado primer "kart". Este se monta con restos de un avión en desuso y un motor de un cortacésped como sistema de propulsión.

Es, a partir de ahí, que el kart se empezó a hacer popular en las diferentes bases aéreas de Estados Unidos y pronto se trasladaría a Europa esta práctica, sobre los años 60. A España, el kart llegó en los años 70 y es desde entonces que podemos hablar del mundo del karting en nuestro país.

Actualmente en España existen alrededor de unos 80 kartings a lo largo de todo el territorio español, entre los cuales 21 están situados en nuestra Comunidad Autónoma, Cataluña. Por tanto, es una disciplina con bastante aceptación por parte de la población española.

En lo que respecta a nuestro ámbito, el karting con karts de propulsión eléctrica su implantación, de momento, es bastante escasa y novedosa, es por ello, que es una buena oportunidad de mercado. En España, se ha podido obtener información de la presencia de dos kartings que utilicen este tipo de propulsión. Uno de ellos es el Electric Karting Salou y el otro, el XtremKart Mallorca, además de otras propuestas menores como el Green Indoor Park, en Cataluña, que ofrece también una propuesta, a menor escala, de karts eléctricos.

2.1.1 Descripción general del kart

Según la Real Federación Española del Automovilismo un kart es un vehículo terrestre monoplaza sin techo o cockpit, sin suspensiones y con o sin elementos de carrocería, con cuatro ruedas no alineadas que están en contacto con el suelo, las dos delanteras ejerciendo el control de dirección y las dos traseras ejerciendo la tracción del vehículo conectadas por un eje de una pieza.

2.2 Posibilidades de propulsión alternativa

Las posibilidades existentes en una primera aproximación son muchas y vamos a ver las principales a continuación. La idea es realizar un pequeño estudio de campo para ver qué posibilidades existen y cual, de verdad, es la que realmente nos interesa para nuestra finalidad.

2.2.1 Sistemas de combustible alternativo

Actualmente existen diferentes tipos de combustibles que pueden sustituir a la gasolina, como es nuestro caso. Entre ellos destacan el etanol, que es un derivado del maíz y otras cosechas; el biodiesel que es extraído de aceites vegetales y grasas animales, el gas natural, el gas de petróleo licuado (GPL) y el hidrógeno, el cual se quemaría también como un combustible más en un motor de combustión interna.

2.2.2 Sistemas híbridos

La finalidad de los sistemas híbridos es la de reducir los consumos que tiene un vehículo con tan solo combustión interna. Para ello lo que se propone con este sistema es unir un motor eléctrico al de combustión interna para conseguir tal fin.

El principal problema de los motores de combustión es su falta de eficiencia al arrancar y al ralentí. Por el contrario, los motores eléctricos generan su par máximo desde casi las cero revoluciones pudiendo compensar esa baja eficiencia a bajas revoluciones. Las posibilidades de sistemas híbridos son múltiples como, por ejemplo, pudiendo utilizar el motor eléctrico como un compresor para el motor de combustión. En definitiva, los sistemas híbridos se pueden fabricar con diferentes configuraciones y las principales son las siguientes:

- En serie: Es esencialmente un vehículo eléctrico, ya que, únicamente el motor eléctrico es el que impulsa el coche y el único papel que desempeña el motor de combustión es el de accionar el generador. El sistema es el más simple de todos.
- En paralelo: En este tipo de configuración los motores de combustión y eléctrico trabajan al mismo tiempo. La distribución más típica es situar el motor eléctrico entre la transmisión y el motor de combustión, el cual suele ser bastante pequeño debido a que el motor eléctrico le da soporte mejorando así los consumos.
- Mixto: En estos sistemas, también conocidos como repartidores de energía, el mecanismo de distribución de la energía emplea un engranaje planetario para dividir la energía entre el generador y el motor consiguiendo de esta manera que, al arrancar y a bajas velocidades sea la batería quién proporcione la energía y que, a velocidades normales sea el motor de combustión el que acciona el generador y, a su vez, recarga la batería.

2.2.3 Sistemas eléctricos

Los vehículos que llevan implantado este sistema utilizan como generador un motor eléctrico. Este motor eléctrico está alimentado, generalmente, por baterías. Estas baterías se recargan utilizando una conexión a la red eléctrica o podemos instalar un sistema de baterías extraíbles que se recarguen en puntos de recarga. Pero, no solo existe este tipo de vehículos con motor eléctrico como comúnmente se cree, también existen otro tipo de instalaciones para alimentar al motor eléctrico como la energía solar o, incluso, la energía nuclear.

Estos sistemas son mucho más sencillos que los sistemas híbridos y se destacan del sistema de combustible convencional mucho más que los sistemas de combustible alternativo. Por ello, nuestra elección es el uso de un sistema eléctrico con baterías que nos permite crear un sistema de propulsión diferenciador respecto lo convencional hasta ahora y, además, mucho más simple lo que nos supondrá mayor eficiencia respecto un sistema híbrido.

Además, aparecen en escena los vehículos impulsados por hidrógeno mediante una pila de combustible. El principio de funcionamiento del sistema parte de la combinación de hidrógeno y oxígeno, produciendo energía eléctrica que nos permite alimentar directamente el motor eléctrico, además de alimentar las baterías. Se descarta este tipo de sistema porqué son también sistemas complejos y que ocupan un volumen considerable que no tenemos en un kart.

2.3 Tipos de baterías

Actualmente, el factor principal de crítica de los vehículos eléctricos reside en su autonomía, la cual viene estrictamente ligada a las baterías, ya que, la gran mayoría de vehículos eléctricos extraen su energía de la almacenada en estas.

Por tanto, una batería es un acumulador de energía o varios acumuladores de energía conectados entre sí que son capaces de almacenar energía con tal de poder utilizarla posteriormente.

La idea es realizar un pequeño estudio de las diferentes posibilidades de baterías según los materiales con los que estas fabricadas, que hay en el mercado. Posteriormente, en el apartado de diseño del contenedor de las baterías se explicaran con más detalle cada una de las posibles alternativas y cuál de ellas se ha escogido finalmente.

Hoy en día en el mercado de la movilidad eléctrica se presentan las siguientes posibilidades de baterías para un vehículo eléctrico:

- Baterías de Plomo-Ácido: Han sido las más utilizadas en los vehículos eléctricos debido a la alta disponibilidad y el bajo coste de éstas, además de que su tecnología está en un nivel de gran madurez.
- Baterías de Níquel Cadmio (NiCd): Baterías recargables de uso doméstico e industrial pero que se están reemplazando por otros tipos debido al uso del Cadmio, material que se ha restringido su uso debido a su nocividad.
- Baterías de Níquel Metal Hidruro (NiMH): Son la denominada evolución de las baterías de Níquel Cadmio. Es la tecnología predominante en el mundo de los vehículos eléctricos e híbridos, como es el caso de Toyota.
- Baterías de Ion-Litio: Se usan extensamente en el mundo de la electrónica de consumo, como en portátiles o telefonía móvil. Los nuevos estudios y proyectos de vehículos eléctricos están siendo implantadas este tipo de baterías debido a sus altas prestaciones respecto el resto.

Por tanto, el mercado de las baterías es muy extenso y con un gran abanico de posibilidades. Cada día, se descubren nuevas posibilidades que podrían ser la solución definitiva para el mundo de la automoción. Mientras tanto, los principales tipos son los mencionados anteriormente y trabajaremos, posteriormente, sobre esta base.

2.4 Estudio de la competencia

Como en todo proyecto, antes de realizar el diseño, se hará una búsqueda de las soluciones propuestas por la que sería, en la fase final de todo el proceso, nuestra competencia.

Este estudio sobre la competencia nos permite dos elementos muy importantes. Por un lado, es saber qué soluciones proponen en productos y materiales estas empresas a los usuarios de estos vehículos para tener una idea general en la que podernos guiar como base de nuestro diseño. Por el otro, sabiendo que soluciones están proponiendo podemos saber en qué podemos diferenciarnos y que mejoras podemos realizar con nuestro diseño respecto lo que ya hay en el mercado.

Por tanto, lo que se pretende con esta búsqueda es obtener información sobre: Fabricantes de karts eléctricos, componentes utilizados, potencia del motor, tipo de baterías, peso, dimensiones, prestaciones (velocidad, aceleración y autonomía) y precio.

Después de una búsqueda en Internet se muestran los resultados obtenidos en la siguiente tabla.

Fabricante	Modelo	Tipo de motor	Potencia nominal (kW)	Tipo de baterías	Prestaciones batería (Volts/Capacidad)	Peso (kg)	Dimensiones (mm) (LongitudxAnchuraxAltura)	Precio (€)
BIZ Karts	EcoVolt NG	DC (Sin escobillas)	14,9	LiFePO4	51,2V/3kWh	200	1900x1310x600	---
Speed2Max	SLC	AC	6	Plomo	12V/48Ah	200	2100x1350x800	---
Caroli kart	Stinger electric	DC (Con escobillas)	5,5	LiFePO4	48V/60Ah	195	1920x1300x600	---
RIMO Germany	SINUS Ion	DC (Con escobillas)	2x2,8	LiFeMnPO4	**1.** 16x3,2V/40Ah Option: **2.** 60Ah/**3.** 100Ah	170	2020X1390X600	---
Otl Kart	Prokart Evo	AC	4-8	LiPo/LiFePO4	LiPo: **1.** 48V/40Ah **2.** 48V/62Ah LiFePO4: **3.** 48V/90Ah	180	2060x1410x600	---
Tom Kart	F1	DC (Con escobillas)	10	LiFePO4	50V/40Ah	150	1950x1300x650	7000 (kart) +3500 (baterías)
Linde	E1	AC	22	Li-ion	96V/---	160	---	---
EVC Racing	Complete kart	AC	26	Li-ion	88V/31Ah	145	---	Máx. ≈ 13669

Tabla 2.1. Comparativa diversos fabricantes

Como podemos ver en la tabla anterior hay algunos datos a destacar. Las baterías predominantes son con base de litio, ya que, como se dijo anteriormente, son el futuro como elementos acumuladores en el mundo de la automoción y los estudios se están encarando en este sentido. Finalmente, se ha obtenido el precio de dos de los posibles competidores, lo que nos permitirá tener una idea cualitativa del precio que debería tener nuestro kart eléctrico.

Si nos fijamos detalladamente en la tabla anterior vemos que los dos últimos modelos destacan respecto el resto en cuanto a prestaciones. Esto se debe a que, para realizar un muestreo algo más detallado se han tomado datos de dos modelos preparados para competición para saber aproximadamente los valores máximos a los que podríamos aspirar.

Además tenemos los datos de prestaciones de algunos de los modelos y se presentan a continuación:

Fabricante	Modelo	Velocidad máx.	Aceleración máx.	Autonomía máx.
BIZ Karts	EcoVolt NG	70 km/h (lim. reglamentaria)	4,68 m/s^2 (En circuito de Salou)	40 min
Speed2Max	SLC	70 km/h (lim. reglamentaria)	5 m/s^2	60-90 min
Caroli kart	Stinger electric	---	---	35 min
RIMO Germany	SINUS Ion	---	---	1. 20 min 2. 35 min 3. 60 min
Otl Kart	Prokart Evo	---	---	1. 25 min

				2. 45 min 3. 60 min
Tom Kart	F1	55 km/h (recomendada) 100 km/h máx.	---	30 min
Linde	E1	≈ 120 km/h	8,05 m/s^2	---
EVC Racing	Complete kart	113 km/h	---	10-15 min

Tabla 2.2. Comparativa prestaciones

Por tanto, con estas dos tablas comparativas podemos tener una idea aproximada tanto de los motores y baterías que se utilizan en este tipo de karts como de las prestaciones de velocidad, aceleración y autonomía que presentan las posibles opciones, cada una de ellas enfocada más a un sector que otro, recordemos que los dos últimos modelos son enfocados a competición y prestaciones máximas de velocidad y aceleración.

3. Selección de los componentes

En este apartado, procederemos a realizar una explicación desde términos generales hasta llegar a la explicación de las partes escogidas en detalle de la instalación eléctrica que realizaremos en nuestro kart.

3.1 Justificación de la solución eléctrica

En el apartado anterior, después de la búsqueda de los posibles sistemas alternativos, se ha mencionado que la solución más óptima sería la que lleva este proyecto como título, kart con propulsión eléctrica.

Antes de empezar a realizar la selección y explicación de las diferentes partes que componen nuestro kart, procederemos a realizar una breve justificación de los motivos que nos han llevado a escoger la opción totalmente eléctrica como alternativa respecto a los otros sistemas.

El sistema eléctrico surge como alternativa más factible debido a que los sistemas de generación eléctrica convierten la energía eléctrica a energía mecánica con unos rendimientos superiores al 80-85% mientras que los sistemas de combustión interna se quedan en un 25% de rendimiento los sistemas más eficientes. Por tanto, nos diferenciamos en rendimientos de una manera destacada.

El segundo es que la opción eléctrica nos supone la eliminación total del uso de un motor de combustión interna. Este hecho nos hace diferenciarnos totalmente de lo ya presente en el mercado. Por un lado, si escogiésemos opciones que utilizasen un combustible alternativo nos estaríamos decantando por una opción muy conservadora que, no convencería, al público que queremos dirigirnos ni a los entusiastas del motor de combustión. Y, por otro lado, estaría la opción de utilizar los sistemas híbridos pero estos, suponen el uso de dos motores, un motor de combustión interna y otro eléctrico. Por tanto, sería un sistema demasiado pesado y voluminoso como para incorporarlo en un kart, además, los sistemas actuales podrían modificarse levemente para hibridarse y perder un nicho del mercado potencial.

El tercero, y último punto para justificar nuestra elección, sería que las emisiones con un sistema eléctrico son nulas en lo que se refiere al vehículo. Es decir, si bien es cierto, que ciertos sectores son críticos con este aspecto defendiendo que la proveniencia de la electricidad proviene de fuentes no renovables y que producen contaminación medioambiental, existen la posibilidad de contratar servicios que garantizan que la energía utiliza es completamente “Energía verde” proveniente de energías renovables que no tienen impacto en las emisiones a la atmósfera. En definitiva, este es un punto muy a favor de nuestra opción que, además de la eliminación de la emisiones de gases y

la reducción de la contaminación acústica, nos permite que los "Indoor Karting", que suelen ser los más interesados en la compra de karts eléctricos, no necesiten de un sistema de extracción de gases que supone un coste elevado de instalación y de electricidad.

Si bien es verdad, que no todo en la opción del sistema eléctrico son ventajas. El principal problema que presenta este tipo de sistema de propulsión es su autonomía. Las baterías son el principal inconveniente debido a que su almacenaje de energía no es muy denso. Es decir, su capacidad por volumen no es demasiado elevado y esto produce que debido al limitado espacio que tenemos nuestra autonomía se pueda ver afectada. Los karts se suelen utilizar en alquiler en tandas de unos 15 minutos por lo que está no debe ser muy elevada pero, se quiere ofrecer al menos una autonomía de unos 35-45 minutos para que este punto no suponga un problema a la hora de una decisión final en la compra del kart que desarrollaremos.

3.2 Especificaciones básicas

Para el proceso de selección del motor, tanto como para el posterior diseño del contenedor de las baterías nos atenderemos a las prestaciones de los vehículos de la competencia para determinar unos rangos que nos permitan seleccionar los elementos adecuados según lo que queremos obtener.

Esto se realizará determinando, en primera instancia, unos rangos de las prestaciones de peso, velocidad, aceleración y autonomía que queremos obtener, a partir de los datos que tenemos del apartado anterior resumidos en la tabla 2.2. Estas especificaciones básicas quedarán resumidas a continuación de la siguiente manera:

- Prestación: Característica del kart que queremos determinar su rango.
- Valor mínimo: Valor que nos hará de límite inferior, es decir, el valor que nos determinará el valor menos deseable que queremos obtener para esa prestación.
- Valor máximo: Valor que nos hará de límite superior, es decir, el valor que nos determinará el valor deseado para esa prestación. Aun así, a diferencia del valor mínimo, este puede ser mejor que el determinado como deseado.

Prestación	*Valor mínimo*	*Valor máximo*
Peso	*200 kg*	*145 kg*
Velocidad	*55 km/h*	*70 km/h*
Aceleración	*4,5 m/s²*	*6,5 m/s²*
Autonomía	*25 min*	*60 min*

Tabla 3.3. Especificaciones básicas

3.2.1 Justificación

Para el proceso de selección de las especificaciones básicas los datos son básicamente mínimos y máximos de las prestaciones ofrecidas por las alternativas que se ofrecen desde la competencia, aun así, se procede a justificar brevemente los motivos.

En primer lugar, el peso queremos obtener el mínimo peso posible, ya que, esto nos hará mejorar las otras tres prestaciones. Por ello, el peso deseable, es el menor peso posible y se ha establecido como valor el mínimo de la competencia. De la misma manera, se ha establecido como máximo, el máximo peso que hay en la competencia.

En segundo lugar, la velocidad, como mínimo tenemos el mínimo que lo tiene el Tom Kart, mientras que como máximo se establece el máximo permitido, normalmente, en los "Indoor Karting".

En tercer lugar, la aceleración se establece como mínimo un valor levemente inferior al ofrecido por el kart utilizado en el karting de Salou mientras que como máximo se ha establecido un valor que mejore ostensiblemente los karts de la competencia, 38,9% respecto el kart utilizado en el karting de Salou, en materia de karting de ocio, y quede por debajo del World Record Guinness que ostenta el Linde E1.

Finalmente, la autonomía se establecen los mínimos y máximos ofrecidos por la competencia, ya que, siendo un valor importante, las tandas son de 10-15 minutos, por lo que, un valor de 25 minutos es suficiente, pero la idea sería poder realizar sobre las tres tandas sin recargar los karts.

3.3 Explicación de la instalación

La base fundamental de nuestra instalación eléctrica es utilizar la energía eléctrica almacenada en las baterías para propulsar el motor eléctrico, que convertirá la energía eléctrica en energía mecánica, que aplicaremos al eje trasero de nuestro kart haciéndolo girar y transmitiendo la energía mecánica al suelo y podernos desplazar.

El sistema estará compuesto por:

1. Motor eléctrico: Sistema encargado de convertir la energía eléctrica extraída de las baterías en energía mecánica y transmitirla al eje trasero de nuestro kart.
2. Baterías: Las baterías transmiten la energía eléctrica almacenada al motor eléctrico en forma de voltaje, el cual está balanceado al valor adecuado por un controlador.
3. El controlador es el encargado de gestionar la información de las necesidades de nuestro sistema. Se encarga, además de lo mencionado anteriormente en las baterías, de transmitir los porcentajes de presión que nosotros ejercemos en los

pedales del acelerador y el freno para adecuar el funcionamiento del motor eléctrico y proporcionarnos la potencia que estamos requiriendo.

4. El BMS (Battery Management System) se encarga del correcto funcionamiento de las baterías. Mediante la monitorización de datos de la batería y un algoritmo evita que las baterías se desbalanceen al descargarse o cargarse y así evita que sufran sobrecargas y/o sobredescargas.
5. Otros elementos: Habrá también componentes con menor importancia como pueden ser los fusibles, relés, etc. No se entrará en detalle de estos elementos.
6. Además de los principales componentes que irán instalados en el kart propiamente dicho, necesitaremos de un cargador para recargar las baterías. Este constará de un transformador para reducir la corriente alterna de alto voltaje proveniente de la instalación donde esté conectado a corriente de bajo voltaje. Después constará de un rectificador para convertir la señal de AC a DC.

3.4 Selección del motor

3.4.1 Comparativa con karts convencionales

Para la selección del motor, además de las especificaciones básicas y los posibles valores de potencia que podemos extraer de la competencia en karts eléctricos también haremos una correlación con los karts de combustión y los valores típicos de potencia que tienen sus motores para realizar una selección más aproximada.

Los karts de combustión convencionales que se utilizan en el mercado de alquiler llevan equipados motores de cuatro tiempos de 390cc con 13 CV, lo que equivale a unos 9,6 kW de pico y un peso aproximado medio de 150 kg. Por otro lado, hay kartings que ofrecen la posibilidad de pilotar karts de competición con motores Rotax de dos tiempos de 125cc con 30 CV, lo que equivale a 22 kW de pico, y un peso aproximado de 95-100 kg.

Por tanto, como nuestra idea es ofrecer un kart de alquiler que esté a medio camino de un kart de competición tendremos que tener en cuenta estas relaciones con los karts convencionales, las potencias y pesos que tienen, y dimensionar nuestro motor en función de las potencias y teniendo en cuenta, que nuestro peso sea como mínimo, igual al peso de un kart de alquiler convencional.

3.4.2 Cálculo de potencia

Para el cálculo de potencia procederemos a realizar un estudio de cinemática básico, ya que, queremos un valor aproximado que, juntamente con los datos obtenidos con la comparativa, nos dará la posibilidad de seleccionar el motor adecuado dentro de las posibilidades que nos ofrezca el mercado.

El cálculo se ha realizado con unas suposiciones que determinaremos a continuación:

- La idea es realizar un kart con un peso entre 150 y 200 kg, por tanto, se realizará el cálculo con una medida media de 175 kg, a los que hay que añadirle el peso de una persona, que consideraremos de 70 kg.
- La velocidad que deseamos obtener es de 70 km/h (19,44 m/s).
- La aceleración que utilizaremos es el valor máximo que esperamos obtener de 6,5 m/s^2.

Las demás hipótesis quedan especificadas en el desarrollo del cálculo:

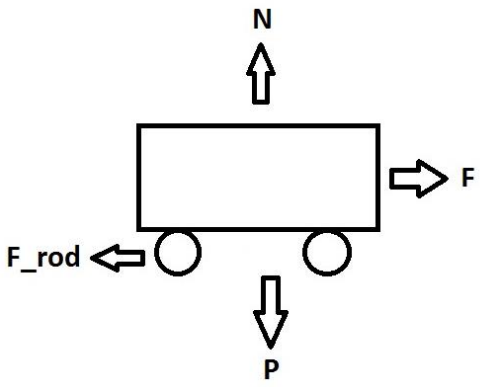

Ilustración 3.1. Esquema de las fuerzas resultantes

En primer lugar, definiremos la resistencia a la rodadura que queda expresada de la siguiente manera:

$$F_{rod} = R_{aero} + R_{rod} + R_{grav}$$

Hipótesis:

- Que la resistencia aerodinámica, al tratarse de un vehículo de pequeño tamaño que no alcanza grandes velocidades y es un cálculo estimativo, es despreciable.
- Que la resistencia gravitatoria es despreciable, ya que, se hará un cálculo para superficie plana. Los desniveles que nos encontraremos no serán superiores a 5° generalmente.

Por tanto:

$$F_{rod} \approx R_{rod}$$

$$R_{rod} = f_r \cdot P = 0{,}015 \cdot 2452{,}5 = 36{,}05\ N$$

Donde:

P es el peso del conjunto del vehículo más la persona en Newtons.

f_r es el coeficiente de rodadura, que asumiremos como 0,015 como queda definido por:

Tipo de Vehículo	Superficie		
	Asfalto	Dureza media	Arena
Turismos	0.015	0.08	0.3
Camiones	0.012	0.06	0.25
Tractores	0.02	0.04	0.2

Ilustración 3.2. Valores típicos para el coeficiente f_r (86)

$$F = ma + F_{rod} = 245 \cdot 6{,}5 + 36{,}05 = 1628{,}55\ N$$

Donde:
m es la masa total del conjunto
a es la aceleración.
F_{rod} es la fuerza de rodadura

La potencia de pico que necesitaremos queda definida de la siguiente manera:

$$P_{pico} = F \cdot v_{final} = 1628{,}55 \cdot 19{,}44 = 31659{,}01\ W \approx \mathbf{31{,}7\ kW}$$

Donde:
v_{final} es el valor de la velocidad que deseamos obtener, valor de 19,44 m/s.

