



Trabajo Fin de Grado

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA TRANSFORMACIÓN
DE UN KART DE GASOLINA EN KART ELÉCTRICO

TECHNICAL STUDY FOR THE TRANSFORMATION
OF A KART TO ELECTRIC KART

Autor

Javier de la Torre Esteban

Director

Juan Luis Villa Gazulla

Escuela de Ingenieros y Arquitectos

2017

Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

TRABAJOS DE FIN DE GRADO / FIN DE MÁSTER

D./D^a. JAVIER DE LA TORRE ESTEBAN,

con nº de DNI 03146511-L en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)

GRADO, (Título del Trabajo)

ESTUDIO TÉCNICO PARA LA TRANSFORMACIÓN

DE UN KART DE GASOLINA EN KART ELÉCTRICO

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 21 de Abril de 2017



Fdo: JAVIER DE LA TORRE ESTEBAN

RESUMEN

Este proyecto consiste en estudiar las prestaciones de un kart de gasolina (2 tiempos) en un determinado circuito de karting y así poder diseñar y calcular la transformación del kart de combustión interna en un kart de propulsión eléctrica con prestaciones similares para ese mismo circuito.

Con los datos obtenidos en las pruebas de campo, se realizará una serie de cálculos para el dimensionamiento del motor eléctrico y batería, entre otros elementos como el driver del motor y el cargador de la batería.

Las características necesarias para dimensionar el motor eléctrico serán par [Nm] y velocidad [rpm]. Habrá que tener presente la transmisión que se va a utilizar (eje rueda / eje motor). Una vez elegido el motor (existente en el mercado) es necesario seleccionar el convertidor (driver) adecuado, el cual se encargará de controlar el paso de energía desde las baterías hasta el motor a partir de la acción que realice el piloto tanto en el acelerador como en el freno. El diseño de la batería será en función de la autonomía que se desee.

Para la realización de este proyecto se ha utilizado:

Arduino: Software y Hardware (obtención de datos reales del kart de gasolina (2T)).

Matlab: Diseño y cálculo del motor y baterías para el circuito dado.

ABSTRACT

The aim of this Project is to study the performances of a petrol fuel kart (two-stroke engine) in a particular karting circuit. Thus, we will be able to design and calculate the transformation from internal combustion kart to an electric one with similar characteristics for the mentioned circuit.

With the data obtained in the field tests, we will carried out a series of calculations for the sizing of the electric engine, the driver, the battery and its charger.

The features needed for sizing the electric motor will be torque [Nm] and speed [rpm]. We must bear in mind the transmission that will be used (wheel shaft /motor shaft). Once the engine has been selected, (available on the market), it will be necessary to select the suitable converter (driver). The driver will be in charge of controlling the passage of power from batteries to the engine. This will be determined by the use of the brake and the accelerator made by the pilot. The battery will be designed according to the autonomy desired.

For the implementation of this project I have used the following things.

Arduino: Software and Hardware (obtaining real data from petrol fuel kart (2 stroke kart)).

Matlab: Design and calculation of the engine and batteries for the mentioned circuit.

INDICE

1	OBJETIVO DEL PROYECTO	12
2	EL MUNDO DE LOS KARTS Y EL VEHÍCULO ELÉCTRICO	12
2.1	KARTS	12
2.2	KARTING	12
2.3	HISTORIA DEL KARTING	12
2.4	PARTES DEL KART	13
2.4.1	Ruedas	13
2.4.2	Chasis	13
2.4.3	Freno	13
2.4.4	Motor	13
2.5	VEHÍCULO ELÉCTRICO	14
2.5.1	Vehículos híbridos eléctricos (hev):	14
2.5.2	Vehículo híbrido enchufable (phev):	14
2.5.3	Vehículo 100% eléctrico (ev):	14
2.6	PARTES DEL KART ELÉCTRICO	16
2.6.1	Máquina rotativa eléctrica (motor y generador eléctrico)	16
2.6.2	Convertidor	18
2.6.3	Baterías	19
2.6.4	Cargador	21
2.7	VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO	21
2.7.1	Ventajas	22
2.7.2	Inconvenientes	22
2.8	RIESGO ELÉCTRICO	23
3	DESARROLLO DEL PROYECTO	24
3.1	TOMA DE DATOS	24
3.1.1	Programación del cuentakilómetros (parte de análisis)	25
3.1.2	Datos obtenidos a partir del cuentakilómetros	26

3.2	MODELO MATEMÁTICO DEL KART	28
3.2.1	Programación del modelo dinámico y diseño de baterías (parte de diseño) 28	
3.3	PROGRAMACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN SIMULINK.....	31
3.3.1	Bloque de fuerza	33
3.3.2	Bloque del motor	36
3.3.3	Bloque de la energía.....	38
3.3.4	Bloque de cálculo de baterías.....	39
3.4	DATOS OBTENIDOS APARTIR DE MATLAB-SIMULINK (con datos del kart de gasolina).....	41
4	SELECCIÓN DE ELEMENTOS ELÉCTRICOS Y DISEÑO	45
4.1	MOTOR ELÉCTRICO, BATERÍA Y DRIVER	47
4.1.1	Cálculo para una autonomía de 11 km:	53
4.1.2	Cálculo para una autonomía de 27,5-33 km	55
4.2	CARGADOR EXTERNO.....	64
4.3	TRANSMISIÓN MECÁNICA DEL KART ELÉCTRICO.....	64
4.4	SECCIÓN DEL CABLE.....	66
4.5	DISEÑO DE INSTALACIÓN	66
4.5.1	Reparto de masas	66
4.5.2	Volumen de los elementos.....	68
5	ESQUEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA Y DE CONTROL	69
6	PRESUPUESTO ECONÓMICO	70
6.1	PRESUPUESTO DESCOMPUESTO DEL MATERIAL ELÉCTRICO.....	70
6.2	COMPARACIÓN DE PRESUPUESTOS SEGÚN EL TIPO DE KART	71
7	COMPARACIÓN DE KARTS.....	72

LISTA DE FIGURAS:

Figura 1. Tipos de vehículos eléctricos	14
Figura 2. Comparativa de la eficiencia entre los dos tipos de vehículos	15
Figura 3. Sistema eléctrico del kart eléctrico	16
Figura 4. Pack de celdas que forman una batería de 5s3p	20
Figura 5. Sensor colocado en el eje trasero (no detectando el imán)	24
Figura 6. Sensor colocado en el eje trasero (detectando el imán)	24
Figura 7. Cuentakilómetros colocado detrás del asiento	25
Figura 8. Interior de la caja donde va instalado el cuenta kilómetros	25
Figura 9. Sensor hall junto al imán, (detectando)	25
Figura 10. Sensor hall junto al imán (no detectando)	25
Figura 11. Imagen aérea sobre el circuito con sus tramos de aceleración y frenado ..	27
Figura 12. Vista general de la programación, en Simulink	32
Figura 13. Bloque de Cálculo de Fuerzas, en Simulink	33
Figura 14. Interior del bloque de fuerzas, en Simulink	34
Figura 15. Interior de la caja de la fuerza de ascensión, en Simulink	34
Figura 16. Interior de la caja de la fuerza de rozamiento, en Simulink	35
Figura 17. Interior de la caja de la fuerza aerodinámica, en Simulink	35
Figura 18. Interior de la caja de la F.Aceleración Angular, en Simulink	35
Figura 19. Interior de la caja de la F.Aceleración Lineal, en Simulink	36
Figura 20. Bloque de Cálculo del Motor, en Simulink	37
Figura 21. Interior del bloque: Cálculo Motor, en Simulink	37
Figura 22. Bloque de Cálculo de Energía, en Simulink	38
Figura 23. Interior del bloque: Cálculo de Energía, en Simulink	38
Figura 24. Bloque Cálculo de Baterías, en Simulink	39
Figura 25. Interior del bloque Cálculo de Batería, en Simulink	40
Figura 26. Kart donde se instalará el proyecto (vista frontal)	45

Figura 27. Kart donde se instalará el proyecto (vista trasera)	45
Figura 28. Motor PMS 156W.....	50
Figura 29. Alzado PMS 156W	50
Figura 30. Perfil PMS 156W.....	50
Figura 31. Gráfica Par-Velocidad del motor PMS 156W	51
Figura 32. Celda2S Lipo con capacidad de 7000 mAh.....	53
Figura 33. Representación de la batería, según los cálculos realizados en el ejemplo anterior	54
Figura 34. Pack de 7,4V y 7Ah (2S1P)	60
Figura 35. Características específicas del pack 2S1P que se instalará en la batería del kart eléctrico	60
Figura 36. Conexión eléctrica del BMS a una de las ramas de la batería (conexión en serie)	61
Figura 37. BMS instalado por cada rama de la batería	61
Figura 38. Dimensiones del controlador seleccionado (tamaño 4)	63
Figura 39. Circuito de conexión. Desde la batería al motor pasando por el controlador	63
Figura 40. Elementos del cargador exterior. Rectificador, cable de conexión a red, cable conexión batería y cable sensores	64
Figura 41. Distribución de los elementos según las masas	67
Figura 42. Distribución del espacio libre para la colocación de elementos eléctricos ..	68
Figura 43. Circuito de potencia (rojo) y circuito de control (azul)	69
Figura 44. Prototipo del kart eléctrico.....	74
Figura 45. Neumáticos de lluvia	78
Figura 46. Neumáticos de seco	78
Figura 47. Presión de los neumáticos	78
Figura 48. Tipos de máquinas rotativas	79
Figura 49. Coeficiente aerodinámico según la forma	91
Figura 50. Coeficiente aerodinámico de un kart	92
Figura 51. Kart de pruebas (vista frontal).....	93
Figura 52. Kart de pruebas (vista lateral)	93

Figura 53. Kart de pruebas (vista trasera).....	93
Figura 54. Calentando motor con el piloto y su mecánico	93
Figura 55. Circuito donde se han realizado las pruebas para hallar las prestaciones del kart de gasolina	94
Figura 56. Kart de pruebas en pista	95
Figura 57. Báscula con el kart.....	96
Figura 58. Báscula con el kart y el piloto.....	96
Figura 59. Hoja de cálculo para operar con datos de celdas LiFePo4.....	96

LISTA DE TABLAS:

Tabla 1. Tipos de celdas	19
Tabla 2. Densidades energéticas de diferentes fuentes de energía.	23
Tabla 3. Valores obtenidos de la vuelta más rápida	27
Tabla 4. Datos kart de gasolina	29
Tabla 5. Datos del circuito	29
Tabla 6. Comparación de diferentes configuraciones de diseño (frenado regenerativo)	43
Tabla 7. Prestaciones del kart de gasolina (modo freno regenerativo parcial)	45
Tabla 8. Prestaciones del modelo PMS 150EV	47
Tabla 9. Prestaciones del modelo PMS 156W	47
Tabla 10. Masas descompuestas para el diseño de PMS 150EV sin batería	48
Tabla 11. Masas descompuestas para el diseño de PMS 165W sin batería	48
Tabla 12. Tabla de prestaciones según la masa del kart	49
Tabla 13. Hoja de características del motor PMS 156W	50
Tabla 14. Características de la celda Lipo a 7,4V y 7Ah	53
Tabla 15. Características de la batería del kart eléctrico para una autonomía de 11 km	53
Tabla 16. Características de la celda Lipo a 7,4 V y 7Ah	55
Tabla 17. Características de la batería del kart eléctrico para una autonomía de 27-30km.....	55
Tabla 18. Resultados de la batería con una autonomía de 11 km con celdas de LiFePo4	56
Tabla 19. Resultados de la batería con una autonomía de 27-30 km con celdas de LiFePo4	57
Tabla 20. Resultados de la batería con una autonomía de 11 km con celdas de Lipo	58
Tabla 21. Resultados de la batería con una autonomía de 27-30 km con celdas de Lipo	59
Tabla 22. Características específicas de BMS seleccionado, HCX-D170	62

Tabla 23. Modelos de cargadores de batería externos	64
Tabla 24. Relaciones de transmisión	65
Tabla 25. Masa total del kart eléctrico.....	66
Tabla 26. Masas de distintos laterales del kart.....	67
Tabla 27. Espacios libres para la instalación de los elementos eléctricos	68
Tabla 28. Volumen que ocupa los elementos a instalar	68
Tabla 29. Presupuesto económico de ambos tipos de kart	71
Tabla 30. Estudio de 1.000 horas al kart de gasolina.....	73
Tabla 31. Estudio de 1.000 horas al kart eléctrico.....	73
Tabla 32. Precio estimado a lo largo de un año	73
Tabla 33. Comparación general entre Karts.....	74
Tabla 34. Valores de coeficientes de rozamiento	91
Tabla 35. Tabla de las densidades del aire según la altitud	92
Tabla 36 Características del kart de pruebas	93
Tabla 37. Características del circuito	94

LISTA DE GRÁFICAS:

Gráfica 1. Velocidades obtenidas en la prueba de telemetría	26
Gráfica 2. Ciclo de trabajo de la vuelta más rápida	41
Gráfica 3. Par en rueda, Par en Motor y sus pares efectivos	41
Gráfica 4. Aceleraciones lineales sobre los tres diseños de frenado regenerativo durante su ciclo de trabajo	43
Gráfica 5. Energía consumida en la vuelta más rápida [kWh]	44

ACRÓNIMOS

EV: Vehículo eléctrico.

HEV: Vehículos Híbridos Eléctricos.

PHEV: Vehículo Híbrido Enchufable.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

BMS: Balance Master System.

LiFePo₄: Batería de Litio ferro-fosfato

Lipo: Batería de Polímero de Litio

PMS 150 EV: Motor síncrono de imanes permanentes 150 con ventilación externa.

PMS 165 W: Motor síncrono de imanes permanentes 165 refrigerado por agua.

1 OBJETIVO DEL PROYECTO

El motivo por el cual realizo este proyecto es unir una de mis pasiones, el karting, con lo que he estudiado durante mi carrera universitaria, la electricidad. El objetivo fundamental es transformar el kart de gasolina con el que he realizado las pruebas, en un kart eléctrico con las mismas prestaciones que el kart de competición (kart de pruebas).

En este proyecto pongo a prueba todos los conocimientos aprendidos en el grado de ingeniería eléctrica, ya que puedo aplicar en él muchas de las disciplinas estudiadas en este grado.

También, se observa que esta rama de la ingeniería eléctrica (movilidad eléctrica) está tomando una gran importancia en la actualidad por lo que es una buena salida en el mundo laboral.

La estructura se basa en dos partes. La primera de ellas trata de explicar con detalle todo lo relacionado con los karts y el vehículo eléctrico, expone la teoría que este proyecto desarrolla. Seguidamente, en la segunda parte, se encuentra la obtención de datos del kart de combustión y la transformación a kart eléctrico. Este diseño se consigue a partir de los cálculos realizados con Matlab, y a partir de ellos la elección de los elementos eléctricos y electrónicos.

2 EL MUNDO DE LOS KARTS Y EL VEHÍCULO ELÉCTRICO

2.1 KARTS

Un kart es un vehículo terrestre monoplace sin cockpit (sin cabina), sin suspensiones y con cuatro ruedas no alineadas que están en contacto con el suelo.

Las dos ruedas delanteras son las directrices y las dos ruedas traseras las motrices. Éstas están conectadas a un eje sin diferencial que es arrastrado por el motor de combustión siendo la transmisión una cadena.

Las partes principales de un kart son los neumáticos, el chasis, el freno y el motor. Más adelante vienen definidos.

2.2 KARTING

El karting es una disciplina deportiva del automovilismo que se aplica con karts sobre unos circuitos llamados kartódromos. La longitud de estos circuitos está entre 600 y 1.700 metros y un ancho de entre 8 y 15 metros.

Esta modalidad es la iniciación y formación de los pilotos de competición como Fórmula 1, Rally, entre muchas otras modalidades automovilísticas.

2.3 HISTORIA DEL KARTING

El karting es el primer escalón en el mundo del automovilismo de competición. Es la escuela donde se forman los pilotos que pasan a otras categorías automovilísticas.

Este deporte nació en el año 1951 en una base de aviación de los Estados Unidos. El primer kart se hizo con unos tubos de calefacción, ruedas de cola de avión, un motor de corta-césped y el volante de un antiguo avión en desuso. En sus comienzos los karts eran unas máquinas muy rudimentarias que escasamente alcanzaban los 50 Km/h. Al poco tiempo el karting se fue

consolidando en otras bases de los Estados Unidos y comenzaron las primeras competiciones. Fueron superando rápidamente aquellos 50 km/h. y se incorporaron numerosas mejoras técnicas.

En los años 60 este deporte se introdujo en Europa a través de Francia e Inglaterra para posteriormente llegar a España sobre los años 70. El karting ha estado en continua evolución. Los chasis fueron ganando en estabilidad y frenada. En la actualidad pueden alcanzar velocidades superiores a los 150 Km/h, pero con una seguridad equiparable a la de un monoplace de Fórmula 1. Italia ha sido el mayor protagonista tanto en la fabricación de chasis como de motores en este mundo de competición.

2.4 PARTES DEL KART

Es un vehículo muy básico. Se compone básicamente de cuatro elementos: ruedas, chasis, freno y motor.

2.4.1 RUEDAS

Son el punto de apoyo del kart sobre el suelo. Su pequeña zona de contacto con el suelo, soporta el peso de los demás elementos y su carga. La función principal de este elemento es generar agarre para poder girar, acelerar y frenar.

La rueda está compuesta por una llanta de aluminio o magnesio y un neumático.

Hay diferentes tipos de neumáticos, en función de su compuesto y su dibujo. Se eligen en función de las inclemencias meteorológicas y el estado del pavimento. En función del compuesto podemos encontrar una gran variedad entre los más duros y los más blandos. Para más información de este elemento, ver página 78, en anexos.

2.4.2 CHASIS

Formado por un conjunto de tubos soldados aproximadamente de 30 mm de diámetro. Su función es dar rigidez al conjunto para transmitir la máxima potencia al suelo y debe permitir una cierta torsión y flexión para aportar agarre ya que este tipo de vehículos no dispone de suspensión.

Carece de diferencial en su eje trasero (elemento que permite que las ruedas motrices giren a diferentes velocidades en función del radio de la curva).

2.4.3 FRENO

Generalmente el freno que llevan los karts es freno de disco. Un sistema hidráulico se activa en cuanto se pisa el pedal de freno (pedal izquierdo) y hace que dos pastillas, montadas en las mordazas, friccionen con el disco.

Este elemento se encarga de reducir el par, que realiza el eje motriz, de forma mecánica haciendo perder la energía cinética en forma de calor (energía perdida).

2.4.4 MOTOR

Es el encargado de impulsar el kart. Son sistemas termodinámicos formados por diversos mecanismos, cuya función principal es utilizar de forma efectiva y precisa la energía química del combustible y convertirla en trabajo mecánico que termine por generar movimiento. Las

partes que lo forman son: un bloque de cilindros, carters, eventualmente caja de velocidades, un sistema de encendido, un carburador y un tubo de escape.

Este proceso de propulsión se lleva a cabo en cuatro pasos muy sencillos que llevan a la explosión del carburante para liberar energía y crear movimiento. Esto ocurre en la parte superior del cilindro, donde se encuentra la cámara de combustión (donde se producen las explosiones). En el interior de este cilindro se encuentra un pistón que se mueve de arriba abajo y da movimiento al cigüeñal, éste aprovecha el movimiento longitudinal del pistón para convertirlo en movimiento angular.

Los cuatro pasos son: admisión, compresión, expansión y escape.

2.5 VEHÍCULO ELÉCTRICO

Actualmente el EV está en continuo desarrollo. Esta “nueva” tecnología se está investigando ya que probablemente sea el medio de transporte del futuro.

Según su funcionamiento hay varios tipos de vehículo eléctrico:

2.5.1 VEHÍCULOS HÍBRIDOS ELÉCTRICOS (HEV):

Estos vehículos equipan un motor de combustión interna y un motor eléctrico de imán permanente. Con ello aprovechamos los beneficios de ambos motores. Para una gran autonomía y repostaje rápido utilizamos el motor de combustión interna. Para circular a bajas velocidades y aprovechar la energía cinética en los frenados regenerativos utilizamos el motor eléctrico.

2.5.2 VEHÍCULO HÍBRIDO ENCHUFABLE (PHEV):

Tienen el mismo formato que los HEV pero los PHEV pueden ser enchufados a la red para poder cargar las baterías y así recorrer las primeras decenas de kilómetros de un viaje.

2.5.3 VEHÍCULO 100% ELÉCTRICO (EV):

Son totalmente eléctricos. Este tipo de vehículo está limitado por autonomía y su tiempo de recarga.

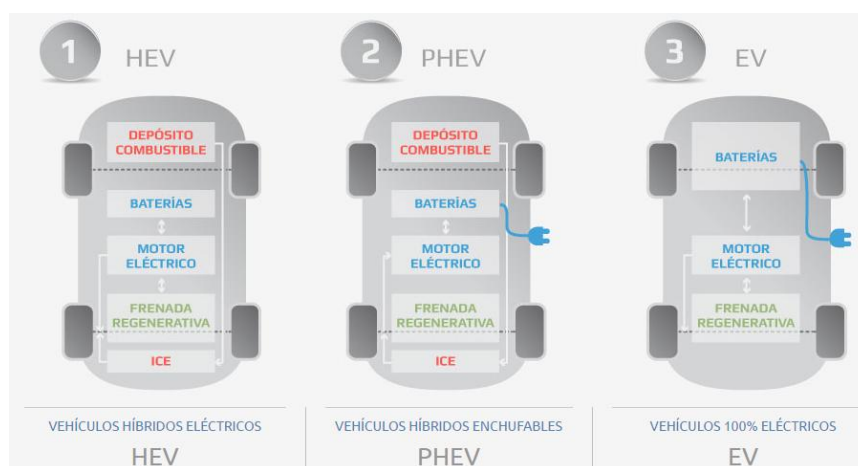


Figura 1. Tipos de vehículos eléctricos

Hay que recalcar que su mayor problema es la autonomía, la cual está muy limitada. Éste es uno de los inconvenientes de este estudio, el gran peso de las baterías por su reducida densidad energética.

Otro de sus problemas es el tiempo de recarga que necesitan.

Desde un punto de vista positivo a este problema, la recarga puede ser la nocturna, ya que el precio del kWh es mucho más barato y así se aprovecha en equilibrar la curva de demanda eléctrica y la potencia instalada de nuestro país.

Existen tres tipos de recarga:

Recarga convencional (16 A): sus niveles de potencia son reducidos (3,7 kW), por tanto el tiempo de recarga es mayor. Implica 8 horas aproximadamente. Óptimo para una vivienda unifamiliar o garaje comunitario.

Recarga semi-rápida (32 A): Los niveles de potencia son mayores (7,3 kW). Los tiempo de recarga son menores, aproximadamente de 4 horas.

Recarga rápida: se puede cargar un 80% de la batería en 30 minutos. Este tipo de carga se hace en corriente continua con unas potencias de salida en el orden de 50 kW. Esta solución es la que se asemeja más al repostaje de un vehículo de combustión.

Por otra parte, este tipo de vehículo contiene numerosos beneficios. Uno de ellos es la eficiencia energética que ofrece, es prácticamente el doble si se compara con la eficiencia del vehículo de combustión interna.

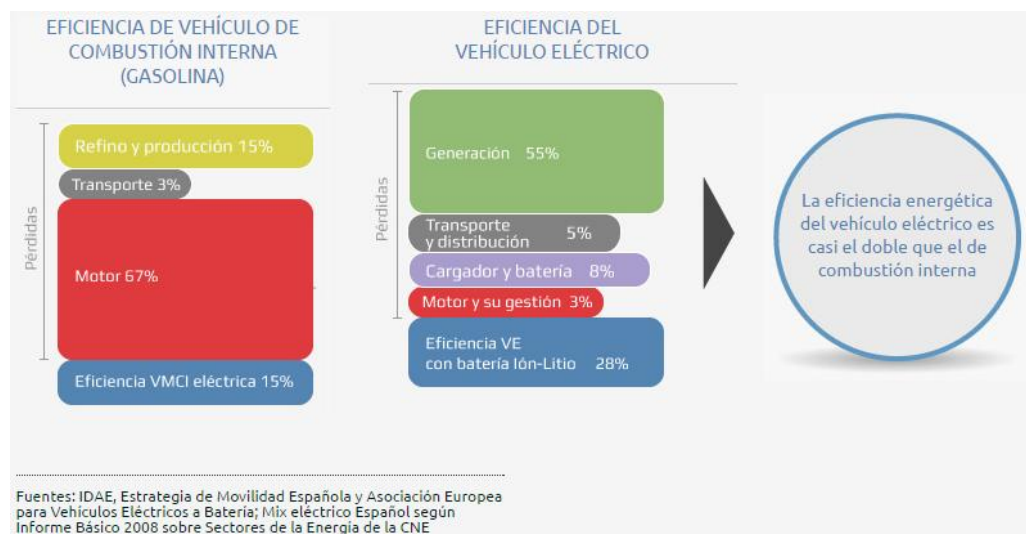


Figura 2. Comparativa de la eficiencia entre los dos tipos de vehículos

A nivel mecánico, los coches eléctricos no pueden ser más simples. Su número de piezas móviles se reducen al máximo y apenas hay piezas de desgaste. Por lo tanto el mantenimiento de éste es mínimo.

Otro problema que se estudia en la actualidad es la contaminación. Con este tipo de vehículos podemos decir que la reducción de ruido y de emisiones de GEI (gases de efecto invernadero) es total, a la hora de utilizar este tipo de propulsión. Es verdad, que existe un impacto ambiental cuando generamos energía eléctrica para recargar las baterías del vehículo, en el caso de que la generación no provenga de energías renovables.

El ahorro económico es considerable. Se aprovecharán las tarifas nocturnas para ello. El coste de recargar un VE es mucho más barato que repostar un vehículo de combustión.

2.6 PARTES DEL KART ELÉCTRICO

Antes de ver la siguiente sección de la memoria, se puede observar la distribución de los distintos elementos eléctricos en la figura 3. Todos ellos son los encargados del sistema de movilidad eléctrica. Serán los estudiados y calculados para el kart eléctrico diseñado.

