

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Aeroespacial



Gestión del sistema eléctrico de un monoplaza.

Autor: Francisco Jesús Matas Díaz

Tutor: Alejandro Marano Marcolini

Dep. de Ingeniería eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Sistema de potencia eléctrica de un monoplaza de competición

Autor:

Francisco Jesús Matas Díaz

Tutor:

Alejandro Marano Marcolini

Profesor contratado doctor

Dep. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Sistema de potencia eléctrica de un monoplaza de competición

Autor: Francisco Jesús Matas Díaz

Tutor: Alejandro Marano Marcolini

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia
A mis seres queridos.

Agradecimientos

Este trabajo nunca hubiera sido posible si no fuera por los grandes compañeros con los que he podido trabajar esta temporada, todos los miembros del equipo ARUS y especialmente al equipo de Electrónica. También quisiera hacer una mención especial a mi pueblo, Herrera, por el gran interés que mostraron cuando fuimos y que, como herrereño, supuso una gran motivación. A toda mi familia y amigos, que siempre estuvieron ahí para darme una sonrisa y una palmada en la espalda que me permitían seguir adelante. También agradecer a mis compañeros de trabajo, quienes me escuchaban y ayudaban cada vez que lo necesitaba.

Principalmente, a quien más sin duda le debo es a mis padres, quienes siempre han estado ahí, con palabras de aliento en los momentos más difíciles, y sonriendo aún más que yo en los mejores momentos. Sin duda, su contribución ha sido muchísimo más importante para el desarrollo de este proyecto que los libros más prestigiosos de electricidad y electrónica que haya podido consultar.

Francisco Jesús Matas Díaz

Diseñador electrónico en ARUS Andalucía Racing Team.

Sevilla, 2016

Resumen

En el presente documento se detalla el diseño del sistema de potencia eléctrica de un monoplaça de competición. Atendiendo a los requisitos impuestos por el equipo y a la normativa de la competición *FSGermany 2016*, se han evaluado las posibles alternativas de diseño y se ha realizado un proyecto de detalle de la opción más viable, incluyendo tanto el almacenamiento de energía eléctrica como los sistemas de control y seguridad.

En primer lugar se analizarán las condiciones iniciales exigidas por el equipo, evaluando las posibles consecuencias de éstas en el sistema o en la forma de abordar los diseños. Además, se realizará un análisis detallado del apartado de normativa que rige en la competición correspondiente a electrónica y electricidad.

Una vez planteada la situación y conocidos todos los detalles, se procederá a realizar una investigación inicial del estado del arte, enfocándose sobretodo en el automovilismo. Se verán las alternativas viables y se decidirá por cual optar.

Tras elegir la más óptima, se expondrán los resultados de los distintos ensayos llevados a cabo con el fin de conocer con detalle todos los factores condicionantes y poder así realizar un diseño más preciso.

Teniendo ya todos los datos necesarios sobre el comportamiento interno del monoplaça, se expondrá el proyecto de detalle, los planos y esquemas, y el presupuesto final.

Abstract

This document details the design of the electric power system of a racing car. Based on team requirements and FSGermany 2016 competition rules, different design alternatives have been evaluated and a detailed project of the best option has been done, including control and safety systems as well as electrical energy storage.

At first, all initial conditions required by the team will be analysed, evaluating possible consequences on the system or designs. Furthermore, competition rules concerning electricity and electronics will be exhaustively analysed.

After setting out the situation and details, an initial research of the state of the art will be carried out, focusing on motor racing. Different options will be evaluated and finally the best will be chosen. The results of different tests will determine in good measure the option selected.

Finally, the designs of the system will be described in detail and schematics and a final budget will conclude the document.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Distintas pruebas de la competición FSAE.	2
Tabla 2: Resumen de la comparación entre MOSFET, IGBT y Tiristor.	13
Tabla 3: Resumen de resultados de las pruebas de consumo de los componentes del monoplaza	17
Tabla 4: Características principales de los supercondensadores KEMET	12
Tabla 5: Especificaciones del ATmega 328-P	18
Tabla 6: Registro emitido por el EPMS	19
Tabla 7: Parámetros de las pistas de potencia.	25