3.4.3 Tipos de motor eléctrico

Los motores eléctricos debido a sus diversas y múltiples aplicaciones pueden tener diferentes configuraciones para adaptarse a la aplicación que se desee implantar está solución. Por tanto, tenemos múltiples opciones de distintos tipos de concepto de motor eléctrico para motorizar nuestro kart. Haremos un breve estudio de los principales tipos de motor y veremos su funcionamiento y cuáles son sus principales características para escoger el motor más adecuado para nuestra finalidad. La principal división en la clasificación de los motores eléctricos es entre motores de corriente continua (DC) y corriente alterna (AC).

3.4.3.1 Motores de corriente continua

Los motores de corriente continua, más concretamente los motores DC con escobillas, son los motores eléctricos más usados históricamente. Estos motores presentan, o presentaban hasta hace unos años, la ventaja de tener una gran capacidad para poder regular su velocidad de rotación, lo cual los hacía necesarios en aquellas aplicaciones en las cuales se precisa un ajuste fino de la velocidad y torque como sería nuestro caso.

En las aplicaciones de tracción se han utilizado principalmente este tipo de motores hasta que, recientemente, los nuevos modelos de vehículos eléctricos presentan opciones de motor con corriente alterna. Además de, aparecer en escena, los motores de corriente continua sin escobillas.

Esto es debido a que los motores de corriente continua con escobillas presentan las siguientes desventajas:

- Los motores de corriente continua necesitan una alimentación diferente a la que suministran la empresas eléctricas (AC) por ello deben instalarse rectificadores de potencia, con los que la corriente alterna es convertida a directa.
- Necesitan un mayor mantenimiento que los motores de corriente alterna, lo cual aumenta su coste a lo largo de su vida útil, debido a que el colector y las escobillas necesitan mucha atención.

La principal división en motores de corriente continua que podemos encontrar es:

- Motores DC con escobillas:

Generalmente se construyen con dos o más imanes permanentes fijos en torno a un electroimán giratorio. Al electroimán se le suministra la energía eléctrica a través de conmutación mecánica, es decir, los contactos que se realizan sobre el anillo rotatorio del motor son mediante “escobillas”. Actualmente, estas escobillas son contactos de carbón con resortes. A medida que el electroimán gira, las dos escobillas tienden a cambiar la polaridad del electroimán para que el electroimán y los imanes permanentes estén siempre en oposición.

Sus ventajas son el bajo coste de adquisición, su sencillez de construcción y tener una buena curva de par. Pero, sus principales desventajas son que el uso de escobillas nos obliga a un mantenimiento continuo.

- Motores DC sin escobillas:

Están formados por un imán giratorio permanente y dos electroimanes fijos. La conmutación se realiza mediante un control electrónico. Se necesita un microcontrolador, que utiliza una entrada de sensores que indican la posición del rotor, para energizar las bobinas del estator en el momento correcto.

La principal desventaja, respecto los anteriores, es que la presencia de tener este control electrónico nos hace que la inversión inicial en el motor sea mayor que en los motores con escobillas. Pero, nos hace que la vida útil y la eficiencia sean mayores y el mantenimiento menor.

3.4.3.2 Motores de corriente alterna

Los motores de corriente alterna presentar la gran ventaja de funcionar con la forma de corriente que se suministra por el sistema eléctrico. No requieren pasar la corriente alterna a corriente directa, por tanto tienen un menor coste y son los motores más utilizados. Se pueden clasificar en dos grandes grupos:

- Motores asíncronos o de inducción:

Los elementos constructivos del motor asíncrono (jaula de ardilla), al igual que cualquier otro dispositivo de conversión electromagnética de la energía de tipo rotativo está formado principalmente por: un estator y un rotor. El estator (inductor) es alimentado por una red monofásica o trifásica.

El devanado del estator está constituido por tres bobinados desfasados 120° en los que se introducen corrientes de una red trifásica. Esto produce una onda rotativa distribuida senoidalmente por el entrehierro que produce un flujo giratorio. Esto, a su vez, genera un campo magnético que pasa por las barras del rotor e induce un voltaje en ellas que provoca un par inducido que hace girar el rotor.

La principal ventaja de estos motores respecto de los motores síncronos o los motores DC sin escobillas es que no necesitan de imanes permanentes para generar el movimiento, es decir, son más robustos frente a golpes y, además presentan un fuerte par de arranque. Sus principales desventajas son que necesitan de una mayor refrigeración, su eficiencia es menor y son más pesados que los motores síncronos.

- Motores síncronos:

De igual manera que los motores asíncronos el estator de la maquina síncrona está alimentado con corrientes alternas. Esto hace que se produzca un campo magnético rotatorio en el estator. Pero, en el caso del rotor del motor síncrono, éste es alimentado por una corriente continua o tiene imanes permanentes que hacen que la fuerza electromotriz sea fija y constante al rotor. Por tanto, el campo magnético del rotor tiene a alinearse con el del estator haciendo que el eje gire a la velocidad síncrona.

Las principales ventajas son que son más compactos y se necesita un menor mantenimiento que en los motores asíncronos. Su principal inconveniente es su falta de par de arranque.

3.5 Selección de las baterías

En lo referente a las baterías habíamos hecho una pequeña muestra de las posibilidades de baterías posibles anteriormente. Ahora, realizaremos un estudio de las ventajas y desventajas que presentan los diferentes tipos de baterías para ver cuál es la mejor opción.

3.5.1 Baterías de plomo ácido

Baterías que suelen ser de 6 y 12V y están constituidas por celdas de 2V. Suelen ser utilizadas para el arranque de los motores de combustión utilizados en los vehículos convencionales.

Ventajas:

- Tecnología madura, es el tipo de batería más barata del mercado.
- Alta tensión por celda (2 V/celda) lo que permite obtener baterías de mayor tensión con un número menor de celdas conectadas en serie.
- Excelente capacidad para suministrar picos de corriente altos durante la descarga.
- Alta eficiencia, mayor al 80%.
- Componentes fácilmente reciclables.

Desventajas:

- Peso elevado debido al plomo como material principal.
- Baja energía específica, la menor de todas las baterías utilizadas (30-50 Wh/kg). Se usa para cubrir las necesidades de arranque, iluminación e ignición, ya que no son lo suficientemente grandes como para mover un vehículo.
- Corta vida cíclica, entre 500 ó 600 ciclos de carga-descarga.
- Se necesitan largos periodos de tiempo para la recarga.
- Baja resistencia ante sobrecargas y descargas accidentales.
- Necesidad de mantenimiento periódico.

3.5.2. Baterías de Níquel-Cadmio

Son baterías recargables que están desapareciendo paulatinamente debido a su efecto memoria y la presencia del Cadmio, su uso se restringió en el 2008 debido a su nocividad para el medio ambiente.

Ventajas:

- Tecnología muy establecida.
- Amplio rango de temperaturas de trabajo (-40 º C ÷ 60 º C).
- Admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten más carga, aunque no la almacenan.
- Vida cíclica larga que supera los 1500 ciclos de carga.
- Gran fiabilidad, mejor que las de plomo-ácido.
- Energía específica es de 45/80 Wh/Kg.

Desventajas:

- Precio elevado, en comparación con las baterías de plomo-ácido (por encima de los 300 €/kWh).

- Componente principal el Cadmio. Muy contaminante y restringido su uso por el Real Decreto 106/2008.
- La tensión nominal es de 1,2 V/celda, valor bastante bajo que nos obliga a conectar varias celdas en serie para tener los voltajes deseados.
- Efecto memoria muy elevado.
- Sufren envejecimiento prematuro con el calor.

3.5.3 Baterías de Níquel-Hidruro Metálico

Se introdujeron en los años 90 teniendo un rendimiento similar a las baterías de Níquel Cadmio, siendo la principal diferencia que el cátodo está formado por una aleación de hidruro metálico y no de Cadmio, ventaja muy importante respecto las anteriores.

Ventajas:

- Una mayor densidad energética y mayor energía específica que el NiCd, entre 60-120 Wh/Kg.
- Pueden ser cargadas con un cargador convencional y admiten cargas rápidas, con duración de entre 1 y 3 horas.
- Seguras y sin necesidad de mantenimiento.

Desventajas:

- Menor fiabilidad que las baterías Ni-Cd.
- Voltaje bajo de 1,2V por celda.
- Número de ciclos de vida moderado de aproximadamente 300-600 ciclos de carga en función del fabricante.
- Tiempos de carga superiores al Ni-Cd.
- No admiten bien las temperaturas extremas.
- Efecto memoria moderado, perdiendo capacidad de almacenamiento y una alta auto descarga.

3.5.4 Baterías de Litio

Tipo de baterías ampliamente conocido por su uso en electrónica, como en ordenadores portátiles y teléfonos. Este tipo de baterías tiene una densidad aproximadamente del doble de las baterías de Níquel-Cadmio y su voltaje por celda oscila entre los 3,3 y 3,7 voltios. Además no requieren mantenimiento y no tienen efecto memoria. Por tanto, vamos a describir los puntos fuertes y débiles a continuación.

Ventajas:

- Alta densidad de energía.
- Alta energía específica, aproximadamente entre 80-200 Wh/Kg.

- Alta capacidad de descarga en algunos tipos de baterías basadas en el litio.
- No necesitan de mantenimiento.
- No tienen efecto memoria.
- Bajo efecto de auto descarga.

Desventajas:

- Requieren de un circuito de seguridad para mantener los límites de voltaje máximo y mínimo por celda.
- Pérdida de prestaciones con temperaturas elevadas.
- Vulnerable a sobrecargas y sobre descargas.
- Elevado coste respecto a otras baterías, pueden llegar a los 800€/kWh.

Por otro lado, el cátodo puede ser de diversos materiales y dependiendo de éste sus características varían ostensiblemente.

3.5.4.1 Baterías LiPo

Formadas por polímero de litio, se diferencian del resto por el electrolito usado. La principal ventaja que ofrecen es que utilizan una bolsa flexible de aluminio en lugar de fundas rígidas, esto nos supone un ahorro considerable en el peso y el tamaño. El problema es que requieren un circuito de seguridad para mantener los límites de voltaje y pueden explotar si se perforan.

3.5.4.2 Baterías con cátodo de $LiCoO_2$

Este tipo de baterías son las más utilizadas en el mercado de la electrónica de consumo. Poseen la mayor densidad energética y energía específica del mercado, además de una alta tensión por celda de 3,6-3,7V. Por contrapartida, las altas temperaturas son bastante perjudiciales para su ciclo de vida y su capacidad de descarga es muy pequeña.

3.5.4.3 Baterías con cátodo de $LiFePO_4$

Son una variación de las anteriores, su diferencia es el cátodo fabricado con fosfato de hierro litio, que posee un bajo costo y no es tóxico. Otras características favorables de este subtipo de las baterías de litio son su mayor vida útil que el resto, supera los 2000 ciclos de vida, su tiempo de carga es de 10-15 minutos y es más segura que las otras posibilidades mencionadas anteriormente.

3.5.4.4 Baterías $LiMn_2O_4$ (LMO) y $LiNiMnCoO_2$ (NMC)

Son el tipo de baterías más utilizadas actualmente en los sistemas de los vehículos eléctricos. Poseen un voltaje por celda de 3,8V y 3,6-3,7V, respectivamente. En referencia

a su energía específica, las primeras poseen unos valores comprendidos entre 100-135 Wh/Kg mientras que las segundas 140-180 Wh/Kg.

A continuación se muestran tablas comparativas con los diferentes tipos de baterías de litio con diferente cátodo.

	Energy	Power	Safety*	Life	Cost
LCO lithium cobaltite $LiCoO_2$	+++	+++	-	++	+
LMO lithium manganese oxide $LiMnO_2$	-	+++	++	-	++
NMC nickel manganese cobalt $Li(Ni_xMn_yCo_{1-x-y})O_2$	++	++	++	+++	+++
LFP lithium iron phosphate $LiFePO_4$	+	+++	+++	++	++

Tabla 3.1. Comparativa entre los diferentes tipos de baterías de litio con diferente cátodo. (73)

Además se presentan las características en esta tabla para las Li-Po para poderlas comparar con el resto.

Li-Po	Voltaje	Límite de carga	Ciclo de vida	Temperatura de trabajo	Energía específica	Poder específico
	3,7V	4,2V	>1000	Media	130-200 Wh/Kg	20-50c
	Seguridad	Fuga térmica	Coste			
	Buena	77 °C	Alto			

Tabla 3.4. Tabla características baterías Li-Po

Especificaciones	Li-Cobalto $LiCoO_2$ (LCO)	Li-Manganeso $LiMn_2O_4$ (LMO)	Li-Fosfato $LiFePO_4$ (LFP)	NMC[1] $LiNiMnCoO_2$
Voltaje	3.60V	3.80V	3.30V	3.60/3.70V
Límite de carga	4.20V	4.20V	3.60V	4.20V
Ciclo de vida[2]	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000	1,000–2,000
Temperatura de trabajo	Media	Media	Buena	Buena
Energía especifica	150–190Wh/kg	100–135Wh/kg	90–120Wh/kg	140-180Wh/kg
Poder especifico	1C	10C, 40C pulso	35C continuo	10C
Seguridad	Media. Requiere de circuito de protección y el equilibrio celular de paquete de celdas multinivel. Los requisitos para formatos pequeños con células 1 ó 2 se pueden relajar		Muy seguro, necesita equilibrado celular y la protección de V.	Más seguro que las de Lito-Cobalto, necesitan equilibrado celular y protección.
Fuga térmica[3]	150°C (302°F)	250°C (482°F)	270°C (518°F)	210°C (410°F)
Coste	Alto	Medio	Alto	Alto
En uso desde	1994	1996	1999	2003

Tabla 3.3. Tabla comparativa entre las baterías de litio con diferentes cátodos (72)

3.6 Selección del BMS

Este sistema, conocido como BMS (Battery Management System), es decir, sistema de gestión de baterías, es el encargado de asegurar el correcto funcionamiento de las baterías. Prácticamente todas las baterías y por recomendación de los fabricantes van acompañadas de un sistema de gestión de las baterías.

El BMS se encarga de monitorizar los parámetros de la batería, como los voltajes, corrientes y la temperatura de cada celda, además de la temperatura ambiente y con estos parámetros se encarga de realizar funciones para que la batería se encuentre dentro de unos límites que consideremos seguros. Sus funciones principales son las siguientes:

- Detección de fuga: Se encarga de detectar posibles fugas de corriente en nuestro pack de baterías, ya que, una fuga en nuestro vehículo es un grave peligro ya que se trabaja a una intensidad de unos 400 A.
- Bloque de gestión térmica: Se encarga de determinar la temperatura de cada celda y actúa en consonancia.
- Estimación del estado de carga: Se define como la capacidad de la batería en función de su capacidad nominal. Nos permite limitar la carga y descarga entre unos valores para mejorar la vida útil.

- Estimación del estado de salud: Se reflejan las condiciones físicas de la batería comparando su capacidad máxima en comparación con la nominal de una batería nueva.
- Estimación de la capacidad: Deduce la corriente máxima de carga y de descarga mediante un algoritmo con tal de que la batería no sufra corrientes por encima de su límite.
- Bloque de señal: Se encarga de comunicar el BMS con la unidad de control electrónica (Controlador).
- Equilibrio entre células: La células de batería que conforman nuestro pack de baterías no son idénticas, es por ello, que el BMS se encarga de balancear estas celdas para que los estados de carga sean aproximadamente los mismos. Este proceso lo puede realizar con dos métodos diferentes que permitirían clasificar los BMS en dos grandes grupos.

Por tanto, la principal división entre los BMS existentes sería la siguiente:

- Sistemas activos: El método de equilibrio consiste en quitar carga de una o más celdas que tienen una carga superior al resto y, mediante condensadores o inductores, proporcionársela a otras celdas con un nivel de carga inferior. De esta manera conseguimos un mejor uso de la energía y podemos cuidar mejor el pack de baterías aumentando su vida útil.
- Sistemas pasivos: Esta técnica utiliza una resistencia para disipar el exceso de carga que puede acumular una célula hasta que la tensión cae por debajo del límite de voltaje seguro. Por tanto, a diferencia de los otros sistemas, este desaprovecha parte de la energía. Aun así, la principal ventaja de estos sistemas es su facilidad de implementación y control, reduciendo costes en materiales y mantenimiento.

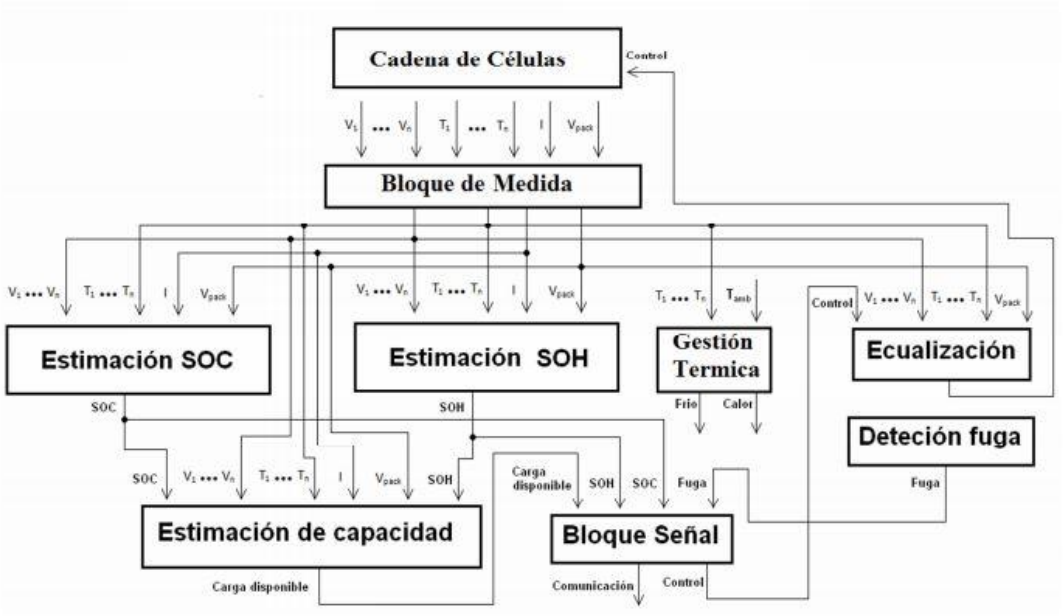

Ilustración 3.3. Diagrama de conexionado de un BMS (72)

3.7 Selección del controlador

El controlador será el elemento que gobernará por el correcto funcionamiento de las baterías y del motor eléctrico. Es decir, no podemos transmitirle al motor eléctrico un voltaje constante como el saliente de las baterías para la aplicación que deseamos. Por tanto, se encargará de transmitir el voltaje necesario al motor eléctrico según las necesidades del momento que vendrán definidas por los impulsos que nos proporcionaran el acelerador y el freno, regulados por un potenciómetro que nos transmitirá la información adecuada.

En definitiva, el controlador estará situado entre las baterías y el motor eléctrico para realizar los recortes del voltaje saliente de las baterías y entregar el valor correcto a nuestro motor. Dependiendo de la elección de nuestro motor, si es de corriente continua o corriente alterna, de su voltaje y su corriente nominal el controlador quedará definido para poder escoger el adecuado para nuestro kart eléctrico.

3.8 Selección del acelerador y freno

Tratándose de un vehículo estos dos elementos son indispensables para saber la velocidad que nos demanda el conductor. Por ello, la necesidad de saber este parámetro nos implica la instalación de estos dos elementos para transmitir la información al motor eléctrico y entregar la potencia adecuada.

En nuestro caso, al ser un vehículo eléctrico, la información se transmite gracias a un potenciómetro que transforma la presión ejercida en los pedales de acelerador y freno instalados en una corriente de mayor o menor intensidad que es transmitida al controlador del vehículo. Una vez el controlador tiene esta información, la analiza y la transmite para que el motor eléctrico funcione al régimen que se ha demandado para obtener la velocidad deseada.

3.9 Selección del cargador

El cargador es un elemento que, siendo externo a la estructura del kart, es de especial importancia en el conjunto de la instalación eléctrica de nuestro vehículo. Se encarga de tomar la energía eléctrica de la red (corriente alterna) y transformarla a corriente continua para alimentar y recargar las baterías de nuestro kart.

Si nuestras baterías son de base de litio el cargador toma aún más importancia. Como hemos mencionado anteriormente en el apartado 3.6, las baterías deben cargarse de una manera balanceada y evitar sobretensiones en nuestras células. Las células de ion-litio se cargan a 4,2V con una tolerancia de ±0,5mV, por tanto, una tensión más elevada de este límite nos produciría una reducción de la vida útil.

Finalmente, y no menos importante, deberemos tener en cuenta el tipo de carga que realiza nuestro cargador teniendo en cuenta el proceso de carga que se debe realizar para una celda de ion-litio.

4. Modelo de simulación

En este apartado se utilizará un programa de simulación desarrollado para simular las condiciones de un Nissan Leaf en Matlab. Se han modificado los parámetros de entrada para adaptarlos a las condiciones de nuestro vehículo, tanto los valores del sistema eléctrico, compuesto de las baterías, su distribución y las características de los motores a simular y comparar, como de los valores de peso y coeficientes de resistencia a la rodadura.

Independientemente de esto, también se ha modificado el programa en los siguientes aspectos:

- Se han modificado los archivos que son llamados por el programa para adecuarlos a nuestros componentes. El archivo que es llamado para establecer el rango de voltajes de las celdas ha sido adaptado para nuestro rango y el archivo que se usa para determinar la eficiencia del motor también ha sido adaptado el rango de par motor y velocidad angular para cada motor simulado.
- Se ha añadido al programa que se ejecuta para mostrar las gráficas con los resultados para mostrar el gráfico de eficiencia de motor en el ciclo de trabajo que se simule.

Todo el programa de simulación se basa en un sistema general que simula diversos subsistemas para extraer los valores del funcionamiento de un vehículo eléctrico. Empezaremos explicando el programa general e iremos profundizando posteriormente en cada subsistema por separado.

4.1 Programa general

El sistema general se basa en cinco bloques que se detallan más adelante cuál es su finalidad y que parámetros podemos extraer de ellos. Los cinco grandes bloques son los siguientes:

- Ciclo de conducción (Driving cycle)
- Control del vehículo (Vehicle control)
- Componentes del vehículo (Vehicle components)
- Entorno (Environment)
- Conversión de fuerza resultante a velocidad (F=ma)

Estos grandes bloques están compuestos por otros bloques que van simulando, a partir de los datos, de las condiciones y características de nuestro vehículo, introducidos en el previamente mediante una hoja de datos de Matlab, que se irán explicando a continuación.

```
28      %% Battery Model Parameters
29 -    Capacity = 2.88e3*60*60;        % Battery pack capacity [J] = Wh*60*60
30 -    SOC_0 = 90;                  % Initial battery state of charge [%]
31 -    Vbat = 72;                   % battery pack nominal voltage [V]
32      % Battery model parameters [room temperature]
33 -    Mp = 0; % number of cells in parallel
34 -    Ns = 20; % number of units in series
35      % Cell model parameters [room temperature]
36 -    load batt_V_SOC.mat % Voc(SOC) look-up table
37 -    Cnom = 40; % cell capacity [Ah]
38 -    Crate = 5*Cnom; % Max battery pack charge/discharge rate
39 -    SOC0 = SOC_0/100; % initial SOC [0-1]
40 -    Rp = 0.005; % discharge series resistance for Ibat > 0
41 -    Rn = 0.005; % charge series resistance for Ibat < 0
42 -    R1 = 0.005; % diffusion series resistance
43 -    tau1 = 240; % diffusion time constant [s]
44 -    VM = 0.015; % hysteresis voltage [V]
45 -    tauH = 40; % hysteresis time constant [s]
46 -    etaC = 0.995; % Coulomb efficiency
47
48      %% Electric Motor Parameters
49 -    load MotorEff1115;               % Electric Motor Efficiency Data
50 -    Ke = 0.15;                  % Torque Constant [Nm/A]
51 -    Pe_max = 30e3;               % Maximum Motor Power [W]
52 -    Vbase = 19.44;          % Base speed [m/s] = MPH * 0.44704
53 -    Te_max = Pe_max*rw/gratio/Vbase;     % Maximum motor torque [Nm]
54 -    Fv_max = Te_max*gratio/rw;     % Maximum vehicle tractive force [N]
55 -    VbaseMPH = Vbase/0.44704;    % Base speed [mph]
56
57      %% DC-DC Converter Parameters
58 -    eta_DC = .98;                % DC-DC Converter Efficiency (constant)
59 -    Vbus_ref = 72;              % DC Bus Voltage Reference (constant) [V]
60
61      %% Inverter Parameters
62 -    eta_inv = .95;               % Inverter Efficiency (constant)
63
64      %% Vehicle physical parameters
65 -    Mv = 245; % Vehicle curb weight + 70 kg passenger and cargo
66 -    Cd = 0.804;                   % Coefficient of Drag
67 -    Cr = 0.014;                   % Coefficient of Friction
68 -    Av = 0.9;                   % Front area [m^2]
69 -    rho_air = 1.204;             % Air density [kg/m^3]
```

Ilustración 4.3. Ejemplo de la introducción de datos

Una vez se ha producido la simulación el sistema da por finalizado el tiempo de simulación estos bloques de Simulink nos permiten extraer los datos de:

- Velocidades y fuerzas
- Potencia
- Distancia
- Estado de carga de las baterías

- Intensidades (Intensidad entrada inverter, Intensidad de salida de tres fases inverter e intensidad de la batería)

Los detalles de los datos introducidos para la parametrización de cada motor quedan detallados en los anexos, apartado "2. Parametrización".