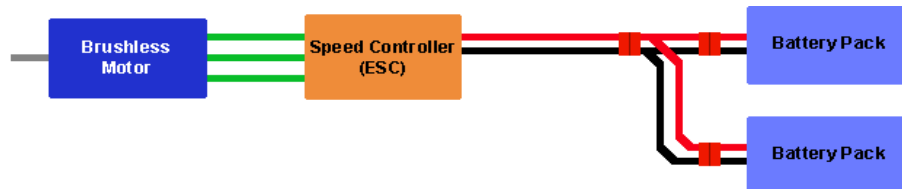


Figura 3. Sistema eléctrico del kart eléctrico

2.6.1 MÁQUINA ROTATIVA ELÉCTRICA (MOTOR Y GENERADOR ELÉCTRICO)

Es la parte fundamental del EV, capaz de transformar energía eléctrica en energía mecánica (modo motor cuando ejercemos presión sobre el acelerador) y transformar energía cinética en energía eléctrica (modo generador cuando se deja de acelerar o se frena con el freno eléctrico). Este elemento será el encargado de desplazar el kart ejerciendo un par que contrarreste las fuerzas que se oponen al movimiento. Estas fuerzas resistentes se estudiarán en el modelo dinámico programado en Matlab (véase en la segunda parte del TFG).

Las principales características de una máquina rotativa eléctrica son la eficiencia, fiabilidad y duración, tamaño compacto, ligero, silencioso y el rango de par-velocidad. Existe una gran variedad de máquinas eléctricas rotativas. Dependiendo del tipo de carga que vaya a mover.

Partes principales de una máquina rotativa son el estator (parte estática de la máquina) y el rotor (parte de la máquina en movimiento). Entre estas dos partes existe el entrehierro que es el espacio libre que hace que se pueda mover el rotor.

Dependiendo del tipo de carga que vaya a mover, unas son más adecuadas que otras por sus diferentes prestaciones. Los motores que se utilizan en tracción eléctrica son los siguientes:

Motores asíncronos o de inducción.

Motores síncronos de imanes permanentes (Brushless síncronos)

Máquinas de reluctancia conmutada.

Motores de corriente continua sin escobillas (Brushless DC)

2.6.1.1 MÁQUINA ASÍNCRONA O DE INDUCCIÓN

Son los más extendidos en la industria debido a su robustez, escaso mantenimiento y reducido precio. En el pasado, los procesos que necesitaban regulación de velocidad, utilizaban motores de corriente continua. Ahora, se instalan motores asíncronos controlados por convertidores de variación de frecuencia.

Jaula de ardilla y rotor bobinado son los dos tipos de la máquina asíncrona.

Al conectar el estator a una fuente senoidal, se crea un campo magnético giratorio que induce una fuerza electromagnética y corrientes de intensidad por el devanado del rotor, creando en el propio rotor un campo magnético giratorio. La interacción entre ambos campos (campo del estator y campo del rotor) genera un par electromagnético que hace girar al rotor.

2.6.1.2 MÁQUINA SÍNCRONA DE IMANES PERMANENTES (AC BRUSHLESS)

Este tipo de máquina rotativa se emplea en aplicaciones de generación eléctrica, aunque cada vez más se utiliza como motor (en EV) por su mayor densidad de potencia y mejor rendimiento que las máquinas asíncronas.

Se puede diferenciar dos tipos de máquina síncrona: de polos salientes y de rotor cilíndrico. El circuito de excitación (devanado del rotor) ha sido sustituido por imanes permanentes de alta energía (neodimio NdFeB) para evitar las escobillas en el eje.

Sus cualidades principales son el alto rendimiento y densidad de potencia, su par constante en un amplio rango de velocidades y sus dimensiones y peso reducido. Este tipo de máquinas son controladas, alimentando el estator, con técnicas PWM.

2.6.1.3 MÁQUINA DE RELUCTANCIA CONMUTADA

Máquina de polos salientes en ambas partes, en el estator y en el rotor. Se hallan bobinas concentradas en el estator, haciendo que esta máquina sea idónea para tracción eléctrica, por su robustez, gran par y sencillez en la fabricación además de tener un control sencillo. El rotor no es de un material magnético ni tampoco utiliza escobillas. Se mueve a una posición donde la inductancia del bobinado excitado es máxima.

Como inconveniente presenta un pequeño rizado en el par y un bajo factor de potencia. Para su control es necesario un sistema de detección de posición.

2.6.1.4 MÁQUINA DE CORRIENTE CONTINUA SIN ESCOBILLAS (DC BRUSHLESS)

Este tipo de máquina es la mejora a la máquina de corriente continua, ya que no existen escobillas en su configuración. Esto se debe porque se ha sustituido el circuito inductor (en el rotor) por imanes permanentes, siendo las bobinas del estator el circuito inducido. Para este sistema, la conmutación se realiza de forma electrónica. El funcionamiento se basa en la alimentación secuencial de cada una de las fases del estator de forma sincronizada con el movimiento del rotor, para ello es necesario sensores hall para detectar la posición del rotor. De esta manera, al no tener escobillas, no requiere mantenimiento periódico.

2.6.1.5 MÁQUINA ROTATIVA DE FLUJO AXIAL

Después de haber explicado los mejores tipos de motores para la tracción, es necesario saber que existe una variación en las máquinas que utilizan imanes permanentes. Es en la forma en la que fluye el campo magnético resultante. Éste, puede ser flujo radial (el campo fluye perpendicularmente al eje de la máquina) o puede ser flujo axial (el campo fluye paralelamente al eje de la máquina).

Las máquinas de flujo axial tienen el estator en forma de anillo y el rotor en forma de disco, con sus caras activas paralelas, cumpliéndose que sus diámetros activos interiores y exteriores, son iguales respectivamente. Presentan excelentes prestaciones además de un reducido tamaño.

2.6.2 CONVERTIDOR

Es la parte del circuito eléctrico que conecta el motor con las baterías. Es el encargado de controlar el paso y la dirección en la que fluye la energía.

El convertidor tiene unas entradas y salidas para poder actuar sobre él. La entrada que proviene del acelerador hará que aumenten los parámetros que haga acelerar al motor eléctrico y del mismo modo con el freno, para poder aprovechar la energía cinética y poder devolver esa energía a las baterías. Se puede decir que el convertidor es el carburador del vehículo de combustión, dando paso a la entrada de la mezcla de aire y gasolina al motor.

Los inversores disponen de interruptores de potencia (IGBT's) que conectan la tensión de la batería al motor según las exigencias del encoder. Estos interruptores de potencia se activan o desactivan a través de un controlador, que es comandado a través de las entradas que hemos dicho anteriormente (entrada del acelerador y entrada del freno). El tipo de control que lleve el EV, va acorde con el tipo de motor que se instale, ya que cada tipo de motor se controla de diferente manera.

Las máquinas rotativas de inducción pueden ser controladas vectorialmente. Este método de control permite modelar un motor AC como uno de corriente continua, es decir, controlar de manera independiente la magnetización de la máquina y el par desarrollado.

Otro sistema con el que se puede regular la velocidad de un motor asíncrono, es un variador de frecuencia. Este dispositivo electrónico regula la frecuencia de la tensión aplicada al motor, logrando modificar la velocidad de éste. Para que esto se produzca correctamente, es necesario variar la tensión aplicada al motor para evitar la saturación de flujo magnético con una elevada corriente que pueda dañar el motor. Se utilizan estos equipos cuando sea necesario dominar el par y la velocidad al realizar las siguientes funciones:

- Aceleración controlada, permite el tiempo de aceleración adecuado para cada aplicación, mediante una rampa de aceleración lineal.
- Variación de velocidad, control sobre la frecuencia y la tensión, bucle abierto.
- Regulador de velocidad, consigue la velocidad mediante una consigna (piloto de navegación automática) en bucle cerrado.
- Deceleración controlada, puede ajustarse en forma de consigna o dando una referencia exterior (pisando el pedal del freno). Si la deceleración que se desea es más rápida que la natural, se habla de frenado regenerativo (energía devuelta a las baterías).

Los variadores de velocidad para motores DC se adaptan bien a todas las aplicaciones. Los únicos límites vienen impuestos por el propio motor de corriente continua, en especial por la dificultad de conseguir velocidades elevadas y la necesidad de mantenimiento (sustitución de escobillas). Fueron las primeras soluciones industriales hasta que los variadores de frecuencia se hicieron con este campo, ya que los motores asíncronos son más robusto y económicos que un motor DC.

A parte del control de los motores, este dispositivo es el encargado de la protección del sistema. Un microprocesador interno se encarga de medir corrientes de cortocircuito y temperaturas del motor, suministrando una señal de alarma o de desconexión en caso de calentamiento excesivo.

La elección de este elemento eléctrico, el cerebro del EV, se dará en la segunda parte de este TFG, ya que tiene que ir acorde con el motor seleccionado.

2.6.3 BATERÍAS

Uno de los elementos principales del sistema eléctrico, encargado de almacenar la energía de forma química para transformarla a energía eléctrica, a través de reacciones químicas. Análogamente es el depósito de gasolina en los vehículos de combustión, con la diferencia que las reacciones son de combustión. Hay muchas variedades de elementos que reaccionan químicamente para entregar energía en forma de electricidad.

Las baterías están formadas por un conjunto de celdas, las cuales almacenan la energía, y por un conjunto de circuitos electrónicos inteligentes que controlan la carga y la descarga de las celdas y el balanceo de tensión entre ellas. El BMS (Balance Master System) es el sistema que se encarga de todo ello.

En la tabla 1, se observa algunos de los diferentes tipos de celdas con sus densidades energéticas, su tensión por celda y el número de ciclo que tienen cada una de ellas.

TIPO	DENSIDAD ENERGÉTICA [Wh/kg]	TENSIÓN POR CELDA [V]	DURACIÓN [nº de ciclos]
Plomo	30-40	2	1.000
Ni-Fe	30-55	1,2	+10.000
Ni-Cd	48-80	1,25	500
Ni-Mh	60-120	1,25	1000
Li-ion	110-160	3,7	4000
Li-Po	100-130	3,7	5000
LiFePo ₄	100-130	3,2	2500

Tabla 1. Tipos de celdas

Para proyectos de movilidad eléctrica, como es este caso, la característica de densidad energética es de las más importantes por la gran relación que tiene con la autonomía del vehículo y por el tipo de proyecto que es, de competición. Otras propiedades a tener en cuenta son: la capacidad [Ah], intensidad que puede descargar la batería en una hora y el índice de descarga, xC, que es la intensidad máxima que puede descargar la batería en un periodo de tiempo limitado. Otro aspecto importante que se debe saber sobre las baterías es el número de

ciclos que tienen (vida de la batería). A partir de estas características, las celdas que más se ajustan a las necesidades del proyecto son de LiFePO_4 y de Lipo.

2.6.3.1 BATERÍA DE LiFePO_4

Las celdas de LiFePO_4 son más estables, seguras, duraderas y adecuadas para cargas rápidas de bicicletas eléctricas, scooters, coches eléctricos...

Estas celdas se instalarán para que formen packs y poder colocarlos en los laterales del kart, repartiendo y equilibrando el peso del conjunto de elementos eléctricos. La figura 4, es un ejemplo de cómo se representa un pack de celdas 5s3p. Esta notación representa 3 ramas de celdas en paralelo y cada rama está formada de 5 celdas en serie. Cuando las celdas se disponen en serie obtenemos la suma de sus tensiones y cuando están en paralelo conseguimos la suma de sus intensidades. Si la celda es de 3,7 V con una capacidad de 3 Ah y un índice de descarga de 20C, el pack de la figura 4 es de 18,5 V con una capacidad de 9 Ah y una corriente de descarga máxima de 180 A. En la segunda parte de este proyecto, calcularemos la energía necesaria para mover el kart eléctrico unas determinadas vueltas al circuito elegido, y a partir de ello se podrá calcular el número de celdas y su disposición para el motor seleccionado.

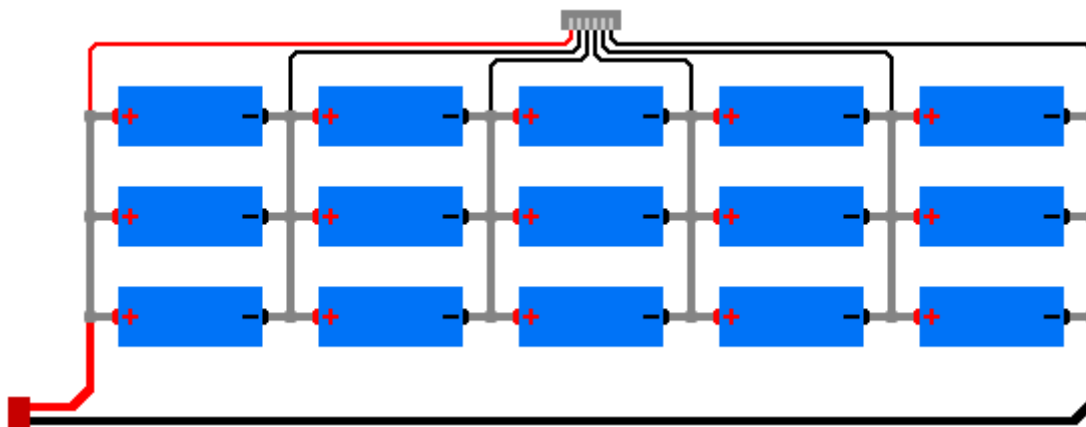


Figura 4. Pack de celdas que forman una batería de 5s3p

Se observa que en la figura 4 hay dos tipos de conexiones. Las conexiones gruesas de color gris entre celdas se encargan de transmitir la energía de cada una de ellas realizando la carga y descarga, y las conexiones finas de color negro y rojo son las que se encargan de dar información al BMS, miden la tensión de cada celda y es el que hace el balanceo de todas ellas. El balanceo, es el paso de energía entre las celdas para que todas tengan el mismo valor de tensión, este proceso se realiza al finalizar el proceso de carga y no en ningún otro momento. A parte de la función de proteger la batería, puede monitorizar su estado calculando los datos obtenidos. La monitorización puede ser de la temperatura media, el estado de carga (SOC), la profundidad de descarga (DOD), el estado de salud de la batería (SOH), la corriente de carga (CCL) y descarga de la batería (DCL). Todos estos datos son importantes para hacer un uso adecuado de la batería y que duren el máximo de ciclos posibles.

Estudiaremos el diseño de la batería con este tipo de celdas más adelante. Las celdas LiFePO_4 existentes en el mercado son de 8 Ah, 10 Ah, 12 Ah y 15 Ah a 3,2 V.

2.6.3.2 BATERÍA DE LIPO

Las baterías Lipo (abreviatura del Litio y polímero) son un tipo de batería recargable que se suele utilizar en los sistemas eléctricos de radiocontrol, especialmente los aviones, helicópteros... las características principales es que son ligeras y con un tamaño reducido, tienen una gran capacidad por lo que su densidad energética es elevada y por último, su índice de descarga es muy alta para alimentar sistemas eléctricos muy exigentes.

Como inconveniente de estas baterías es que tienen problemas de seguridad, si no se mantienen correctamente pudiendo incendiarse o explotar. Requieren un cuidado único y adecuado a la hora de la carga y la descarga para que no afecte a su esperanza de vida.

Estas baterías Lipo tienen celdas de 3,7 V. Con ellas podemos crear la batería con la tensión que necesitemos.

- 3,7 V de batería = 1 celda x 3.7 V (1S)
- 7,4 V de batería = 2 celdas x 3.7 V (2S)
- 11,1 V de batería = 3 celdas x 3.7 V (3S)
- 14,8 V de batería = 4 celdas x 3.7 V (4S)
- 18,5 V de batería = 5 celdas x 3.7 V (5S)
- 22,2 V de batería = 6 celdas x 3.7 V (6S)

2.6.4 CARGADOR

Este elemento no ocupará ningún lugar en el EV pero no por ello, menos importante. El cargador se encarga de transformar la energía de la red a los parámetros necesarios de las baterías del EV. Para que el cargador sea útil, éste debe de proporcionar una tensión superior a la tensión del pack de celdas cuando esté al 100% de carga. La corriente no puede ser superior a la corriente de carga del pack. El tiempo de carga de las baterías depende a que toma de corriente se conecte, está en función de la potencia de dicha toma, a más potencia de la toma menor tiempo de carga. Siempre con limitaciones de corriente.

El tipo de cargador se desconecta automáticamente de la alimentación cuando éste detecte que las baterías están cargadas completamente. Una vez desconectada la alimentación por primera vez no vuelve a dejar pasar corriente a no ser que desenchufes y se vuelva a enchufar de nuevo a la red. Esta medida de control sirve para que no esté en carga constantemente cuando la batería pierda energía en vacío.

2.7 VENTAJAS E INCONVENIENTES DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

Este tipo de proyecto tiene impacto sobre la economía, la sociedad y el medioambiente. Por parte de la economía, es más rentable si se emplea electricidad que si se utiliza combustible fósil. Este proyecto pone de manifiesto que la movilidad eléctrica es posible junto sus ventajas y en todos sus ámbitos. El impacto medio ambiental se reducirá, por lo tanto la imagen que proyectará es de responsabilidad y mejora del entorno y reputación.

2.7.1 VENTAJAS

La ventaja del motor eléctrico es su par. El par dado no depende de las revoluciones, puede darse desde 0 rpm un par nominal constante, otorgando una aceleración inmejorable.

Este tipo de motor aprovecha entorno el 95% de la energía que recibe de las baterías, frente al 25% que aprovechan los motores de combustión. Gracias a ello es menos costoso económicamente y enérgicamente.

Su parte mecánica es sencilla ya que tiene una parte móvil (rotor), de modo que el riesgo de sufrir una avería es muy bajo y la labor de mantenimiento es escasa. Los gastos asociados con el motor eléctrico son considerablemente menores que los coches de combustión. Aproximadamente un 35% de reducción en los costes de mantenimiento (cambios de filtros y aceite no son necesarios).

La producción en serie de un motor eléctrico es mucho más compacta, barata y simple que un motor de combustión interna. Su funcionamiento no provoca grandes temperaturas y vibraciones alargando así su duración. Se disponen todas las prestaciones del motor desde el primer instante “en frío”.

Mejoras medioambientales en que los EV no emiten gases contaminantes a la atmósfera y no generan contaminación acústica. Esta gran ventaja la podemos aplicar a karting indoor donde no tienen que acondicionar el circuito (local) para la extracción de gases y el aislamiento acústico.

La gran ventaja del motor eléctrico frente a los motores de combustión, es que podemos aprovechar la energía del frenado para devolverla a las baterías y mejorar el rendimiento del EV.

Si estudiamos este proyecto para negocio de ocio, hay muchas más facilidades para conseguir autorizaciones a la hora de abrir una pista indoor ya que en estos momentos se está controlando mucho los problemas medio ambientales. El riesgo que conlleva para los empleados del negocio es nulo, por el contrario si fuera en una instalación indoor con karts de gasolina, la probabilidad que éstos puedan contraer enfermedades profesionales a largo plazo es muy elevada. Los riesgos podrían ser pérdida auditiva parcial, ausencia olfativa debido a exhalaciones de gasolina, problemas respiratorios debidos a una exposición excesiva de gases de escape y polvos finos, riesgo por atropello a la hora de ayudar al piloto a dar la vuelta a su kart por causa de un trompo. Esto último, el piloto puede activar por sí mismo la marcha atrás (solo para karts eléctricos) y no poner en peligro al operario pudiendo ser atropellado por otros pilotos. El coste de la instalación es menor (con karts eléctricos) ya que no requiere un sistema de ventilación de gases, ni cumplir con normativa de local con sustancias explosivas (depósitos de gasolina).

2.7.2 INCONVENIENTES

Los EV también cuentan con desventajas, muchas de ellas por la novedad y la temprana fase de desarrollo en la que se encuentra.

Las principales contras que la movilidad eléctrica es el tiempo de carga que se necesita para cargar las baterías. Realmente no compensa el sobre coste que supone quemar gasolina para disfrutar de un rendimiento sin descanso. Con un kart a pleno rendimiento podemos esperar una autonomía aproximada de 25 a 35 minutos. El tiempo de carga será aproximadamente el mismo o superior, ya que la corriente de carga esté más limitada que la corriente de descarga. Lo atractivo de este proyecto es el mantenimiento y el ahorro a medio-largo plazo.

EL coste inicial hay que considerarlo como una inversión. La obtención de cualquier tecnología eficiente es más costosa que el homónimo tradicional, pero siempre compensa.

La densidad energética de las baterías existentes en la actualidad es bastante más baja que la de la gasolina o el diesel. Por eso el problema básico es la portabilidad de la energía eléctrica.

Tipo	Dens. ener., Wh/kg		Rel. petro.	
	Baja	Alta	Baja	Alta
Petróleo	11.670	11.670	1	1
Plomo-ácido	30	50	389	233
Níquel-Cadmio	45	80	259	146
Níquel-Metal-Hidruro	60	110	194	106
Pila alcalina	80	160	146	73
Litio-ión	90	180	130	65
Litio-aire	1.500	2.000	8	6

Tabla 2. Densidades energéticas de diferentes fuentes de energía.

Otro problema relacionado con las baterías es su deterioro, envejecen con el uso y paso del tiempo. Por el momento tiene fecha de caducidad, que son los ciclo de la batería (corresponde con el número de cargas y descargas).

2.8 RIESGO ELÉCTRICO

Como el diseño de este proyecto es totalmente eléctrico, hay que tener en cuenta los riesgos eléctricos en el entorno de trabajo. Para obtener el mayor rendimiento a nuestro motor eléctrico y lograr una larga autonomía, se trabajará a 96 V en corriente continua. El punto más peligroso son las baterías, estarán totalmente aisladas de contactos directos y del chasis que las soporta. Siempre que el piloto esté conduciendo el kart, estará aislado ya que el contacto a tierra son las ruedas y son aislantes. El contacto indirecto se dará en caso de tocar el kart sin estar montado, pero esto no sucederá ya que se instalará protección diferencial. También se instalará un interruptor general que será accionado a través de una llave.

Por otra parte, hay que tener en cuenta los riesgos que conlleva las baterías que se elijan, pudiendo estas ser peligrosas al ser inflamables o explosivas por un mal uso.

3 DESARROLLO DEL PROYECTO

3.1 TOMA DE DATOS

Estudio técnico y económico de la transformación de un kart con motor de combustión (de dos tiempos) a un kart con motor eléctrico para un circuito (kartódromo) elegido.

La obtención de datos ha sido realizada en el karting de Los Santos de la Humosa, municipio situado en la Comunidad de Madrid. Con dichos datos, he conseguido hallar las prestaciones del kart con el que realicé la prueba para su posterior estudio y cálculo de su transformación a kart eléctrico.

Los datos han sido hallados con un cuenta kilómetros realizado y programado por mí. Este dispositivo está formado por un microcontrolador (arduino UNO), un shield data logger para guardar los datos en una tarjeta SD, una pila para su alimentación y un sensor hall junto su imán.

El sensor hall es el encargado de detectar el número de vueltas que da el eje trasero. Esto lo consigo colocando un imán en dicho eje. Cada vez que el sensor hall detecta el imán, envía una señal analógica entrando al arduino para ser procesada. El arduino calcula cada cuanto tiempo da 10 vueltas el eje, de esta manera puedo calcular la velocidad a la que va el kart teniendo en cuenta el perímetro de la rueda del eje trasero (0,13 m). Todas estas velocidades y sus tiempos, quedan guardados en la tarjeta SD introducida en el shield data logger.

A continuación se procesan los datos de la tarjeta SD para hallar la gráfica de velocidad-tiempo y poder seleccionar la vuelta más rápida dada en la prueba realizada y así saber el peor de los casos ya que es la vuelta que más gasto energético tiene.

En las siguientes figuras se puede ver la instalación del cuentakilómetros. El sensor hall se coloca en el eje trasero del kart de pruebas y la parte de recepción de datos se ubica detrás del asiento del piloto.



Figura 5. Sensor colocado en el eje trasero (no detectando el imán)

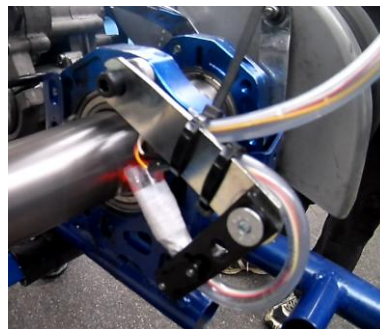


Figura 6. Sensor colocado en el eje trasero (detectando el imán)



Figura 7. Cuentakilómetros colocado detrás del asiento

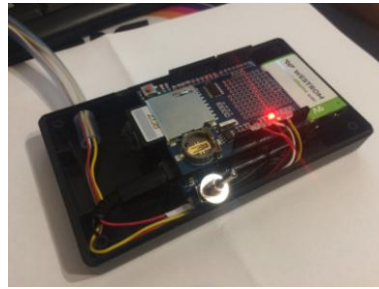


Figura 8. Interior de la caja donde va instalado el cuenta kilómetros



Figura 9. Sensor hall junto al imán, (detectando)

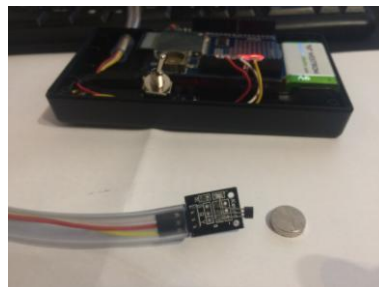


Figura 10. Sensor hall junto al imán (no detectando)

Tomamos como ciclo de trabajo la vuelta más rápida (gráfica velocidades-tiempo), y se introducen en Matlab-Simulink, que permite simular y hallar el par, potencia y energía del ciclo de trabajo dado.

Para hacer el modelo de simulación en Matlab-Simulink hay que programar las ecuaciones necesarias para obtener la fuerza necesaria que ha tenido que hacer el kart en el ciclo de trabajo para su desplazamiento.

3.1.1 PROGRAMACIÓN DEL CUENTAKILÓMETROS (PARTE DE ANÁLISIS)

La programación del cuentakilómetros se hace a través de un microcontrolador Arduino UNO. Este tipo de microcontrolador es de software libre y se programa en lenguaje C. Los elementos más importantes del cuentakilómetros son una placa Arduino UNO, un shield data logger y un sensor hall.

El código del programa se encuentra en el anexo de este TFG. A continuación se explicará el código programado.