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 1: Ciclos de vida en función de la profundidad de descarga media.	6
Ilustración 2: Caída de tensión máxima de celda para distintos regímenes de descarga.	6
Ilustración 3: Imagen de la batería de un Toyota Prius.	7
Ilustración 4: Curva de descarga de una batería de Ión-Litio.	8
Ilustración 5: Tensión y capacidad de las celdas a distintas temperaturas.	8
Ilustración 6: Batería de Ión-Litio del Boeing 787 calcinada tras un mal funcionamiento.	9
Ilustración 7: Plaquetas de tecnología Lipo.	9
Ilustración 8: Diferentes celdas de tecnología LiFePO4. Las más eficientes en cuanto a capacidad son las plaquetas.	10
Ilustración 9: Ejemplos de arrays de supercondensadores como módulos de arranque de motores eléctricos.	11
Ilustración 10: Los microcontroladores de los módulos Arduino son fabricados para aplicaciones didácticas o caseras, sin embargo Atmel fabrica los mismos microcontroladores adaptados para automovilismo, con estrictos certificados de seguridad.	14
Ilustración 11: Resultados de un test de funcionamiento del ventilador de la refrigeración.	15
Ilustración 12: Resultados de la prueba del Paddle.	16
Ilustración 13: Esquema del actuador electromecánico.	16
Ilustración 14: Imagen de un Supercondensador Kemet y dimensiones.	12
Ilustración 15: Características principales de la batería ETX1200.	13
Ilustración 16: Batería ETX1200.	13
Ilustración 17: Transistores N-MOS y P-MOS.	15
Ilustración 18: Transistor N-MOS colocado de formas distintas. Hay que evitar que caiga elevada tensión en el transistor.	16
Ilustración 19: P-MOS funcionando a nivel alto y bajo.	17
Ilustración 20: Celda básica de funcionamiento del sistema.	17
Ilustración 21: ATMega 328-P Automotive	18
Ilustración 22: Sensor ACS712.	20
Ilustración 23: Imágenes de un cable apantallado con aplicaciones militares y un ejemplo de caja blindada.	21
Ilustración 24: Distribución general de la PCB.	22
Ilustración 25: Distribución de la zona de potencia.	22
Ilustración 26: Distribución de la zona de señal.	23

Ilustración 27: Configuraciones a 4 capas más comunes. Opción A (izq) y B (der).	23
Ilustración 28: Tomas de la batería.	24
Ilustración 29: Las perturbaciones de corriente generan emisiones conducidas y radiadas que afectan al sistema. La franja sin cobre de separación hace que no sigan su camino natural, sino que se fuerzan a retornar a la fuente.	24
Ilustración 30: Las ferritas delimitan las dos áreas restringidas para los microcontroladores y su electrónica asociada. Las líneas discontinuas marcan la zona sin cobre.	25

Notación

<	Menor o igual
>	Mayor o igual
XXC	Descarga máxima de XX veces la capacidad.

1 Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
Índice de Conceptos	22
Glosario	25
2 Requisitos y normativa	1
3 Estudios previos	5
3.1 <i>Batería: alternativas y viabilidad.</i>	5
3.1.1 Tecnología de <i>Pb-ácido</i> .	6
3.1.2 Tecnología de Níquel.	7
3.1.3 Tecnología de Litio.	7
3.1.4 Otras tecnologías.	10
3.1.5 Supercondensadores.	11
3.2 <i>Sistema de control. Alternativas y viabilidad.</i>	11
3.2.1 Dispositivos semiconductores y electrónica de potencia.	12
3.2.2 Microcontrolador.	13
4 Ensayos y mediciones	15
4.1 Ensayos de potencia y consumo.	15
4.2 Ensayos de temperatura	18
5 Proyecto de detalle	11
5.1 <i>Batería y supercondensadores</i>	11
5.1.1 Supercondensadores	11
5.1.2 Elección de la batería.	13
5.2 <i>PCB.</i>	14
5.2.1 Descripción del funcionamiento básico	14
5.2.2 Celda básica de control.	15
5.2.3 Microcontrolador.	18
5.2.4 Comunicación CAN bus con el sistema general.	19
5.2.5 Sensorización.	20
5.2.6 Protección EMC y blindaje a EMI.	20
5.2.7 Programación y código.	26
6 Presupuesto.	29
7 Esquemático y <i>Layout</i>	31
7.1 Esquemático.	31
7.2 <i>Layout.</i>	34
8 Conclusiones	35

Referencias	37
Bibliografía.	39
Anexo I: Normativa <i>FSAE</i>.	41
Anexo II: Código.	43

ÍNDICE DE CONCEPTOS

Alternador (motor): máquina eléctrica rotativa que transforma parte de la energía mecánica del cigüeñal en energía eléctrica. Consiste en un núcleo magnético en el extremo del cigüeñal girando en el interior de un estátor bobinado de cobre.

Kill-switch: interruptor general que abre o cierra la conexión de todo el sistema al generador o dispositivo de almacenamiento de energía.

Interruptor rotativo: modelo de interruptor que se acciona girándolo un cierto ángulo. Pueden tener varias posiciones.