Con los resultados obtenidos se ha generado un subprograma que ejecuta estos datos y nos permite realizar las gráficas que nos permitirán comparar los motores eléctricos que se propondrán.

```
%Battery SOC plot

subplot(3,1,1);
hold on;
plot(SOC.time/60, SOC.signals.values(:,1), 'b', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Battery SOC [%]');
xlabel('time [min]');
grid on;

%Battery ouput current plot

subplot(3,1,2);
hold on;
plot(Ibat.time/60, Ibat.signals.values(:,1), 'b', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('Current [A]');
xlabel('time [min]');
grid on;

%Battery charge/discharge rate plot

subplot(3,1,3);
hold on;
plot(Ibat.time/60, (Ibat.signals.values(:,1))/Cnom, 'r', 'LineWidth', 1.5);
ylabel('C rate');
xlabel('time [min]');
grid on;
```

Ilustración 4.4. Ejemplo del subprograma de graficado de los datos obtenidos

Las gráficas presentan los siguientes valores:

- Velocidad del vehículo (en km/h)
- Voltaje utilizado de la batería (en V)
- Estado de carga de las baterías (en %)
- Corriente que circula por las baterías (en A)
- Ratio de C que es la intensidad a la que las baterías trabajan en ese instante respecto su capacidad.

- Curvas de eficiencia del motor y la línea de trabajo del motor. La gráfica presenta el par motor (en Nm) respecto la velocidad angular (en rad/s).

El programa al completo queda detallado en los anexos, apartado “3. Graficado”.

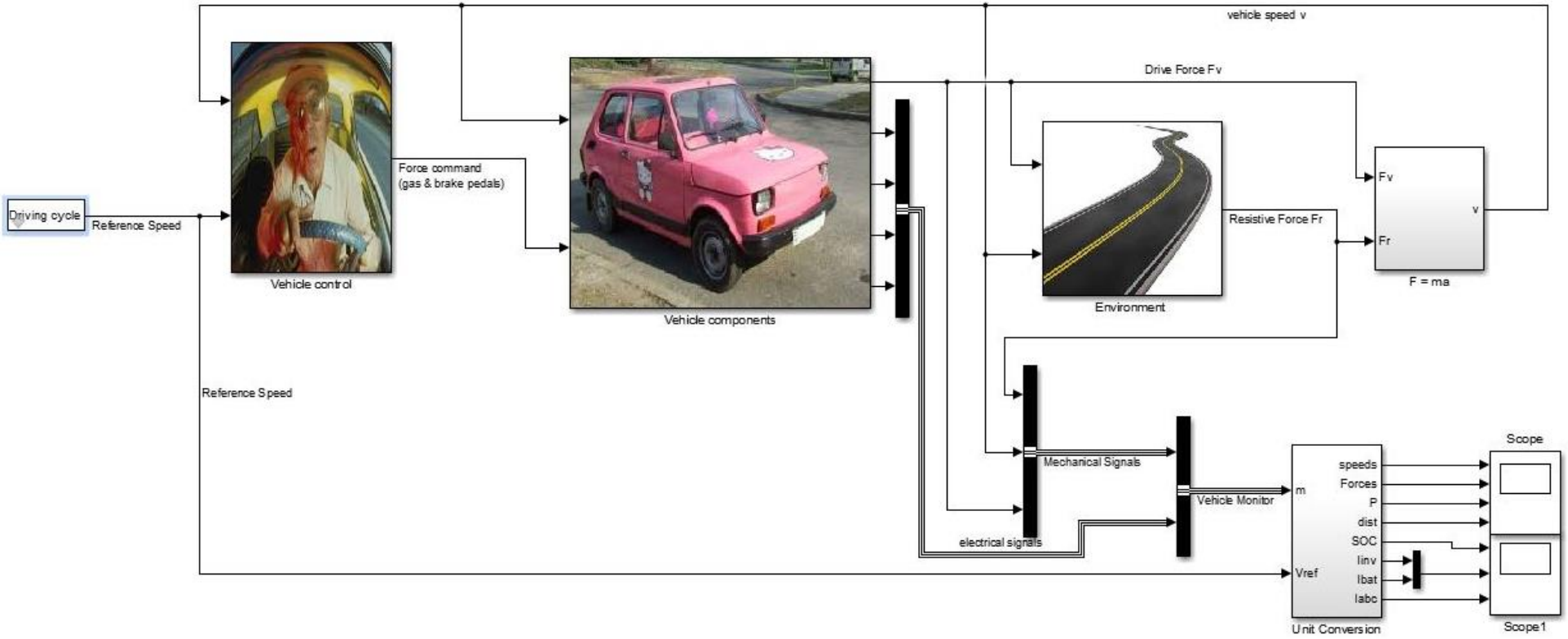

Ilustración 4.5. Sistema de simulación, vista general

4.2 Ciclo de conducción

Este primer gran bloque está conformado en su interior por un interruptor que selecciona el bloque del ciclo de trabajo seleccionado por el usuario en el sistema general. El programa está conformado por ciclo de trabajos con características de diferentes carreteras o situaciones que se podría encontrar el Nissan Leaf.

Como en nuestro caso, estamos simulando los motores para un kart eléctrico hemos utilizado el ciclo de trabajo de autopista (hwy) para poder ver qué resultados obteníamos llevando el motor con una elevada carga de trabajo. Con ello obtendremos valores pesimistas en descarga de batería y los valores máximos de corrientes demandadas a la batería, voltaje necesario y la velocidad máxima alcanzada por el kart eléctrico (la velocidad máxima que demanda este ciclo es de 80 km/h).

Los demás ciclos que presenta son carretera urbana de U.S (udds), carretera secundaria de U.S (us06), carretera europea (eudc) y constante a 60 millas por hora desde 0 (mph60).

El sistema de este bloque se muestra en la imagen siguiente:

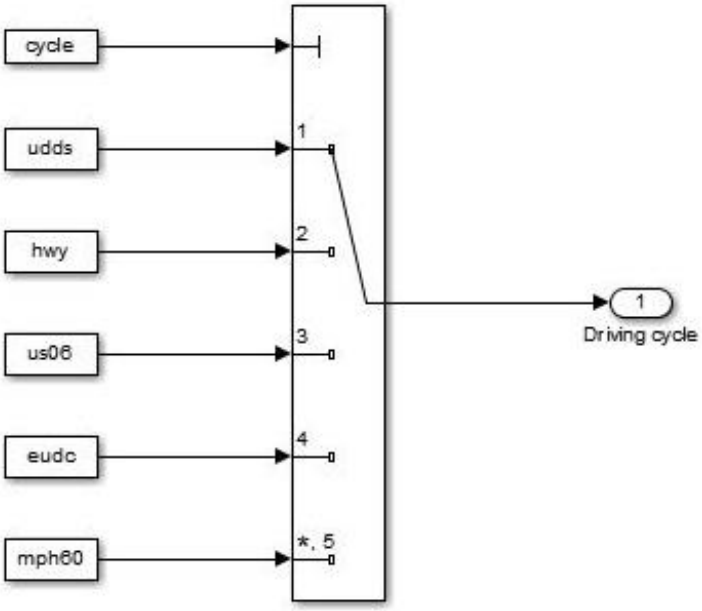

Ilustración 4.6. Bloque ciclo de trabajo

4.3 Control del vehículo

En esta parte el programa nos da la fuerza resultante que hay que aplicar sobre el vehículo para obtener la velocidad que se le está introduciendo. El sistema recibe una velocidad de referencia que viene dada por el ciclo de conducción que hemos seleccionado previamente y mediante un controlador PID se encarga de compararla con la velocidad actual del vehículo, en nuestro caso el kart eléctrico. Una vez comparadas ambas velocidades extrae el valor de fuerza necesaria para obtener la velocidad que se le está reclamando.

Además, hay un sistema para comprobar si la fuerza demandada es superior a la máxima disponible y detener la integración del programa si el pedal de gas excede este máximo disponible. Por tanto, gracias a este sistema podremos saber qué velocidad máxima podemos obtener en el caso de que el ciclo reclame la máxima fuerza disponible que nos puede entregar el motor.

A lo largo de la simulación estas señales de fuerzas son extraídas de este bloque y enviadas al bloque de componentes del vehículo para poder simular todo el sistema eléctrico delante de la situación a la que se le esté planteando.

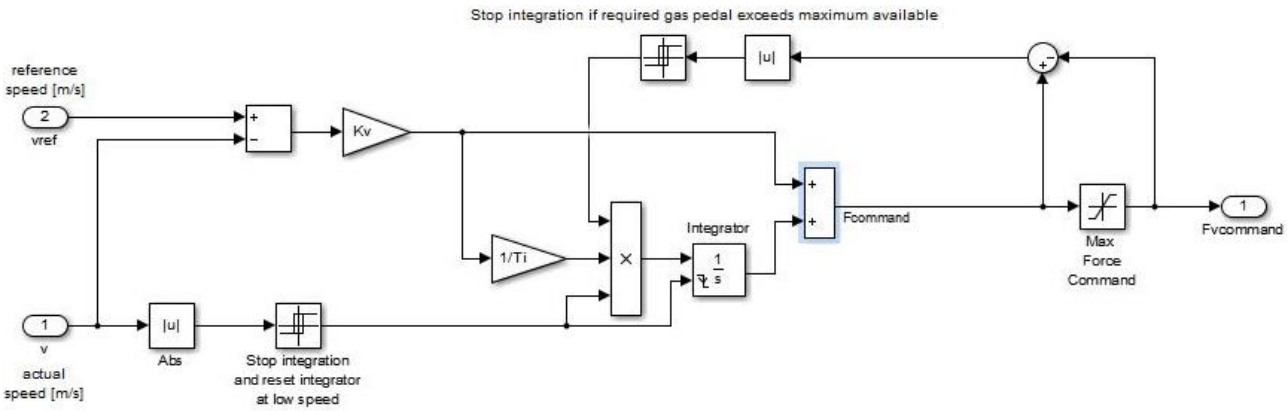

Ilustración 4.7. Bloque del control del vehículo

4.4 Componentes del vehículo

El bloque más importante de todo el sistema de simulación donde se sitúa todo el sistema eléctrico del vehículo que queremos simular. En este bloque nos aparecen todos los elementos que dependen de las características de nuestro vehículo. El bloque está formado por los siguientes sistemas:

- Modelo de baterías del vehículo eléctrico

- Convertidor DC-DC
- Inverter
- Motor PMAC (Permanent Magnet AC)
- Engranaje
- Ruedas

Con este sistema podremos extraer la mayoría de valores necesarios para poder realizar las comparaciones que deseamos y poder seleccionar así, el mejor motor eléctrico para nuestro kart. Con el sistema que se representa en la imagen siguiente obtenemos los datos de la fuerza que proporciona el kart, el estado de carga del pack de baterías y las intensidades; la intensidad de la batería, la intensidad de entrada del inverter y las intensidades de salida de las tres fases del inverter. Con estos datos simulados, a partir de la introducción de los valores iniciales de las características del sistema eléctrico, y posteriores cálculos con el uso de estos podremos realizar las gráficas y conclusiones finales sobre nuestro vehículo.

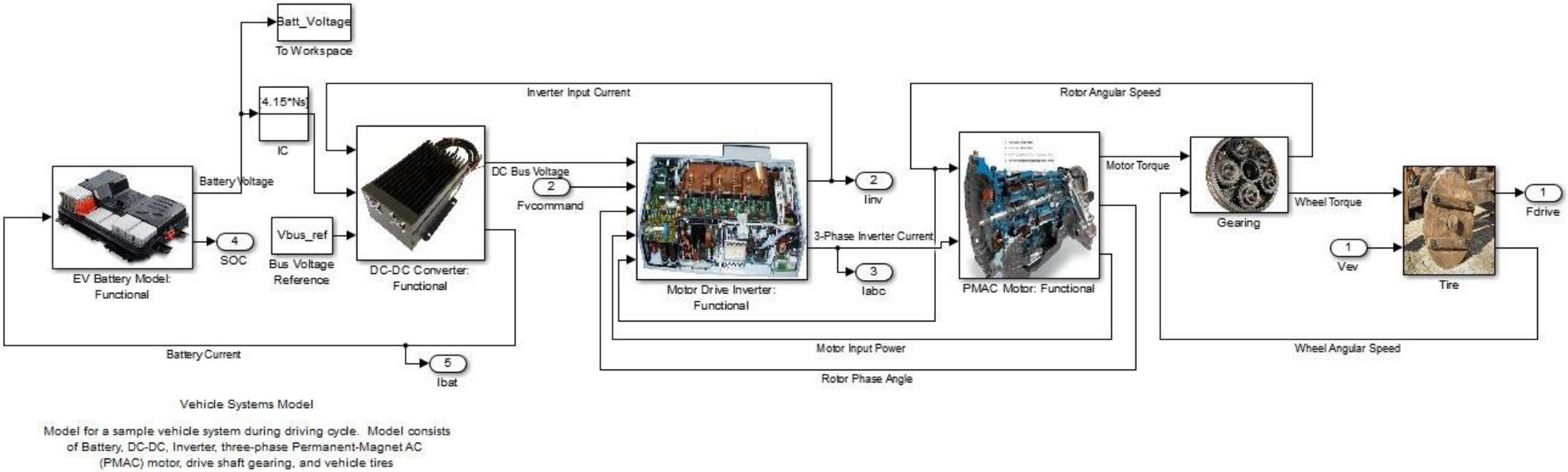

Ilustración 4.8. Sistema de los componentes del vehículo

Ahora veremos cada elemento del bloque de componentes del vehículo con más detalle para poder ver como se extraen los datos.

4.4.1 Modelo de baterías del vehículo eléctrico

El modelo de baterías nos demanda inicialmente las características iniciales de las celdas escogidas. En nuestro caso, estos valores serán detallados más adelante, cuando se proponga la solución para las celdas del contenedor de baterías pero, vamos a ver a continuación, cuales son los valores que se han modificado para nuestro caso en particular y nos pide el modelo de simulación:

- Capacidad del pack de baterías (Wh)
- Estado de carga inicial
- Voltaje nominal del pack de baterías (V)
- Número de celdas en paralelo
- Número de celdas en serie
- Capacidad nominal de las celdas (Ah)
- Rango de voltaje de la celda

En nuestro caso, no hay celdas en paralelo y para que no haya ningún error en el programa se ha modificado eliminando este parámetro. También, la hoja de datos inicial llama a otra hoja de datos externa con los valores del rango de voltaje de las celdas, el cual también se ha modificado para las celdas que se han escogido finalmente.

Una vez introducidos estos valores iniciales, el modelo de baterías extrae el valor del estado de carga de las baterías y el voltaje que se demanda al pack de baterías en cada instante de la simulación.

El procedimiento es extraer el voltaje de la celda en cada instante y restarle los voltajes residuales que se puedan producir por las resistencias de descarga, carga y difusión y el voltaje de histéresis (como no se han podido encontrar los datos exactos para nuestras celdas se han mantenido los valores prestablecidos en el programa). Una vez tenemos este valor, se multiplica por el número de celdas que tengamos en serie y obtenemos el valor de voltaje del pack de baterías que se está demandando en cada instante de tiempo.

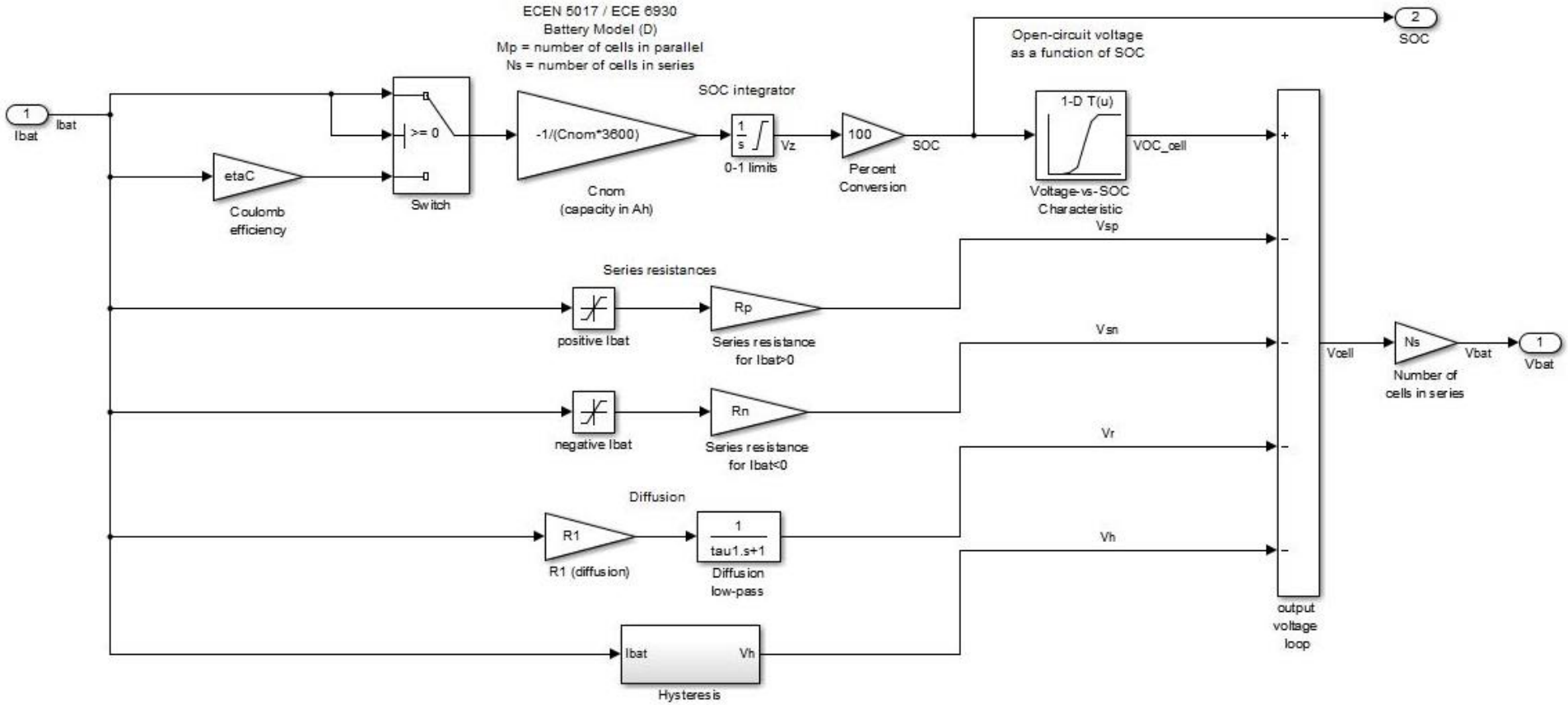

Ilustración 4.9. Modelo de baterías del vehículo eléctrico

4.4.2 Convertidor DC-DC

El convertidor DC-DC se encarga de marcar un voltaje de salida predefinido que es el que está establecido que trabaje el motor eléctrico de nuestra instalación. Por tanto, su función principal es adecuar el voltaje del pack de baterías y que el voltaje de salida sea el estipulado. Nuestro sistema está pensado para que no sea necesario este elemento, es decir, el pack de baterías tendrá un voltaje nominal de 72 V y el motor eléctrico trabajará a este mismo voltaje. Aun así, se ha mantenido por precaución y por asegurar el correcto funcionamiento en todo momento del motor eléctrico y de la instalación.

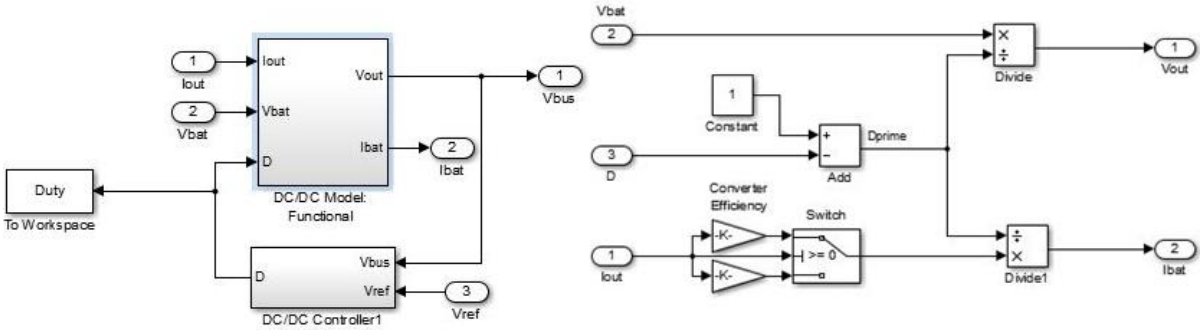

Ilustración 4.10. Bloque del convertidor DC-DC (izquierda), interior bloque modelo DC-DC funcional (derecha)

4.4.3 Inverter

El inverter es el encargado de recibir la fuerza que viene como predeterminada por el ciclo de conducción y utilizando el radio de la rueda y el ratio de transmisión que se han introducido pasarlo a par motor demandado, que junto la velocidad angular del rotor, nos extrae el par motor actual. A partir de estos datos y la potencia que se demanda y el voltaje determinado por el convertidor DC-DC extraemos los valores de intensidad de entrada y de salida del inverter.

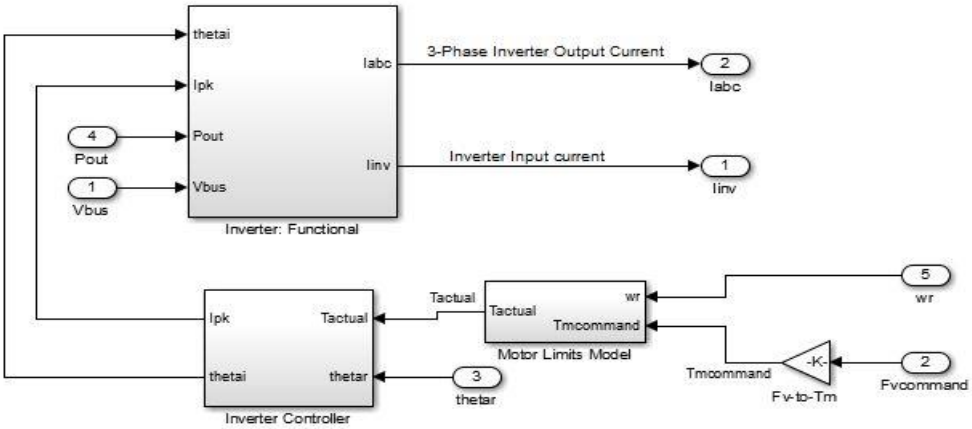

Ilustración 4.11. Bloque Inverter

Refiriéndonos a la intensidad de entrada se calcula a partir de la potencia demandada por el motor y el voltaje proveniente del convertidor DC-DC. Por lo que respecta a la intensidad de salida, la característica principal es que tiene forma sinusoidal. Esto se realiza, ya que, el tipo de motores escogidos trabajan con este tipo de señales PWM (Pulse Width Modulation). Por tanto, estas señales son generadas a partir de las entradas por fase según el ángulo del rotor y los valores de intensidad de pico.