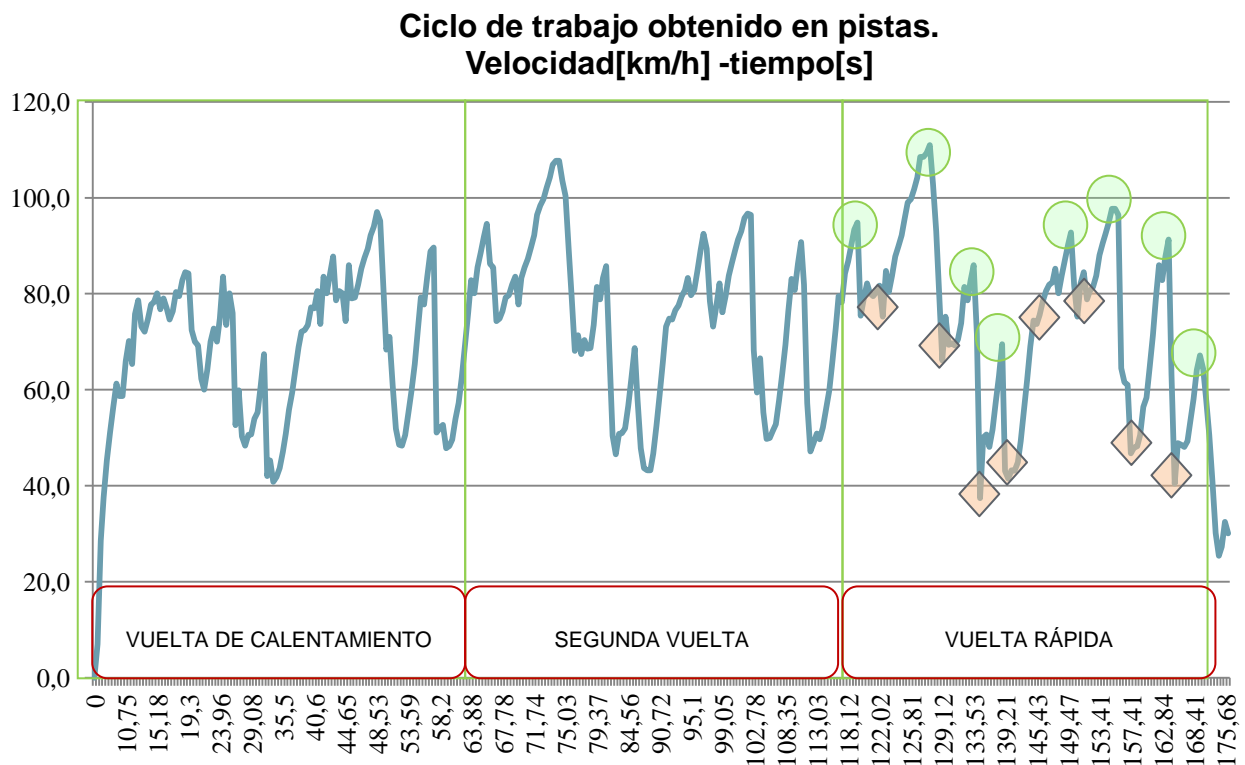
Antes de comenzar, decir que este código se divide en partes. La primera de ellas es donde cargamos las librerías y definimos las variables y de qué tipo son. La segunda parte “prepara” el programa definiendo funciones que más tarde se utilizarán en el loop (cuerpo del programa que está continuamente repitiéndose) e inicializa los dispositivos periféricos. Por último está la parte del loop, que es donde se ejecuta el programa de forma repetida.

Comenzamos cargando las distintas librerías para poder utilizar el hardware necesario para este cuentakilómetros. He necesitado cargar la librería del display LCD de 16 caracteres y 2 filas y la librería del adaptador del display (SPI) que se comunica con arduino. Otra librería necesaria ha sido la del shield data logger para poder registrar y guardar los datos conseguidos por el sensor hall. Seguidamente están definidas todas las variables que hemos utilizado.

En la segunda parte del código, se inicializa la tarjeta DS y la del display. También algunas funciones que se utilizarán más tarde en el loop, como la escritura en el display y en la tarjeta DS. Por último, el bloque del loop (bucle) está programado para contabilizar las detecciones del imán por el sensor hall (de modo analógico). Para hallar la velocidad, se mide el tiempo que tarda en dar 10 vueltas el eje y calculamos la distancia que ha recorrido (longitud del perímetro de la rueda [$2 * \pi * radio_{rueda}$] por las 10 vueltas que ha dado). Una vez hallada la velocidad [m/s], se imprime por pantalla del display y se guarda en la tarjeta de memoria DS los datos que necesitamos (la velocidad del kart a lo largo del circuito).

3.1.2 DATOS OBTENIDOS A PARTIR DEL CUENTAKILÓMETROS

En la siguiente gráfica se encuentran los datos de las tres vueltas que realizó el piloto. Para hacer el estudio he analizado todos los datos y escojo la vuelta más rápida (3ª vuelta) como ciclo de trabajo.



Gráfica 1. Velocidades obtenidas en la prueba de telemetría



Figura 11. Imagen aérea sobre el circuito con sus tramos de aceleración y frenado

3ª vuelta (vuelta rápida)								
Tramo / Curva	Tiempo [s]	Velocidad [km/h]	Velocidad [m/s]	Velocidad angular en RUEDA[rad/s]	Velocidad angular en MOTOR [rad/s]	Velocidad angular en RUEDA [rpm]	Velocidad angular en MOTOR [rpm]	Aceleración [m/s ²]
Star	0	0	0	0	0	0	0	0
Tramo_8_1	7,49	94,86	26,35	202,69	1418,85	1936,55	13555,85	3,52
Curva_1	10,69	75,204	20,89	160,69	1124,85	1535,28	10746,94	-1,71
Tramo_1_2	16	110,952	30,82	237,08	1659,54	2265,07	15855,46	1,87
Curva_2	17,39	66,096	18,36	141,23	988,62	1349,34	9445,37	-8,96
Tramo_2_3	21,8	85,968	23,88	183,69	1285,85	1755,02	12285,15	1,25
Curva_3	22,63	37,404	10,39	79,92	559,46	763,60	5345,17	-16,25
Tramo_3_4	27,02	69,516	19,31	148,54	1039,77	1419,16	9934,10	2,03
Curva_4	28,2	41,472	11,52	88,62	620,31	846,64	5926,51	-6,60
Tramo_4_5	36,18	85,248	23,68	182,15	1275,08	1740,32	12182,26	1,52
Curva_5	36,57	80,136	22,26	171,23	1198,62	1635,96	11451,74	-3,64
Tramo_5_6	38,1	92,772	25,77	198,23	1387,62	1893,92	13257,47	2,29
Curva_6	38,86	75,204	20,89	160,69	1124,85	1535,28	10746,94	-6,42
Tramo_6_7	43,12	97,704	27,14	208,77	1461,38	1994,61	13962,27	1,47
Curva_7	45,68	46,764	12,99	99,92	699,46	954,68	6682,75	-5,53
Tramo_7_8	51,88	91,332	25,37	195,15	1366,08	1864,53	13051,69	2,00
Curva_8	52,74	40,392	11,22	86,31	604,15	824,60	5772,17	-16,45
Tramo_8_1	60,23	94,86	26,35	202,69	1418,85	1936,55	13555,85	2,02
PROMEDIO		75,64	21,01	161,62	1131,37	1544,18	10809,28	

Tabla 3. Valores obtenidos de la vuelta más rápida

3.2 MODELO MATEMÁTICO DEL KART

Una vez obtenidos los datos reales en el circuito, la siguiente fase del proyecto es el procesamiento de los datos conseguidos. Para ello utilizamos el programa Matlab-Simulink donde operamos con datos conocidos (características del kart como coeficiente de rodadura, coeficiente aerodinámico, masa...) y datos registrados por el cuentakilómetros (velocidad y tiempo).

El resultado de todas estas operaciones es para poder elegir las prestaciones del motor eléctrico óptimo según el circuito donde se han hecho las pruebas. Una vez elegido el motor, el siguiente paso es escoger el convertidor. Este elemento se elegirá en función del motor que se haya seleccionado. De los cálculos que se realizarán en Matlab también diseñaremos el número de celdas que se instalarán en las baterías y como éstas irán conectadas (en serie/paralelo) para la autonomía necesaria del gran premio de los Santos de la Humosa, clasificación más carrera, un total de 27,5 km.

3.2.1 PROGRAMACIÓN DEL MODELO DINÁMICO Y DISEÑO DE BATERÍAS (PARTE DE DISEÑO)

Después de haber conseguido las velocidades en cada instante de tiempo con el cuentakilómetros se consigue el ciclo de trabajo. Estas velocidades junto con otras variables (masa del kart más el piloto, la relación de transmisión (G), el coeficiente aerodinámico, la resistencia de rodadura, etc), podemos hallar las fuerzas externas que hay contra el desplazamiento del kart. Para ello se diseña un modelo dinámico en Simulink-Matlab que represente el comportamiento dinámico del vehículo y como resultados se obtiene el par motor, el par en rueda, la energía consumida en kWh, la potencia necesaria y la velocidad de giro en el motor y las ruedas motrices en rpm.

Una vez realizado este proceso de cálculos, sabremos que motor necesitaremos para poder contrarrestar el sumatorio de fuerzas negativas y se podrá calcular el número de celdas que formarán las baterías para un determinado número de vueltas al circuito.

Coeficiente y datos sacados de las características del vehículo, en este caso del kart de gasolina.

3.2.1.1 COEFICIENTES Y DATOS NECESARIOS

El coeficiente de rodadura se encuentra en la tabla 34 del anexo. Para este proyecto se ha elegido el tipo de pavimento del circuito de pruebas, asfalto, con un coeficiente de rodadura de 0,02.

El coeficiente aerodinámico se trata de un concepto ligado a la eficiencia y el rendimiento de un vehículo. Cuando hablamos de ello nos referimos a la resistencia que ofrece un cuerpo en el momento en que se mueve dentro de un fluido por razón de su forma. Es un dato indispensable para calcular la resistencia aerodinámica (que es una fuerza). Otro dato que necesitamos saber es el área frontal del vehículo. En el caso de los karts, el coeficiente aerodinámico es elevado por su forma irregular y no redondeada, siendo un coeficiente de 0,8 y el área frontal de $1,0125\text{m}^2$.

Después de la explicación de estos coeficientes, se expone en las siguientes tablas (Tabla 4 y Tabla 5) todos los datos que hemos utilizado para el cálculo de las fuerzas dinámicas. Más datos sobre el kart y el circuito en el anexo tabla 36 y tabla 37.

DATOS KART		
m	159,6	[kg]
área	1,0125	Área frontal enfrentada al aire 1,35 x 0,75 [m ²]
C_x	0,8	Coeficiente aerodinámico
r	0,13	Radio de la rueda [m]
G	7	Relación de transmisión (rueda-motor)

Tabla 4. Datos kart de gasolina

DATOS CIRCUITO		
g	9,81	m/s ²
dens = ρ	1,11	Densidad del aire [kg/m ³]
C_r	0,02	Coeficiente de rozamiento (asfalto)
Alpha = α	0°	Pendiente del circuito [en grados]
pendiente	(α*2*π)/360° = 0	Pendiente del circuito [en radianes]
Vwind	0	Velocidad del viento [m/s]
Km_1vuelta	1,1	Longitud de la cuerda del circuito [km]
n_vueltas_competicion	15	Número de vueltas en un gran premio
n_vueltas_crono	10	Número de vueltas en la clasificación

Tabla 5. Datos del circuito

3.2.1.2 ECUACIÓN DEL MODELO DINÁMICO

La fuerza total que ha tenido que desarrollar el motor de gasolina es el sumatorio de diferentes fuerzas ejercidas en cada instante del ciclo de trabajo. Esta ecuación consigue modelar la dinámica del kart. Todas las fuerzas ejercidas son expresadas en Newtons.

$$\Sigma F = F_g + F_{al} + F_{aa} + F_a + F_{rr} \quad \text{Ec.1}$$

A continuación se desarrollará por separado cada una de las fuerzas que se ejercen.

Estas ecuaciones necesitan unos datos y coeficientes que caracterizan a cada tipo de vehículo y en el entorno donde se hace el ensayo, se pueden encontrar en la tabla 4 y tabla 5.

ECUACIÓN FUERZA DE GRAVEDAD:

F_g : fuerza de gravedad cuando sube o baja debido a la pendiente del circuito.

$$F_g = m * g * \sin \alpha \quad \text{Ec.2}$$

ECUACIÓN FUERZA DE ACELERACIÓN LINEAL:

F_{al} : fuerza de aceleración lineal, para aumentar o disminuir la velocidad.

$$F_{al} = \frac{dv}{dt} * m \quad \text{Ec.3}$$

ECUACIÓN FUERZA DE ACELERACIÓN ANGULAR:

F_{aa} : fuerza de aceleración angular. Para el cálculo de esta fuerza es necesario conocer en profundidad la mecánica del vehículo. Una aproximación válida es considerar la fuerza de aceleración angular como el 5% de la fuerza de aceleración lineal.

$$F_{aa} = F_{al} * 0,05 \quad \text{Ec.4}$$

ECUACIÓN FUERZA AERODINÁMICA:

F_a : fuerza al aire (resistencia aerodinámica).

$$F_a = \frac{\rho}{2} * C_x * area_{fronta} * v_{kart}^2 \text{ respecto al aire} \quad \text{Ec.5}$$

ECUACIÓN FUERZA DE RODADURA:

F_{rr} : fuerza de rodadura debida a las ruedas.

$$F_{rr} = C_r * m * g * \cos \alpha \quad \text{Ec.6}$$

3.2.1.3 ECUACIONES PARA HALLAR PRESTACIONES Y AUTONOMÍA

A continuación se muestran otras ecuaciones básicas que se utilizarán más adelante y estarán programadas en Simulink.

ECUACIÓN PAR EN RUEDA [NM]

$$M = \Sigma F * r_{rueda \text{ trasera}} \quad \text{Ec.7}$$

ECUACIÓN DE POTENCIA [KW]

$$Potencia = M_{ef} [Nm] * \Omega \left[\frac{rad}{s} \right] \quad \text{Ec.8}$$

ECUACIÓN DE ENERGÍA [KWH]

$$Energía = \int Potencia(t) dt \quad \text{Ec.9}$$

3.3 PROGRAMACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO EN SIMULINK

La programación en Simulink tiene el siguiente aspecto, véase en la figura 12. Se pueden apreciar 4 grandes bloques de cálculo (rectángulos azules), en los que se calcula las fuerzas, las prestaciones del motor, la energía consumida por el kart y el cálculo de celdas necesarias para la batería. Todo ello es hallado a partir del ciclo de trabajo y de las características específicas del kart y el entorno.

Por haber programado el modelo matemático del kart, podemos ver todas las variables que tratamos en cada instante del ciclo de trabajo gracias a las gráficas que puede mostrarnos Simulink. Todo ello es posible por las ecuaciones del modelo dinámico y las ecuaciones de las prestaciones y autonomía. Todas las variables con las que se trabaja en Simulink son dirigidas a Matlab para ser programadas (en lenguaje C) y hallar los resultados finales para la posterior selección de elementos eléctricos.

Vamos a poder realizar diferentes estudios con diferentes tipos de motor y ver sus resultados para más tarde compararlos y hacer la mejor selección. La diferencia de cada estudio se basa en que cambia la masa por los diferentes tipos de motores.

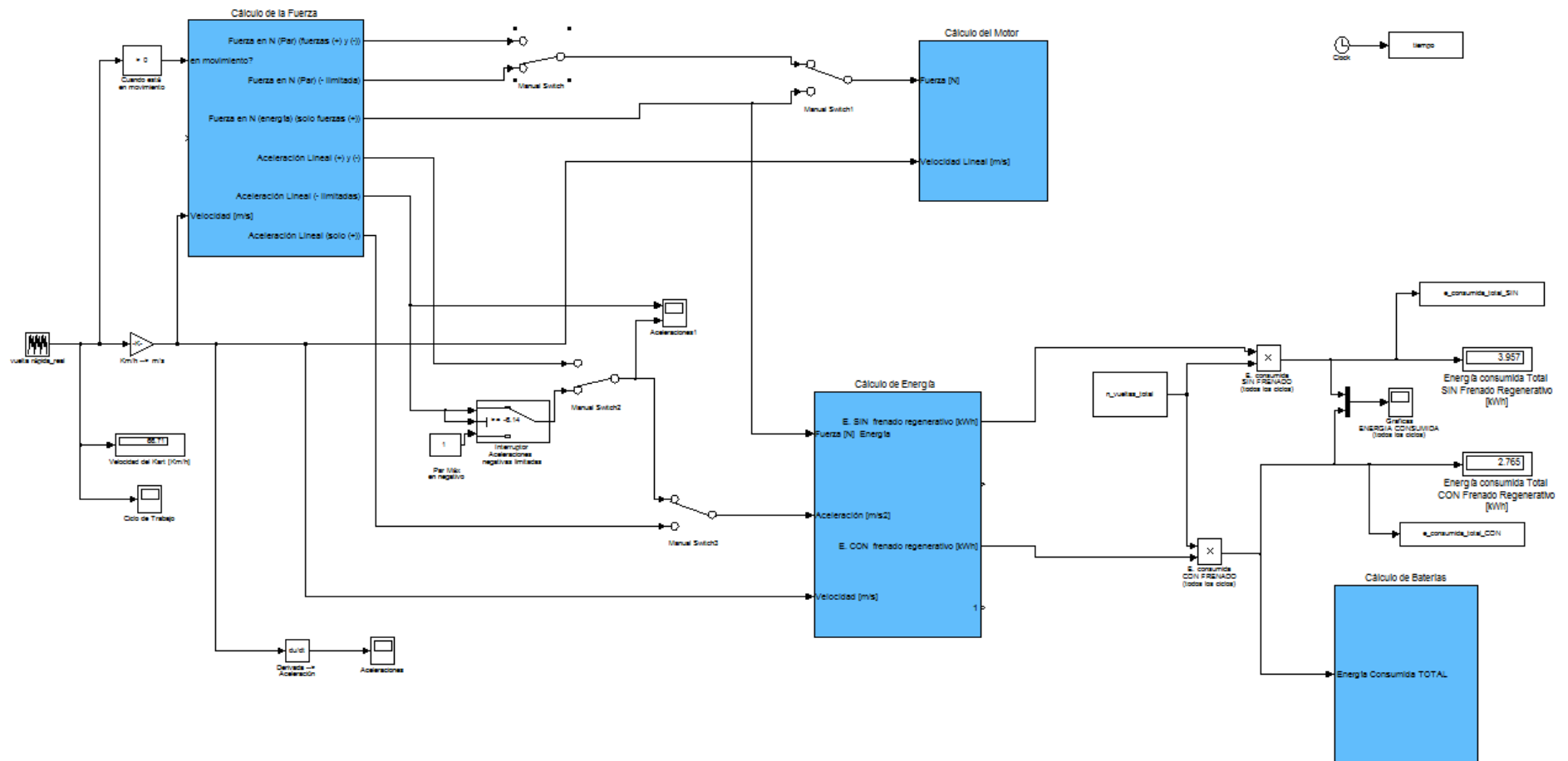


Figura 12. Vista general de la programación, en Simulink

3.3.1 BLOQUE DE FUERZA

En este bloque, figura 13, se calcula todo el modelo dinámico del kart. Las entradas necesarias para este bloque es la velocidad en m/s, y saber si el kart está en movimiento. Estas variables que están en función del tiempo, se hallan a través del ciclo de trabajo obtenido por el cuentakilómetros programado anteriormente e instalado en el eje trasero del kart.

Las salidas programadas por este bloque son tres tipos de fuerza y tres tipos de aceleración. Con ellas vamos a realizar diferentes estudios obteniendo diferentes resultados con los que vamos a poder sacar una conclusión y elegir el tipo de frenado que necesitamos para nuestro kart. Os adelanto que hay tres posibles formas de frenado: frenado mecánico total, frenado regenerativo total y frenado regenerativo parcial.

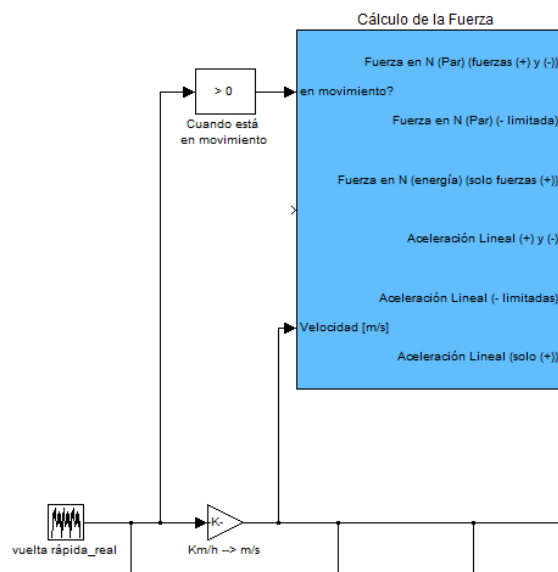


Figura 13. Bloque de Cálculo de Fuerzas, en Simulink

En el interior del bloque de Cálculo de Fuerzas (figura 14) podemos ver que están programadas en forma de caja, todas las ecuaciones nombradas anteriormente en el apartado: modelo matemático del kart. (Ec.2, Ec.3, Ec.4, Ec.5 y Ec.6).

En la figura 14 está el sumatorio todas las fuerzas (Ec.1), fuerza de ascensión, resistencia de rozamiento, resistencia aerodinámica, fuerza de aceleración lineal y fuerza de aceleración angular. Dentro de estas cajas están las variables que se necesitan para calcular cada fuerza en los diferentes instantes del ciclo de trabajo.

Se puede apreciar en la caja de fuerza de aceleración lineal, que hay 6 tipos de salidas. Con diferentes combinaciones hallamos los distintos tipos de frenado.



```

graph LR
    pendiente[pendiente] --> sin[sin]
    pendiente --> mult((x))
    sin --> mult
    movimiento((1 en movimiento?)) --> mult
    g[g] --> mult
    m[m] --> mult
    mult --> fuerza[Fuerza de ascensión]
    fuerza --> salida1((1))
    fuerza --> fas[Fas]
    fas --> fas_display[0]
    fuerza --> f_asc[F. Ascension]
    f_asc --> asc_icon[Ascensor]
  
```

Figura 15. Interior de la caja de la fuerza de ascensión, en Simulink

34

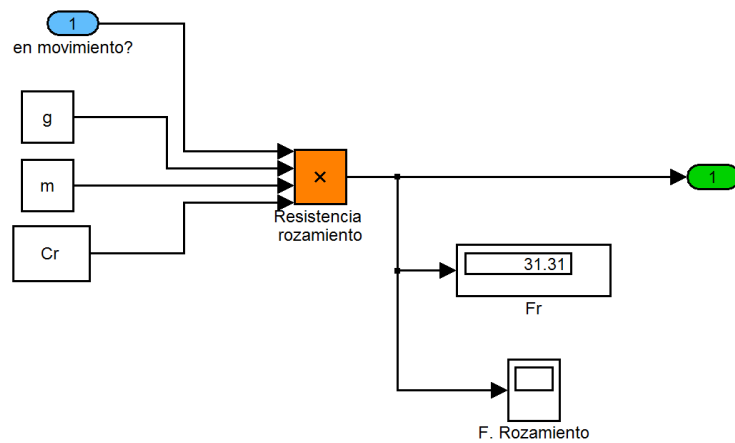


Figura 16. Interior de la caja de la fuerza de rozamiento, en Simulink

Otra de las fuerzas es la aerodinámica. Ésta requiere una serie de constantes y la velocidad del ciclo del trabajo. Se puede observar el interior de la caja de la fuerza aerodinámica (Figura 17).

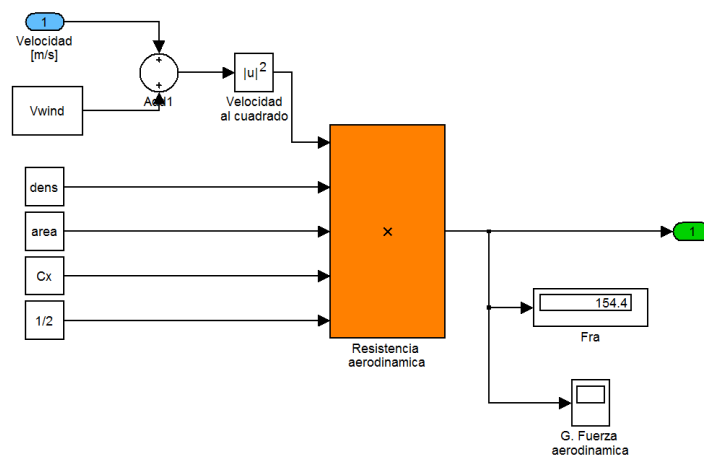


Figura 17. Interior de la caja de la fuerza aerodinámica, en Simulink

Otra de las cajas es la fuerza ejercida por la aceleración angular (Figura 18). Como este tipo de fuerza es complicado de hallar, según estudios realizados se toma el 5% de la fuerza de aceleración lineal.

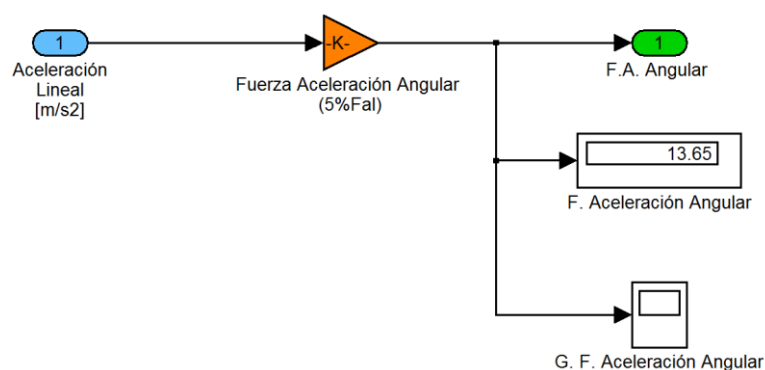


Figura 18. Interior de la caja de la F.Aceleración Angular, en Simulink

En la figura 19 se encuentra todos los cálculos necesarios para diferenciar los tres tipos de frenado. Comentando la figura de arriba a abajo, comenzamos explicando la aceleración y la fuerza solamente positiva, esto quiere decir, que en el momento que el kart pierde velocidad (hay una desaceleración) la fuerza de aceleración lineal es cero. Esta parte se utiliza para estudiar el freno no regenerativo (freno solamente mecánico).

La aceleración y fuerza que se estudia a continuación se relaciona con el frenado regenerativo parcial, porque si que se permite una desaceleración controlada hasta un cierto límite (el límite es la aceleración positiva máxima pero de signo contrario).

Por último, está la fuerza y aceleración lineal con la que se calcula el frenado regenerativo total. Este tipo de estudio mediante el cálculo del modelo matemático del coche nos dirá toda la energía que es posible de devolver a las baterías en cada una de sus desaceleraciones.