Interruptor *push/pull*: modelo de interruptor que conserva la posición tras ser accionado. Mientras que el botón esté hacia afuera el circuito permanece cerrado. Cuando se presiona se abre el circuito y permanece pulsado.

Cockpit: zona del coche situada entre la zona del piloto y el motor, separada de éstos por aislantes térmicos y un *firewall*. En este espacio se sitúan la batería, la electrónica general y el depósito de combustible, entre otros.

Chasis: Estructura interna del monoplace la cual se encarga de aportarle rigidez y forma al vehículo. Consta de un armazón que integra entre sí y sujeta tanto los componentes mecánicos como el grupo motopropulsor y la suspensión de las ruedas.

Marine-type: son requisitos mandatorios para asegurar que los navíos y todo su equipamiento cumplen todas las normas de seguridad y estándares internacionales.

Firewall: pared de material rígido y aislante térmico que protege al piloto en caso de fallos eléctricos o combustión de cualquier dispositivo.

Motor de arranque: parte del grupo motopropulsor que consiste en un pequeño motor eléctrico que se encarga de revolucionar lo suficiente al cigüeñal en el arranque para poder iniciar la combustión en el motor.

Efecto memoria: El efecto memoria es un fenómeno que reduce la capacidad de las baterías cuando se recargan de forma incompleta. Las reacciones químicas internas no se realizan correctamente y parte de los reactivos queda neutralizado o aislado.

Colectores: entramado de tubos que convergen al conducto de escape del vehículo y por los que se expulsan los gases resultantes de la combustión.

Electrolito: sustancia que contiene iones orbitando libres, que le proporciona buena conductividad eléctrica. Generalmente son soluciones iónicas, aunque también pueden encontrarse fundido o sólido.

ECU: *Engine Control Unit* o Unidad de Control del Motor es la unidad electrónica que controla varios aspectos de la combustión interna del motor, como la inyección de combustión, o la activación del circuito de refrigeración.

Unidad maestra/esclava: la unidad maestra es aquel dispositivo cuyo funcionamiento prima sobre el resto (esclavos). Generalmente tiene la capacidad de desactivar las unidades esclavas si se es requerido.

Ruido de señal: anomalías o perturbaciones en el nivel de tensión o corriente de una señal de datos que puede producir errores en la información transmitida.

PCB: *Printed Circuit Board*. Circuito impreso en una superficie constituida por pistas o buses de material conductor laminado (cobre) sobre una base no conductora (resinas de fibra de vidrio reforzadas).

Transistor BJT: transistor de unión bipolar.

Transistor MOSFET: transistor de efecto campo de metal-óxido-semiconductor.

Dispositivo semiconductor: elemento que se comporta como un conductor o como un aislante dependiendo de diversos factores, como por ejemplo el campo eléctrico o magnético, la presión, la radiación que le incide, o la temperatura del ambiente en el que se encuentre.

Corriente de fuga: circulación de corriente a través del material aislante que rodea a un conductor o dispositivo electrónico.

Chopper: interruptor electrónico que se utiliza para interrumpir una señal bajo el control de otra. Generalmente el nombre suele ir acompañado de una nomenclatura que hace referencia al tipo de señal sobre la que actúa.

Inversor: dispositivo que transforma una corriente continua en alterna.

Transistor de efecto campo: transistor que se basa en el campo eléctrico para controlar la forma y, por lo tanto, la conductividad de un canal que transporta un solo tipo de portador de carga, hecho de un material semiconductor, por lo que también suele ser conocido como transistor unipolar.

Transistor bipolar: La denominación de bipolar se debe a que la conducción tiene lugar gracias al desplazamiento de portadores de dos polaridades (huecos positivos y electrones negativos), y son de gran utilidad en gran número de aplicaciones; pero tienen ciertos inconvenientes, entre ellos su impedancia de entrada bastante baja.

Multiplexación: combinación de dos o más canales de información en un solo medio de transmisión permitiendo varias comunicaciones de forma simultánea.

Resistencia de pull-up / pull-down: resistencias que se usan para establecer un determinado valor lógico en un punto del circuito. Se emplean resistencias de alta impedancia conectadas por un extremo al nodo del circuito y por el otro a tierra o a VCC, dependiendo del caso.

Inyectores: elementos del sistema de inyección de combustible cuya función es introducir una determinada cantidad de combustible en la cámara de combustión en forma pulverizada, distribuyéndolo lo más homogéneamente posible dentro del aire contenido en la cámara.

Bujías: elementos que producen el encendido de la mezcla de combustible y oxígeno en los cilindros, mediante una chispa, en un motor de combustión interna.