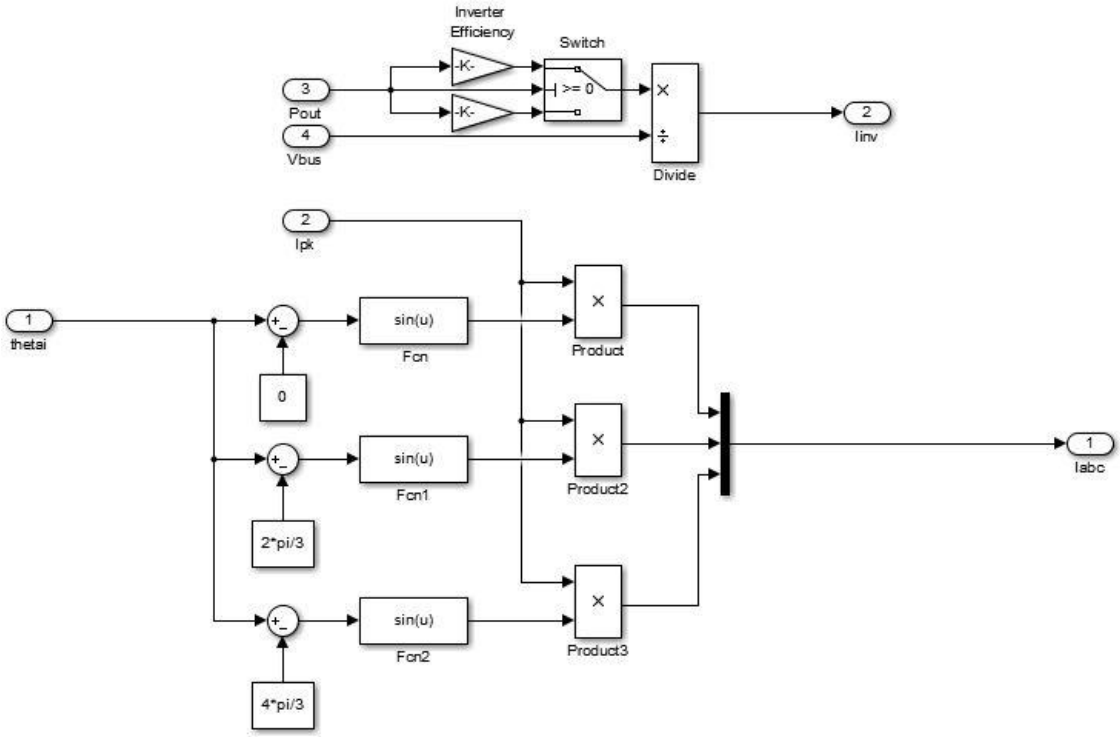

Ilustración 4.12. Generación de las intensidades de entrada y salida del inverter

4.4.4 Motor Permanent Magnet AC (PMAC)

El elemento del sistema de simulación que más nos interesa, ya que, es el componente que queremos comparar y seleccionar a partir de los datos obtenidos mediante la simulación. Los motores seleccionados son motores AC síncronos que funcionan mediante imanes permanentes como se ha explicado anteriormente. Estos funcionan mediante la señal sinusoidal proveniente del inverter y la salida de par motor depende de las intensidades de las tres fases y la posición relativa del rotor respecto el estator.

Una vez se determina cual es la fase que está actuando en ese momento dependiendo del ángulo del rotor, el sistema de simulación nos da el valor del par motor que está entregando el motor en ese instante.

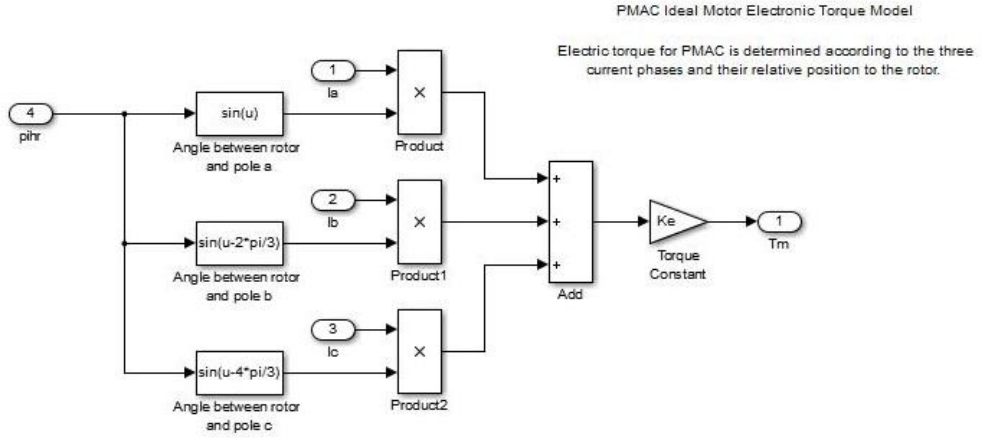

Ilustración 4.13. Modelo de motor ideal PMAC

Desde una vista más generalizada del sistema del motor, éste recibe las tres intensidades para cada una de las tres fases junto con el módulo del ángulo del rotor extraído de la velocidad angular del rotor. A partir de estos valores extrae el par motor y con, de nuevo, la velocidad angular del rotor extraemos la potencia entregada del motor, previamente filtrada por un bloque que determina la eficiencia del motor, según la posición en una tabla predefinida que busca el valor de eficiencia según el par motor y la velocidad angular. Podemos ver este proceso detallado en las siguientes ilustraciones:

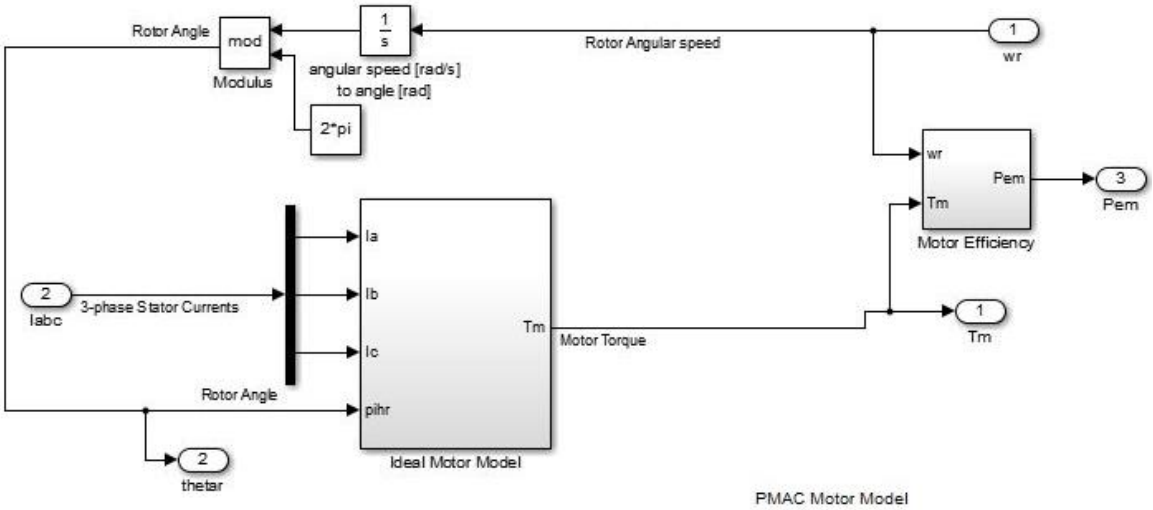

Ilustración 4.14. Modelo de motor PMAC

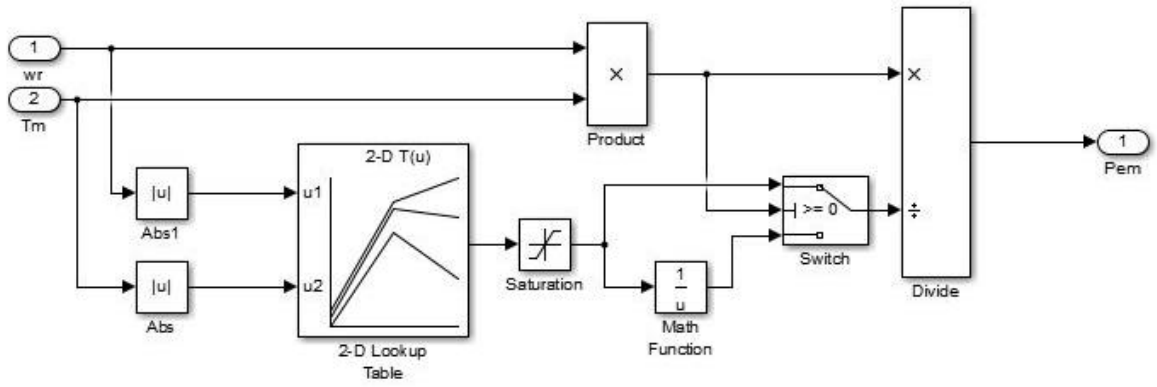

Ilustración 4.15. Cálculo de la eficiencia del modelo de motor PMAC

4.4.5 Engranaje

Tanto este bloque como el de ruedas del modelo se hace una pequeña mención de su funcionamiento, ya que, su función es muy sencilla.

El bloque del engranaje se encarga de recibir el par motor entregado por el motor eléctrico y mediante el ratio de transmisión que se haya introducido en los valores iniciales transmitir este a las ruedas.

4.4.6 Ruedas

Bloque encargado de recibir el par transmitido a las ruedas y convertirlo a la fuerza de avance que se estaría aplicando al vehículo dividiendo el par motor entre el radio de las ruedas.

Además, a partir de la velocidad lineal se divide por el radio de las ruedas para obtener la velocidad angular de las ruedas que utiliza el bloque de engranaje para realizar los cálculos.

4.5 Entorno

El cuarto gran bloque del programa principal es el de entorno que se encarga de recibir la velocidad del vehículo y la fuerza del motor resultante que se está aplicando en ese momento para las condiciones que se demandan previamente. Con estos valores y utilizando unas constantes predefinidas en la introducción inicial de datos podemos extraer la fuerza que se opone al movimiento del vehículo. Las constantes necesarias para el cálculo son las siguientes:

- Densidad del aire (kg/m^3), valor de 1,204 kg/m^3 (20ºC).
- Coeficiente de drag (C_d), predeterminado en 0,804 para nuestro vehículo.

- Coeficiente de fricción (C_r), predeterminado en 0,014.
- Área frontal (m^2), valor de 0,9 estimado para nuestro tipo de vehículo.
- Masa del vehículo (kg), estimado en 245 kg incluyendo un pasajero de 70 kg.

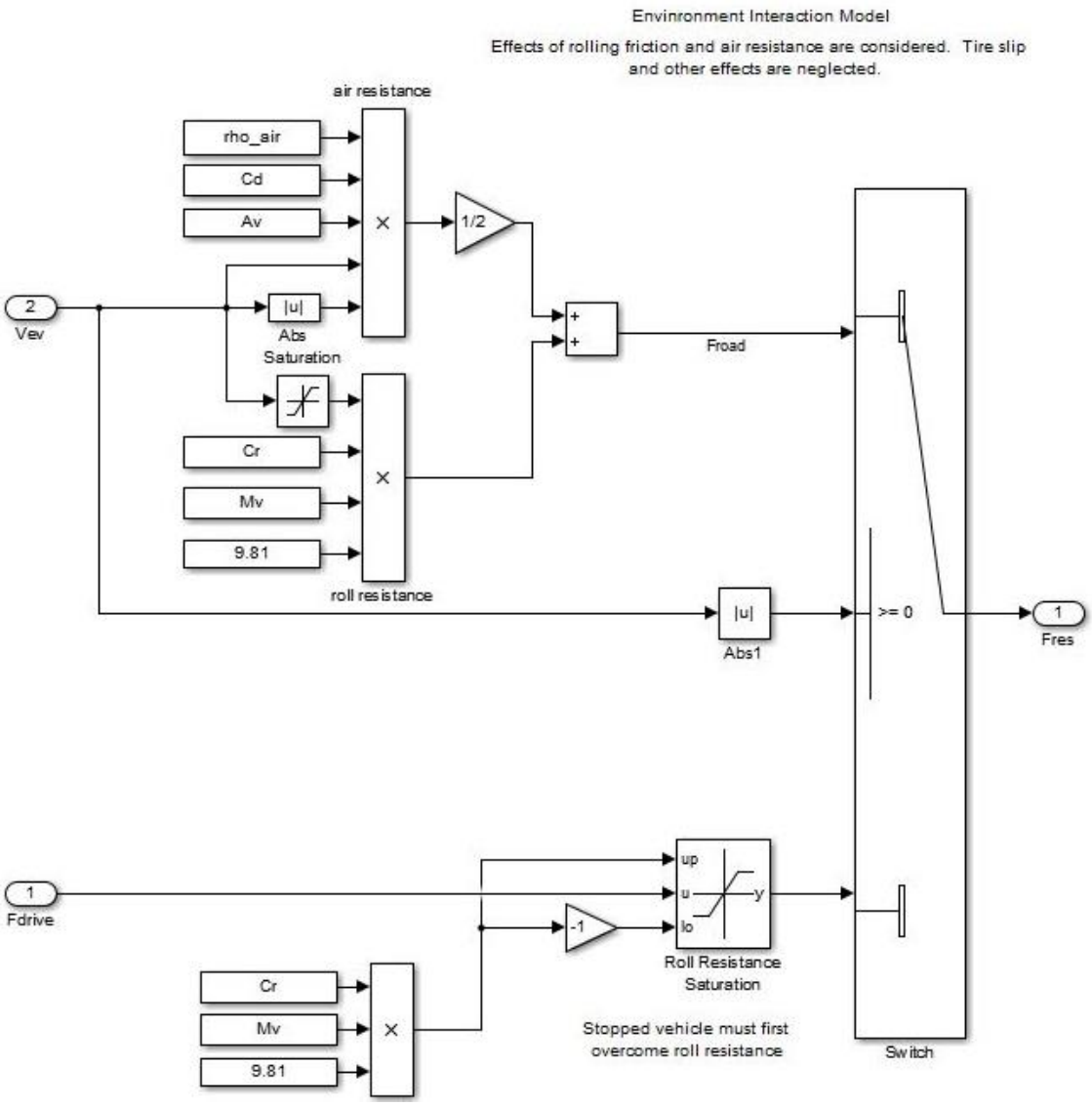

Ilustración 4.16. Modelo de simulación del entorno

4.6 Conversión de fuerza resultante a velocidad

El último de los bloques es el encargado de recoger el valor de fuerza resultante obtenido de los cálculos realizados previamente por los bloques explicados anteriormente y dividir este valor por la masa del vehículo obteniendo así, la aceleración de este. Una vez tenemos el valor de aceleración lo integramos para obtener la velocidad del vehículo en cada instante de la simulación.

5. Propuesta definitiva

En esta sección presentaremos la solución propuesta para los componentes que se han ido mencionando anteriormente. Cabe destacar que no es una solución única y precisa, es decir, no son los mejores componentes en todos los aspectos. Como se ha mencionado, se ha buscado una solución que nos permita el equilibrio que deseábamos encontrar para realizar un kart eléctrico enfocado al sector del ocio y del alquiler pero, que además, nos permitiese poder tener unas prestaciones que se acercasen a los vehículos de competición de este sector. Por tanto, las soluciones de motor, controladores, baterías, etc. que se han seleccionado van enfocadas en esta dirección.

Se detallan solo las características más relevantes para el entendimiento de las soluciones. El resto de características de los elementos seleccionados pueden ser consultadas en los anexos, apartado "4.Manuales".

5.1 Propuesta de motor

Los diferentes tipos de motor eléctrico existentes han sido comentados en el apartado 2, vistas las ventajas y desventajas de estos se ha decidido seleccionar un motor AC síncrono sin escobillas (Brushless AC/Permanent Magnet Synchronous Magnet)

Los motivos por los que se ha seleccionado son varios pero, entre los más destacables podríamos decir que es porqué son motores mucho más compactos que los motores AC asíncronos y poseen una tecnología más avanzada que los habituales motores de corriente continua con escobillas utilizados en el mundo del karting eléctrico.

Este último punto ha sido el más importante en el momento de seleccionar el motor. Si bien es cierto que los motores con escobillas poseen precios, generalmente, más económicos, debido a la gran experiencia de construcción de éstos, se ha optado por los AC síncronos. Por tanto, hemos preferido realizar esta decisión aun siendo el desembolso inicial mayor por un mantenimiento periódico posterior muy inferior que con los motores con escobillas.

El motor escogido se verá más adelante una vez realicemos la muestra de las simulaciones realizadas con varías situaciones, siempre partiendo de la base de que los motores funcionaran a 72 VDC para poder compararlos correctamente y marcar un valor de referencia para la selección del controlador, el diseño del contenedor de baterías, etc. Los modelos que se han simulado son los siguientes:

Ilustración 5.17. Motor Motenergy ME1114 (47)

Ilustración 5.18. Motor Motenergy ME1115 (49)

Ilustración 5.19. Motor MARS ME0913 (41)

5.1.1 Características principales de los motores

Los motores a la hora de simularlos se nos demandan la introducción de la potencia máxima que pueden entregar, la velocidad base y los márgenes de par motor y revoluciones.

Los valores utilizados son los siguientes:

Modelo motor	Potencia máxima (kW)	Velocidad base (m/s)*	Constante Par Motor (Nm/A)	Margen par motor (Nm)	Margen revoluciones (rad/s)
Motenergy ME1114	24	11,72	0,12	0-65	0-378
Motenergy ME1115	30	11,76	0,15	0-81	0-378
MARS ME0913	43,2	15,24	0,15	0-90	0-482

Tabla 5.5. Datos utilizados para la simulación de los motores

*Todos los motores han sido simulados con una relación de transmisión igual a 3.

5.1.2 Simulación 1

En este apartado se muestran las simulaciones realizadas para cada motor, respectivamente, las conclusiones y la decisión final sobre el motor a escoger para nuestro kart eléctrico a partir de los resultados obtenidos. Como bien se ha mencionado anteriormente se ha utilizado el ciclo de conducción para simular una autopista para obtener valores pesimistas en estado de carga de batería y ver que velocidades máximas podemos llegar a obtener, el ciclo las limita a 80 km/h y nosotros queríamos un máximo de 70 km/h, por tanto, es válido para ver si llegamos a los valores que deseábamos.

5.1.2.1 Simulación 1: Motor Motenergy ME1114

Presentamos los resultados obtenidos para el ciclo de conducción que se ha simulado:

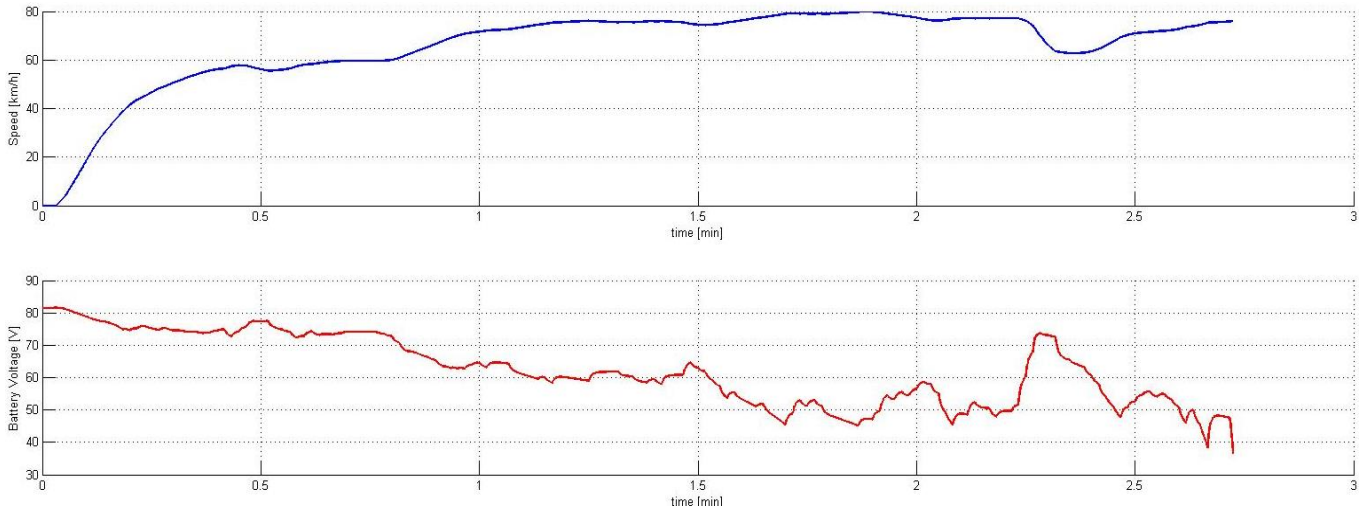

Ilustración 5.20. Simulación 1. Velocidad y voltaje demandado a la batería. Motor ME1114

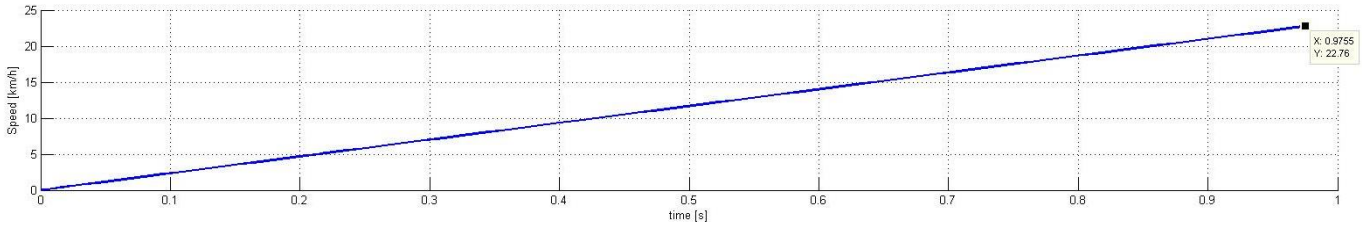

Ilustración 5.21. Comprobación aceleración. Motor ME1114

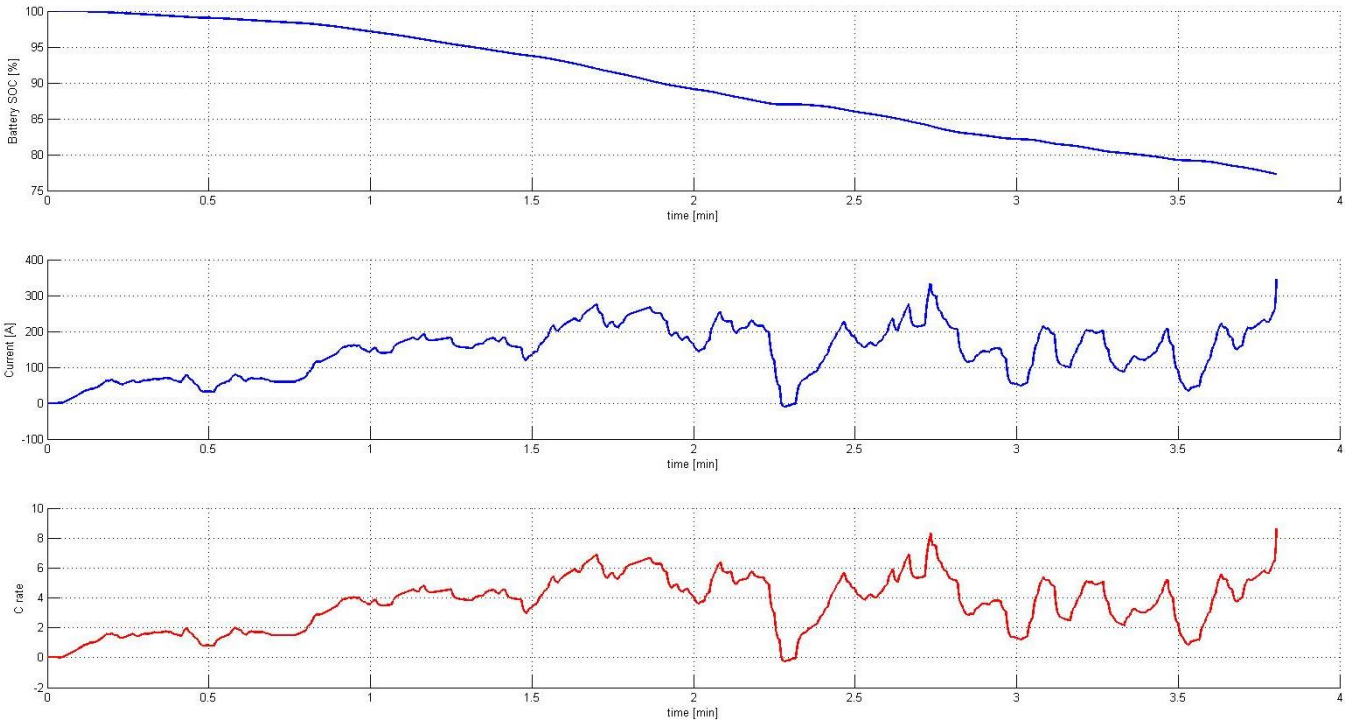

Ilustración 5.22. Simulación 1. Estado de carga, corriente y ratio C. Motor ME1114