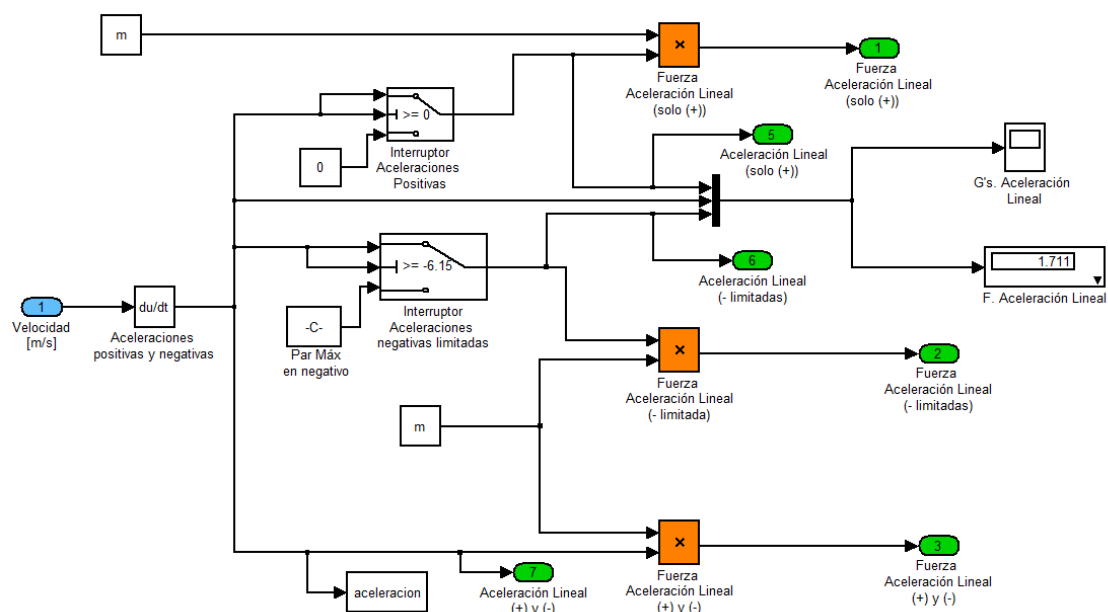


Figura 19. Interior de la caja de la F.Aceleración Lineal, en Simulink

3.3.2 BLOQUE DEL MOTOR

Otro de los bloques generales programados es el del motor. En él se calcularán las prestaciones que tiene el kart, tanto en rueda como en motor. Estoy hablando del par [Nm] y de la velocidad [rpm]. Con estos dos parámetros se podrá hallar también la potencia que ejerce el motor en cada instante. Para todo esto es necesario integrar en dicho bloque la fuerza [N] y la velocidad lineal [m/s] hallada del ciclo de trabajo.

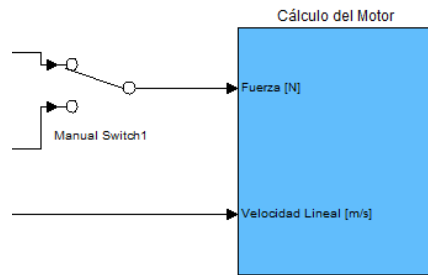


Figura 20. Bloque de Cálculo del Motor, en Simulink

El bloque de Cálculo del Motor (Figura 20), se encuentra programado a continuación en la figura 21.

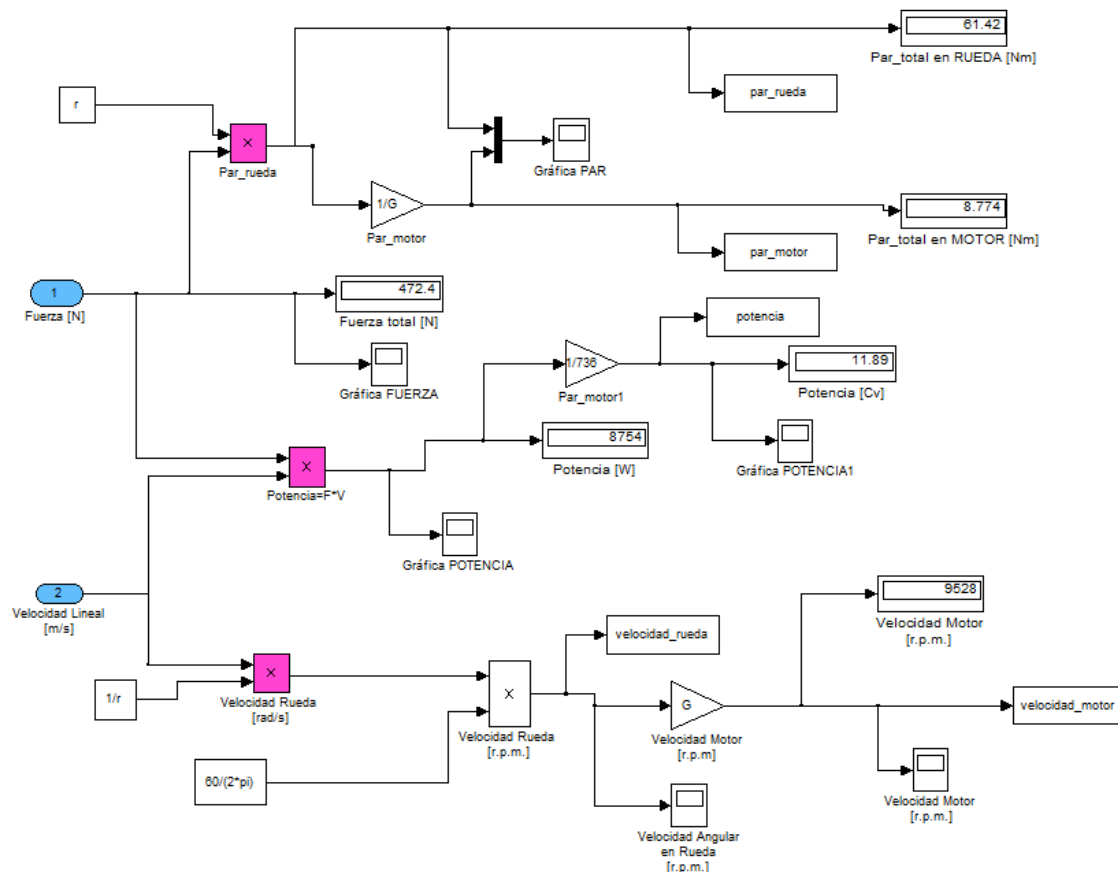


Figura 21. Interior del bloque: Cálculo Motor, en Simulink

Como se puede ver en la figura 21, en la parte superior se calcula el par en rueda y el par en el motor. Para ello se necesita la fuerza que se ejerce en cada instante y el radio de la rueda trasera del kart, que es la rueda motriz y es la que hace que se desplace el vehículo.

Para calcular la potencia son necesarias las dos variables que entran en este bloque (fuerza y velocidad lineal). Si hacemos el producto entre ambas hallamos la potencia que se ejerce en

cada instante en Wattios. Para saber esa potencia en caballos de vapor [cv], hay que dividir la potencia en Wattios entre 736.

Por último, el siguiente cálculo que se hace en este bloque es transformar la velocidad lineal del kart a la velocidad angular a la que gira la rueda y el motor.

3.3.3 BLOQUE DE LA ENERGÍA

El siguiente bloque es el del cálculo de la energía consumida. Para hacer los cálculos necesitamos tres variables: fuerza, aceleración (calculada en el bloque de fuerza) y la velocidad lineal a la que circula el kart. Se puede ver las entradas y las salidas en la figura 22.

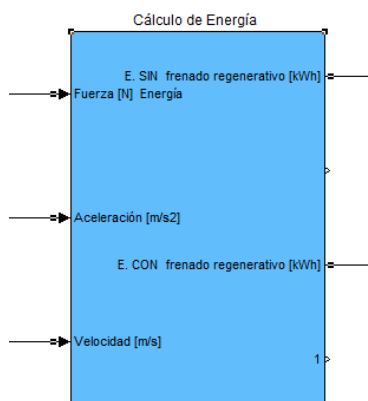


Figura 22. Bloque de Cálculo de Energía, en Simulink

A continuación, figura 23, se muestra el interior del bloque de Cálculo de Energía. En él veremos cómo está programado el consumo de energía para dicho ciclo de trabajo y cómo está programada la energía regenerativa en los momentos de desaceleración.

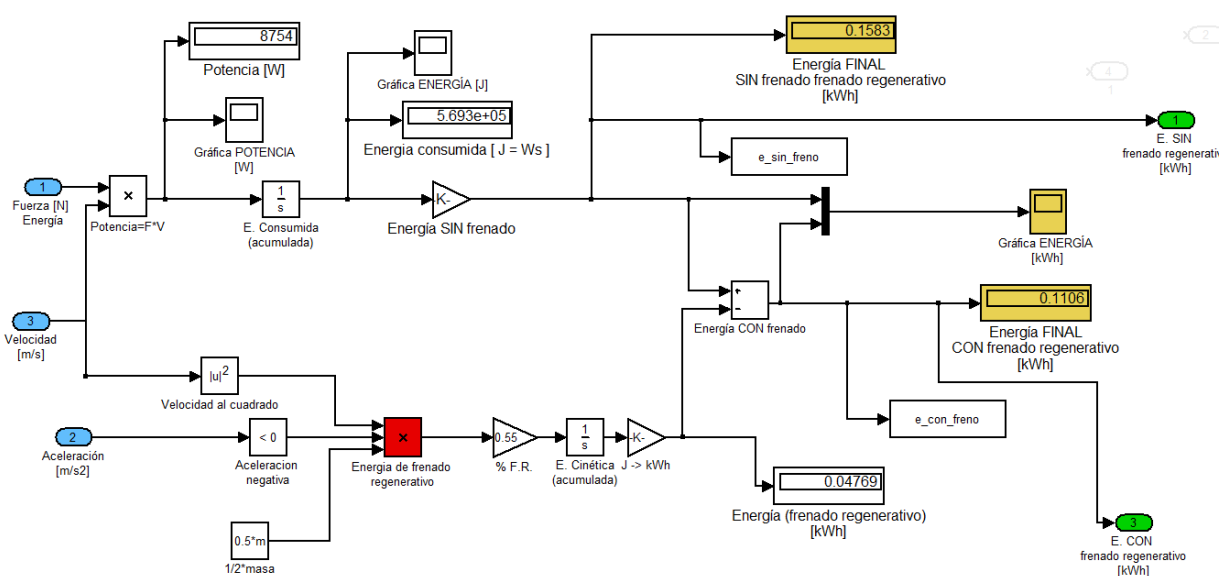


Figura 23. Interior del bloque: Cálculo de Energía, en Simulink

Para hallar la energía consumida por el desplazamiento realizado, hallamos la potencia como hemos hecho anteriormente en el bloque del Cálculo del Motor. Multiplicando la fuerza ejercida

por la velocidad lineal en m/s, hallamos la potencia. Seguidamente se integra esa potencia respecto del tiempo y hallamos la energía consumida en el ciclo de trabajo. Seguidamente pasamos esa energía de Julios a kWh.

La energía que se regenera en cada desaceleración, se aprovecha de la energía cinética que lleva el vehículo. De esa energía cinética el frenado regenerativo capta un 45%, todo lo demás son pérdidas y no son aprovechables. Después de hallarla hay que integrar esa energía y transformarla a kWh.

Como ya sabemos lo que consume el kart y lo que regenera, si se hace el balance de energía, el gasto menos lo recuperado, hallamos la energía total que se consume en un ciclo de trabajo, es decir, en una vuelta. Por tanto si queremos saber cuánto se consume en un determinado número de vueltas, se multiplica el número de vueltas que se plantean por la energía consumida en un ciclo de trabajo.

3.3.4 BLOQUE DE CÁLCULO DE BATERÍAS

Para el diseño de las baterías, que es el último bloque, se necesita saber cuánta energía tienen que almacenar el conjunto de celdas que forman la batería. Para ello hay que saber qué energía se consume en el total de vueltas y por último aumentar esa energía un 25% para que la batería no se descargue completamente y no se dañen las celdas que la componen. En el interior del bloque también se calcula el consumo que de kWh por kilómetro recorrido.

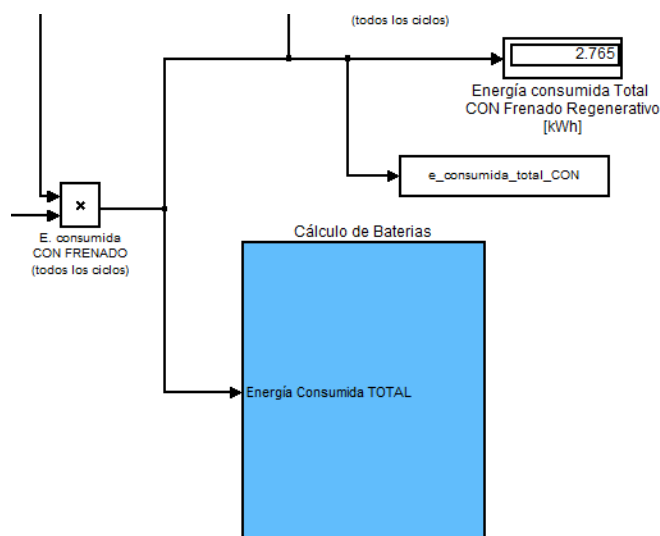


Figura 24. Bloque Cálculo de Baterías, en Simulink

Para calcular el número de celdas y su disposición (en serie) hay que saber el nivel de tensión que se requiere, este nivel lo marca el motor que se seleccione. El estudio de selección será para estos tres niveles de tensión: 96V, 80V y 48V. Como la tensión de las celdas de LiFePo_4 es 3,2V, hay que hacer los siguientes cálculos para ver cuántas celdas van en serie:

$$\frac{96V}{3,2V} = 30 \text{ celdas en serie (30S)}$$

$$\frac{80V}{3,2V} = 25 \text{ celdas en serie (25S)}$$

$$\frac{48V}{3,2V} = 15 \text{ celdas en serie (15S)}$$

Para saber el número de celdas en paralelo hay que saber la capacidad de la celda y la energía almacenada que se necesita en total. Comparando numerosos tipos de celdas, el tipo de celda escogido para este proyecto es de LiFePo_4 . Estas celdas pueden ser de 4 capacidades diferentes: 8Ah, 10Ah, 12Ah y 15Ah. A continuación un ejemplo para saber cuántos packs se necesitan en paralelo para almacenar 4500 Wh, con celdas de 8Ah de capacidad a 80V de tensión.

Anteriormente hemos calculado que se necesitan 25 celdas en serie para conseguir 80V de tensión. Para almacenar 4500 Wh a 80V se necesita una capacidad de:

$$\frac{4500\text{Wh}}{80\text{V}} = 56,25 \text{ Ah}$$

Como las celdas son de 8Ah, para que la batería de 56,25 Ah se necesitan:

$$\frac{56,25\text{Ah}}{8\text{Ah}} = 7,03 \text{ packs en paralelo}$$

Por tanto para conseguir lo propuesto, hay que redondear el número de pack a la alza, $7,03 \approx 8$ packs en paralelo. El total de celdas es:

$$8 \text{ packs en paralelo} * 25 \text{ celdas en serie} = 200 \text{ celdas en total}$$

En el interior del bloque de Cálculo de Baterías, tiene el siguiente aspecto, donde se calculan las 12 posibilidades para el diseño de las baterías.

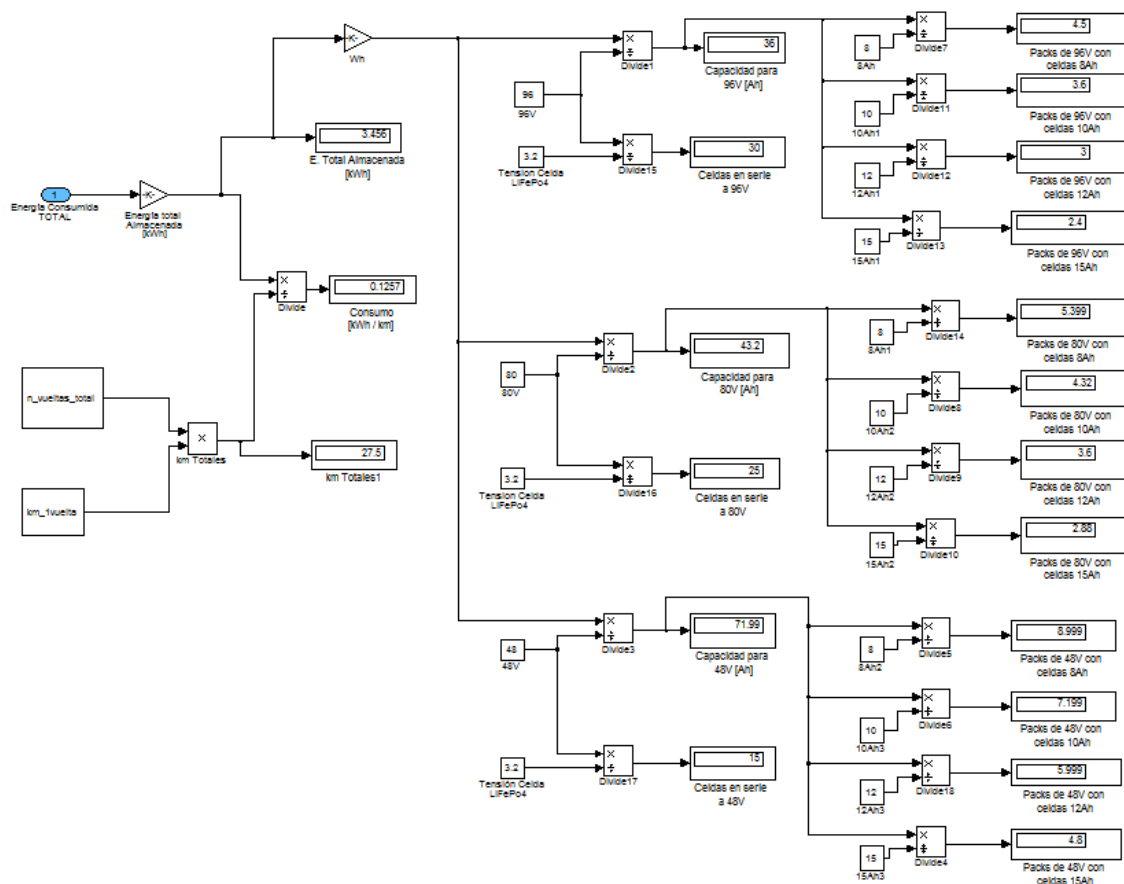
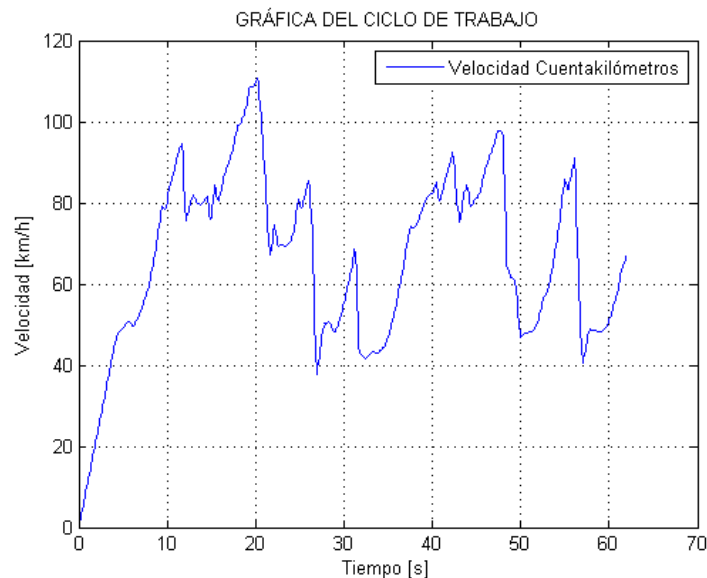


Figura 25. Interior del bloque Cálculo de Batería, en Simulink

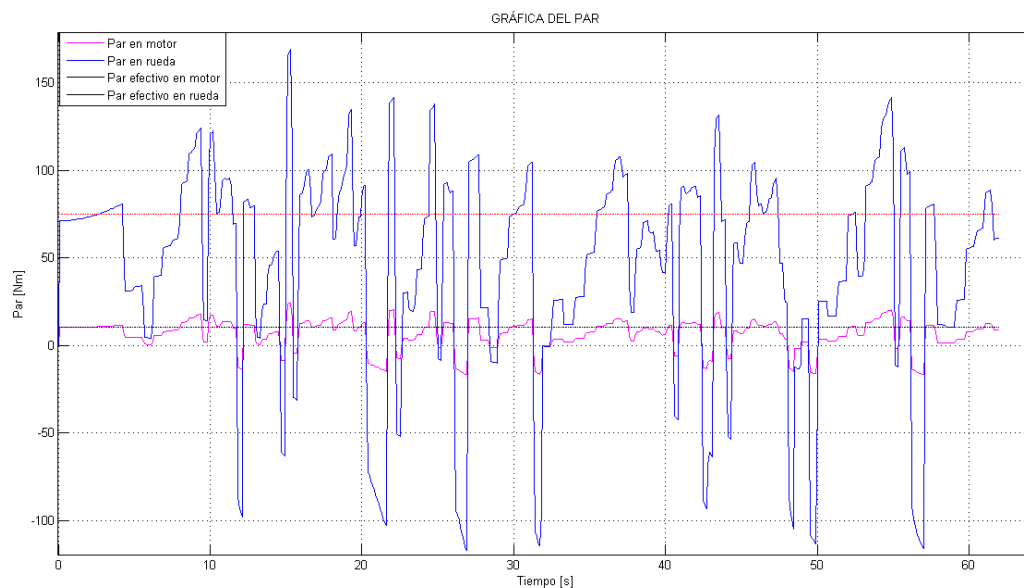
3.4 DATOS OBTENIDOS APARTIR DE MATLAB-SIMULINK (CON DATOS DEL KART DE GASOLINA)

Con los datos de la vuelta más rápida obtenemos el ciclo de trabajo, gráfica 2. Con este ciclo podremos hallar la energía consumida en una vuelta dada en el circuito de los Santos de la Humosa y ver el dimensionamiento que necesitamos del motor eléctrico.



Gráfica 2. Ciclo de trabajo de la vuelta más rápida

La gráfica 3 representa el par en rueda, el par en motor y el par efectivo de cada uno de ellos. Para hallar esta gráfica primeramente se ha hallado el modelo dinámico (sumatorio de fuerzas) y se ha multiplicado por el radio de la rueda trasera del kart (0,13m). Sabiendo la relación de transmisión que existe en el kart de pruebas ($G=7$), se obtiene el par ejercido por el motor que es 7 veces menor que el par en rueda.



Gráfica 3. Par en rueda, Par en Motor y sus pares efectivos

Después de todo ello ya sabemos el par máximo que ejerce el motor para desplazarse de forma competitiva, pero necesitamos el par nominal del motor para hacer una elección concisa. Para ello se aplica Ec.10, y se halla el par efectivo.

$$M_{ef} = \sqrt{\frac{(M_{t1}^2 * t_1) + (M_{t2}^2 * t_2) + (M_{t3}^2 * t_3) + \dots + (M_t^2 * t_t)}{tiempo_{ciclo}}} \quad \text{Ec.10}$$

A partir de ahora vamos a calcular todo en rueda para estudiar todos los parámetros.

En el bloque de Cálculo de Fuerzas de Simulink (figura 13), como se ha dicho anteriormente se calculan tres tipos de aceleración para determinar diferentes tipos de frenado. A continuación se explica en qué consisten estos tres frenados y lo mucho que interviene para la elección del motor eléctrico.

La primera de ellas es la aceleración (+), en la que se estudia solamente las aceleraciones que hace el motor cuando se pisa el pedal de aceleración. Este caso sería sin freno regenerativo porque no introducimos las frenadas (desaceleraciones) en el motor, todo el frenado lo ejerce el freno de disco y por tanto se pierde la energía en forma de calor.

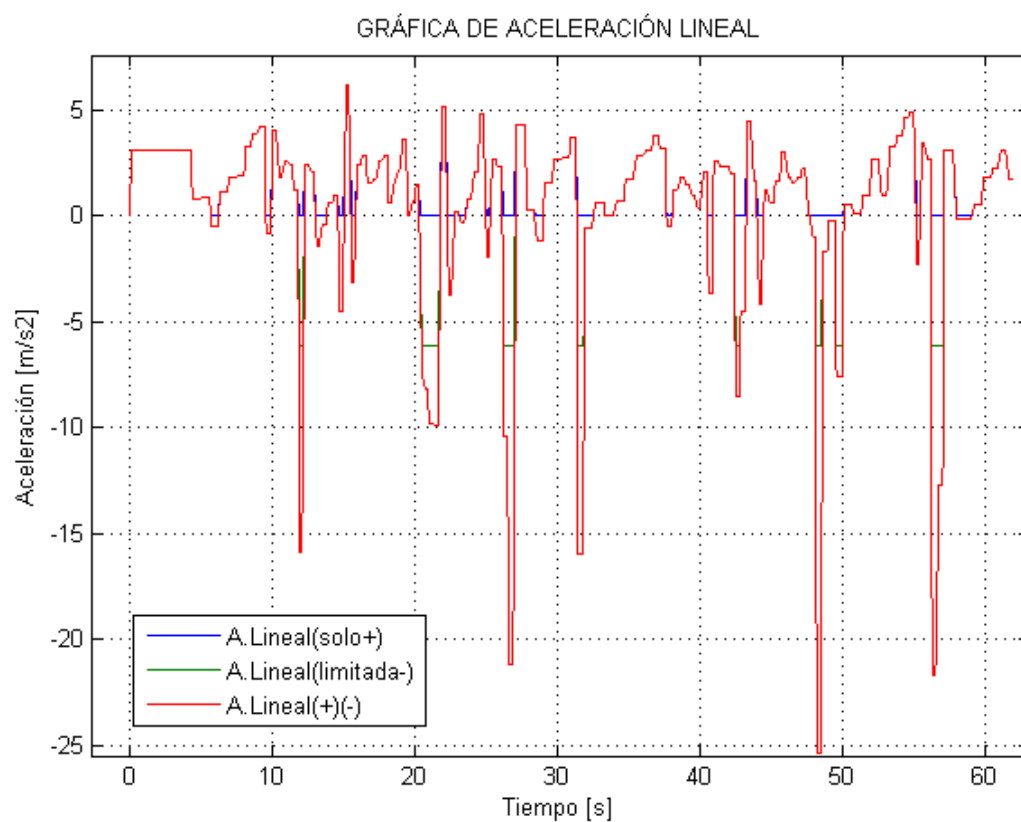
El segundo caso es la aceleración (+) y (-), en el que se estudia y calcula la energía regenerada máxima a través del frenado regenerativo. Es decir, todo el par negativo que se ejerce en las frenadas antes de tomar la curva es ejercido sobre el motor eléctrico, que son mucho mayores que el par máximo positivo. Todo esto quiere decir que para que aguante el motor estos pares negativos tan elevados, hay que dimensionar el motor eléctrico para ello haciendo un sobredimensionamiento innecesario que no se va a aprovechar de forma eficiente ya que estas deceleraciones tienen una duración muy pequeña y el precio y peso del motor aumentaría considerablemente. De esta manera el freno mecánico no se utilizaría ya que todo el frenado recae en la máquina rotativa que funcionaría como generador. El freno mecánico se utilizaría en caso de emergencia.