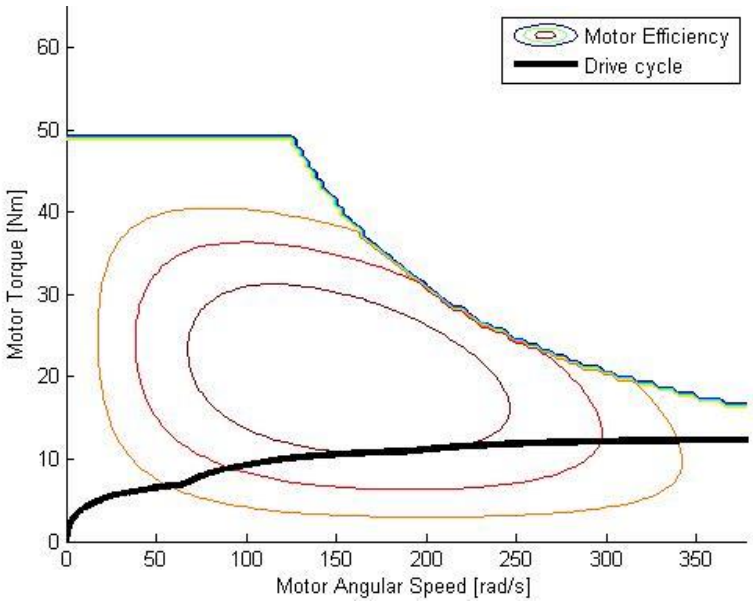

Ilustración 5.23. Simulación 1. Eficiencia. Motor ME1114

5.1.2.2 Simulación 1: Motor Motenergy ME1115

A continuación se presentan los valores obtenidos para el motor ME1115:

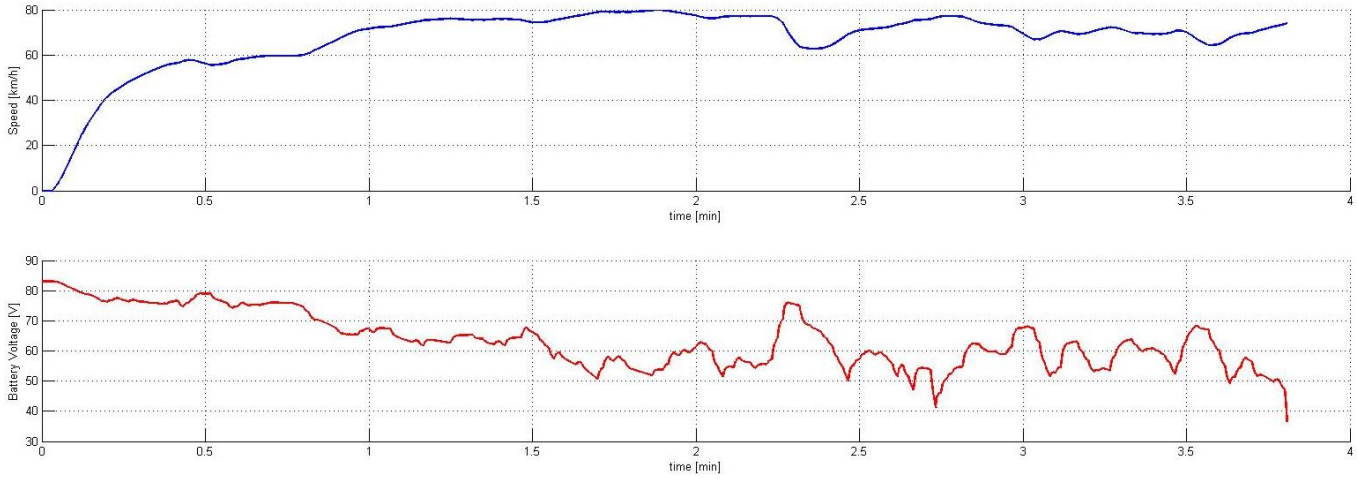

Ilustración 5.24. Simulación 1. Velocidad y voltaje demandado a la batería. Motor ME1115

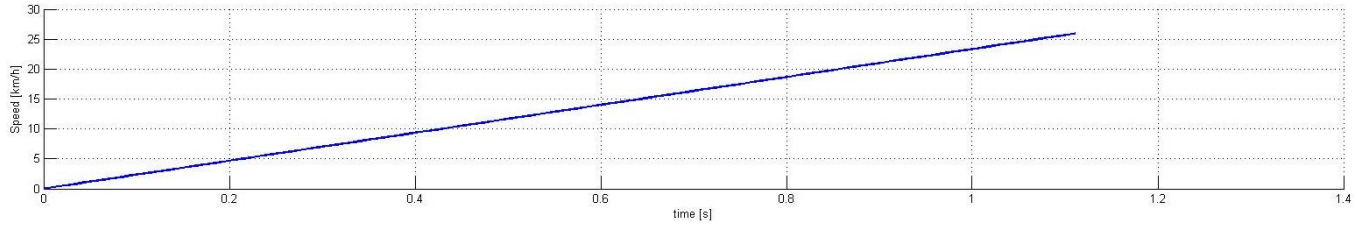

Ilustración 5.25. Comprobación aceleración. Motor ME1115

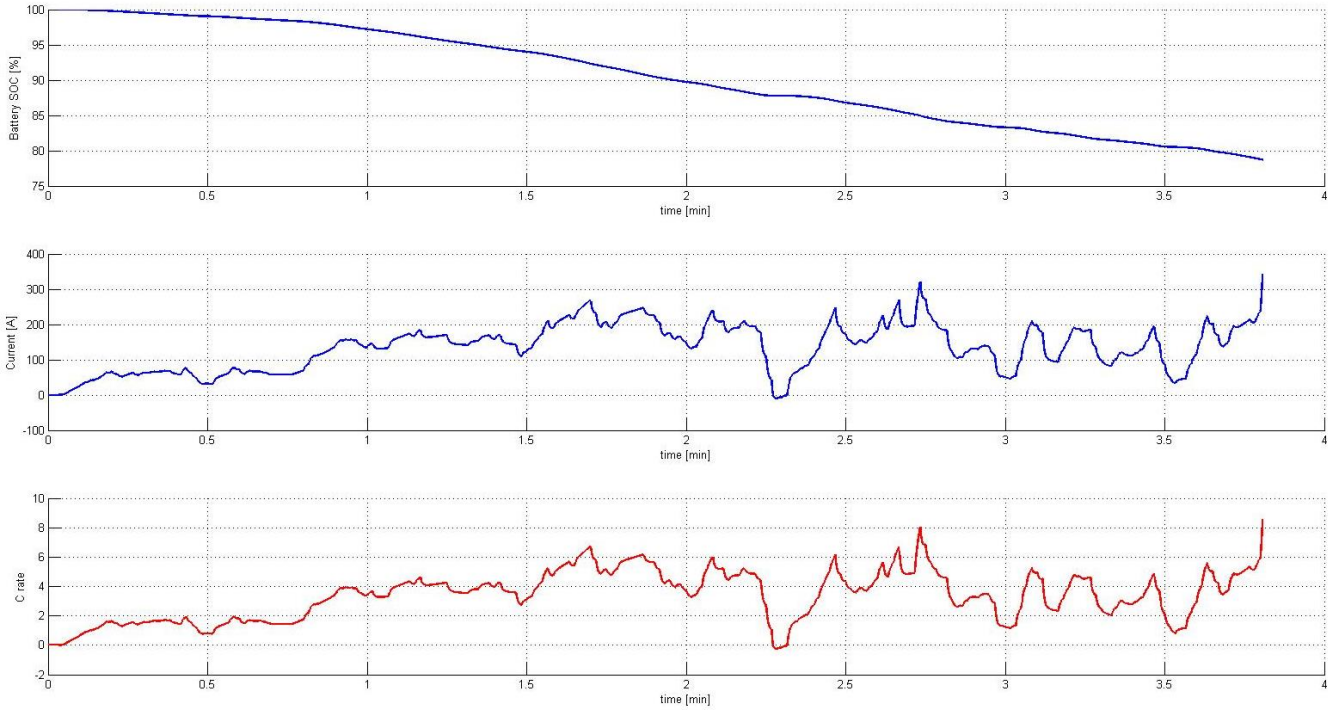

Ilustración 5.26. Simulación 1. Estado de carga, corriente y ratio C. Motor ME1115

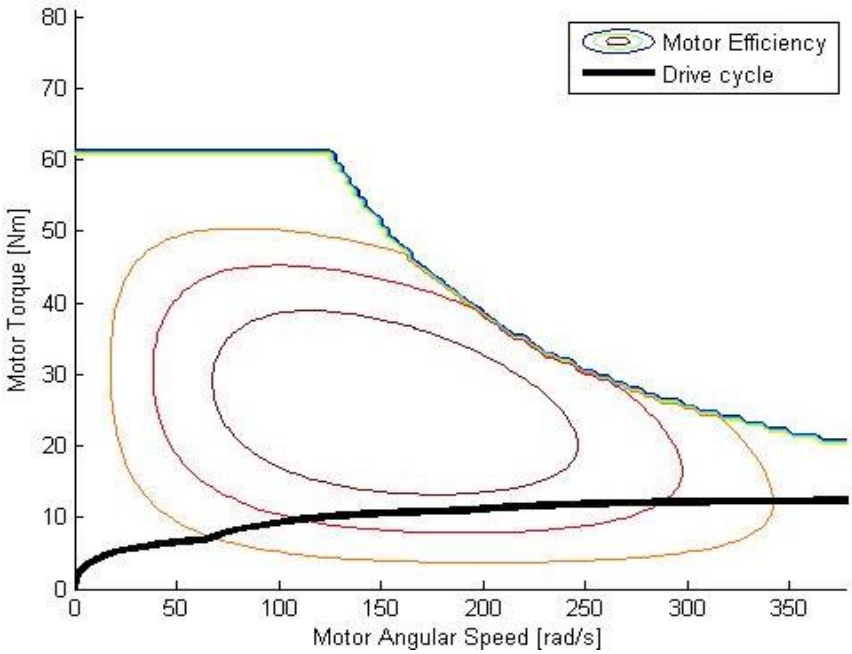

Ilustración 5.27. Simulación 1. Eficiencia. Motor ME1115

5.1.2.3 Simulación 1: Motor MARS ME0913

Los resultados obtenidos para el motor MARS ME0913:

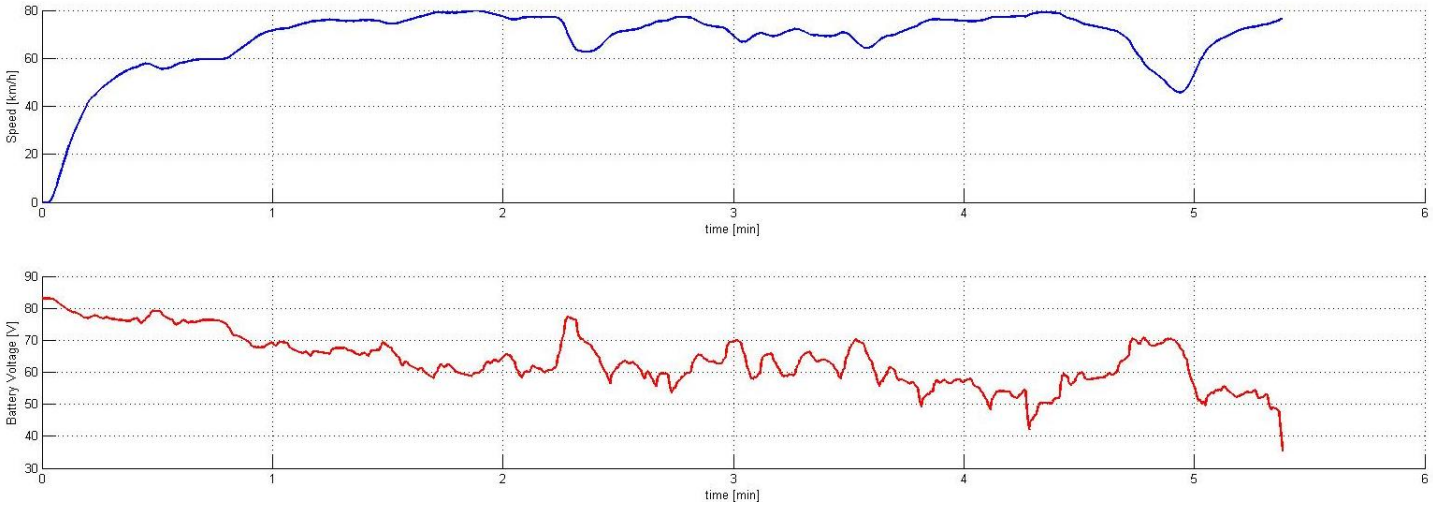

Ilustración 5.28. Simulación 1. Velocidad y voltaje demandado a la batería. Motor ME0913

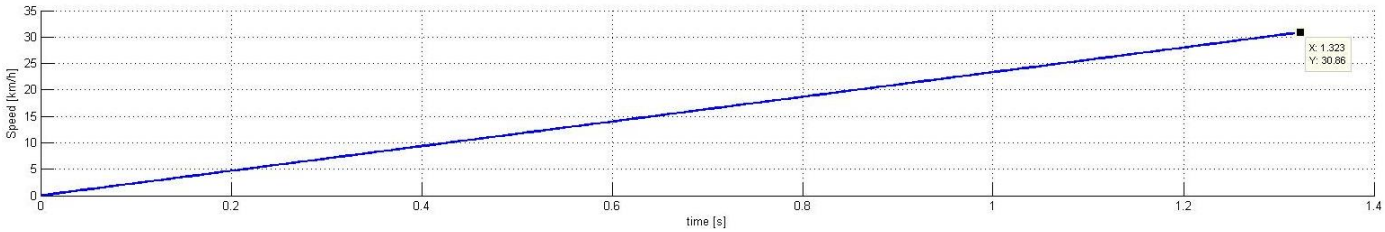

Ilustración 5.29. Comprobación aceleración. Motor ME0913

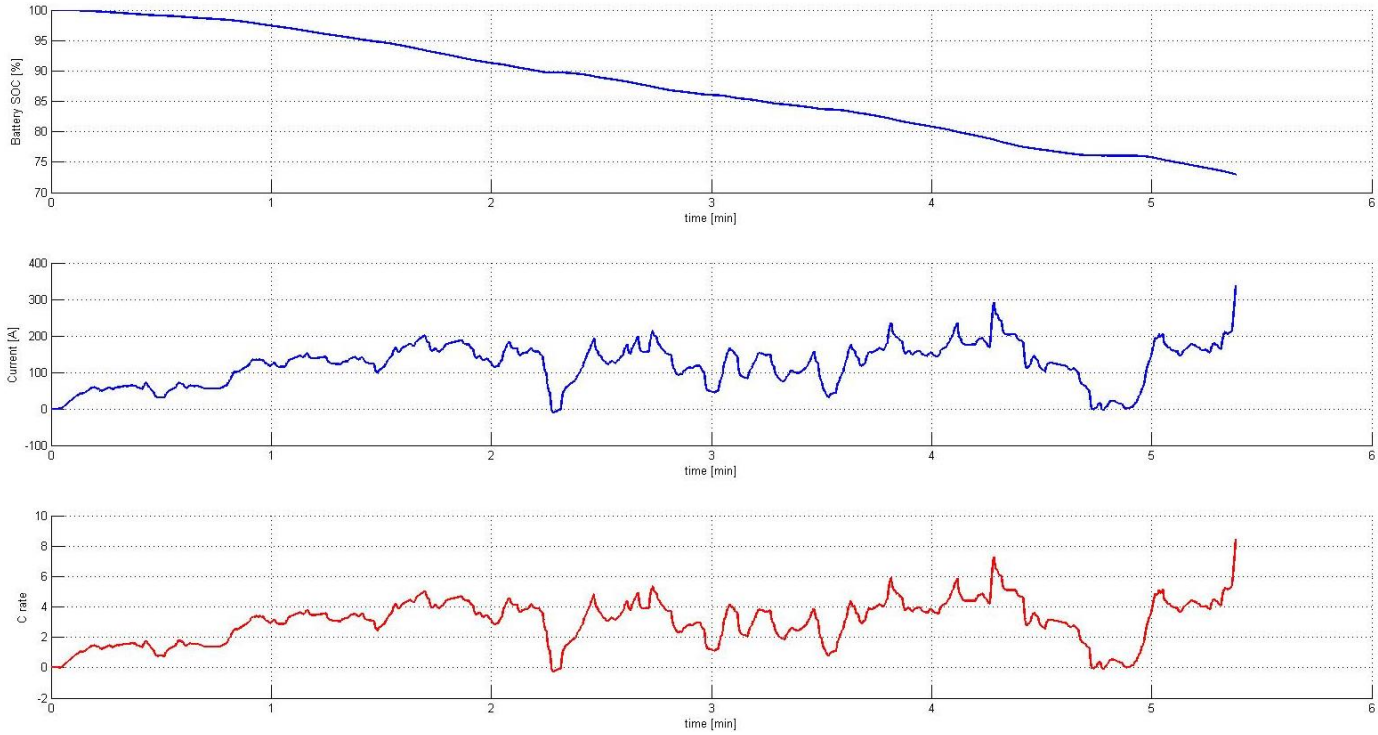

Ilustración 5.30. Simulación 1. Estado de carga, corriente y ratio C. Motor ME0913

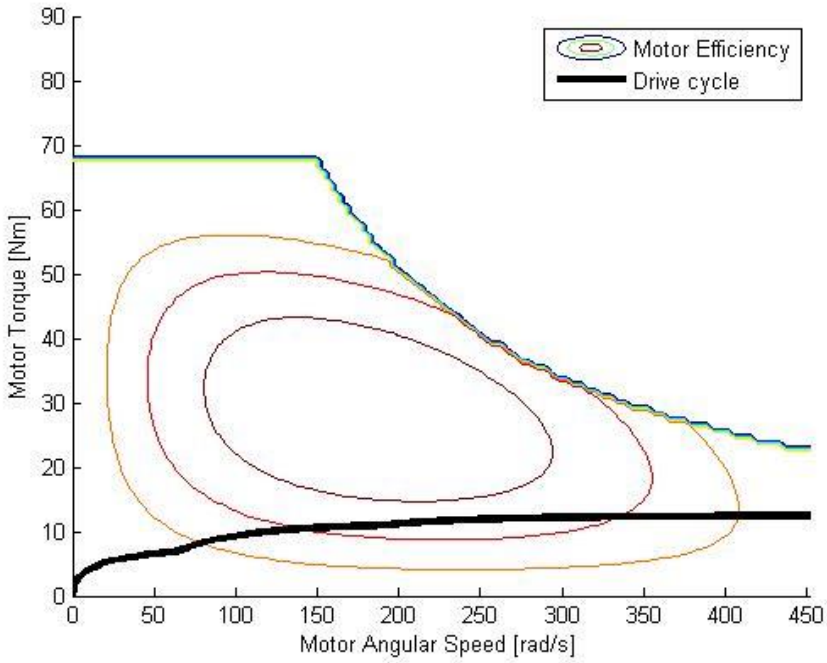

Ilustración 5.31. Simulación 1. Eficiencia. Motor ME0913

5.1.2.4 Conclusiones simulación 1

Una vez hemos realizado las simulaciones en el ciclo de conducción que nos permitiría saber cómo se comportan los tres modelos comparados bajo condiciones elevadas de carga podemos concluir que:

- El Motenergy ME1114 es el modelo que trabaja a una mayor eficiencia.
- Los tres motores presentan suficiente entrega de potencia para conseguir alcanzar los 70 km/h.
- El MARS ME0913 consume menos porcentaje de baterías bajo ese nivel de carga.
- Los tres motores son capaces de proporciones durante breves períodos de tiempo la aceleración de 6,5 m/s^2 desde 0 m/s. Si bien es cierto, el motor MARS 0913 puede alargar unos 0,2s este nivel de aceleración.

Por tanto, cualquiera de los tres motores sería válido para obtener las velocidades y aceleraciones deseadas pero, en consumo de energía nos planteamos los motores Motenergy ME1114 y MARS 0913. Para ello, se han simulado otros ciclos de conducción más cercanos a las posibles características de los circuitos donde funcionaran nuestros vehículos para ver cómo se comportan estos motores en diferentes ciclos de carga.

5.1.3 Simulación 2

Se muestran los resultados de eficiencia y consumo de batería para los motores Motenergy ME1114 y MARS ME0913 para dos ciclos de conducción como se muestra a continuación:

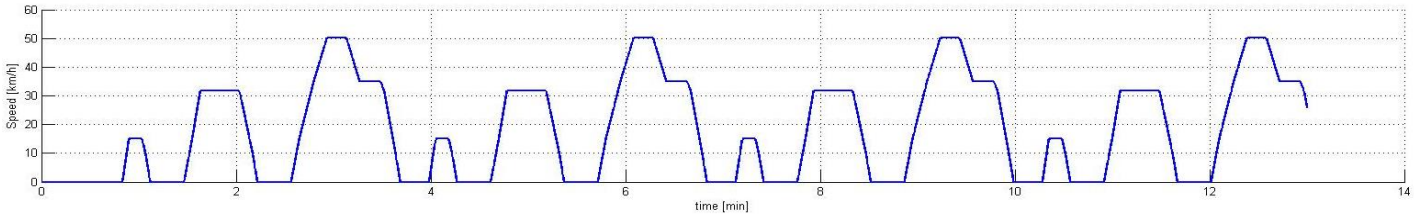

Ilustración 5.32. Simulación 2. Ciclo de conducción 1

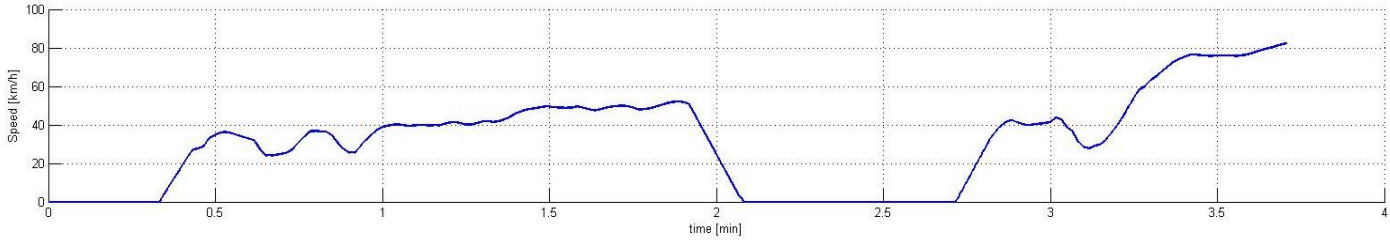

Ilustración 5.33. Simulación 2. Ciclo de conducción 2

5.1.3.1 Simulación 2: Motor Motenergy ME1114

Los resultados para ambos ciclos de conducción son los siguientes:

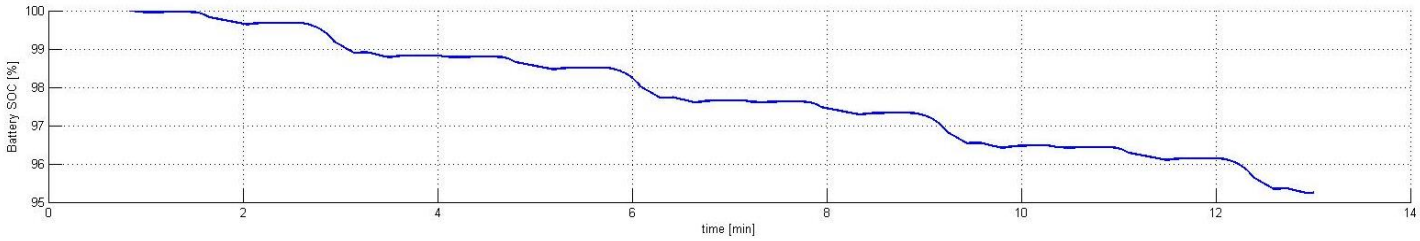

Ilustración 5.34. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Estado de carga. Motor ME1114

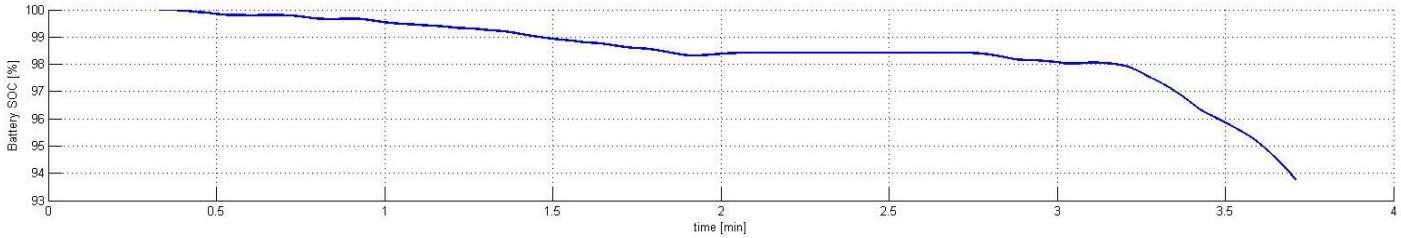

Ilustración 5.35. Simulación 2. Ciclo de conducción 2. Estado de carga. Motor ME1114

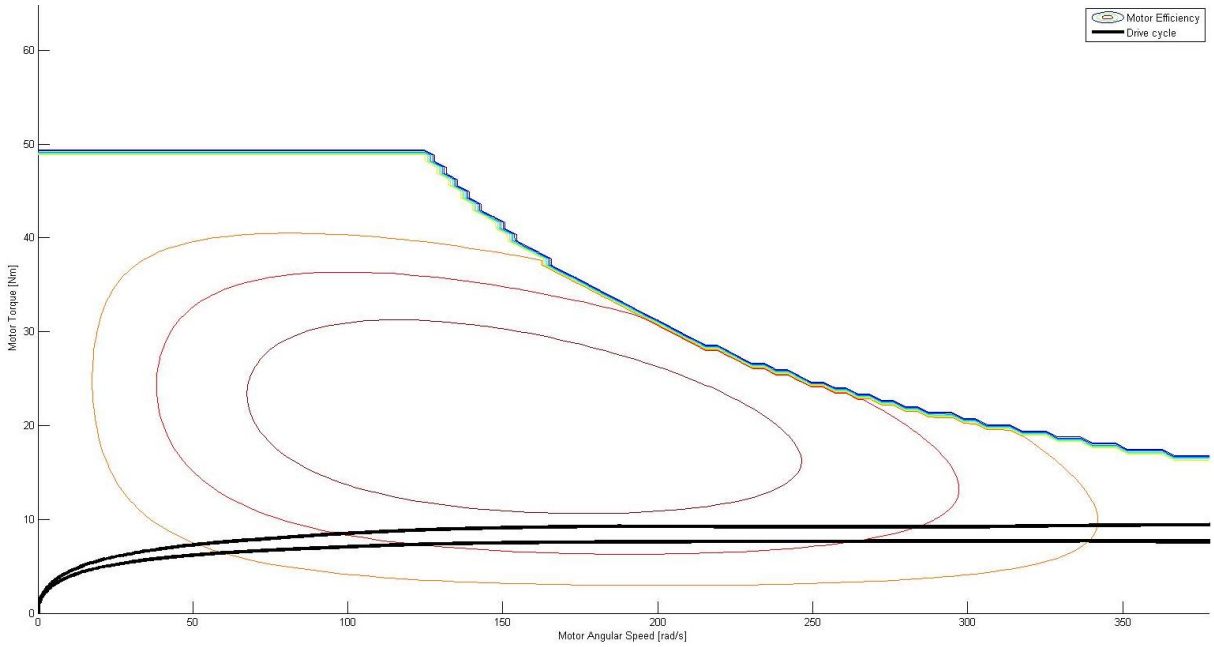

Ilustración 5.36. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Eficiencia. Motor ME1114

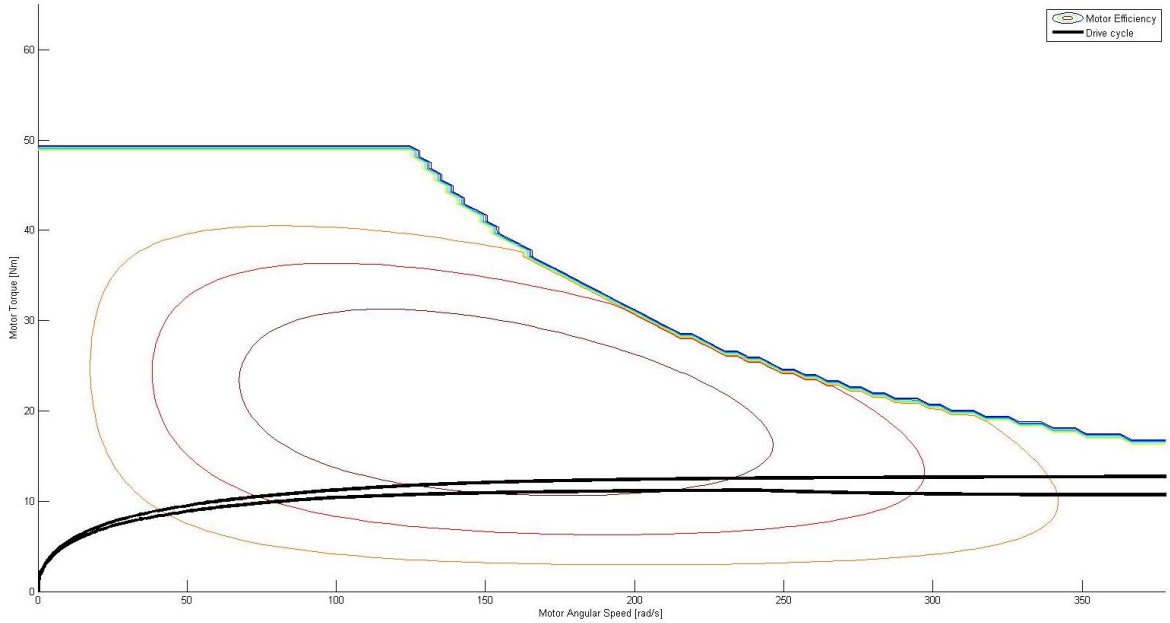

Ilustración 5.37. Simulación 2. Ciclo de conducción 2. Eficiencia. Motor ME1114

5.1.3.2 Simulación 2: Motor MARS ME0913

Los resultados para el motor MARS ME0913 son los siguientes:

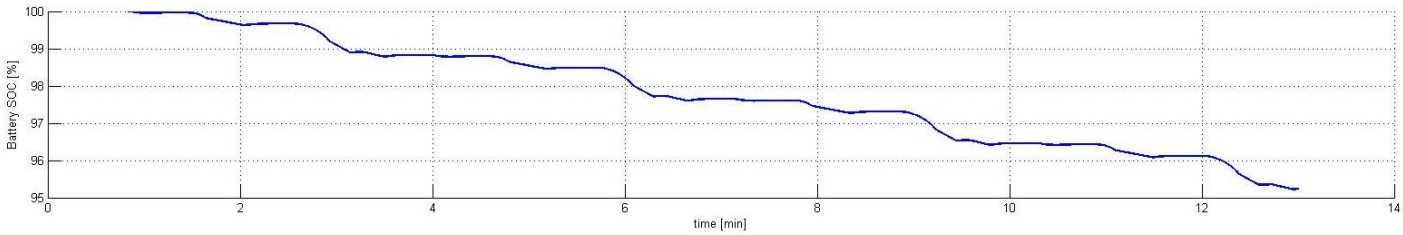

Ilustración 5.38. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Estado de carga. Motor ME0913

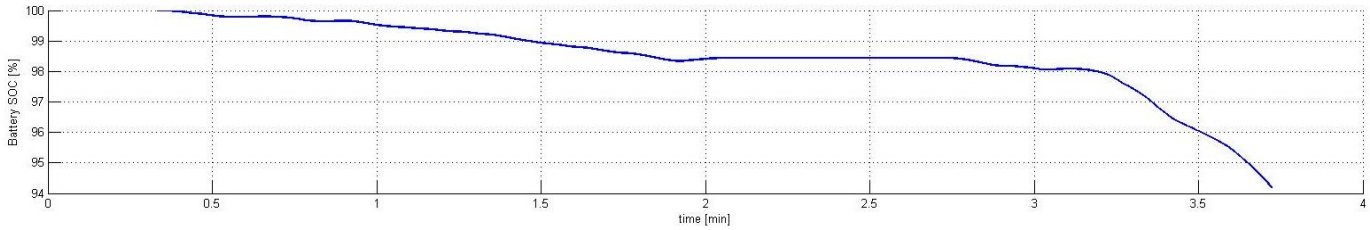

Ilustración 5.39. Simulación 2. Ciclo de conducción 2. Estado de carga. Motor ME0913

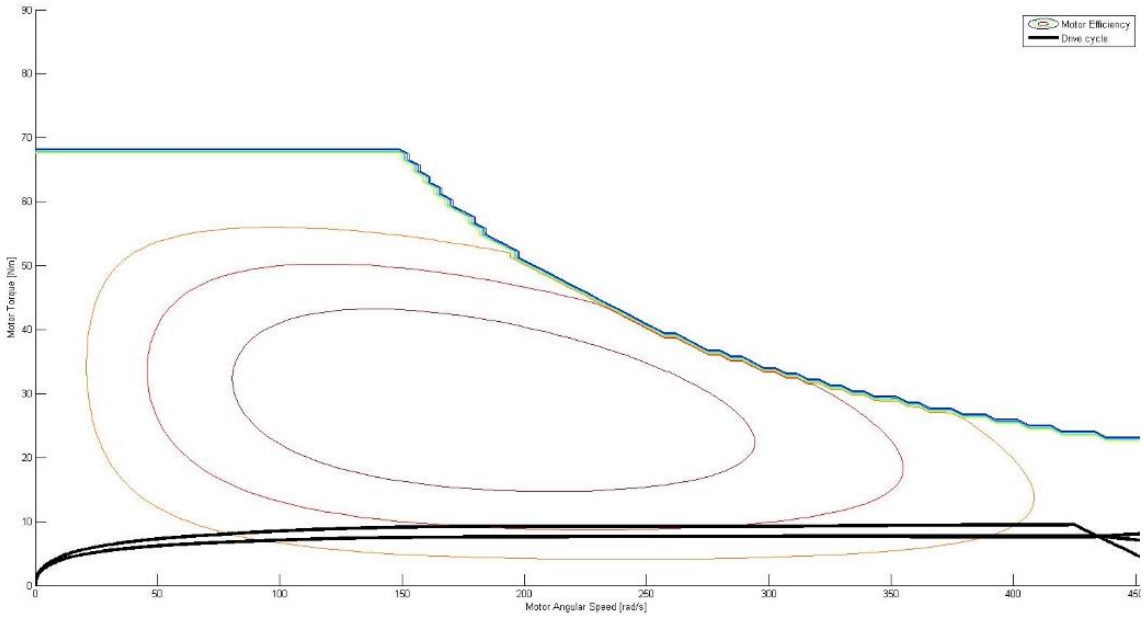

Ilustración 5.40. Simulación 2. Ciclo de conducción 1. Eficiencia. Motor ME0913

5.1.3.3 Conclusiones simulación 2

Podemos extraer como conclusión principal que delante de ciclos de conducción más cercanos a las características de un circuito de karting los consumos de batería en ambos motores son prácticamente idénticos. La única diferencia es que el motor Motenergy ME1114 trabaja siempre en condiciones más cercanas a su eficiencia óptima que el motor MARS ME0913.

Además, otro factor a favor del motor Motenergy ME1114 es que el proveedor que hemos consultado nos ha recomendado los motores ME1114 y ME1115 delante del motor ME0913 por su mayor aislamiento acústico y por ser motores más recientes. Por tanto, siguiendo nuestra filosofía donde lo que queremos conseguir es una reducción del impacto medioambiental nos hemos decantado por el motor Motenergy ME1114.

El precio que presenta este motor es de 1125 CHF, es decir, 1063,86€ (17/05/16).

5.2 Propuesta de controlador

El controlador es el elemento de la selección más guiado que nos aparecerá. Sus características principales vendrán guiadas por las características del motor eléctrico que se seleccione.

En nuestro caso se trata de motores de corriente continua y con características similares, ya que, por ejemplo, se ha impuesto que todos los motores que compararemos funcionaran a 72 VDC. En este caso, también partiremos de la hipótesis de que el

controlador que utilizaran los motores en la simulación será el mismo, no realizando cambios de diseño en la simulación y no tener que incluir nuevos parámetros. La única diferencia existente, es que el controlador Kelly, hay un modelo para controlar los motores Motenergy, que funcionan con sensores de velocidad Seno/Coseno, mientras que el motor MARS funciona con un sensor Hall, aun así, las características que nos interesan son las mismas, por tanto, en esencia es el mismo controlador. Partiendo de esta base, los motores seleccionados para la simulación tienen recomendados unos controladores determinados por el mismo fabricante. Los controladores son los siguientes:

Modelo	Rango de voltaje	Intensidad de pico	Intensidad continuada	Precio
Kelly KLS96601-8080I/IPS	24-96 VDC	600 A (60s)	240 A	702,55 € (19/04/16)
Sevcon Gen 4 Size 8	39,1-116 VDC (Nominal 72-80 VDC)	550 A (120s)	220 A	1050,75 € (19/04/16)

Tabla 5.6. Comparativa entre modelos de controlador

Nos hemos decantado por el primer modelo, ya que, como podemos ver, en las características principales nos ofrece unas mejores prestaciones además de tener un precio bastante inferior (33% inferior). Como elemento adicional, podemos seleccionar como veremos más adelante, un pedal para el acelerador del mismo fabricante, lo que nos supondrá una compatibilidad superior. El modelo en cuestión es el siguiente:

Ilustración 5.41. Controlador Kelly KLS96601-8080I/IPS (74)

5.3 Propuesta del contenedor de baterías

En este apartado trataremos el proceso que se ha llevado a cabo para realizar el diseño del contenedor de las baterías. Se comentaran los aspectos siguientes:

- Selección de la celda
- Conexionado entre celdas
- Distribución en el kart
- Diseño del contenedor de baterías

5.3.1 Selección de la celda

Previamente se ha realizado un estudio de las posibles tecnologías que podíamos utilizar para la selección del tipo de celda a instalar en nuestro kart. Se ha llegado a la conclusión de que la mejor opción estaba en las baterías de litio y, entre ellas, la mejor opción a escoger por las comparativas que hemos podido ver han sido las baterías de polímero de litio (Li-Po), las baterías $LiFePO_4$ y las baterías $LiNiMnCoO_2$ (NMC).

En búsqueda de un fabricante de celdas se ha escogido como posibles proveedores de estas celdas a Kokam Cells y Thunder Sky Winston. Por tanto, entre las celdas que nos ofrecen estos s se ha realizado una búsqueda con la mejor opción para la propuesta que se planteó sobre la filosofía de nuestro kart.

La celda escogida de Kokam Cells ha sido la celda de $LiNiMnCoO_2$ (NMC) y la referencia en el fabricante es SLPB 100216216H de la que se presentan las características principales en la tabla que se muestra a continuación:

Modelo	Voltaje Nominal (V)	Capacidad (Ah)	Dimensiones (XYZ) (mm)	AC-IR (mΩ)	Peso (kg)	Ratio de Carga	
						Ratio-C (C)	Amperios (A)
SLPB100216216H	3,7	40	226x227x10	0,80	0,990	3	120
	Ratio de Descarga				Ciclo de vida (80% DOD)	Densidad de energía (Wh/kg)	
	Continuo		Pulsos				
	Ratio-C (C)	Amperios (A)	Ratio-C (C)	Amperios (A)			
SLPB100216216H	8	320	15	600	> 3000	160	

Tabla 5.7. Tabla de características de la celda SLPB100216216H

Mientras que la celda escogida del fabricante Thunder Sky Winston ha sido el modelo con referencia WB-LYP40AHA de tipo LiFePO4 cuyas características principales se muestran a continuación:

Modelo	Voltaje Nominal (V)	Capacidad (Ah)	Dimensiones (XYZ) (mm)	AC-IR (mΩ)	Peso (kg)	Ratio de Carga	
						Ratio-C (C)	Amperios (A)
WB-LYP40AHA	3,2 V	40	116x183x47	0,70	1,6 ± 0,005	3	120

	Ratio de Descarga				Ciclo de vida (80% DOD)	Densidad de energía (Wh/kg)
	Continuo		Pulsos			
	Ratio-C (C)	Amperios (A)	Ratio-C (C)	Amperios (A)		
WB-LYP40AHA	3	-	10	-	> 5000	80

Tabla 5.8. Tabla de características de la celda WB-LYP40AHA

Los parámetros decisivos en la selección de la celda han sido por orden de prioridad los siguientes y se muestran a continuación las ventajas y desventajas que presenta respecto otro modelo que se había contemplado previamente:

- Ciclo de vida
- Densidad de energía
- Precio
- Peso
- Ratio de carga
- Número de celdas
- Dimensiones

Finalmente se ha realizado un estudio de las ventajas y desventajas de las dos posibilidades y nos hemos decantado por las primeras celdas aun teniendo menor ciclo de vida estimado, los motivos son los siguientes:

<u>Ventajas</u>

- Mismo ratio de carga y mejor ratio de descarga.
- Mayor densidad de energía por celda; 160 Wh/kg frene a 80 Wh/kg
- Menores dimensiones finales, menor volumen del contenedor resultante.
- Menor peso final; 19,8 kg frente a 36,8 kg.

Desventajas

- Menor ciclo de vida; más de 3000 ciclos frente a más de 5000 al 80%.
- Precio ligeramente superior, pero con un proveedor nacional; 1815 € frente a 1381,9 €.

5.3.2 Conexionado entre celdas

Para realizar el dimensionado del contenedor de baterías habrá que tener en cuenta las características que tienen las celdas cuando se conectan entre sí. Por tanto, es importante tener en cuenta como varían el voltaje y la capacidad dependiendo de la conexión que realicemos. Los únicos requisitos que deben cumplir es que las celdas deben ser de las mismas características de voltaje y capacidad y estar en el mismo estado de carga. En definitiva, las celdas se pueden conectar de dos maneras:

- En serie: Conectamos el polo positivo de una celda con el polo negativo de la otra y así continuamente.

Ilustración 5.42. Conexión de celdas en serie (77)

En este tipo de conexión las celdas mantiene el valor de capacidad pero su voltaje equivale a multiplicar el voltaje de la celda por el número total de celdas.

- En paralelo: El polo positivo de la celda debe ir conectado al polo positivo de la otra celda y de igual manera con los polos negativos.

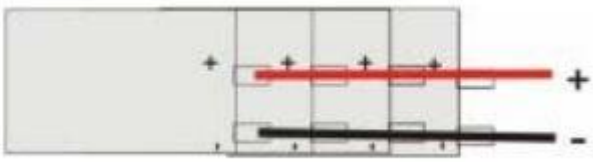

Ilustración 5.43. Conexión celdas en paralelo (77)

En este tipo de conexión entre celdas el valor del voltaje se mantiene constante pero su capacidad es equivalente a multiplicar la capacidad de una celda por el número total de celdas conectadas de esta forma.

La solución propuesta para nuestro contenedor de baterías es de veinte celdas conectadas en serie. El motivo de esta conexión es que es necesario un voltaje mínimo de 72 V que es el voltaje nominal al que haremos trabajar el motor seleccionado. Por tanto para cumplir con este requisito es necesario realizar esta conexión.

$$V_{total} = V_{celda} \cdot N^{\underline{o}}{}_{total\ celdas} = 3{,}7 \cdot 20 = 74\ V$$

5.3.3 Distribución en el kart

Para una correcta distribución de los pesos en nuestro vehículo y mantener la simetría en este aspecto, conectaremos las baterías en serie como se ha dicho previamente pero, se distribuirán en dos bloques de diez celdas a cada lado del asiento del kart. De esta manera, no quedará todo el peso de las baterías desplazado a un lado del kart provocando un desequilibrio en el reparto de pesos transversal.

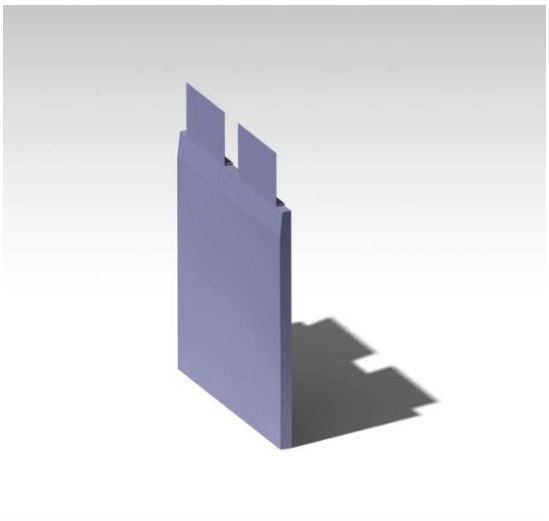

Ilustración 5.44. Diseño 3D celda de batería

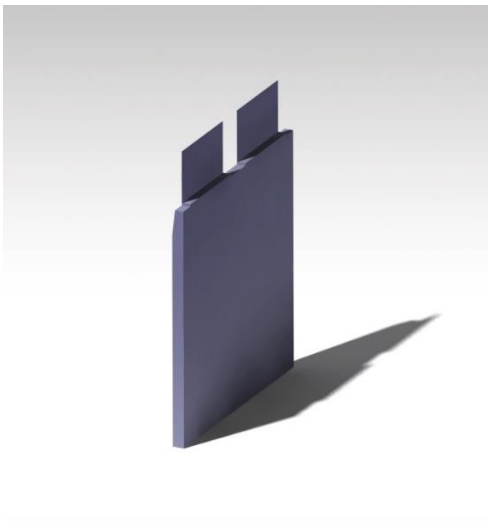

Ilustración 5.45. Diseño 3D celda de batería 2

5.3.4 Diseño del contenedor de baterías

El contenedor de las baterías que asegurará las celdas escogidas se diseñará bajo las siguientes condiciones:

- Estará refrigerado con ventiladores.
- Será un contendor cerrado para evitar fugas de corriente.
- Tendrá un espacio para colocar los fusibles.
- Espacio para colocar el interruptor de seguridad
- Salida para el cable de conexión entre las celdas y el BMS.