El último caso, será el que se aplique en nuestro proyecto, la aceleración negativa limitada (aunque los dos anteriores estén programados en Simulink para hallar resultados y hacer comparaciones). Este tipo de aceleración consiste en limitar las aceleraciones negativas en el aspecto eléctrico (frenado regenerativo), a partir de ese límite (el límite es el valor del par máximo positivo pero de signo cambiado), del frenado se encarga el freno mecánico situado en el eje trasero del kart. Con este tipo de diseño se consigue no sobredimensionar el motor eléctrico a la hora del frenado y también que exista el frenado regenerativo, aunque no sea del 100% ya que a partir del límite pasa a ser frenado mecánico donde la energía se disipa en forma de calor.

Según la explicación anterior de cada diseño, en la tabla 6 se muestra los datos hallados en Simulink de cada uno de ellos y en la gráfica 4 se observa las distintas aceleraciones que se provocan en cada diseño. Todos estos resultados son a partir de los datos obtenidos del kart de gasolina.

Modos de diseño	Aceleración (+) Sin frenado reg.	Aceleración (+) y (-) Con frenado reg. total	Aceleración (-) limitada Con frenado reg. parcial
Masa [kg]	159,6	159,6	159,6
Velocidad Max en rueda [rpm]	2.258,70	2.258,70	2.258,70
Par Max (+) en rueda [Nm]	169,3953	169,3953	169,3953
Par Max (-) en rueda [Nm]	0	-502,7909	-117,2451
Par efectivo en rueda [Nm]	69,7289	103,2132	74,8346
Potencia [kW]	16,493	24,413	17,7
Potencia [cv]	22,439	33,21	24,082
E.Consumida SIN Freno Reg (25 vueltas) [kWh]	3,9567	3,9567	3,9567
E.Consumida CON Freno Reg (25 vueltas) [kWh]	3,9567	2,116	2,7645
Energía regenerada [kWh]	0	1,8407	1,1922

Tabla 6. Comparación de diferentes configuraciones de diseño (frenado regenerativo)

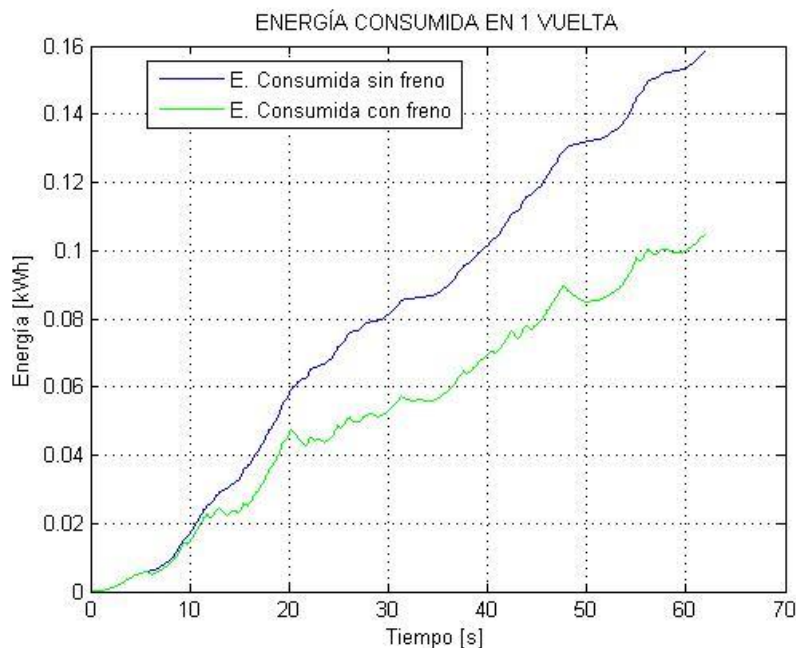


Gráfica 4. Aceleraciones lineales sobre los tres diseños de frenado regenerativo durante su ciclo de trabajo

Comparando los resultados de la tabla 6, la mejor opción es el frenado regenerativo parcial, por tanto utilizaremos esos parámetros para la elección de los elementos eléctricos. En la Ec.11 se halla la potencia del motor a partir del par efectivo y la velocidad angular.

$$Potencia_{motor} = M_{ef} * \Omega = 74,8346 Nm * 236,45 \frac{rad}{s} = 17.695,18 W = 24,07 cv \quad \text{Ec.11}$$

Una vez obtenida la potencia durante la vuelta más rápida, podemos hallar la energía que consume el kart. En la gráfica 5, se representa el total de la energía consumida y la energía consumida si utilizamos el frenado regenerativo. Este tipo de frenado aprovecha el 45% de la energía cinética que lleva el kart en cada una de sus desaceleraciones hasta el punto que pasa a frenar de forma mecánica.



Gráfica 5. Energía consumida en la vuelta más rápida [kWh]

Si queremos que nuestro kart eléctrico entre en competición tendrá que dar 10 vueltas de clasificación y 15 vueltas de carrera oficial. Todas estas vueltas suman 25 vueltas que es igual a 27,5 km, autonomía del kart de gasolina con 8 litros de depósito. Por tanto calcularemos el conjunto de baterías para 25 ciclos de trabajo.

Tenemos que tener en cuenta que el conjunto de baterías no pueden descargarse por completo. Hay que calcular que la energía almacenada en las baterías tendrá que ser un 25% mayor que la energía que se consume en esas 25 vueltas.

$$\begin{aligned}
 Energía_{almacenada} &= Energía_{vuelta rápida con frenado} * 25 vueltas * 1,25 = \\
 &= \frac{0,1106 kWh}{1vuelta} * 25vueltas * 1,25 = 3,456 kWh
 \end{aligned}$$

Ec. 11

Una vez que hemos obtenido el par y la energía necesaria para completar el ciclo de trabajo, hacemos la selección de los elementos eléctricos, motor y baterías.

4 SELECCIÓN DE ELEMENTOS ELÉCTRICOS Y DISEÑO

Una vez analizado todo el conjunto de potencia y energía para equiparar las prestaciones del kart de gasolina al kart eléctrico, se realiza la selección de elementos eléctricos para la realización del presupuesto económico y la comparación técnica entre ambos karts. Hay que tener en cuenta que el diseño escogido es con frenado regenerativo parcial. Véase las prestaciones de este diseño para el kart de gasolina en la tabla 7.

Modo de diseño	Con frenado reg. Parcial
Masa [kg]	159,6
Velocidad Max en rueda [rpm]	2.258,70
Par Max (+) en rueda [Nm]	169,39
Par Max (-) en rueda [Nm]	-117,24
Par efectivo en rueda [Nm]	74,83
Potencia [kW]	17,7
Potencia [cv]	24,0
E.Consumida SIN Freno Reg (25 vueltas) [Kwh]	3,9567
E.Consumida CON Freno Reg (25 vueltas) [Kwh]	2,7645
Energía regenerada [kWh]	1,1922
Energía que debería almacenar la batería [kWh]	3,456

Tabla 7. Prestaciones del kart de gasolina (modo freno regenerativo parcial)

En caso de que este TFG llegue a proyectarse, la instalación será en el kart de la figura 26 y figura 27. El diseño del kart eléctrico reúne la elección, colocación e instalación de elementos eléctricos seleccionados.



Figura 26. Kart donde se instalará el proyecto (vista frontal)



Figura 27. Kart donde se instalará el proyecto (vista trasera)

El motor eléctrico puede alojarse en la parte trasera derecha (donde está actualmente el motor de gasolina). El espacio que deja el depósito de gasolina puede ser aprovechado por el driver. Por último, las baterías que son el elemento más voluminoso podrían ocupar los laterales (entre la rueda delantera y trasera) y la parte trasera del kart.

El proceso de selección comenzará con el motor eléctrico. El objetivo es obtener uno que consiga las prestaciones necesarias y equiparables con el kart de pruebas. Sabiendo el nivel de tensión, la intensidad máxima que puede demandar el motor y la autonomía que se requiere, se diseña la batería que se necesita. Una vez diseñada la batería se sabrá el peso total del vehículo eléctrico y se recalculará en Simulink-Matlab las prestaciones que se necesitan para este nuevo vehículo (al aumentar el peso del kart por la batería, también aumenta el par que debe ejercer el motor). Después de saber el par necesario, se selecciona la relación de transmisión para finalizar el diseño completo.

Hay que tener en cuenta que si el motor elegido es refrigerado por agua, el kart debe de llevar radiador, por tanto este elemento ocupará espacio libre de uno de los laterales del kart.

4.1 MOTOR ELÉCTRICO, BATERÍA Y DRIVER

La búsqueda de esta máquina ha sido un trabajo difícil. El motor elegido tiene unas características muy especiales y por tanto es complicado encontrarlo en el mercado. El fabricante, HEINZMANN, ha desarrollado un producto robusto de gran potencia que es ideal para la movilidad eléctrica por su reducido tamaño y peso. Su tecnología es muy valorada en su sector por su elevada eficiencia y su escaso mantenimiento, brushless (sin escobillas), con lo cual su servicio es cómodo y económico. El tipo de excitación es síncrono de imanes permanentes, pudiendo llevar el control total de la máquina. El tamaño reducido es por el tipo de flujo magnético, axial. Además, este motor puede actuar como generador gracias al driver de control que es bidireccional y así tener la opción del frenado regenerativo.

Se ha estudiado dos tipos de modelos del mismo fabricante. Estos motores son el PMS 150 refrigerado con aire forzado y el PMS 156 refrigeración por agua.

Voltage	P	n	M	I
	kW	min ⁻¹	Nm	A
PMS 150 (EV) m = 22.3 kg / J = 58.6 kg · cm²				
48 VDC	5.2	1500	33.1	130.5
	8.5	3000	27.1	191.9
	8.5	4500	18.0	190.8
	8.5	6000	13.5	192.0
80 VDC	5.0	1500	31.8	73.4
	10.0	3000	31.8	139.0
	13.0	4500	27.6	187.0
	13.0	6000	20.7	176.2
96 VDC	5.0	1500	31.8	61.4
	10.5	3000	33.4	130.8
	14.0	4500	29.7	167.4
	13.0	6000	20.7	157.5

Tabla 8. Prestaciones del modelo PMS 150EV

Voltage	P	n	M	I
	kW	min ⁻¹	Nm	A
PMS 156W m = ~29.8 kg / J = 58.6 kg · cm²				
96 VDC	9.0	1500	57.0	124.0
	18.5	3000	58.9	237.4
	21.0	4500	44.6	249.7
	21.0	6000	33.4	245.5

Tabla 9. Prestaciones del modelo PMS 156W

La variable más delicada y especial que utilizaremos es la masa. Se estudiará con mucha atención ya que es la encargada de determinar las prestaciones del motor que vamos a tener que instalar en el kart eléctrico. Esta variable se descompone en los elementos del kart y la masa del piloto. Dentro de todos los elementos del kart, la masa que se podrá modificar será la batería.

A continuación se muestra la masa del kart eléctrico de forma descompuesta. La tabla 10, presenta las masas para el modelo PMS 150EV sin masa de la batería. En la tabla 11, se observan las masas con el modelo PMS 156W sin masa de la batería.

La diferencia de masas entre estos dos modelos de diseño es el motor, porque uno de ellos (PMS 150EV) no necesita radiador de agua y el otro modelo si (PMS 156W), a parte de la diferencia de masas entre los motores.

ELEMENTO KART ELÉCTRICO	MASA [kg]
Motor PMS 150EV	22,3
Convertidor SuperSigma2	6,2
Radiador completo	0
Componentes eléctricos	3
Batería auxiliar 12V	2
Kit de transmisión	1,9
Chasis completo con todos los accesorios	24
Carenados completos y paragolpes	12
Neumáticos y llanta	5,35
Masa Kart eléctrico	76,75
Piloto	78,75
TOTAL	155,5

Tabla 10. Masas descompuestas para el diseño de PMS 150EV sin batería

ELEMENTO KART ELÉCTRICO	MASA [kg]
Motor PMS 156W	29,8
Convertidor SuperSigma2	6,2
Radiador completo + bomba de agua, poleas y correa	5,1
Componentes eléctricos	3
Batería auxiliar 12V	2
Kit de transmisión	1,9
Chasis completo con todos los accesorios	24
Carenados completos y paragolpes	12
Neumáticos y llanta	5,35
Masa Kart eléctrico	89,35
Piloto	78,75
TOTAL	168,1

Tabla 11. Masas descompuestas para el diseño de PMS 165W sin batería

Después de saber las masas de ambos diseños (sin la masa de la batería), se estudia a través de Matlab-Simulink una serie de masas para el kart eléctrico, y así saber las prestaciones necesarias del motor. Con este estudio sabremos cuanto podrá pesar la batería para diferentes diseños.

Masa [kg]	Par Nominal en Rueda [Nm]	Par Máximo en Rueda [Nm]	Potencia [kW]	Potencia [cv]	Energía Almacenada [kWh]
159,6	74,83	169,39	17,70	24,08	3,46
180	82,56	187,05	19,52	26,57	3,65
200	90,21	204,37	21,33	29,03	3,83
220	97,91	221,69	23,15	31,50	4,02
240	105,64	239,01	24,98	33,99	4,20
260	113,41	256,32	26,82	36,49	4,39
280	121,20	273,64	28,67	39,00	4,58
300	129,02	290,96	30,51	41,51	4,76

Tabla 12. Tabla de prestaciones según la masa del kart

Al ver las prestaciones que se necesitan para diferentes masas del conjunto del kart, podemos saber el máximo que puede pesar la batería. Con los resultados obtenidos se observa que por cada 20 kg que aumenta la masa, se necesita 8 Nm más de par nominal en el motor eléctrico para seguir teniendo las mismas prestaciones del kart de gasolina. Según la tabla 12, el motor modelo PMS 150EV es pequeño, no alcanza la potencia necesaria para mover la masa mínima que puede llegar a pesar el kart eléctrico, por tanto descartamos la opción de este modelo de motor.

La masa máxima que puede desplazar el modelo PMS 156W, es 200 kg, con las mismas prestaciones que lo hace el kart de gasolina. Utilizando datos de la tabla 11, la masa de la batería tendrá que ser como máximo de:

$$Masa_{Total} - Masa_{Sin\ Batería} = Masa_{Batería}$$

$$200\ kg - 168,1\ kg = 31,9\ kg$$

Los datos de energía de la tabla 12 tienen un 25% más de lo que gasta el kart. Es la energía que realmente tiene que almacenar la batería para que no se descargue al 100% y no sufra daños.

Para saber todos los datos del motor PMS 156W, a continuación están todas las características específicas para un funcionamiento nominal y para un funcionamiento a máxima potencia.

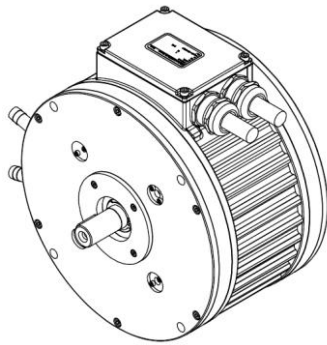


Figura 28. Motor PMS 156W

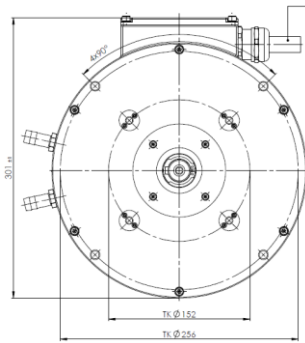


Figura 29. Alzado PMS 156W

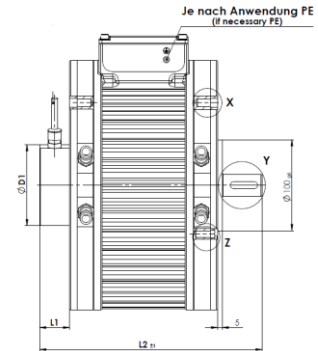


Figura 30. Perfil PMS 156W

PMS 156 W, - Preliminary Datasheet

2015-11-06

Motor type

Motor	PMS 156 W		
Motor ID	-		
Winding-No.	-		
No. of poles	2p	8	
Cooling	Water (max.60°C; 6l/min)		

Electrical data

DC link voltage	U_{dc}	96	VDC
EMF constant	K_E	8,56	V/1000rpm
Torque constant	K_M	0,136	Nm/A
Winding resistance	R_{2ph}	3,27	mΩ
Winding inductance	L_{2ph}	30,5	μH

Operation point 1

Operational mode	S1		
Rated motor voltage	U_n	64,2	VAC
Nominal speed	n_n	6000	rpm
Rated torque	M_n	33,4	Nm
Rated power	P	21	kW
Rated AC current	I_n	245	A
Frequency	f_n	400	Hz
Efficiency	η	94,1	%

Mechanical data

Maximum allowable speed	n_{max}	6000	rpm
Short-time peak power	P_{max}	40,7	kW
Short-time peak torque	M_{max}	80	Nm
Short-time peak current	I_{max}	590	A
Moment of inertia	J	58,6	kg cm ²
Mass	m	29,8	kg
Air gap	s	1,7	mm
Magnet material	N35EH		
Special version	...		

Sensor system

Temperature sensor	...
--------------------	-----

Tabla 13. Hoja de características del motor PMS 156W

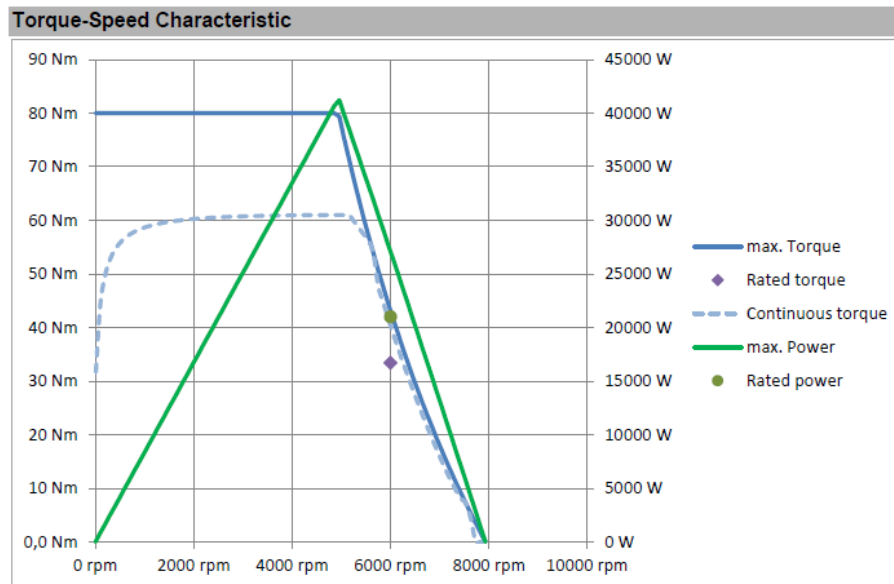


Figura 31. Gráfica Par-Velocidad del motor PMS 156W

Hay dos condiciones para diseñar la batería del vehículo eléctrico, se optará por la más restrictiva. Una de ellas es a partir de la energía que necesita el vehículo eléctrico para poder desplazarse, que es la hallada por Simulink, 3.832 Wh con una masa de 200 kg. Otra manera de calcular la batería sería en función de la intensidad nominal del motor para dar las prestaciones de competición al kart eléctrico.

CÁLCULOS DE CAPACIDAD A PARTIR DE LA ENERGÍA HALLADA EN SIMULINK

Para saber que condición es más restrictiva nos fijamos en la capacidad. Vemos que capacidad necesita la batería para acumular 3.832 Wh a 96 V.

$$Capacidad_{Batería} = \frac{E. Almacenada}{Tensión} = \frac{3.832 Wh}{96 V} = 40 Ah$$

La intensidad nominal del motor de 21 kW a 96V.

$$I_N = \frac{Potencia_N}{Tensión} = \frac{21.000 W}{96V} = 218,75 A$$

El índice de descarga ($C_{descarga}$) que necesitaría la batería de 40Ah para alcanzar las condiciones nominales del motor.

$$C_{descarga} = \frac{I_N}{Capacidad} = \frac{218,75 A}{40 Ah} = 5,46C \approx 6C$$

CÁLCULOS DE CAPACIDAD DESDE LA INTENSIDAD NOMINAL DEL MOTOR:

La capacidad de la batería, dispuesta para un motor de 21 kW a 96V, para que durante una hora esté trabajando en condiciones nominales tiene que ser:

$$Capacidad_{Batería} = 218,75 A * 1,25 = 273,43 Ah$$

El 25% que se ha aumentado a la capacidad es para no descargar la batería al 100% y no dañarla.

Hacemos la comparación de la capacidad con el mismo índice de descarga, 6C:

$$Capacidad = \frac{273,43Ah}{6C} = 46 Ah$$

Comprobamos que de esta manera es más restrictiva y se necesita 46 Ah para que el kart eléctrico compita durante 10 minutos. Por tanto el cálculo de la batería se hará a partir de las prestaciones del motor y no de la energía calculada en Simulink.

Estas son las condiciones que debe cumplir nuestra batería en función del índice de descarga:

$$C_{descarga} = 1C \rightarrow 273,43 Ah \rightarrow 60 minutos$$

$$C_{descarga} = 2C \rightarrow 136,72 Ah \rightarrow 30 minutos$$

$$C_{descarga} = 3C \rightarrow 91,14 Ah \rightarrow 20 minutos$$

$$C_{descarga} = 4C \rightarrow 68,35 Ah \rightarrow 15 minutos$$

$$C_{descarga} = 5C \rightarrow 54,686 Ah \rightarrow 12 minutos$$

$$C_{descarga} = 6C \rightarrow 45,57 Ah \rightarrow 10 minutos$$

Con capacidad de 46 Ah, conseguiríamos las prestaciones del kart de competición durante 10 minutos. Aproximadamente son unas 10 vueltas en el circuito donde se han tomado los datos del ciclo de trabajo. Por tanto, la autonomía que tendría esta batería sería 3 veces menor que la autonomía que tiene el kart de gasolina.

La batería que se necesita para una autonomía como la del kart de gasolina (25 vueltas) con prestaciones de competición se calculará a continuación.

$$C_{descarga} = 1 \rightarrow 273,43 A \rightarrow 60 minutos$$

$$C_{descarga} = 2 \rightarrow 136,72 A \rightarrow 30 minutos$$

Con un índice de descarga de 2C, podemos ver que la capacidad de la batería duraría 30 minutos aproximadamente, que es la autonomía que tiene el kart de combustión con un depósito lleno de gasolina (unas 25-30 vueltas). La autonomía de 25-30 vueltas para el kart eléctrico con prestaciones de competición es complicado de obtener, por la reducida densidad energética que tienen las celdas existentes en el mercado.

El diseño de la batería dependerá de la capacidad de las celdas. Cuanta más capacidad tengan estas celdas, menos ramas en paralelo habrá que instalar.

A continuación detallaremos los cálculos, con el ejemplo de un pack de 7,4V y 7Ah, que hay que realizar para el diseño de la batería con la autonomía de 10 vueltas (11 km) y para la autonomía de 25-30 vueltas (27,5-33 km).

4.1.1 CÁLCULO PARA UNA AUTONOMÍA DE 11 KM:

BATERÍAS Lipo											
Tensión [V]	Capacidad [Ah]	Descarga continua [xC]	Descarga Máxima [xC]	Precio [€]	Peso [kg]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Marca	área [mm ²]	Volumen [mm ³]
7,4	7,00	20,00	40,00	39,00	0,337	137,00	46,00	25,00	Brute Power	6302,00	157550,00

Tabla 14. Características de la celda Lipo a 7,4V y 7Ah

Datos para el diseño de la batería:

Tensión Batería [V]	96
Intensidad nominal [A] aumentada un 25%	273,43
Índice de descarga [xC]	6C

Tabla 15. Características de la batería del kart eléctrico para una autonomía de 11 km



Figura 32. Celda2S Lipo con capacidad de 7000 mAh

La batería diseñada tiene forma de matriz, se compone por celdas en serie y celdas en paralelo (véase en la figura 33).

Con un índice de descarga de 6C:

$$Capacidad = \frac{I_N}{C_{descarga}} = \frac{273,43 A}{6} = 46 Ah \quad \text{Ec.13}$$

Cálculo de las celdas en serie:

$$\frac{96V}{7,4 V/celda2S} = 13 celda2S \quad \text{Ec.14}$$

Cálculo de las celdas en paralelo:

$$\frac{46 Ah}{7Ah/rama} = 7 ramas \quad \text{Ec.15}$$

Número total de celdas2S:

$$13 celda2S * 7 ramas = 91 celda2S \quad \text{Ec.16}$$

Número de celdas individuales para saber qué tipo de BMS hay que instalar:

$$13 \text{ celda}2S * \frac{2 \text{ celdas}}{\text{celda}2S} = 26 \text{ celdas} \quad \text{Ec.17}$$

La figura33 representa la disposición de celdas, según los cálculos realizados para almacenar en la batería 4713,8 Wh

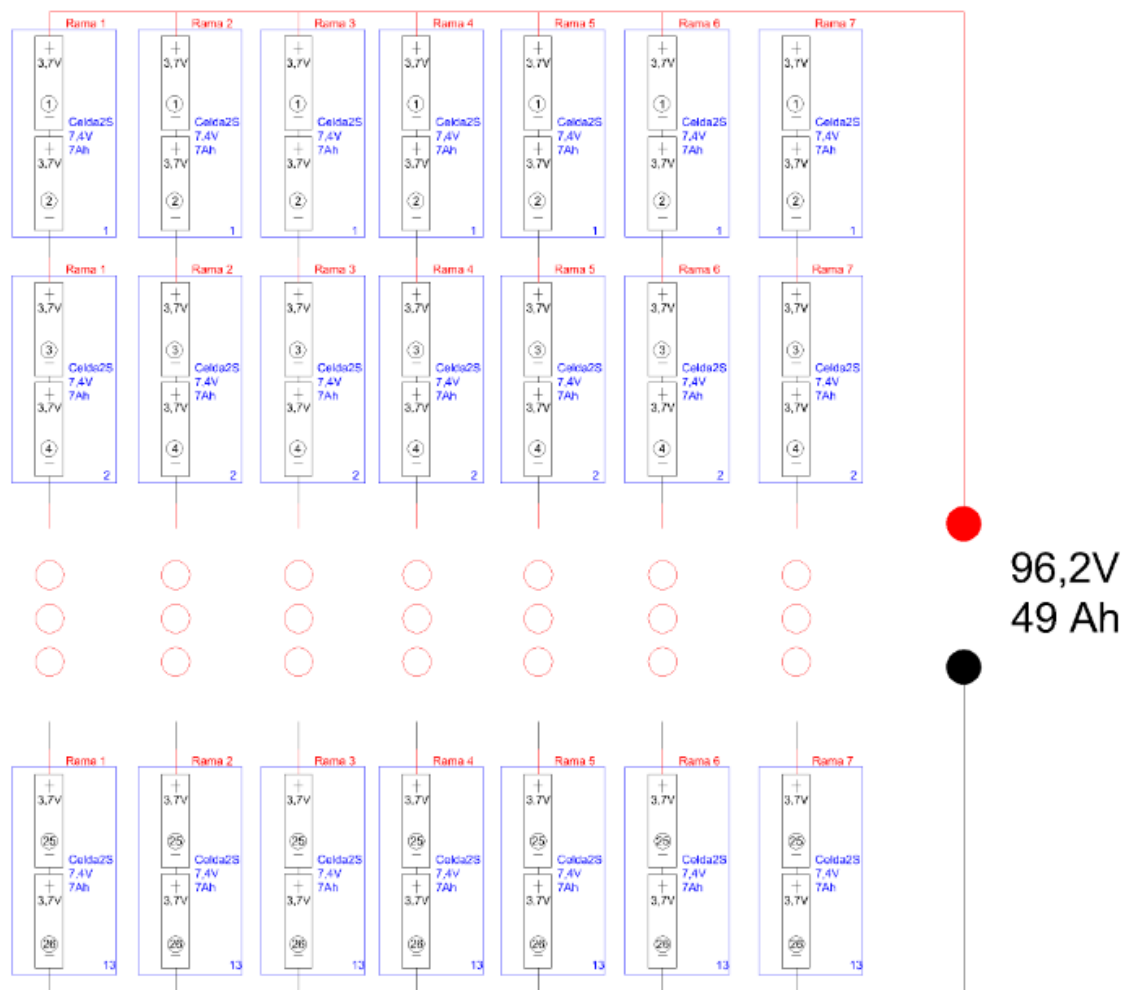


Figura 33. Representación de la batería, según los cálculos realizados en el ejemplo anterior

Sabiendo el total de celda2S, podemos hallar el precio, masa y dimensiones totales de la batería diseñada. En función de estos resultados hacemos la selección de la batería que se va a instalar en el kart eléctrico. Hay que tener en cuenta el BMS necesario para cada diseño de batería. En el caso del ejemplo, la selección del BMS es de 26S. También hay que tener en cuenta la corriente continua y de pico demandada por el motor.