Con estas condiciones de partida se ha procedido a diseñar el contenedor de las baterías. Este tendrá las celdas que irán envueltas individualmente y el conjunto final en plástico termo retráctil e irán conectadas en serie con "Pigtails" que son unos raíles que se colocan encima de los conectores de las celdas para poder conectarlas de una manera más ordenada y segura. Además, se dejará un espacio en la parte superior de las celdas para poder conectar los sensores del BMS y se conectará para que el contenedor sea de fácil extracción del chasis del kart para poderlo sustituir.

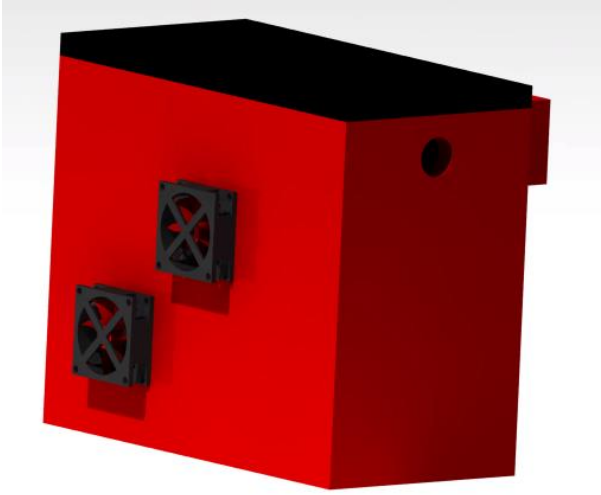

Ilustración 5.46. Diseño 3D contenedor de baterías cerrado

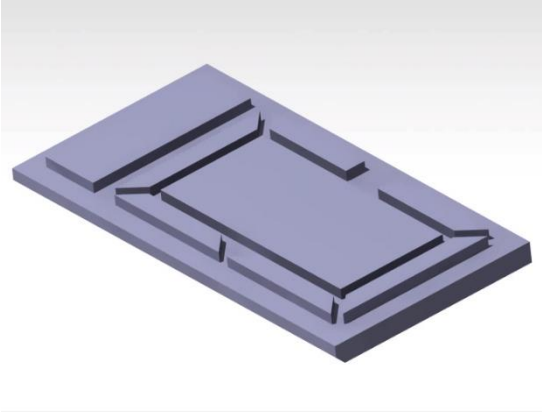

Ilustración 5.47. Diseño 3D tapa del contenedor de baterías

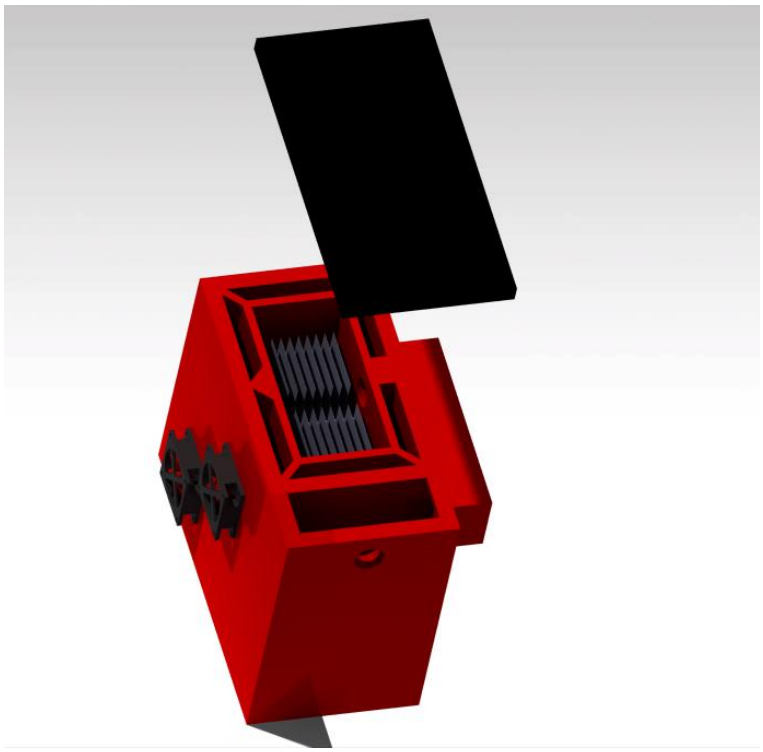

Ilustración 5.48. Diseño 3D contenedor de baterías abierto

Una vez realizado esto, la última celda del contenedor irá conectada a un conector de cobre que se conectará mediante un sistema de pinzas para poder conectar los dos contenedores de diez celdas en serie cada uno y conectarlos entre ellos también en serie.

5.4 Propuesta de BMS

Se hace de especial necesidad la selección de un sistema gestor de baterías que nos permita alargar al máximo la vida útil de nuestras baterías y que estas tengan el mejor funcionamiento posible. Es por ello, que se debe hacer especial hincapié en la búsqueda de un BMS adecuado para el tipo de celdas que hemos escogido, el número de celdas totales, como irán conectadas entre sí y su disposición en el kart.

Con estas premisas hemos accedido al mercado en búsqueda de un BMS que se adecue a nuestras necesidades y el modelo escogido ha sido el Elithion Lithiumate Pro. Los motivos son los siguientes:

- Dispone de compatibilidad total con el tipo de celdas escogidas. Compatibilidad con celdas NMC en formato de bolsa (Pouch).
- Nos permite un control de todo tipo de medidas necesarias (Voltaje de las celdas, temperatura de las celdas, balanceo de la celda).
- Para hasta 255 celdas.
- Protección de la celda frente a corrientes elevadas, bajos/altos voltajes y bajas/altas temperaturas.
- Precio: 1031,65€ (25/04/16)

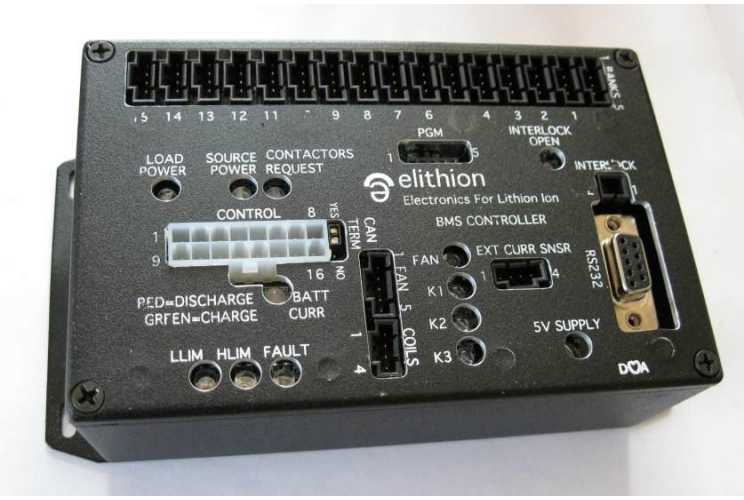

Ilustración 5.49. Elithion Lithiumate Pro BMS (25)

Las características principales quedan expuestas en la siguiente tabla:

Item	Value	Units
Controller		
Supply voltage	12	Vdc nom
12 V supply current	100	mAdc max
Control inputs' voltage	0 to 12	Vdc nom
Digital outputs' sink current	1.5	Adc max
Analog outputs' voltage	0 to 5	Vdc
RS232 rate	19200	baud
CAN rate	125, 250 or 500	kHz
Number of cells monitored	1 to 255	-
Operating temperature	-40 to +80	°C
Volume	0.8	liters
Current sensor		
Sensed battery current	5 to 600	Adc
Cell boards		
Cell voltage sensing range	2.09 to 4.54	Vdc
Cell voltage sensing accuracy	+/-10	mVdc
Cellboard temperature sensing accuracy	+/-2	°C
Cell current drain, standby	2.0	uA max
Cell current drain, operating	2	mA max
Cell current drain, balancing	200	mA nom
Battery isolation	2.5	kV

Tabla 5.9. Características principales Elithion Lithiumate Pro BMS. (70)

5.5 Propuesta de cargador

Se han valorado diferentes fabricantes de cargadores, todos ellos compatibles con el Elithion Lithiumate Pro BMS para poder realizar las cargar a mayor velocidad posible en nuestro kart con total seguridad de un correcto funcionamiento de las celdas y de alargar su vida útil y tener las mejores prestaciones el mayor tiempo posible. Entre los fabricantes, finalmente, nos hemos decantado por Zivan, ya que, es un fabricante reconocido y podemos obtener los cargadores de un proveedor nacional. El modelo en cuestión de todos los posibles de este fabricante es el modelo Zivan NG7 72V-85A.

Esto es debido a que podremos cargar nuestras baterías en menos de 1 hora como podemos ver en las especificaciones del tiempo de carga de las celdas si utilizamos una corriente de 80 A como máximo. Es por ello, que hemos seleccionado este modelo, ya que, podremos actuar en las cargas de las celdas según necesidad. Las características son las siguientes:

- Voltaje nominal de salida: 72 V
- Intensidad máxima suministrada: 84 A

- Compatibilidad con el sistema BMS escogido
- Voltaje de alimentación: 400 +- 15% VAC
- Frecuencia de entrada: 50-60 Hz
- Rendimiento: >87%
- Visualización del voltaje y la intensidad suministrada en el display digital
- Tamaño máximo: 550 x 270 x 120 mm
- Peso: 9 Kg
- Precio ofrecido por el proveedor: 1841,68€

Ilustración 5.50. Cargador Zivan NG7 (13)

5.6 Propuesta de acelerador y freno

Hemos mencionado anteriormente que el controlador escogido para el motor será del fabricante Kelly Controller, es por ello, que el acelerador y freno escogidos, y que actuaran como regulador de la potencia demandada al motor, más concretamente, afectaran a la regulación de la intensidad que reciba el motor son del mismo fabricante.

El modelo de pedal escogido es el Kelly 0-5K Throttle Pedal, con un precio de 69,62€ (28/04/2016), se muestra en la imagen siguiente:

Ilustración 5.51. Pedal Kelly 0-5K (55)

El funcionamiento de este pedal es muy sencillo. Consta de una resistencia de 0-5kΩ, siendo 0 Ω el valor cuando no se ejerce ninguna fuerza sobre el pedal y 5kΩ cuando el pedal está completamente presionando, demandando la máxima potencia posible. De esta forma, como trabajamos a un voltaje constante, la intensidad que circulará por la resistencia variará y este valor será recogido por el controlador, que será el encargado de transmitir la información correcta al motor.

6. Valoración económica

Al contemplar el proyecto como un diseño conceptual del kart eléctrico del cual podríamos construir un prototipo, éste puede ser desglosado según los elementos que se han seleccionado y las horas que se le han dedicado de ingeniería. Por tanto, se desglosará en primera instancia, la facturación producida por las horas trabajadas, gastos en compra de software, etc. Luego se detallará el coste que se derivaría de implementar la instalación eléctrica en el prototipo.

En primera instancia detallaremos los costes de ingeniería que son los siguientes:

- Hora de ingeniería: Se dividirán en subgrupos todas las horas dedicadas al proyecto. Se detallará el coste por hora de cada elemento y su coste final.
- Software utilizado: Se detallará el coste del software utilizado en el transcurso del proyecto. Destacar que en el proyecto en sí, se han utilizado versiones académicas y no han repercutido con coste alguno.

Concepto	Horas	Precio/Hora	Precio Final
Situación actual del mercado	15	15 €	225 €
Búsqueda y análisis de información detallada	50	30 €	1.500 €
Simulación de los motores	70	60 €	4.200 €
Diseño del contenedor de las baterías	80	60 €	4.800 €
Selección de los componentes	35	50 €	1.750 €
Diseño 3D de la solución	100	60 €	6.000 €
Redacción del informe	50	30 €	1.500 €
Total Horas Ingeniería	**400**	**-**	**19.975 €**

Tabla 6.10. Resumen de las horas de ingeniería

Concepto	Precio/Unidad	Precio Final
Matlab & Simulink R2016a	7.000 €	7.000 €
Catia V5	25.000 €	25.000 €
Total Software	**-**	**32.000 €**

Tabla 6.11. Resumen del coste en Software utilizado

Finalmente, determinaremos el coste de la instalación eléctrica del kart con los precios de todos los elementos que se han escogido a lo largo del proyecto. Todos estos precios se recogen en la tabla que se muestra a continuación:

Concepto	Unidad	Precio/Unidad	Precio Total
Motor eléctrico ***(Motenergy ME1114)***	1	1.063,86€	1.063,86€
Controlador ***(Kelly KLS96601-8080I/IPS)***	1	702,55 €	702,55 €
Celdas de batería ***(Kokam SLPB 100216216H)***	20	90,75€	1.815,00€
Gestor de baterías ***(Elithion Lithiumate Pro BMS)***	1	1.031,65€	1.031,65€
Cargador ***(Zivan NG7)***	1	1.841,65€	1.841,65€
Pedal acelerador y freno ***(Kelly 0-5K Throttle Pedal)***	2	69,62€	139,35€
Total instalación eléctrica	-	-	**6.594,06€**

Tabla 5.12. Resumen de precios de la solución propuesta

Por tanto, el precio final del kart dependerá del coste de los elementos mecánicos como el chasis, las ruedas, etc. y la amortización del proyecto. Todo lo anterior se estima en un valor aproximado de unos 2.000-2.500 euros para cada unidad. Por tanto, teniendo en cuenta esto, el valor de construcción del kart se situaría sobre los 9094,06 euros. Si le añadimos un 15% de beneficio por unidad el precio se situaría en 10.458,17 euros. En definitiva, el precio de nuestro kart se establecería sobre los 10.000 ± 5% euros. Pero en ningún caso superará los 10.500 euros que teníamos como referencia que costaba el modelo de la posible competencia en el mercado, de la empresa Tom Kart y, definitivamente, lejos del precio del kart con una vertiente más competitiva de la marca EVC-Racing que se situaba en torno a los 13669 euros.

7. Modelo en 3D

En la presente sección les presentaremos el modelo del kart eléctrico diseñado con el software Catia V5. En el diseño 3D se han tenido en cuenta las dimensiones generales, que nos han sido proporcionadas por la información de todos los elementos escogidos para la solución definitiva. Con ello, se remarca que la representación no es una representación exacta del modelo definitivo sino una representación cualitativa para ver cómo se han distribuido todos los elementos en el chasis del kart y cuáles son las dimensiones generales de este.

7.1 Distribución de los componentes

En este apartado se mostrará la solución que se ha tomado para distribuir los componentes seleccionados y diseñados en el chasis que se ha realizado para el kart. Para ello, ha sido necesario el diseño en 3D del kart para tener una imagen mucho más precisa y visual de las dimensiones de los componentes. Se muestran a continuación las imágenes donde se muestra la distribución.

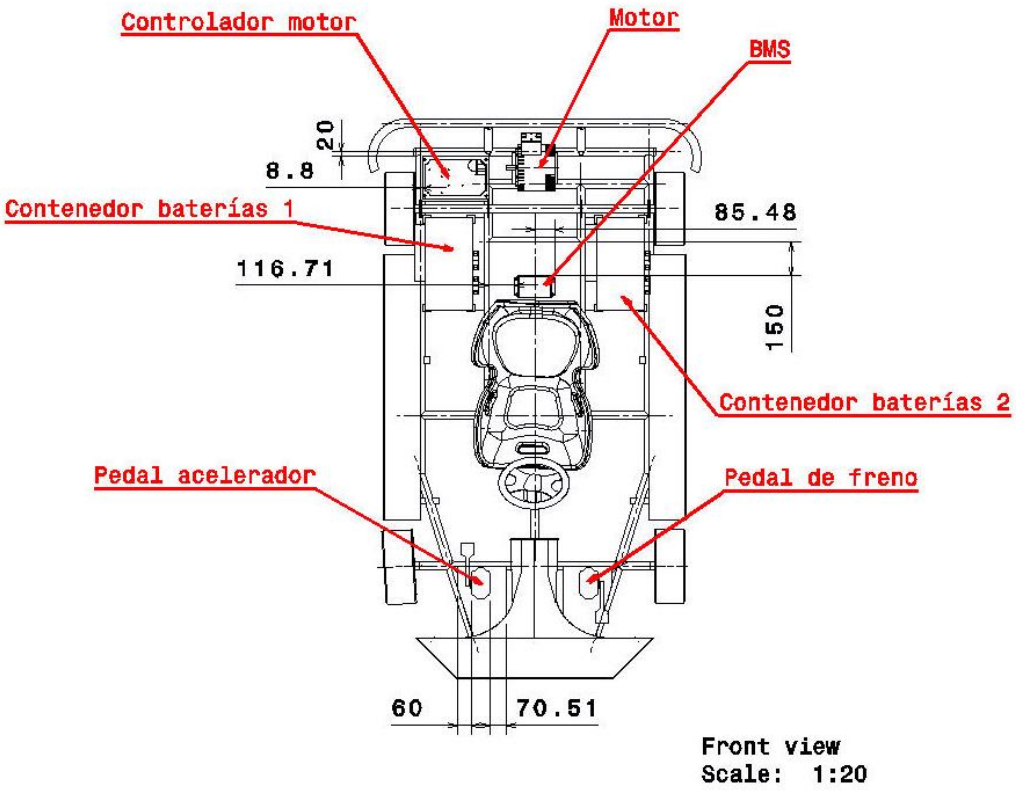

Ilustración 7.52. Distribución e identificación de los componentes en el diseño 3D del kart eléctrico

Podemos apreciar la distribución general de todos los componentes y las distancias respecto elementos del chasis, definidos en el plano de este. No se han especificado las distancias de los pedales en el eje vertical, ya que, son elementos que serán ajustables las distancias para una mejor comodidad de cada piloto.

Se han diseñado superficies para poder situar los pedales del acelerador y freno, el sistema de gestión de baterías (BMS), el controlador del motor y para poder colocar un soporte para el motor. Además, se han diseñado soportes específicos para los contendores de baterías con 4 guías en cada una de las esquinas de los contenedores para una mayor sujeción de éstos.

La siguiente imagen muestra la distribución antes mencionada en una imagen renderizada del kart eléctrico.

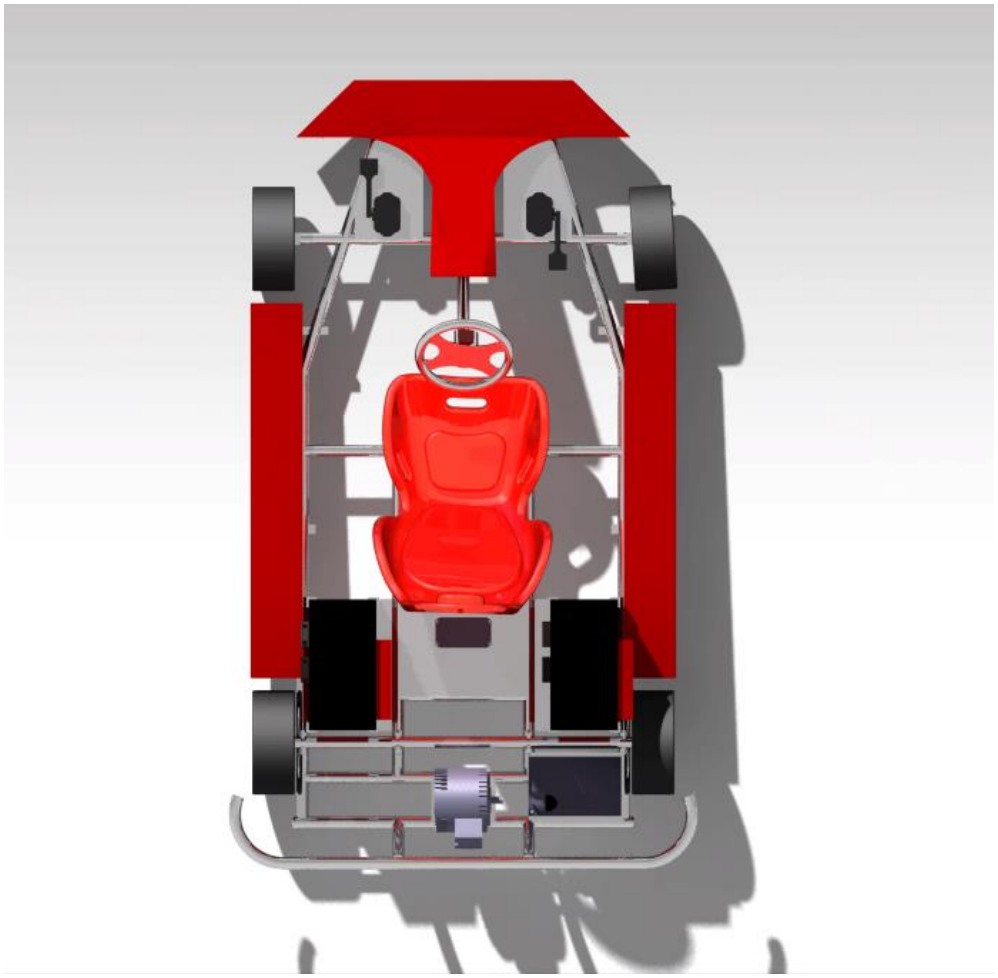

Ilustración 7.53. Vista aérea del diseño 3D del kart eléctrico. Distribución componentes

7.2 Dimensiones y peso

Además de la distribución de los componentes el hecho de realizar el diseño en 3D con el software Catia V5 nos ha permitido saber cuáles son las dimensiones generales del kart eléctrico que hemos diseñado y, mucho más relevante, extraer un valor estimado del peso total del kart. Se detallará el proceso a continuación del cálculo del peso.

7.2.1 Cálculo del peso total

Se han utilizado los pesos proporcionados por los fabricantes y distribuidores de los componentes seleccionados y con el diseño en 3D se han estimado los pesos del resto de piezas, aplicándoles un material de acabado en el 3D, para tener un valor aproximado, pero bastante preciso del peso total del kart.

Los pesos proporcionados por los fabricantes y los estimados son los siguientes:

Componente	Unidades	Peso/Unidad (kg/ud)	Peso Total (kg)
Proporcionados por los fabricantes			
Motor eléctrico **(Motenergy ME1114)**	1	15,88	15,88
Controlador **(Kelly KLS96601-8080I/IPS)**	1	5,76	5,76
Celdas de batería **(Kokam SLPB 100216216H)**	20	0,99	19,80
Gestor de baterías **(Elithion Lithiumate Pro BMS)**	1	≈ 1,50	≈1,50
Pedal acelerador y freno **(Kelly 0-5K Throttle Pedal)**	2	1,59	3,18
Estimados			
Asiento (Tela)	1	5,03	5,03
Volante (Aluminio)	1	2,28	2,28
Chasis (Aluminio)	1	47,45	47,45
Carrocería (Plástico)	1	4,10	4,10
Llanta (Aluminio)	4	1,66	6,64
Neumático (Caucho)	4	4,06	16,24
Eje trasero (Aluminio)	1	2,36	2,36

Soporte delantero (Aluminio)	2	0,49	0,98
Contenedor baterías (Plástico)	2	17,72	35,44
Ventilador (Plástico)	4	0,06	0,24
		Peso Total	***166,88 kg***

Tabla 7.13. Tabla peso total del kart eléctrico

Podemos extraer un peso final del vehículo de, aproximadamente 166,88 kg, es decir, un valor por debajo de la media entre los valores que se pretendían conseguir (entre 145 kg y 200 kg). Además para las simulaciones se había supuesto un peso de 175 kg para el kart con lo que el valor obtenido es ligeramente inferior y, por tanto, las prestaciones serían ligeramente superiores a las obtenidas.

7.2.2 Dimensiones

Se presentan, a continuación, las imágenes de alzado, perfil y planta del diseño de kart eléctrico definitivo con las dimensiones generales (2463x1328x940) junto a su vista isométrica.

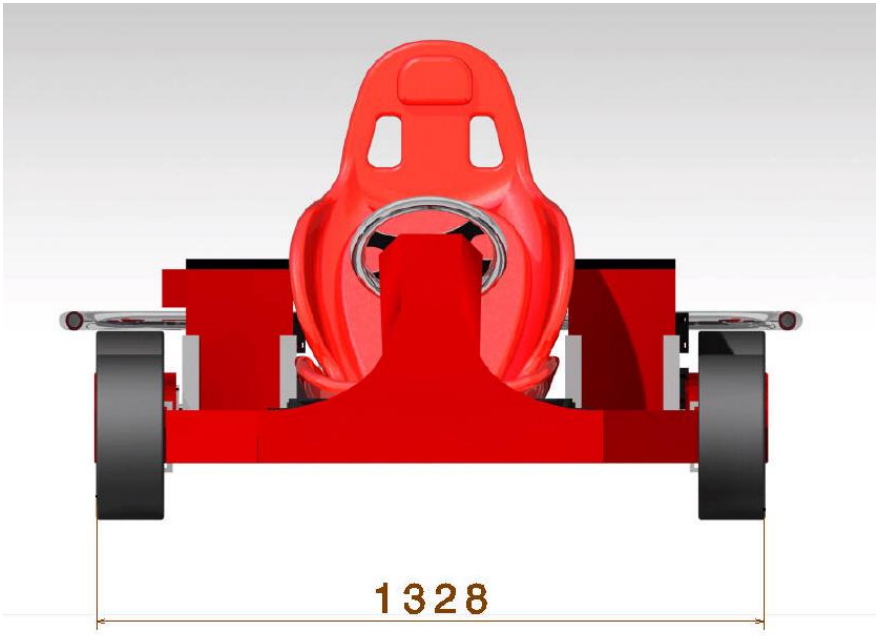

Ilustración 7.54. Vista en alzado del kart eléctrico

Ilustración 7.55. Vista de perfil del kart eléctrico

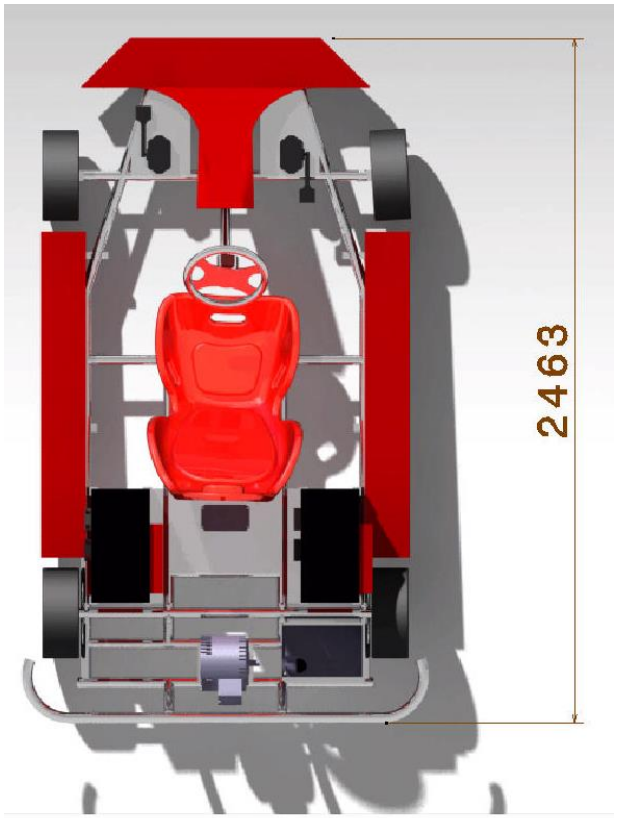

Ilustración 7.56. Vista en planta del kart eléctrico

Ilustración 7.57. Vista isométrica del kart eléctrico

8. Futuros trabajos a realizar

Una vez finalizado este proyecto de final de grado el trabajo a realizar en este proyecto no queda finalizado ni mucho menos.

Hasta este momento se han realizado estudios de dimensionado general en la mayor parte de los campos que se han estudiado. Por ello, es necesario realizar un estudio de detalle de todos ellos para poder llevar a cabo un prototipo real, funcional y donde todo el sistema eléctrico y electrónico esté bajo nuestro control. Es decir, debería realizarse un estudio exhaustivo de varios elementos y los puntos más relevantes para este posterior estudio serían los siguientes:

- Estudio detallado de la instalación eléctrica
- Estudio en detalle del sistema electrónico
- Estudio exhaustivo de las fuerzas resultantes en la estructura del vehículo
- Diseño en detalle del sistema de extracción de los contenedores de baterías
- Diseño de ajuste de la posición de los pedales del acelerador y freno.
- Diseño en 3D exacto de todos los elementos, una vez, realizados los estudios y diseños antes mencionados.
- Construcción de un prototipo real con todas las soluciones propuestas.

9. Medio ambiente

El presente proyecto ha sido realizado con la premisa de reducir el impacto en el medio ambiente. Es por ello, que la toma de decisiones se ha basado principalmente en este aspecto.

El proyecto se ha realizado en base a realizar simulaciones mediante software con el fin de reducir todo posible impacto medio ambiental. Además, se ha realizado también el diseño en 3D del prototipo para presentar la solución de la adaptación de todos los elementos en el kart antes de la realización de un posible prototipo real.

Todos los elementos escogidos para el kart están diseñados en favor de reducir las emisiones a la atmósfera gracias a su diseño de un modelo totalmente eléctrico y, además, conseguir reducir el impacto acústico. El motor ha sido escogido delante de los otros modelos por su mejor reducción del ruido y por presentar un ciclo de trabajo más eficiente que el resto en todos los ciclos de conducción que se han simulado.

Cabe destacar que, aunque la utilización de un vehículo eléctrico supone una reducción del impacto medioambiental debemos tener en cuenta que la electricidad que se utilice para impulsar el vehículo puede proceder de fuentes no renovables. Es por ello, que en favor del medio ambiente se insta a los futuros compradores y futuros establecimientos que puedan utilizar un kart de nuestras características contraten una energía proveniente cien por cien de fuentes renovables, las propias distribuidoras ofrecen esta opción, y puedan acreditar con la certificación que se les otorgue este hecho.

10. Conclusiones

A lo largo del desarrollo de este trabajo se han conseguido los objetivos personales de aumentar el conocimiento, en diversos campos estudiados en el grado, como se pretendía. Tanto es así, que la realización de este proyecto me ha llevado a investigar sobre diversos temas.

La tecnología presente en los motores eléctricos, las celdas de batería o los sistemas de regulación de las baterías sería uno de ellos. Por otro lado, se ha podido simular los motores haciendo uso del software Matlab y mejorar y aprender en el uso de Catia V5 para desarrollar el diseño 3D del kart eléctrico.

En lo referente a los objetivos que se buscaban en el diseño del kart, podemos afirmar que se han conseguido resultados dentro de las especificaciones básicas que habíamos establecido como base de trabajo, a partir del estudio de los karts de la competencia. Los valores de velocidad máxima, aceleración y autonomía se han extraído con la simulación del modelo consiguiendo los máximos que deseamos en los dos primeros y, consiguiendo una autonomía que se mueve dentro del rango previsto según el uso que hagamos al vehículo.

Por otro lado, con el uso de un motor síncrono de imanes permanentes y celdas de batería de $LiNiMnCoO_2$ (NMC) se ha buscado el uso de la tecnología más actual y eficiente buscando siempre el objetivo primordial de diferenciarnos de los karts de combustión convencional en materia de contaminación al medio ambiente, tanto en emisiones de partículas a la atmósfera como en la reducción del ruido, reduciendo el impacto acústico.

Podemos concluir que el trabajo, pese a los problemas que han aparecido a lo largo de éste, en lo que a resultados obtenidos se refiere. Si bien es cierto, que se pretendían realizar un diseño en 3D más detallado del que se ha realizado y realizar un estudio de la autonomía más cercano al uso en un circuito, esto no ha sido posible debido a los problemas que han aparecido durante las simulaciones. Aun así, se han realizado todas las tareas y objetivos propuestos desde un principio.

Como conclusión personal, el proyecto ha sido un reto interesante y nutritivo intelectualmente, que me ha reportado experiencia en el desarrollo de un proyecto de estas dimensiones, y la mejora de mi capacidad de organización y posición delante de las adversidades.

11. Agradecimientos

Destacar mis más sinceros agradecimientos a todas aquellas personas que han sido participes de este proyecto y han dedicado su tiempo a que haya sido posible llevarlo a cabo.

Especial agradecimiento a mi tutor David González Diez por la ayuda proporcionada y las posibles soluciones para el proyecto y los problemas que hayan podido surgir a lo largo de éste.

12. Bibliografía

(1) A123 Systems, 2014. Battery Pack Design , Validation , and Assembly Guide using A123 Systems AMP20M1HD-A Nanophosphate Cells. , pp.1–71. Available at: http://www.formula-hybrid.org/wp-content/uploads/A123_AMP20_battery_Design_guide.pdf.

(2) Anon, ¿Cómo funciona la pila de combustible de Hidrógeno? Toyota responde en 4 vídeos. Available at: http://www.diariomotor.com/tecmovia/2014/12/17/como-funciona-la-pila-de-combustible-de-hidrogeno-toyota-responde-en-4-videos/ [Accessed March 4, 2016a].

(3) Anon, 12V-72V 200mm 8.5kW/14kW light weight pancake PM motors [M-PMPL200] - £1,001.77 : Everything-EV.com - Electric Vehicles, Conversions, Kits, Motors, Controllers, Batteries, DC-DC Converters, Vacuum Pumps, Parts, Scooters, Electric Cars, Consultancy! Available at: http://www.everything-ev.com/index.php?main_page=product_info&cPath=65_77_96&products_id=288 [Accessed April 5, 2016b].

(4) Anon, Abre el circuito indoor Xtremkart Mallorca Festival Park | Sports de ca Nostra. Available at: http://www.sportsdecanostra.com/2014/05/02/abre-el-circuito-indoor-xtremkart-mallorca-festival-park/ [Accessed February 29, 2016c].

(5) Anon, Análisis de un kart de competición y de sus componentes.

(6) Anon, Baterías LiPo. Available at: www.superocio.es.

(7) Anon, BMS. Available at: http://elithion.com/lithiumate.php [Accessed June 13, 2016f].

(8) Anon, Cargador PFC1500. Available at: http://www.elconchargers.com/catalog/item/7344653/7638003.htm [Accessed June 13, 2016g].

(9) Anon, Cargador PFC4000. Available at: http://www.elconchargers.com/catalog/item/7344653/7638123.htm [Accessed June 13, 2016h].

(10) Anon, Cargador PFC5000. Available at: http://www.elconchargers.com/catalog/item/7344653/7638130.htm [Accessed June 13, 2016i].

(11) Anon, Cargador zivan ng5. Available at: http://evolveelectrics.com/chargers/zivan-ng5-charger/ [Accessed June 13, 2016j].

(12) Anon, Cargador zivan precio. Available at: http://varelec.com/zivan/ [Accessed June 13, 2016k].

(13) Anon, Cargadores Zivan. Available at: http://www.zivan.it/ENG/index.html [Accessed June 13, 2016l].

(14) Anon, Caroli Kart - Caroli Motor AB | Stinger Electric. Available at: http://www.carolimotor.com/stinger-electric/ [Accessed February 29, 2016m].

(15) Anon, Celdas Thunder. Available at: http://en.winston-battery.com/index.php/products/power-battery/item/wb-

lyp40aha?category_id=176 [Accessed June 13, 2016n].

(16) Anon, coches electricos, motor vehiculo electrico, conversiones,empresa de carros electricos: Cual es el mejor motor para un auto eléctrico? Available at: http://autolibre.blogspot.com/2009/05/cual-es-el-mejor-motor-para-un-auto.html [Accessed March 25, 2016o].

(17) Anon, Combustibles Alternativos. Available at: https://www.fueleconomy.gov/feg/escurrent.shtml [Accessed March 4, 2016p].

(18) Anon, Commutator and Brushes on DC Motor. Available at: http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/magnetic/comtat.html [Accessed March 25, 2016q].

(19) Anon, Controlador sevcon gen4. Available at: http://www.ev-power.com.au/IMG/png/gen4-pic.png [Accessed June 13, 2016r].

(20) Anon, Controladores DC – Partes y Refacciones para Vehículos Eléctricos. Available at: http://energyev.com/categoria-de-producto/controladoresdc/ [Accessed April 5, 2016s].

(21) Anon, EKC Karts. Llega la hora de los karts eléctricos | forococheselectricos. Available at: http://forococheselectricos.com/2015/03/ekc-karts-electricos.html [Accessed February 29, 2016t].

(22) Anon, El karting eléctrico se abre paso en España | forococheselectricos. Available at: http://forococheselectricos.com/2014/09/el-karting-electrico-se-abre-paso-en-espana.html [Accessed February 29, 2016u].

(23) Anon, Electric Kart Company. Available at: www.ekc-karts.com.

(24) Anon, Electric kart: world record with Linde E1. Available at: https://www.youtube.com/watch?v=Wac1ofVYfd0 [Accessed March 9, 2016w].

(25) Anon, elithion. Available at: http://elithion.com/img/2CN0000E.jpg [Accessed June 13, 2016x].

(26) Anon, EV Power - Australian Electric Vehicle Specialists — EV Power - Australian Electric Vehicles sells Electric Bikes and car conversions, Electric Bicycles, Electric Vehicles, Conversion Kits. Available at: https://www.ev-power.com.au/-SEVCON-PMAC-Motor-Controllers- [Accessed April 5, 2016y].

(27) Anon, EVC Racing | Innovation Through Excellence | Store. Available at: http://www.evcracing.com/store/ [Accessed February 29, 2016z].

(28) Anon, Fastest electric go kart acceleration: Linde E1 set world record (HD Video). Available at: http://www.worldrecordacademy.com/transport/fastest_electric_go_kart_acceleration_Linde_E1_set_world_record_112236.html [Accessed March 9, 2016aa].

(29) Anon, Historia del Karting. Available at: http://www.kartingparcmotor.com/karting-barcelona/historia-del-karting [Accessed February 29, 2016ab].

(30) Anon, HISTORIA DEL KARTING. Available at: http://kartingmotor.galeon.com/historia_karting.htm [Accessed February 29, 2016ac].

(31) Anon, Introducción al control del motor CC sin escobillas | DigiKey.

Available at: http://www.digikey.com/es/articles/techzone/2013/mar/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control [Accessed March 25, 2016ad].

(32) Anon, Introduction to Karting: Part 1. Available at: http://www.autoblog.com/2009/10/05/introduction-to-karting-part-1/ [Accessed March 12, 2016ae].

(33) Anon, Kartelec: La tecnología de los karts eléctricos. Available at: http://www.kartelec.com/f/tech/sp_liste_moteurs.htm [Accessed February 29, 2016af].

(34) Anon, karteléctrico.com. Available at: http://www.kartelectrico.com/Pros_y_Contras.html [Accessed February 29, 2016ag].

(35) Anon, Karting Real Federación española de automovilismo. Available at: http://www.kartingrfeda.com/reglamentos-karting.php [Accessed February 29, 2016ah].

(36) Anon, KLS96601-8080IPS,24V-96V,600A,Sinusoidal BLDC Motor Controller - Kelly Controls, LLC. Available at: http://kellycontroller.com/kls96601-8080ips24v-96v600asinusoidal-bldc-motor-controller-p-1386.html [Accessed April 5, 2016ai].

(37) Anon, Kokam. Available at: http://kokam.com/cell/ [Accessed June 13, 2016aj].

(38) Anon, LAS BATERÍAS DE LITIO Y BMS, ¿COMO FUNCIONAN? – Partes y Refacciones para Vehículos Eléctricos. Available at: http://energyev.com/las-baterias-de-litio-y-bms-como-funcionan/ [Accessed April 5, 2016ak].

(39) Anon, Los más de 70 circuitos de karts que hay en España. Available at: http://blog.qualitasauto.com/circuitos-karts-espana/ [Accessed February 29, 2016al].

(40) Anon, Los mejores circuitos de kart en España - Autofácil. Available at: http://www.autofacil.es/competicion/2014/11/27/mejores-circuitos-kart-espana/21711.html [Accessed March 12, 2016am].

(41) Anon, Mars 0913(Etek Comparable)PMSM/BLDC motor - Kelly Controls, LLC. Available at: http://kellycontroller.com/mars-0913etek-comparablepmsmbldc-motor-p-874.html [Accessed April 5, 2016an].

(42) Anon, Matlab. Available at: https://es.mathworks.com/store/link/products/standard/new;jsessionid=7ce2efb5c37d70323e02985a1da1?s_iid=htb_buy_gtwy_cta1 [Accessed June 13, 2016ao].

(43) Anon, ME0913 - 10,8 kW Brushless Motor - Asmo GmbH Online Shop. Available at: http://shop.asmokarts.com/index.php?id_product=5&controller=product&id_lang=1 [Accessed April 5, 2016ap].

(44) Anon, ME1003 Drive Kit with Motor, Controller, Throttle, Contactor, Wire Kit, and Fuse Block - KARTING. Available at: http://www.electricmotorsport.com/karting/me1003-emc-rt200-drive-kit-with-motor-controller-throttle-contactor-wire-kit-and-fuse-block.html [Accessed February 29, 2016aq].

(45) Anon, ME1115. Available at: http://www.motenergy.com/me1115motor.html [Accessed April 5, 2016ar].
(46) Anon, ME1115 - 12 kW Brushless Motor - Asmo GmbH Online Shop. Available at: http://shop.asmokarts.com/index.php?id_product=11&controller=product&id_lang=1 [Accessed April 5, 2016as].
(47) Anon, Motenergy ME1114 - Kelly Controls, LLC. Available at: http://kellycontroller.com/motenergy-me1114-p-1387.html [Accessed April 5, 2016at].
(48) Anon, Motenergy ME1114 Brushless Motor 24-72V, 5000RPM, 10 kW cont, 24 kW pk - Brushless Motors - MOTORS - EV PARTS. Available at: http://www.electricmotorsport.com/ev-parts/motors/brushless-motors/me1114-brushless-motor-24-72v-5000rpm-10-kw-cont-24-kw-pk.html [Accessed April 5, 2016au].
(49) Anon, Motenergy ME1115 - Kelly Controls, LLC. Available at: http://kellycontroller.com/motenergy-me1115-p-1388.html [Accessed April 5, 2016av].
(50) Anon, Motenergy ME1115 Brushless Motor 24-96V, 5000RPM, 12 kW cont, 30 kW pk. Available at: http://www.electricmotorsport.com/me1115-brushless-motor-24-96v-5000rpm-12-kw-cont-30-kw-pk.html [Accessed April 5, 2016aw].
(51) Anon, Motor eléctrico versus motor de combustión: par, potencia y eficiencia | forococheselectricos. Available at: http://forococheselectricos.com/2011/11/motor-electrico-versus-motor-de.html [Accessed March 17, 2016ax].
(52) Anon, Motor ME1114. Available at: http://shop.asmokarts.com/index.php?id_product=10&controller=product&id_lang=1 [Accessed June 13, 2016ay].
(53) Anon, Motores eléctricos de inducción vs motores de corriente continua | forococheselectricos. Available at: http://forococheselectricos.com/2014/03/motores-electricos-de-induccion-vs-motores-de-corriente-continua.html [Accessed March 25, 2016az].
(54) Anon, OTL kart datasheet.
(55) Anon, Pedal acelerador. Available at: http://kellycontroller.com/kelly-5k-throttle-pedal-p-1131.html [Accessed June 13, 2016bb].
(56) Anon, Pigtails. Available at: http://wsdeans.com/products/pigtails/index.html [Accessed June 13, 2016bc].
(57) Anon, Speed O Max España. Available at: http://www.speedomax.es/nuestro kart.html [Accessed March 8, 2016bd].
(58) Anon, TECHNICAL DATA OF THE SiNUS iON - RiMO GERMANY The First Address For Electric Go-Karts. Available at: http://en.rimo-germany.com/technical-data-of-the-sinus-ion.html [Accessed February 29, 2016be].
(59) Anon, The Expert of Electric Drivetrains for Go-karts and More - Asmo GmbH Online Shop. Available at: http://shop.asmokarts.com/index.php

[Accessed February 29, 2016bf].
(60) Anon, Tomkart | products - swiss electric kart. Available at: http://www.tomkart.ch/en/products.html [Accessed February 29, 2016bg].
(61) Anon, ZIVAN CARGADORES. Available at: http://www.plccenter.co.uk/Brand/ZIVAN?redirect=true [Accessed June 13, 2016bh].
(62) Automovilismo, F.E., 2015. *Normativa para la expedición de licencias karting*,
(63) Automovilismo, F.E., 2016. *Reglamento Kart España*,
(64) Balsells, M., *Diseño eléctrico-electrónico de un kart eléctrico*, Available at: upcommons.upc.edu/handle/2117/77148.
(65) Bizkarts, EcoVolt NG Kart datasheet. , (0).
(66) Castell, X.B., 2012. *Adaptación de un kart convencional a propulsión alternativa MEMORIA*,
(67) Co, K. et al., Kokam cell list.
(68) Elithion, Cargadores compatibles BMS. Available at: http://liionbms.com/php/charger_options.php [Accessed June 13, 2016a].
(69) Elithion, 2016. Elithion - Li-ion Battery Management Systems BMS large battery modules. Available at: http://elithion.com/ [Accessed April 5, 2016].
(70) Elithion, Lithiumate Pro BMS. , p.2. Available at: http://elithion.com/pdf/lithiumate_pro_brochure.pdf.
(71) García Díaz, J., 2012. Estudio de motores eléctricos para su uso en motocicletas. Available at: e-archivo.uc3m.es/bitstream/10016/15476/1/PFC_Jaime_Garcia_Diaz.pdf.
(72) Illera, G.H., 2014. *GESTOR DE CARGA DE BATERÍAS (BMS)*, Available at: riubu.ubu.es/bitstream/10259/3539/1/Huerta_Illera.pdf.
(73) Implicados, A., 2012. DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS BATERÍAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS / HÍBRIDOS AL FINAL DE SU VIDA ÚTIL , REQUERIMIENTOS DE LOS VEHÍCULO ELÉCTRICO Y VEHÍCULO HÍBRIDO " - Gestión y tratamiento de baterías de Estado : Definitivo. , pp.1–63.
(74) Kellycontroller, Kelly KLS8080I / IPS Motor Controller User ' s Manual. Available at: www.kellycontroller.com.
(75) Kokam, 2008. Cell Specification [SLPB 100216216H_40Ah].
(76) Kokam, KOKAM Li-ion / Polymer Cell.
(77) Marks, F., 2003. The Kokam USA Lithium Polymer Battery System By. , (800).
(78) Mavilor, 2001. Motores Mavilor. Available at: www.mavilor.es.
(79) Observatorio Tecnológico de la Energía, 2012. Mapa Tecnológico movilidad eléctrica. , pp.1–79. Available at: www.idae.es.
(80) Ordóñez, C.P., 2011. Estudio de baterías para vehículos eléctricos. , pp.1–105. Available at: http://enterprise.uc3m.es/redmine/files/101115153006_CV_MDdelamata.pdf\nhttp://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11805.
(81) OTL electrokart, Prokart EVO datasheet.
(82) Permanent, Y., Mars ME0913.

(83) Rodrigez, J., 2011. Características de los motores eléctricos y gestión electrónica para vehículos eléctricos.
(84) Sevcon, *Gen4*, Available at: www.sevcon.com.
(85) Tom Kart, 2013. Tom kart datasheet. , pp.4–5.
(86) Universidad Carlos III, 2004. PRESTACIONES EN VEHÍCULOS.
(87) Vilar Guerrero, J.M., 2005. *IMPLANTACIÓN DE UNA EMPRESA DE KARTING*, Available at: www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/42a3fc55ba408.pdf.