El diseño de la batería se puede programar, aportando todas las fórmulas anteriores junto las características de cada tipo de celda en una hoja de cálculo y así adquirir los resultados de todas las formas posibles con las celdas que se comercializan en el mercado.

4.1.2 CÁLCULO PARA UNA AUTONOMÍA DE 27,5-33 KM

BATERÍAS Lipo											
Tensión [V]	Capacidad [Ah]	Descarga continua [xC]	Descarga Máxima [xC]	Precio [€]	Peso [kg]	Largo [mm]	Ancho [mm]	Alto [mm]	Marca	área [mm ²]	Volumen [mm ³]
7,4	7,00	20,00	40,00	39,00	0,337	137,00	46,00	25,00	Brute Power	6302,00	157550,00

Tabla 16. Características de la celda Lipo a 7,4 V y 7Ah

Datos para el diseño de la batería:

Tensión Batería [V]	96
Capacidad Batería [Ah]	136,72
Índice de descarga [xC]	2C

Tabla 17. Características de la batería del kart eléctrico para una autonomía de 27-30km

Comprobamos que multiplicando la capacidad de la batería por el índice de descarga obtenemos la corriente nominal del motor seleccionado:

(Realmente la capacidad es un 25% superior por alargar la vida útil de las baterías)

$$I_N = 2 * 136,72 A = 273,44 Ah \quad \text{Ec.18}$$

Cálculo de las celdas en serie:

$$\frac{96V}{7,4 V/celda2S} = 13 \text{ celda2S} \quad \text{Ec.19}$$

Cálculo de las celdas en paralelo:

$$\frac{273,44 Ah}{2 * 7Ah/rama} = 20 \text{ ramas} \quad \text{Ec.20}$$

Número total de celdas2S:

$$13 \text{ celda2S} * 20 \text{ ramas} = 260 \text{ celda2S} \quad \text{Ec.21}$$

Cómo anteriormente se ha dicho podemos calcular la masa, precio y dimensiones de la batería sabiendo el número de celdas que se necesita. En el primer resultado que debemos fijarnos es la masa, no puede excederse de 31,9 kg.

A continuación, los datos de las celdas LiFePo₄ y los resultados de los cálculos realizados en la hoja de cálculos. Con estos resultados, se podrá comparar diferentes tipos de diseños y seleccionar la mejor batería para este proyecto.

Batería diseñada con celdas LiFePo4 con una autonomía de 10 minutos (11km aproximadamente).

Datos de partida	V Total [V]	96			
	V Celda [V]	3,2			
	25% Intensidad nominal del motor	273,43	273,43	273,43	273,43
Datos Celdas	Capacidad [Ah]	8,00	10,00	12,00	15,00
	Descarga Continua [xC]	6,00	6,00	6,00	6,00
	Descarga Máxima [xC]	25,00	15,00	10,00	10,00
	Precio Celda [€]	15,41	14,48	17,28	21,77
	Masa Celda [kg]	0,3	0,33	0,4	0,48
	Marca	HEADWAY	HEADWAY	HEADWAY	HEADWAY
Resultados	Nº Packs Serie	30	30	30	30
	Nº Packs Paralelo	6	5	4	4
	Nº Packs Total	180	150	120	120
	Precio Pack [€]	2773,8	2172,0	2073,6	2612,4
	Masa Pack [kg]	54,0	49,5	48,0	57,6
	Energía almacenada [Wh]	4608,0	4800,0	4608,0	5760,0
	Densidad Energética [Wh/kg]	85,33	96,97	96,00	100,00

Tabla 18. Resultados de la batería con una autonomía de 11 km con celdas de LiFePo4

Viendo los resultados de estas celdas no es posible instalar este tipo de celdas por su exceso de masa.

Batería diseñada con celdas LiFePo4 con una autonomía de 30 minutos (27,5-33km aproximadamente).

Datos de partida	V Total [V]	96			
	V Celda [V]	3,2			
	25% Intensidad nominal del motor	273,43	273,43	273,43	273,43
Datos Celdas	Capacidad [Ah]	8,00	10,00	12,00	15,00
	Descarga Continua [xC]	2,00	2,00	2,00	2,00
	Descarga Máxima [xC]	25,00	15,00	10,00	10,00
	Precio Celda [€]	15,41	14,48	17,28	21,77
	Masa Celda [kg]	0,3	0,33	0,4	0,48
	Marca	HEADWAY	HEADWAY	HEADWAY	HEADWAY
Resultados	Nº Packs Serie	30	30	30	30
	Nº Packs Paralelo	18	14	12	10
	Nº Packs Total	540	420	360	300
	Precio Pack [€]	8321,4	6081,6	6220,8	6531,0
	Masa Pack [kg]	162,0	138,6	144,0	144,0
	Energía almacenada [Wh]	13824,0	13440,0	13824,0	14400,0
	Densidad Energética [Wh/kg]	85,33	96,97	96,00	100,00

Tabla 19. Resultados de la batería con una autonomía de 27-30 km con celdas de LiFePo4

Los resultados de LiFePo4 determinan que no es posible que se instale este tipo de celdas por el exceso de masa que tienen. Su uso no es adecuado para competición.

Batería diseñada con celdas Lipo con una autonomía de 10 minutos (11km aproximadamente).

Datos de partida	V Total [V]	96	96				96			
	V Pack [V]	7,4	14,8				22,2			
	25% Intensidad nominal del motor	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43
Datos Celdas	Capacidad [Ah]	7,00	7,00	8,00	10,00	12,00	10,00	12,00	16,00	22,00
	Descarga Continua [xC]	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
	Descarga Máxima [xC]	70,00	60,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
	Precio Celda [€]	41,00	90,00	79,00	96,00	96,00	135,00	169,00	195,00	286,00
	Masa Celda [kg]	0,311	0,602	0,791	0,940	1,090	1,355	1,600	2,060	2,620
	Marca	SLS XTRON	SLS XTRON	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power
Resultados	Nº Packs Serie	13	7	7	7	7	5	5	5	5
	Nº Packs Paralelo	7	7	6	5	4	5	4	3	3
	Nº Packs Total	91	49	42	35	28	25	20	15	15
	Precio Pack [€]	3731,0	4410,0	3318,0	3360,0	2688,0	3375,0	3380,0	2925,0	4290,0
	Masa Pack [kg]	28,3	29,5	33,2	32,9	30,5	33,9	32,0	30,9	39,3
	Energía almacenada [Wh]	4713,8	5076,4	4972,8	5180,0	4972,8	5550,0	5328,0	5328,0	7326,0
	Densidad Energética [Wh/kg]	166,56	172,09	149,68	157,45	162,94	163,84	166,50	172,43	186,41

Tabla 20. Resultados de la batería con una autonomía de 11 km con celdas de Lipo

Batería diseñada con celdas Lipo con una autonomía de 30 minutos (27,5-33 km aproximadamente).

Datos de partida	V Total [V]	96	96					96		
	V Pack [V]	7,4	14,8					22,2		
	25% Intensidad nominal del motor	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43	273,43
Datos Celdas	Capacidad [Ah]	7,00	7,00	8,00	10,00	12,00	10,00	12,00	16,00	22,00
	Descarga Continua [xC]	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00	2,00
	Descarga Máxima [xC]	70,00	60,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00	40,00
	Precio Celda [€]	41,00	90,00	79,00	96,00	96,00	135,00	169,00	195,00	286,00
	Masa Celda [kg]	0,311	0,602	0,791	0,940	1,090	1,355	1,600	2,060	2,620
	Marca	SLS XTRON	SLS XTRON	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power	Brute Power
Resultados	Nº Packs Serie	13	7	7	7	7	5	5	5	5
	Nº Packs Paralelo	20	20	18	14	12	14	12	9	7
	Nº Packs Total	260	140	126	98	84	70	60	45	35
	Precio Pack [€]	10660,0	12600,0	9954,0	9408,0	8064,0	9450,0	10140,0	8775,0	10010,0
	Masa Pack [kg]	80,9	84,3	99,7	92,1	91,6	94,9	96,0	92,7	91,7
	Energía almacenada [Wh]	13468,0	14504,0	14918,4	14504,0	14918,4	15540,0	15984,0	15984,0	17094,0
	Densidad Energética [Wh/kg]	166,56	172,09	149,68	157,45	162,94	163,84	166,50	172,43	186,41

Tabla 21. Resultados de la batería con una autonomía de 27-30 km con celdas de Lipo

Con los resultados obtenidos comprobamos que la tecnología para almacenar energía eléctrica sigue siendo insuficiente comparándolo con el combustible derivado del petróleo.

La opción que se ha elegido para este proyecto, sigue siendo transformar el kart de gasolina en kart eléctrico con las mismas prestaciones de competición pero con el inconveniente de la autonomía, que se ha reducido hasta 3 veces.

La tabla 22, refleja distintos resultados posibles, todos los que tenga una masa menor a 31,9kg son válidos. Hay que tener en cuenta la masa del BMS al conjunto de la masa de la batería, por tanto la selección de las celdas que deben formar la batería son las de menor masa, celdas

Lipo a 7,4V y 7Ah (columna sombreada de gris en la tabla 22, con 28,3 kg), para tener más margen de masa a la hora de instalar los BMS's.



Figura 34. Pack de 7,4V y 7Ah (2S1P)

BATERÍA LIPO 2S 7000MAH 35-70C SLS HARD CASE

40.90€ ~~45.00€~~

Especificaciones:

Voltaje: 7,4 V

versión: 2S1P

Capacidad: 7000mAh

tasa descarga continua: máx. 35C (245A)

tasa descarga de corriente: máx. 70C (490A)

Corriente de carga máx. 4C (28A)

Peso: 311 gramos

Dimensiones: aprox 138x47x25mm LxWxH

balanceador: JST- XH (Gensace, Turnigy, etc...)

conector: DEANS

Figura 35. Características específicas del pack 2S1P que se instalará en la batería del kart eléctrico

El número de BMS's que se instala es en función de las ramas que tenga la batería. Cuantas más ramas tenga la batería menos es la intensidad que pasa por ellas y el BMS será menor en todos los sentidos (tamaño, peso, intensidad que soportar, más económico).

La instalación de BMS es en serie con cada una de las ramas de la batería. A continuación un esquema eléctrico de cómo se instala el BMS en una de las ramas (Figura 36).

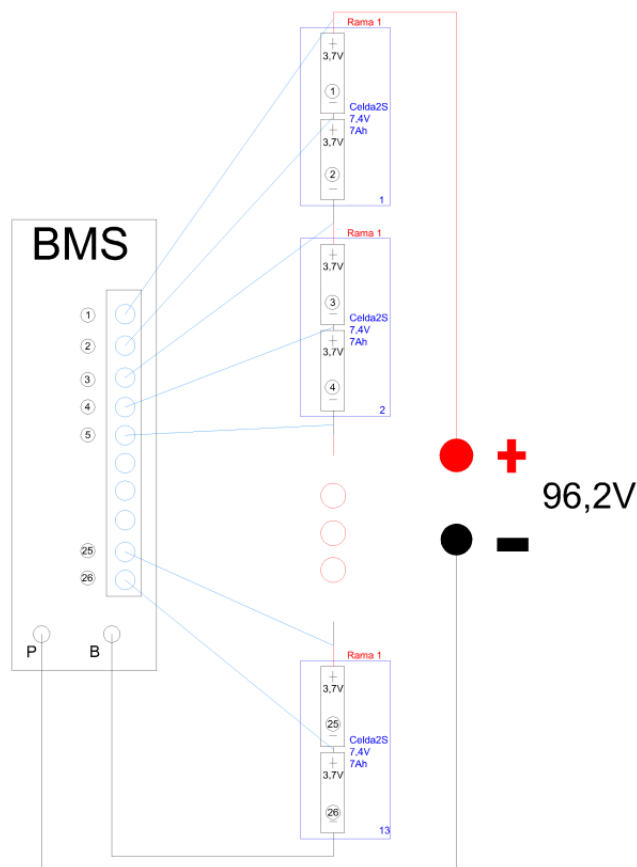


Figura 36. Conexión eléctrica del BMS a una de las ramas de la batería (conexión en serie)

Según los datos que tenemos de la carga (motor PMS 156W), su corriente nominal (218,75 A) y su corriente máxima (590 A), tiene que ser dividida por el número de ramas que tiene la batería, en este caso 7. Por tanto la intensidad que circulará de forma nominal por cada rama será de 31,25 A y una corriente de pico de 84,28 A. Para que el BMS aguante la corriente de pico, habrá que seleccionar un BMS superior a 84,28 A. El BMS elegido del mercado es uno que permite la circulación hasta 100 A.

En la siguiente figura 37 se puede observar el BMS que se va a instalar en cada rama de la batería del kart eléctrico.

Battery Protection Circuit Module (PCM) for 96.2V 26 cells in series Li-ion/Li-Polymer Battery Packs

Part number: HCX-D170



Figura 37. BMS instalado por cada rama de la batería

Sus características específicas son las siguientes:

Item	Contents		Criteria
1	Model	HCX-D170	26S-100A working current
2	Voltage	Charging voltage	109.2V
3	Current	Maximal continuous charging current	100A
		Maximal continuous discharging current	100A
		Current consumption	≤20μA
4	Overcharge Protection	Over charge detection voltage	4.2V~4.35V(Adjustable)
		Over charge detection delay time	0.5S~2S
		Over charge release voltage	4.0V~4.2V(Adjustable)
5	Over Discharge Protection	Over discharge detection voltage	2.3V~3.0V(Adjustable)
		Over discharge detection delay time	50~200mS
		Over discharge release voltage	2.3V~3.0V(Adjustable)
6	Over Current Protection	Over current detection voltage	0.1V~0.2V(Adjustable)
		Over current detection current	Adjustable
		Detection delay time	5~20mS
		Release condition	Cut load,automatically recover
7	Short Circuit Protection	Detection condition	Exterior shot circuit
		Detection delay time	200~500uS
		Release condition	Cut load,automatically recover
8	Balance/ Equilibrium	Balance voltage for single cell	4.20V±0.025V
		Balance current for single cell	256mA±20mA
9	Resistance	Inner resistance	≤20mΩ
10	Temperature	Operating temperature range	-40~+85°C
		Storage temperature range	-20~+125°C
11	Size (L*W*T)	L220mm*W120mm*T50mm	
12	Weight [kg]	0,62	
13	Price [€]	190,40	

Tabla 22. Características específicas de BMS seleccionado, HCX-D170

Según las especificaciones del BMS, su masa es 0,62 kg. El número de BMS es 1 por rama, por tanto el total de masa de los BMS's es:

$$Masa\ BMS's = 0,62\ kg * 7\ ramas = 4,34\ kg$$

La masa total de la batería junto los BMS's es:

$$\begin{aligned}
 Masa\ Total\ Batería &= Masa\ Celdas + Masa\ BMS's = \\
 &= 38,3\ kg + 4,34\ kg = 42,64\ kg
 \end{aligned}$$

La masa total del kart eléctrico transformado es:

$$Masa\ Kart\ Eléctrico\ con\ Batería = 168,1\ kg + 42,64 = 200,74\ kg$$

El siguiente elemento que se debe seleccionar es el driver. Se controlará el motor y la energía que está almacenada en la batería a través del driver. Tendrá dos entradas con las que podremos actuar sobre él (acelerador y freno) y así poder acelerar o recuperar energía a través del frenado regenerativo. Para que pueda actuar, estará alimentado por una batería auxiliar de 12 V y una capacidad de 7 Ah.

El modelo de SiperSigma2 seleccionado es PMS 960T4-01; 60-96V; 600Arms; Size 4(L); Su precio es de 1430,00€.

A continuación el controlador seleccionado con sus dimensiones y sus conexiones.



Figura 38. Dimensiones del controlador seleccionado (tamaño 4)

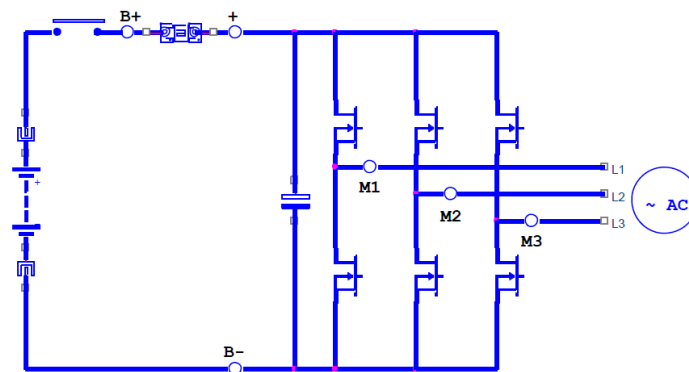


Figura 39. Circuito de conexión. Desde la batería al motor pasando por el controlador

4.2 CARGADOR EXTERNO

Modelo básico	Tensión nominal	Rango tensión de salida	Corriente Máxima de salida
		Rango ajustable	Ajuste de la corriente Máxima
J7240	72V	25-99V	40A
J8240	84V	30-116V	40A
J9632	96V	34-132V	32A
J14423	144V	50-198V	23A
J31210	312V	110-440V	10A
J54006	540V	170-650V	6A

Tabla 23. Modelos de cargadores de batería externos



Figura 40. Elementos del cargador exterior. Rectificador, cable de conexión a red, cable conexión batería y cable sensores

PRECIO: 443,75€

De todos los cargadores que hay en la tabla 23, elegimos el J9632. Para que se realice una carga correcta se debe conectar el cable sensor al BMS de la batería. La conexión a la batería será de más de 96,2V para que tenga diferencia de potencial y pueda circular corriente desde el cargador a las celdas. El tiempo aproximado de carga será de una hora y media aproximadamente, ya que la intensidad que puede ofrecer el cargador es de 32A repartido entre 7 ramas en paralelo siendo así una corriente de 4,6 A por cada rama.

4.3 TRANSMISIÓN MECÁNICA DEL KART ELÉCTRICO.

Se necesita saber qué relación de transmisión es necesaria para poder transmitir el par necesario del motor al eje de la rueda. Hay que tener en cuenta que hay un límite de transmisión, referente a la velocidad punta del kart. La velocidad punta que debe alcanzar el kart es de 2260 rpm, que es la velocidad máxima que alcanzó el kart de gasolina en la toma de datos.

Si la velocidad máxima del motor es de 6000 rpm, la relación de transmisión máxima que se debe hacer respecto a la velocidad es:

$$r_t = \frac{6000 \text{ rpm}}{2265 \text{ rpm}} = 2,65$$

Comprobamos si con esta relación de transmisión el par nominal y el par máximo se cumplen.

$$Par_{n \text{ rueda}} = 90,21 \text{ Nm (datos de Simulink)}$$

$$Par_{MAX \text{ rueda}} = 204,34 \text{ Nm (datos de Simulink)}$$

$$Par_{n \text{ motor}} = 33,4 \text{ Nm (datos de la hoja de características)}$$

$$Par_{MAX \text{ motor}} = 80 \text{ Nm (datos de la hoja de características)}$$

$$Par_{n\text{ rueda}} = 33,4 \text{ Nm} * 2,65 = 88,51 \text{ Nm} < 90,21 \text{ Nm}$$

$$Par_{MAX\text{ rueda}} = 80 \text{ Nm} * 2,65 = 212 \text{ Nm} > 204,34 \text{ Nm}$$

Con estos resultados comprobamos que esta relación de transmisión es justa. Con la relación de transmisión de 2,65, el par nominal en rueda se queda 2 Nm por debajo de los datos ofrecidos por Simulink, pero en cambio supera el par máximo en rueda. No es necesario darle importancia a esto porque el kart eléctrico diseñado dará las mismas prestaciones o incluso mejores que el kart de gasolina, porque gracias al motor eléctrico desde $t=0$ proporcionará el par constante que necesite el eje de la rueda.

A continuación, la tabla de transmisiones donde se podrá elegir el piñón y la corona del kart eléctrico. Para una transmisión de 2,65, seleccionamos un piñón de 17 y una corona de 45.

Tabla de transmisiones

		CORONAS													
PIÑONES		22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	
	8	2,75	2,88	3,00	3,13	3,25	3,38	3,50	3,63	3,75	3,88	4,00	4,13	4,25	
	9	2,44	2,56	2,67	2,78	2,89	3,00	3,11	3,22	3,33	3,44	3,56	3,67	3,78	
	10	2,20	2,30	2,40	2,50	2,60	2,70	2,80	2,90	3,00	3,10	3,20	3,30	3,40	
	11	2,00	2,09	2,18	2,27	2,36	2,45	2,55	2,64	2,73	2,82	2,91	3,00	3,09	
	12	1,83	1,92	2,00	2,08	2,17	2,25	2,33	2,42	2,50	2,58	2,67	2,75	2,83	
	13	1,69	1,77	1,85	1,92	2,00	2,08	2,15	2,23	2,31	2,38	2,46	2,54	2,62	
	14	1,57	1,64	1,71	1,79	1,86	1,93	2,00	2,07	2,14	2,21	2,29	2,36	2,43	
	15	1,47	1,53	1,60	1,67	1,73	1,80	1,87	1,93	2,00	2,07	2,13	2,20	2,27	
	16	1,38	1,44	1,50	1,56	1,63	1,69	1,75	1,81	1,88	1,94	2,00	2,06	2,13	
17	1,29	1,35	1,41	1,47	1,53	1,59	1,65	1,71	1,76	1,82	1,88	1,94	2,00		
18	1,22	1,28	1,33	1,39	1,44	1,50	1,56	1,61	1,67	1,72	1,78	1,83	1,89		
		CORONAS													
PIÑONES		35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	
	8	4,38	4,50	4,63	4,75	4,88	5,00	5,13	5,25	5,38	5,50	5,63	5,75	5,88	
	9	3,89	4,00	4,11	4,22	4,33	4,44	4,56	4,67	4,78	4,89	5,00	5,11	5,22	
	10	3,50	3,60	3,70	3,80	3,90	4,00	4,10	4,20	4,30	4,40	4,50	4,60	4,70	
	11	3,18	3,27	3,36	3,45	3,55	3,64	3,73	3,82	3,91	4,00	4,09	4,18	4,27	
	12	2,92	3,00	3,08	3,17	3,25	3,33	3,42	3,50	3,58	3,67	3,75	3,83	3,92	
	13	2,69	2,77	2,85	2,92	3,00	3,08	3,15	3,23	3,31	3,38	3,46	3,54	3,62	
	14	2,50	2,57	2,64	2,71	2,79	2,86	2,93	3,00	3,07	3,14	3,21	3,29	3,36	
	15	2,33	2,40	2,47	2,53	2,60	2,67	2,73	2,80	2,87	2,93	3,00	3,07	3,13	
	16	2,19	2,25	2,31	2,38	2,44	2,50	2,56	2,63	2,69	2,75	2,81	2,88	2,94	
17	2,06	2,12	2,18	2,24	2,29	2,35	2,41	2,47	2,53	2,59	2,65	2,71	2,76		
18	1,94	2,00	2,06	2,11	2,17	2,22	2,28	2,33	2,39	2,44	2,50	2,56	2,61		

Tabla 24. Relaciones de transmisión

4.4 SECCIÓN DEL CABLE

La densidad de corriente para el cálculo de la sección del cable es de 4 A/mm^2 .

En cuanto a la conexión del circuito de potencia, la intensidad nominal entre la batería y el driver (corriente en DC) es:

$$I_{N(DC)} = \frac{P_N}{V_{DC}} = \frac{21.000 \text{ W}}{96 \text{ V}} = 218,75 \text{ A}$$

$$I_{MAX(DC)} = \frac{P_{MAX}}{V_{DC}} = \frac{40.700 \text{ W}}{96 \text{ V}} = 424 \text{ A}$$

$$Sección = \frac{I_{N(DC)}}{Densidad \text{ de corriente}} = \frac{218,75 \text{ A}}{4 \text{ A/mm}^2} = 54,7 \text{ mm}^2$$

La conexión que existe entre el driver y el motor es a través de corriente alterna en 3 fases.

$$I_{N(AC)} = 245 \text{ A (hoja de características)}$$

$$I_{MAX(AC)} = 590 \text{ A (hoja de características)}$$

$$Sección = \frac{I_{N(AC)}}{Densidad \text{ de corriente}} = \frac{245 \text{ A}}{4 \text{ A/mm}^2} = 61,25 \text{ mm}^2$$

Las conexiones de estos elementos se hacen a través de cables de cobre. La intensidad que tienen que aguantar es de 245 A en AC (parte entre el convertidor y el motor) y 219 A en la parte DC. Por tanto la sección seleccionada es de 35 mm^2 con aislamiento XLPE. Se instalarán dos circuitos en paralelo, ya que la intensidad máxima admisible de 35 mm^2 es 145A.

4.5 DISEÑO DE INSTALACIÓN

4.5.1 REPARTO DE MASAS

Respecto a la colocación de los elementos eléctricos en el kart hay que diseñar el reparto de los packs de celdas, el motor y demás elementos para que ambos laterales del kart estén compensados y el peso esté repartido.

ELEMENTO KART ELÉCTRICO	MASA [kg]
Motor PMS 156W	29,8
Convertidor SuperSigma2	6,2
Batería + BMS's	32,64
Radiador completo + bomba de agua, poleas y correa	5,1
Componentes eléctricos	3
Batería auxiliar 12V	2
Kit de transmisión	1,9
Chasis completo con todos los accesorios	24
Carenados completos y paragolpes	12
Neumáticos y llanta	5,35
Masa Kart eléctrico	122
Piloto	78,75
TOTAL	200,75

Tabla 25. Masa total del kart eléctrico

Se va a separar los elementos en dos partes. En la parte lateral derecha irá instalado el motor, el kit de transmisión y el convertidor. En la parte lateral izquierda irá instalado el radiador y la batería. Los componentes eléctricos y la batería auxiliar irán instalados en la parte central del kart (en el hueco que hay debajo de la dirección). A continuación un esquema de cómo quedaría la instalación.

Todos los demás elementos que componen el kart no se pueden instalar en otro espacio porque están en el lugar que les corresponde.

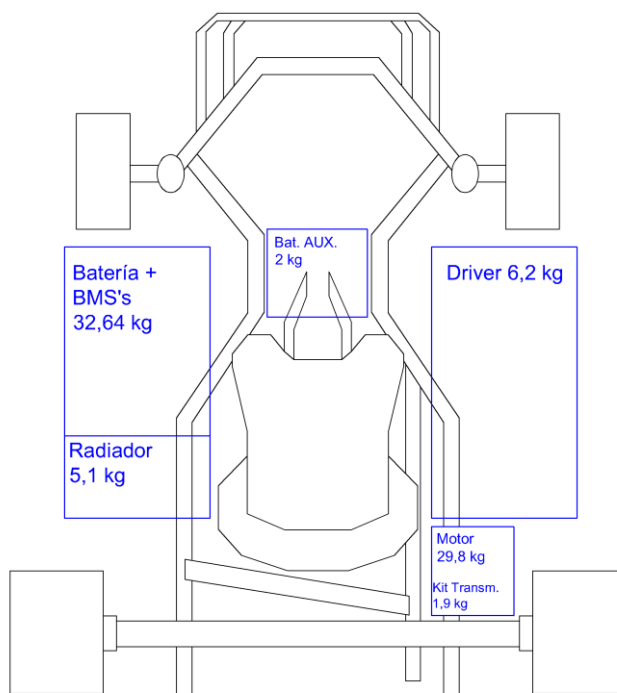


Figura 41. Distribución de los elementos según las masas

Lateral izquierdo		Lateral derecho	
Masa Radiador [kg]	5,1	1,9	Masa Kit Transmisión [kg]
Masa Batería [kg]	32,64	29,8	Masa Motor [kg]
		6,2	Masa Driver [kg]
Total [kg]		37,9	Total [kg]

Tabla 26. Masas de distintos laterales del kart

4.5.2 VOLUMEN DE LOS ELEMENTOS

Los espacios libres para la instalación de los elementos eléctricos están en la **tabla 27**

ESPACIO	MEDIDAS [mm]	ÁREA [mm ²]
Depósito de gasolina	270x200	54.000
Lateral derecho	700x400	240.000
Lateral izquierdo	700x400	240.000
Parte trasera del kart	600x200	120.000
Motor de gasolina	200x200	40.000
Total del espacio libre	694.000	

Tabla 27. Espacios libres para la instalación de los elementos eléctricos

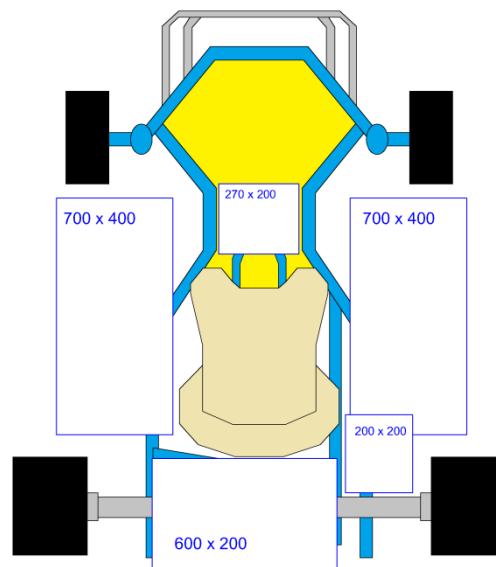


Figura 42. Distribución del espacio libre para la colocación de elementos eléctricos

A estos espacios libre se le puede dar una altura de 300 mm (de media) para alojar los distintos elementos que contiene el kart eléctrico. Siendo así queda un volumen libre total de 208.200.000 mm³.

Número	Elemento	Medidas	Volumen
91	Pack 7,4V; 7Ah	138x47x25	162.150
7	BMS's	220x120x50	1.320.000
1	Driver	320x200x72	4.608.000
1	Motor	301x274x245	20.206.130
1	Radiador	200x400x600	48.000.000
TOTAL			74.296.280

Tabla 28. Volumen que ocupa los elementos a instalar

5 ESQUEMA DEL CIRCUITO DE POTENCIA Y DE CONTROL

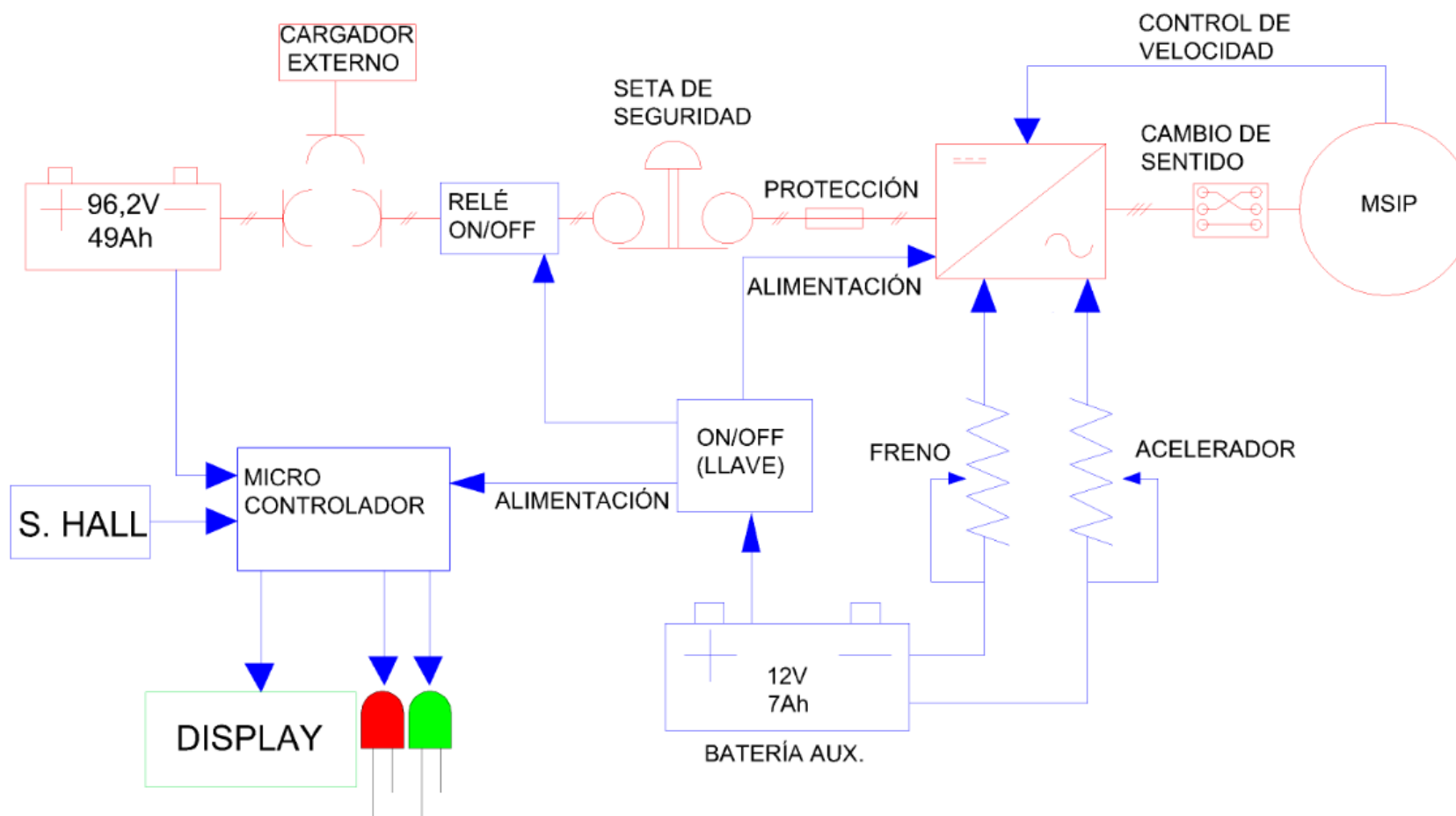


Figura 43. Circuito de potencia (rojo) y circuito de control (azul)

La figura 43, representa dos circuitos. El circuito de color rojo es el de potencia, por el cual se transfiere toda la energía necesaria para mover el motor y por lo tanto hacer que se desplace el kart. El otro circuito de color azul, es el circuito de control, encargado de que el circuito de potencia funcione correctamente. Gracias a él podemos actuar sobre el circuito de potencia y también podemos ver qué está sucediendo en él a través del display (recuadro verde). Los led de color rojo indica cuando el kart está regenerando y el diodo verde cuando el kart está acelerando. El cerebro de este circuito es el microcontrolador que es programado por uno mismo ya que es de software libre.

6 PRESUPUESTO ECONÓMICO

6.1 PRESUPUESTO DESCOMPUESTO DEL MATERIAL ELÉCTRICO

	UNIDADES	ELEMENTO	PRECIO POR UNIDAD [€]	PRECIO TOTAL [€]
CIRCUITO DE POTENCIA	1	Motor eléctrico	2.170,00 €	2.170,00 €
	1	Convertidor DC-AC	1.430,00 €	1.430,00 €
	91	Packs 7,4V; 7Ah (2S1P)	40,90 €	3.721,90 €
	7	BMS 100A	190,40 €	1.332,80 €
	2	Conectores DC	12,89 €	25,78 €
	1	Interruptor con llave	33,45 €	33,45 €
	1	Fusible 500A	96,70 €	96,70 €
	1	Seta de emergencia	42,77 €	42,77 €
	5	Cable DC	20,00 €	100,00 €
	1	Conmutador (III)	20,00 €	20,00 €
CIRCUITO DE CONTROL	1	Batería auxiliar 12V, 7Ah	8,99 €	8,99 €
	2	Contactores	15,47 €	30,94 €
	1	Microprocesador	20,00 €	20,00 €
	1	Display LCD	5,68 €	5,68 €
	2	Led's (rojo y verde)	0,20 €	0,40 €
	2	Potenciómetro	5,00 €	10,00 €
TOTAL		9.049,41 €		

6.2 COMPARACIÓN DE PRESUPUESTOS SEGÚN EL TIPO DE KART

COMPONENTES KART DE GASOLINA	PRECIO [€]	PRECIO [€]	COMPONENTES KART ELÉCTRICO
Motor	3.110,00 €	9.049,41 €	Material eléctrico
Carburador	202,34 €		
Filtro del aire	90,75 €		
Escape	237,90 €		
Depósito de gasolina	44,62 €		
Kit Bomba de agua	74,90 €	74,90 €	Kit Bomba de agua
Radiador	292,10 €	292,10 €	Radiador
Piñón de ataque 11	13,20 €	13,20 €	Piñón de ataque 17
Corona 77	24,00 €	24,00 €	Corona 45
Cadena	29,10 €	29,10 €	Cadena
Chasis completo	4.569,00 €	4.569,00 €	Chasis completo
Juego de neumáticos	160,00 €	160,00 €	Juego de neumáticos
Total	8.847,91 €	14.211,71 €	Total

Tabla 29. Presupuesto económico de ambos tipos de kart

7 COMPARACIÓN DE KARTS

Una vez realizada la transformación y el diseño del kart eléctrico, se procede a hacer la comparación con el kart de gasolina de pruebas.

Gasolina: 9.700 Wh/litro

Energía almacenada en un depósito de 8 litros (durante 30 minutos, 33 km)

$$\text{Energía almacenada en 1 deposito} = 9.700 \frac{\text{Wh}}{\text{litro}} * 8 \text{ litros} = 77.600 \text{ Wh} = 77,6 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo} = \frac{77.600 \text{ Wh}}{33 \text{ km}} = 2351,51 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} = 2,35151 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

Batería diseñada del kart eléctrico: 4.713,8 Wh/ciclo (durante 10 minutos, 11 km)

$$\text{Energía almacenada Batería diseñada} = 4.713,8 \text{ Wh} = 4,7138 \text{ kWh}$$

$$\text{Consumo} = \frac{4.713,8 \text{ Wh}}{11 \text{ km}} = 428,5 \frac{\text{Wh}}{\text{km}} = 0,4285 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}$$

$$\text{Energía consumida (33 km)} = 0,4285 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} * 33 \text{ km} = 14,14 \text{ kWh}$$

Se aprecia una gran diferencia de eficiencia en los diferentes tipos de movilidad. Para una movilidad de combustión interna se necesita 77,6 kWh en forma de 8 litros de gasolina para recorrer 33 km. En cambio, si queremos una misma autonomía con movilidad eléctrica, se necesita 14,14 kWh (haciendo 2 recargas intermedias).

La conclusión que saco de ello, es que la movilidad eléctrica es más eficiente que la movilidad de combustión interna. Se necesita 5 veces más de energía cuando producimos movimiento con motor térmico que si se hace con motor eléctrico. El inconveniente, es que la propulsión eléctrica aún no está preparada para almacenar una gran capacidad de energía, por tanto está debe de recargarse de forma repetitiva para conseguir la autonomía que tiene el kart de gasolina.

Las dos tablas planteadas a continuación (Tabla 30 y Tabla 31) es un estudio realizado para 1.000 horas, en el que se compara el coste final de mantenimiento entre los dos tipos de karts.

Cálculos del precio de combustible consumido durante 1.000 horas, siendo el precio de la gasolina 1,30€/litro.

En 30 minutos se consumen 8 litros

En 1 hora se consumen 16 litros

En 1.000 horas se consumen 16.000 litros

$$\text{Precio de 1.000 horas de uso} = 16.000 \text{ litros} * 1,30 \frac{\text{€}}{\text{litro}} = 20.800 \text{ €}$$

KART GASOLINA		
Concepto	Horas	Coste
Embrague	1.000	400,00 €
Aceite, filtros...	1.000	160,00 €
Piezas motor	1.000	240,00 €
Mantenimiento Total	después de 1.000 horas de uso	800,00€
Combustible (1,30€/litro)	1.000	20.800,00 €
Coste Total	después de 1.000 horas de uso	21.600,00 €

Tabla 30. Estudio de 1.000 horas al kart de gasolina

Cálculos del precio de energía eléctrica durante 1.000 horas, siendo el precio del kWh a 0,15€.

En 30 minutos se consumen 14,14 kWh

En 1 hora se consumen 28,28 kWh

En 1.000 horas se consumen 28.280 kWh

$$\text{Precio de 1.000 horas de uso} = 28.280 \text{ kWh} * 0,15 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 4.242 \text{ €}$$

KART ELÉCTRICO		
Concepto	Horas	Coste
Batería	1.000	3.721,90 €
Kit Transmisión	1.000	240,00 €
Mantenimiento Total	después de 1.000 horas de uso	3.961,90 €
"Combustible" (0,15€/kWh)	1.000	4.242,00 €
Coste Total	después de 1000 horas de uso	8.204,32 €

Tabla 31. Estudio de 1.000 horas al kart eléctrico

Con los resultados obtenidos en la tabla 30 y tabla 31, observamos con las primeras 1.000 horas de rodaje, el kart eléctrico sale más barato que el kart de gasolina:

Tiempo	Coste del kart de gasolina	Coste acumulado	Coste del kart eléctrico	Coste acumulado
t=0	8.847,91 €	0	14.211,71 €	0
t=1.000	21.600,00 €	30.447,91€	8.204,32 €	22.416,03€
t=2.000	21.600,00 €	52.047,91€	8.204,32 €	30.620,03€
Con menos de 3.000 horas	52.047,91€		30.620,03€	

Tabla 32. Precio estimado a lo largo de un año

En la siguiente tabla se resume todos los cambios que se han producido y se verá si realmente la movilidad eléctrica a superado a la movilidad de combustibles fósiles.

	Kart Gasolina (2T)	Kart Eléctrico
P_{nominal} / P_{máxima}	22 kW (30 cv)	21 kW (29cv)/40,7kW (55cv)
Par	Medio régimen	Continuo
Ajuste Prestaciones	No disponible	Configurable
Peso	Bajo	Medio
Peso/Potencia	Medio	Alto
Velocidad Máxima	110 km/h	110 km/h
Autonomía	Alto	Limitado
Marcha atrás	No disponible	Opcional
Parada de emergencia	No disponible	Por defecto
Mantenimiento	Medio	Muy bajo
Coste Consumo	Medio	Muy bajo
Contaminación	Acústica y Atmosférica	Nula

Tabla 33. Comparación general entre Karts

Las consecuencias de la transformación:

Cero emisiones → evita problemas de salud → Facilita autorizaciones de industria

Cero emisiones → se eliminan costosos sistemas de ventilación

No se genera calor → no es necesario traje ignífugo → reducción coste de seguros

No se almacena combustible → Facilita autorizaciones → se evitan normas anti-incendio severas

No ruidos fuertes → Ambiente más saludable → Aislante acústico no necesario



Figura 44. Prototipo del kart eléctrico

CONCLUSIÓN

El diseño realizado finalmente ha sido para 10 vueltas (11 km), 15 vueltas menos que la autonomía del kart de gasolina. Por lo tanto la autonomía del kart eléctrico es menor como es lógico, ya que la densidad energética de la gasolina es mucho mayor que nuestros bancos de baterías. Este es el máximo inconveniente que hemos visto y no se ha podido transformar al 100%. Sin embargo se ha podido realizar el diseño del kart eléctrico con las prestaciones de competición que tiene el kart de gasolina. El kart transformado puede con las exigencias del circuito, siendo éstas un largo trazado y unas velocidades puntas muy elevadas.

Aún así, este tipo de proyecto sería más beneficioso para kartódromos indoor, donde no hay grandes rectas y por tanto la velocidad punta es menor. La infraestructura que debe realizarse en estos circuitos interiores se reduce considerablemente, ya que instalar la extracción de humos y habilitar un espacio de sustancias inflamables tiene un gran coste. Estos circuitos con karts eléctricos podrían ocupar lugares sin ningún tipo de acondicionamiento acústico, ya que estos karts son prácticamente silenciosos.

Otro ámbito donde el kart eléctrico podría desbancar al kart de combustión sería en el mundo del ocio (alquiler de karts), donde estos karts no tienen unas prestaciones tan exigentes como las puede tener un kart de competición. Referente a su autonomía, las tandas de alquiler suele ser de 10 minutos aproximadamente, y durante tanda y tanda puede estar cargando sus baterías para que sigan siendo alquilados.

Respecto al medio ambiente, se podría decir que los karts eléctricos son 100% sostenibles en el caso de que se recargaran con energía renovable. Si no es así, la contaminación de este tipo de energía seguiría siendo muy reducida respecto la contaminación que produce el kart de gasolina. Por otro lado el mantenimiento que tienen los vehículos eléctricos es totalmente sencillo y económico. Siendo así, no es necesario el cambio de aceite y otros elementos que deben cambiarse con el vehículo de combustión y que pueden crear problemas en el medio ambiente.

En cuanto al tema económico, según los presupuestos anteriores, el kart eléctrico es mucho más caro que el kart de gasolina. Hay que decir que no hemos estudiado el mantenimiento que debe realizarse al kart de gasolina pero sabemos que el mantenimiento del kart eléctrico es prácticamente cero.

BIBLIOGRAFÍA

Para la realización de este proyecto se ha consultado varias fuentes de información.

FÓRMULAS DEL MODELO DINÁMICO

Juan Luis Villa Gazulla y Jose F. Sanz Osorio, Material didáctico de la asignatura Movilidad Eléctrica, de la Universidad de Zaragoza.

VALORES PARA VER EL COEFICIENTE DE ROZAMIENTO DEL CIRCUITO:

<http://www.causadirecta.com/especial/calculo-de-velocidades/tablas/tabla-de-factores-de-rozamiento-del-pavimento-para-neumaticos-de-goma>

David Ochoa Gregorio, *Diseño de un vehículo tipo kart*, Trabajo Final de Grado 2013-2014.

INFORMACIÓN SOBRE MOTORES

<http://www.digikey.es/es/articles/techzone/2013/mar/an-introduction-to-brushless-dc-motor-control>

VEHÍCULO ELÉCTRICO

<https://www.motorpasion.com/coches-hibridos-alternativos/coches-electricos-que-son-y-como-funcionan>

https://es.wikipedia.org/wiki/Veh%C3%ADculo_el%C3%A9ctrico

<https://www.endesavehiculoelectrico.com/>

BATERÍAS

<http://electromovilidad.net/tipos-de-bateria-para-coche-electrico/>

<http://sls-spain.com/producto/bateria-lipo-2s-7000mah-35-70c-sls-hard-case/>

<https://erlerobotics.gitbooks.io/erle-robotics-erle-copter/es/safety/lipo.html>

BMS

<https://bmsbattery.com/bmspcm/716-lifepo4-bms-system-32s-battery-management-system-bms-pcm.html>

<http://evcomponents.com/lifepo4-bms.html>

<http://www.bestechpower.com/962v26spcmbmspcbfiori-ionli-polymerbatterypack/PCM-D170.html>

INFORMACIÓN DEL MUNDO DE LOS KARTS

<https://es.wikipedia.org/wiki/Kart>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Karting>

<http://www.ev-fun.eu/>

<http://otlkart.es/>

FRENADO REGENERATIVO

<http://www.pistonudos.com/reportajes/la-revolucion-de-los-sistemas-de-recuperacion-energetica/>

https://es.wikipedia.org/wiki/Freno_el%C3%A9ctrico

<http://www.frenelsa.es/es/producto-aplicaciones/vehiculo-industrial.asp>

<https://www.motorpasionfuturo.com/mecanica-eficiente/freno-regenerativo-recuperando-energia>

INFORMACIÓN SOBRE LOS LEXUS HÍBRIDOS

<http://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/el-sistema-lexus-hybrid-drive/20100511081231001122.html>

SOBRE ARDUINO

<https://www.xataka.com/especiales/guia-del-arduinomaniaco-todo-lo-que-necesitas-saber-sobre-arduino>

<http://arduino.cl/que-es-arduino/>

<https://aprendiendoarduino.wordpress.com/2015/03/26/lenguaje-de-programacion-c/>

<http://www.prometec.net/indice-tutoriales>

COEFICIENTE AERODINÁMICO

<http://espaciocoches.com/coeficiente-aerodinamico-cx-que-es/>

https://es.wikipedia.org/wiki/Anexo:Cx_de_autom%C3%B3viles

<https://cajonddesastre.wordpress.com/2010/03/16/formula-1-y-aerodinamica/>

<http://www.caranddriverthef1.com/formula1/blogs/angelesf1/aerodinamica-2-en-busca-la-eficiencia>

<http://www.moto1pro.com/reportajes-motos/la-mala-aerodinamica-de-las-motos>

PAR Y POTENCIA

<http://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn63.html>

CONVERTIDORES:

<http://www.cloudelectric.com/category-s/335.htm>

http://www.dmcde.de/index.php?option=com_content&view=article&id=113&Itemid=113

CARGADOR

<http://evcomponents.com/customized-chargers.html>

ANEXOS

A continuación hay elementos y datos que son referidos en el TFG anterior.

RUEDAS:

La principal característica de los neumáticos blandos es que ofrecen más adherencia con lo que nos lleva a la vuelta más rápida. En contra partida, su duración es menor y soporta peor los ciclos de frío y calor. A altas temperaturas se produce una alta degradación.

El neumático duro soporta temperaturas más altas sin degradarse. Su durabilidad es mucho más larga ofreciendo agarre constante pero menor que el blando estando éste en buenas condiciones.

El dibujo del neumático dependerá de cómo esté la climatología. Se usarán neumáticos lisos en condiciones de seco (llamados slicks), figura 46. En caso de que esté lloviendo o se formen pequeños charcos de agua en pista se usarán neumáticos con dibujo con la función principal de evacuar el agua que se interpone entre el neumático y la pista (para evitar el aquaplaning), aportando mayor agarre con el asfalto. Cuanto mayor es el número de canales que tiene el neumático, más cantidad de agua podrá evacuar de la zona de contacto entre el neumático y el asfalto, figura 45.



Figura 45. Neumáticos de lluvia



Figura 46. Neumáticos de seco

La presión de los neumáticos es una variable importante a la hora de rodar con el kart. Si la presión es baja, hace que los flancos se deformen al tomar curvas y transmita una sensación de flotabilidad siendo mayor su degradación y por tanto menor agarre por su exceso de temperatura. Además ofrece más resistencia de rodadura siendo mayor el consumo y menor la velocidad. Si la presión es demasiado elevada, notamos un kart instantáneo con una respuesta rápida y limpia. Sin embargo la sobrepresión reduce la superficie de contacto del neumático en pista, con un resultado de menor agarre y más rebotes por las irregularidades de la pista. (Véase en la figura 47)

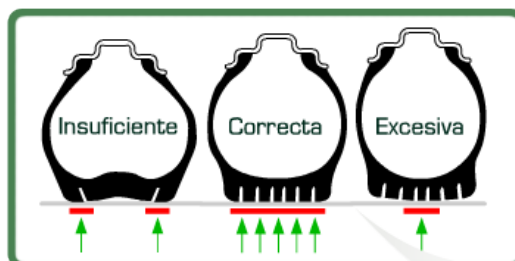


Figura 47. Presión de los neumáticos

CLASIFICAN LAS MÁQUINAS ROTATIVAS SEGÚN SU CONFIGURACIÓN:

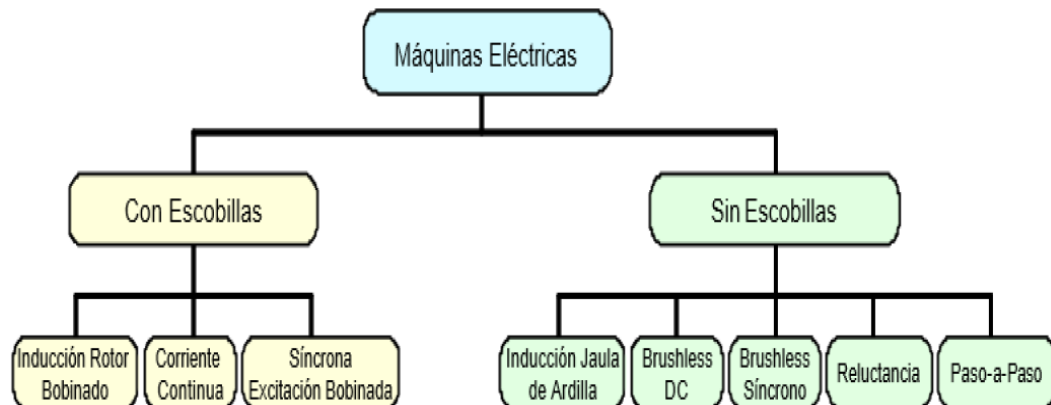


Figura 48. Tipos de máquinas rotativas

Según el tipo de excitación:

Motores de corriente continua (Direct Current, DC):

Motores de corriente alterna (Alterna Current, AC)

Como se puede ver, existe una gran variedad de máquinas eléctricas rotativas.

CÓDIGO EN C DEL CUENTAKILÓMETROS:

```
//LIBRERIAS

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include <SD.h>

#include <SPI.h>

File Archivo;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

//VARIABLES

#define PI 3.141592

double instante_inicio=0;

double instante_fin=0;

double incremento_t_1=0;

double vel=0;

////

int analogPin = 0;

int hall_data = 0;

boolean var_aux=false;

boolean var_aux2=true;

boolean hall=false;

////

double instante_actual=0;

double instante_previo=0;

double incremento_t=0;

double t=0;

double t_aux=0;

float vel_previa=0;

float vel_actual=0;

double distancia=0;

float aceleracion=0;

float radio=0.13;

int i;
```



```
void setup()

{

  pinMode(10,OUTPUT);

  Serial.begin(9600);

  lcd.begin(16,2);

  /* ESCRIBIENDO DATOS EN LA MEMORIA SD */

  Serial.println("Iniciando SD...");

  if(!SD.begin(10))

  {Serial.println("Fallo o tarjeta no presente");

  }

  Serial.println("Tarjeta SD OK");

  Archivo = SD.open ("datos.txt", FILE_WRITE);

  if (Archivo)

  {

    Archivo.println ("");

    Archivo.println ("");

    Archivo.println ("Telemetría Karting");

    Archivo.println ("");

    Archivo.println ("TIEMPO / DISTANCIA / VELOCIDAD");

    Archivo.close();

    Serial.println("Todos los archivos fueron almacenados");

  }

  else

  {Serial.println ("El archivo datos.txt no se abrio correctamente");

  }

  /*INTRO DE LA PANTALLA LCD*/

  lcd.init();

  lcd.backlight();

  lcd.home();

  lcd.setCursor(0, 0);

  lcd.print("    INFRILUX    ");
```

```
    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print("*****");

    delay(5000);

    lcd.clear();

    lcd.setCursor(0, 0);

    lcd.print(" e-Kart Project ");

    lcd.setCursor(0, 1);

    lcd.print("   Javier T.E.   ");


    delay(5000);


    lcd.clear();


    delay(1000);

    lcd.setCursor(0,0);

    lcd.print("V=");

    lcd.print(vel_actual);

    lcd.print("Km/h");

    lcd.setCursor(0,1);

    lcd.print("D=");

    lcd.print(distancia);

    lcd.print("m");

}

void LCD()

{ lcd.clear();

  lcd.setCursor(0,0);

  lcd.print("V=");

  lcd.print(vel);

  lcd.print("Km/h");

  lcd.setCursor(0,1);

      if(distancia<=999)

      {
```

```

        lcd.print("D=");

        lcd.print(distancia);

        lcd.print("m");

    }

    else

    {

        lcd.print("D=");

        lcd.print(distancia/1000);

        lcd.print("Km");

    }

}

float DataLogger (double distancia, double vel, double instante_inicio)

{

    String dataString = "";

    File Archivo = SD.open ("datos.txt", FILE_WRITE); // Se abre el
    documento sobre el que se va escribir

    dataString += String(distancia)+ String (" metros, ") + String (vel)+
    String (" km/h,      ");

    if (Archivo)

    {Archivo.print(instante_inicio/1000);

    Archivo.print(", ");

    Archivo.println(dataString);

    Archivo.close();

    Serial.println(dataString);

    }

    else {

        Serial.println ("error abriendo datos.txt");

    }

}

void loop()

{

    hall_data = analogRead(analogPin);

    instante_inicio= millis();

```

```
for (i=0; i<10; i++)
{
    boolean var_aux3=false;

    boolean var_aux4=false;

    Serial.println(i);

    while (var_aux3==false)
    {
        hall_data = analogRead(analogPin);

        if (hall_data < 30)
        { var_aux4=true;
          }

        if(hall_data > 30 && var_aux4==true)
        { var_aux3=true;
          }

    }

}

instante_fin=millis();

incremento_t_1= ((instante_fin - instante_inicio)/10);

vel=((2*PI*radio/(incremento_t_1/1000))*3600)/1000;

distancia=distancia+(10*2*PI*radio);

Serial.print("velocidad    ");

Serial.println(vel);

LCD();

DataLogger (distancia, vel,instante_inicio);

}
```

CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN PARA EL MODELO MATEMÁTICO DEL KART ELÉCTRICO:

El siguiente código calcula las prestaciones que tiene el kart de gasolina. Para hacer los cálculos del kart eléctrico simplemente hay que cambiar su masa y su G (relación de transmisión).

```
%% Proyecto. KART ELÉCTRICO

%% Datos Kart

m = 159.6;          % [kg]

area = 1.0125;      % área frontal enfrentada al aire 1.35*0.75 [m2]

Cx = 0.8;           % coeficiente aerodinámico

r = 0.13;           % radio de la rueda [m]

G = 7;              % relación de transmisión rueda-motor

%% Datos Circuito

g = 9.81;           % aceleración de la gravedad [m/s2]

dens = 1.11;         % densidad del aire [kg/m3]

Cr = 0.02;          % coeficiente de rozamiento de la pista

Alpha = 0;          % grados de la pendiente

pendiente = Alpha*2*pi/360; % [rad] de la pendiente

Vwind = 0;          % velocidad del viento [m/s]

km_1vuelta=1.1;      % km en una vuelta

n_vueltas_competicion=15; % n° de vueltas en un gran premio

n_vueltas_crono=10;   % n° de vueltas para la clasificación

n_vueltas_total=n_vueltas_crono+n_vueltas_competicion; % n° de vueltas totales

%%Cálculos

stop_time=61.96;     % Tiempo que tarda en realizar el ciclo de trabajo
completo

    %En Motor

vel_max_motor = max (velocidad_motor);

vel_min_motor = min (velocidad_motor);

par_max_motor = max (par_motor);

par_min_motor = min (par_motor);

    %En Rueda

vel_max_rueda = max (velocidad_rueda);
```

```
vel_min_rueda = min (velocidad_rueda);

par_max_rueda = max (par_rueda);

par_min_rueda = min (par_rueda);


a_max = max (aceleracion);

a_min = min (aceleracion);

    %Par [Nm]

par_motor2 = par_motor.^2;

par_efectivo_motor=sqrt((sum(par_motor2*0.1)/stop_time));


par_rueda2 = par_rueda.^2;

par_efectivo_rueda=sqrt((sum(par_rueda2*0.1)/stop_time));


    %Velocidad [rpm]

vel_rueda2 = velocidad_rueda.^2;

vel_efectivo_rueda=sqrt((sum(vel_rueda2*0.1)/stop_time));


potencia_rueda2 = potencia.^2;

potencia_efectivo_rueda=sqrt((sum(potencia_rueda2*0.1)/stop_time));

    %Potencias

potencia_motor_kw = par_efectivo_rueda*((vel_max_rueda* 2 * pi )/60);

potencia_motor_cv = potencia_motor_kw / 735;

%%

fprintf('*****\n');

fprintf(' \n');

fprintf('RESULTADOS \n');

fprintf(' \n');

fprintf('Para una G =');

disp(G);

%%

fprintf('MOTOR \n');

fprintf(' \n');
```

```
fprintf('Velocidad MAX en motor [rpm]: ');  
  
disp(vel_max_motor);  
  
fprintf('Par MAX en motor [Nm]: ');  
  
disp(par_max_motor);  
  
fprintf('Par min en motor [Nm]: ');  
  
disp(par_min_motor);  
  
fprintf('Par efectivo en motor [Nm]:');  
  
disp(par_efectivo_motor);  
  
%%  
  
fprintf('RUEDA \n');  
  
fprintf(' \n');  
  
fprintf('Velocidad MAX en rueda [rpm]: ');  
  
disp(vel_max_rueda);  
  
fprintf('Par MAX en rueda [Nm]: ');  
  
disp(par_max_rueda);  
  
fprintf('Par min en rueda [Nm]: ');  
  
disp(par_min_rueda);  
  
fprintf('Par efectivo en rueda [Nm]:');  
  
disp(par_efectivo_rueda);  
  
fprintf('Velocidad efectiva en rueda [Nm]:');  
  
disp(vel_efectivo_rueda);  
  
fprintf('Potencia del motor elegido [kW]:');  
  
disp(potencia_motor_kw);  
  
fprintf('Potencia del motor elegido [cv]:');
```

```

disp(potencia_motor_cv);

%%

fprintf('ENERGÍA \n');

fprintf(' \n');

fprintf('Energía consumida en el total numero de vueltas SIN frenado
regenerativo [kWh]');

disp(max(e_consumida_total_SIN));

fprintf('Energía consumida en el total numero de vueltas CON frenado
regenerativo [kWh]');

disp(max(e_consumida_total_CON));

%% Gráficas

figure (1) % ciclo de trabajo
plot(ciclo_trabajo);

title ('GRÁFICA DEL CICLO DE TRABAJO');

grid on

xlabel('Tiempo [s]');

ylabel('Velocidad [km/h]');

legend ('Velocidad Cuentakilómetros');

figure (2) % gráfica Fuerza
plot(tiempo,Grafica_FUERZA);

title ('GRÁFICA DEL MODELO DINÁMICO');

xlabel('Tiempo [s]')

ylabel('Fuerza [N]')

grid on

legend('Sumatorio de fuerzas')

figure (3) % gráfica del Par
plot(tiempo,par_motor,'m');

hold on

plot(tiempo,par_rueda,'b');
```



```

hold on

plot(tiempo,par_efectivo_motor,'k');

hold on

plot(tiempo,par_efectivo_rueda,'r');

title ('GRÁFICA DEL PAR');

xlabel('Tiempo [s]');

ylabel('Par [Nm]');

grid on

legend('Par en motor','Par en rueda','Par efectivo en motor','Par efectivo en
rueda');

figure (4) % gráfica de aceleración lineal

plot(aceleraciones_acotadas);

hold on

title ('GRÁFICA DE ACELERACIÓN LINEAL');

xlabel('Tiempo [s]');

ylabel('Aceleración [m/s2]');

grid on

legend('A.Lineal(solo+)', 'A.Lineal(limitada-)', 'A.Lineal(+) (-)');

figure (5) % gráfica de la Velocidad

plot(tiempo,velocidad_motor)

hold on

plot(tiempo,velocidad_rueda,'g')

title ('GRÁFICA DE VELOCIDADES')

xlabel('Tiempo [s]')

ylabel('Velocidad [rpm]')

grid on

legend('Velocidad en motor','Velocidad en rueda')

figure (6) % gráficas de Energías 1 ciclo

plot(e_sin_freno)

hold on

```

```

plot(e_con_freno,'g')

title ('ENERGÍA CONSUMIDA EN 1 VUELTA')

xlabel('Tiempo [s]')

ylabel('Energía [kWh]')

grid on

legend('E. Consumida sin freno reg.','E. Consumida con freno reg.')


figure (7) %gráficas de Energías TOTAL (número de ciclos totales)

plot(e_consumida_total_SIN)

hold on

plot(e_consumida_total_CON,'g')

title ('ENERGÍA CONSUMIDA EN 25 VUELTAS')

xlabel('Tiempo [s]')

ylabel('Energía [kWh]')

grid on

legend('E. Consumida sin freno reg.','E. Consumida con freno reg.')

%BATERÍAS

EnergiaALmacenadaBAT = (1.25 * max(e_consumida_total_CON))*1000;           %
Energía que almacenan las baterías [Wh]

fprintf(' Energía que se necesita almacenar ');

disp(EnergiaALmacenadaBAT);

```

COEFICIENTES DE ROZAMIENTO SEGÚN EL PAVIMENTO DEL CIRCUITO:

NATURALEZA DEL SUELO	COEFICIENTE DE RODADURA (C_r)
Carretera de cemento	0,0125
Empedrado seco	0,015
Asfalto	0,02-0,03
Terreno natural duro	0,08
Terreno de consistencia media	0,11
Terreno arenoso	0,15-0,30

Tabla 34. Valores de coeficientes de rozamiento

COEFICIENTE AERODINÁMICO SEGÚN LA FORMA DEL VEHÍCULO:

A continuación hay dos figuras donde confirman el valor del coeficiente aerodinámico de un kart. En la Figura 49 se indica el C_x según sea la forma del objeto. En la figura 50 es una parte del diseño de un vehículo tipo kart.










Shape	Drag Coefficient
Sphere → 	0.47
Half-sphere → 	0.42
Cone → 	0.50
Cube → 	1.05
Angled Cube → 	0.80
Long Cylinder → 	0.82
Short Cylinder → 	1.15
Streamlined Body → 	0.04
Streamlined Half-body → 	0.09

Figura 49. Coeficiente aerodinámico según la forma

DISEÑO DE UN VEHÍCULO TIPO KART **DAVID OCHOA GREGORIO**

La resistencia aerodinámica viene dada por la expresión:

Ec. 8.7.

$$R_a = \frac{1}{9.81} \cdot \frac{\rho_{aire}}{2} \cdot C_x \cdot S \cdot V^2$$

Donde:

- R_a = Resistencia aerodinámica en [kgf]
- ρ_{aire} = Densidad del aire en [kg/m³]
- C_x = coeficiente aerodinámico
- S = Superficie efectiva frontal del vehículo piloto incluido en [m²]
- V = velocidad del vehículo en [m/s]

El valor de la densidad del aire en condiciones estándar (1 bar y 298,15K) es de **1,168 Kg/m³**. Para el C_x , los valores se acotan entre 0,75 y 0,80. Por tanto se toma $C_x = 0,775$. La superficie efectiva tendrá en cuenta la proyección frontal del vehículo ponderada por un factor = 0,8.

Figura 50. Coeficiente aerodinámico de un kart

Curiosidad: No en todos los ámbitos se busca una resistencia aerodinámica mínima. Por ejemplo en los fórmula 1 esta resistencia aerodinámica va unida al efecto suelo. La sustentación negativa (fuerza hacia el suelo) hace que el vehículo consiga un mayor agarre en las curvas y pueda tomarlas a gran velocidad.

DENSIDAD DEL AIRE

Como el circuito está a 912 m de altitud, la densidad del aire escogida es de 1,11 kg/m³

Altitud (metros)	Valores de la densidad del aire ambiente		
	Mínimo (kg/m ³)	Promedio (kg/m ³)	Máximo (kg/m ³)
0	1,1405	1,2254	1,3167
305	1,1101	1,1886	1,2735
610	1,0812	1,1533	1,2302
914	1,0524	1,1197	1,2222
1000	1,0444	1,1101	1,1902
1219	1,0252	1,0861	1,1501
1524	0,9996	1,0556	1,1133
1829	0,9739	1,0236	1,0764
2000	0,9595	1,0076	1,0572
2134	0,9483	0,9931	1,0412
2438	0,9243	0,9643	1,0060
2743	0,8986	0,9355	0,9723
3000	0,8794	0,9115	0,9467
3048	0,8762	0,9082	0,9419

Tabla 35. Tabla de las densidades del aire según la altitud

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

KART



Figura 51. Kart de pruebas (vista frontal)



Figura 52. Kart de pruebas (vista lateral)



Figura 53. Kart de pruebas (vista trasera)



Figura 54. Calentando motor con el piloto y su mecánico

CARACTERÍSTICAS	MAGNITUD
Masa total (kart + piloto)	159,6 kg
C_r	0,02
g	9,81 m/s ²
Área frontal enfrentada al aire	1,35 m x 0,75 m = 1,0125 m ²
C_x	0,8
Radio de la rueda trasera	0,13 metros
Relación de transmisión (rueda/motor)	$G = 77/11 = 7$
Tipo de motor	IAME PARILLA X30
Potencia	30 cv
Cilindrada	125 cc
r.p.m. máximas del motor	16.000 r.p.m.
Refrigeración	Agua
Litros del depósito de gasolina	8 litros
Densidad de la gasolina	680 kg/m ³

Tabla 36 Características del kart de pruebas

CIRCUITO DE KARTING

La siguiente imagen es una fotografía en planta del circuito de karts donde se han realizado las pruebas con el kart de gasolina de 2T.



Figura 55. Circuito donde se han realizado las pruebas para hallar las prestaciones del kart de gasolina

CARACTERÍSTICAS	MAGNITUD
Localización	Santos de la Humosa (Madrid)
Longitud del circuito	1.100 metros
Ancho de vía	8 metros
Altitud	912 metros
Número de curvas	8 curvas
Pendiente recorrida en el circuito	$\alpha = 0^\circ$
Velocidades del viento	$V_{\text{viento}} = 0 \text{ m/s}$
Densidad del viento	$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$
Velocidad máxima alcanzada en pruebas	$110,952 \text{ km/h} = 30,82 \text{ m/s}$
Aceleración máxima alcanzada en pruebas	$3,52 \text{ m/s}^2$
Desaceleración máxima alcanzada en pruebas	$-16,45 \text{ m/s}^2$
Número de vueltas en la clasificación	9 vueltas = 9.900 m
Número de vueltas que da un kart de alquiler (una ronda)	7 vueltas = 7.700 m
Vueltas con el depósito lleno	25 vueltas = 27.500 m

Tabla 37. Características del circuito



Figura 56. Kart de pruebas en pista

EXPLICACIÓN BREVE SOBRE EL SOFTWARE UTILIZADO:

Simulink es un entorno de programación visual de Matlab. Es una herramienta donde se utilizan diagramas de bloques para la simulación de modelos o sistemas. Con ayuda de Simulink y Matlab, se han realizado todos los cálculos necesarios para la obtención de las prestaciones del kart de gasolina. A partir de estas prestaciones podremos elegir los elementos eléctricos y electrónicos que formarán el nuevo kart eléctrico.

La simulación consiste en hallar todas las fuerzas ejercidas en el kart durante un ciclo de trabajo (vuelta más rápida) para poder determinar la energía consumida y las prestaciones que se necesitan para ese circuito en concreto.

El concepto sobre el movimiento de cualquier cuerpo debe recibir una fuerza impulsora que iguale y anule las fuerzas que se opongan al movimiento.

RELACIÓN DE TRANSMISIÓN

La relación de transmisión (r_t) es una relación entre las velocidades de rotación de dos engranajes conectados entre sí, donde uno de ellos ejerce fuerza sobre el otro. Esta relación se debe a la diferencia de diámetros de las dos ruedas, que implica una diferencia entre las velocidades de rotación de ambos ejes, esto se puede verificar mediante el concepto de velocidad angular.

Al cambiar la relación de transmisión se cambia el par de fuerza aplicado. La relación de transmisión debe elegirse cuidadosamente, de manera que el par del engranaje motor sea capaz de vencer la inercia del engranaje y otras fuerzas externas para comenzar el movimiento, y para que el engranaje sea capaz de soportar un par muy grande sin fallar.

COMPARACIÓN DE MASAS ENTRE KARTS

Fotos tomadas de la báscula del taller el día de la prueba. La figura 57 muestra la masa del kart y la figura 58 muestra la masa del kart más la masa del piloto.



Figura 57. Báscula con el kart



Figura 58. Báscula con el kart y el piloto

Una vez calculada la energía que necesita almacenar la batería, en este caso 3.051 Wh, para la autonomía de 22 km, se procede a calcular el número de celdas, de distintas capacidades, que se necesita para almacenar toda esa energía que necesitamos. Este cálculo se ha hecho para diferentes niveles de tensión (48V, 80V y 96V)

El cálculo se ha realizado en una hoja Excel, como se puede ver en la figura 59, y así poder comparar todos los resultados y elegir la mejor opción de celdas.

Inicialmente se ha necesitado obtener todas las características de cada tipo de celda para poder operar con ellos.

Para empezar a construir la tabla hay que saber cuántas celdas se necesitan en serie para llegar a los niveles de tensión que se requiere.

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
Energía Almacenada [Wh]		3051													
	Tensión Celda [V]														
	Vcelda	3.2													
	Vpack96	36													
	Vpack80	80													
	Vpack48	48													
	Capacidad [Ah]	Descarga Max [nC]													
	Icelda8	8	20												
	Icelda10	10	10												
	Icelda12	12	10												
	Icelda15	15	10												
	Masa [kg]														
	Peso8	0.3													
	Peso10	0.35													
	Peso12	0.4													
	Peso15	0.48													
	Precio [€]														
	Coste8	15.41													
	Coste10	14.48													
	Coste12	17.28													
	Coste15	21.77													
	Volumen [l]	Area [l]	altura [l]	diámetro [l]											
	Volumen8	47.78362426	133	33											
	Volumen10	47.78362426	133	33											
	Volumen12	47.78362426	146	33											
	Volumen15	55.41769441	166	42											

BATERÍAS									
Tensión [V]	Capacidad [Ah]	Nº de celdas en serie	Nº de packs en paralelo	Packs completos	Capacidad total [Ah]	Corriente de descarga Max [A]	Total nº celdas	Coste [€]	Peso [kg]
48	8	15	7.95	8	64	1280	120	1849.2	36.00
	10	15	6.36	7	70	700	105	1520.4	36.75
	12	15	5.30	6	72	720	90	1555.2	36.00
	15	15	4.24	5	75	750	75	1632.8	36.00
80	8	25	4.77	5	40	800	125	1826.3	37.50
	10	25	3.81	4	40	400	100	1448.0	35.00
	12	25	3.38	4	48	480	100	1728.0	40.00
	15	25	2.54	3	45	450	75	1632.8	36.00
96	8	30	3.97	4	32	640	120	1849.2	36.00
	10	30	3.38	4	40	400	120	1737.6	42.00
	12	30	2.85	3	36	360	90	1555.2	36.00
	15	30	2.12	3	45	450	90	1559.3	43.20

Figura 59. Hoja de cálculo para operar con datos de celdas LiFePo4

CARACTERÍSTICAS DEL CONTROLADOR**Specification**

- Single and dual motor traction
- Pump controllers
- Maximum current: 140 - 600Arms
- Nominal voltage range: 24/48V & 72/96V
- 120V on request
- Operating temperature from -30 to +85°C
- CAN Open compatible
- RS232 Communication on request
- Flash firmware
- Hidden hand held calibrator connector
- Industry standard 35 way AMP Seal connector
- Protection rating IP65
- State of the art high efficiency MOSFET based, switching at 16kHz
- IMS power boards

Features


- Speed and torque control mode
- AC auto tuning (on vehicle)
- Hill hold
- Software selectable input polarity
- 3 Analogue inputs
 - 1 Dedicated accelerator i/p with full wire off protection & redundancy feature
- 7 Digital inputs
- 1 Proportional output 2.5A
- 2 Contactor outputs 2.5A
- 1 Digital output – low current
- 1 Analogue KTY84 motor thermal sensor input
- Driver short circuit protected
- Integral CAN termination options
- Integrated power fuse

Specific PMS Features

- Flexible motor sensor support
- 8 or 12 bit absolute position sensors
- 2 Analogue Sin/Cos inputs
- 3 Hall sensors
- Resolver optional
- Automated sensor adjustment
- Field weakening

Setup methods

- PC programmer
- Hand held calibrator
- Conditional access



DMC
Digital Motor Control

SuperSigma2 Controllers for AC & PMS motors

- Nominal voltage: 24/48V or 60/96V – 120V optional
- Maximum current: 140Arms - 600Arms for 2 minutes
- Auto tuning (AC) & auto motor sensor setup
- Protection rating: IP65, AMP SEAL Connector
- CAN Open compatible
- Parameter setup via PC or hand held calibrator
- Motor sensor inputs: Hall-, absolute position- and Incremental.
- Customer specific hard- and software development on request

Model	Size 1 (S)	Size 2 (M)	Size 3 (M+)	Size 4 (L)
24/48V	250Arms	450Arms	600Arms	-
60/96V	140Arms	270Arms	450Arms	600Arms
Size (mm)	160x200x72	200x200x72	250x200x72	320x200x72

CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO DE CONTROL



Alimentado por una batería de 12V y una capacidad de 7Ah. Se encarga de alimentar al convertidor, al microcontrolador y a las entradas del convertidor (acelerador y freno).

CARACTERÍSTICAS DEL CARGADOR

Technical Data		Protection Function	
AC Input Voltage Range	AC90V~AC265V	Input Over-voltage Protection	AC270±5V
AC Input Frequency	45~65 Hz	Input Under-voltage Protection	AC85±5V
AC Power Factor	≥0.98	Output Over-voltage Protection	Stop the output when exceeds +1% of the maximum output voltage
Full Load Efficiency	≥93%	Output Under-voltage Protection	Stop the output when below -5% of the minimum output voltage
Mechanical Shock &	Conformance to	Output Over-current Protection	Stop the output when exceeds +1% of the maximum output current
Vibration Resistance Level	10 — 25Hz Amplitude 1.2mm, 25 — 500Hz 30m/s ² , 8hrs per direction	Over-temperature Protection	Power down from 85°C and turn off at 90°C
Environmental Enclosure	IP67	Short-circuit Protection	Stop Output
Operating Temperature	-35°C~+85°C	Battery Reverse Connect Protection	Fuse Burn-out
Storage Temperature	-55°C~+100°C	Ground Protection	≤100mΩ
Mechanical Dimensions(mm)	239(L)*135(W)*125(H)	CAN communication Protection	Automatically stop the output when CAN communication fails
Net Weight	6.4kg	Power-off Protection	Yes

FINAL DEL DOCUMENTO