Paddle Shifter: elemento que controla y ejecuta el cambio de marchas.

Datalogger: dispositivo registrador de datos.

Sistema flotante: subcircuito cuya referencia a tierra es diferente a la tierra global del sistema completo, es decir, entre GND flotante y GND principal existe una diferencia de tensión.

Variable flag: tipo de variable cuyo cambio provoca el inicio de un evento.

EEPROM: *Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory* (ROM programable y borrrable eléctricamente). Es un tipo de memoria ROM (no volátil) que puede ser programada, borrada y reprogramada eléctricamente, a diferencia de la EPROM que ha de borrarse mediante un aparato que emite rayos ultravioleta.

Señal discreta: señal cuyo valor no cambia de forma continua y progresiva con el tiempo, sino que lo hace cada cierto período determinado de tiempo.

BMS: *Battery Management System*. Sistema electrónico que gestiona una batería recargable, por ejemplo, mediante la protección de la batería para no operar fuera de su área de operación segura, el seguimiento de su estado, el cálculo de los datos secundarios, informar de esos datos, el control de su entorno, la autenticación y el equilibrio de la misma.

Efecto Hall: aparición de un campo eléctrico por separación de cargas, en el interior de un conductor por el que circula una corriente en presencia de un campo magnético con componente perpendicular al movimiento de las cargas.

Puente H: configuración de transistores muy utilizada para el control de motores con giro de doble sentido.

Cristal externo: cristal de cuarzo que proporciona al microcontrolador una señal de reloj más precisa que la del reloj interno de éste.

GLOSARIO

ISO: International Organization for Standardization	4
UNE: Una Norma Española	4
ECU: Engine Control Unit	33
PCB: Printed Circuit Board	33
EPMS: Electric Power Management System	33
DAQ: Data Acquisition.	33
EMC: ElectroMagnetic Compatibility	33
EMI: ElectroMagnetic Interferences	33
SC: Supercondensadores	33
VCC: Power Supply	33
GND: Ground	33
ASTM: American Society for Testing and Materials	33

2 REQUISITOS Y NORMATIVA

No basta con tener buen ingenio, lo principal es aplicarlo bien.

- René Descartes -

La *Formula Student*, también conocida como Formula SAE, es una competición entre estudiantes de universidades de todo el mundo que promueve la excelencia en ingeniería a través de una competición donde los miembros del equipo diseñan, construyen, desarrollan y compiten un pequeño pero potente monoplace.

La primera competición empezó a gestarse en 1979 cuando Mark Marshek, docente de la Universidad de Houston, contactara con el Departamento de Relaciones Educativas de la SAE un año antes. El concepto original era una evolución de la BAJA SAE, sin embargo, esta competición limitaba mucho la libertad (motor proporcionado por la organización sin posibilidad de modificarlo) y la nueva competición debía darles mayor margen para diseñar el monoplace.

Así se llega a 1981, año en que se organiza en la Universidad de Texas en Austin la primera edición de la Formula SAE. Participan 6 equipos y un total de 40 alumnos. Esta competición ha ido creciendo y desde 1998 también se celebra en Warwickshire una edición británica conocida como Formula Student. Aquel año participaron 4 equipos y 40 alumnos.

Actualmente se celebran competiciones en numerosos países como Alemania, Japón, Brasil, Australia, etc. Todas ellas utilizan la misma normativa base original de la Formula SAE y llegan a albergar hasta 120 equipos y más de 2.000 estudiantes. Los resultados de las competiciones son recogidos y puntúan en el ranking mundial.

El objeto de la competición es simular una situación real en la cual una empresa de competición contrata a estos ingenieros para desarrollar un prototipo. Los compradores hipotéticos serían corredores amateur. El coche debe por ello satisfacer unas prestaciones elevadas en aceleración, frenada, y estabilidad, pero también debe ser fácil de mantener, barato, y fiable. Otros factores como la estética y el confort se valoran igualmente. El precio máximo para el vehículo es de 21.000 euros y la victoria es para el equipo que mejor logre superar todos estos requisitos. Las pruebas se pueden clasificar en eventos estáticos y dinámicos.

Eventos estáticos	Puntuación	Eventos dinámicos	Puntuación
Diseño	150	<i>Skidpad</i>	75
Análisis de coste	100	Aceleración	75
Plan de negocio	75	Autocross	100
-	-	<i>Endurance</i>	325
-	-	Consumo	100

Tabla 1: Distintas pruebas de la competición FSAE.

El equipo ARUS *Andalucía Racing Team* es un equipo muy joven en la competición, sin embargo sigue una trayectoria espléndida. Con ya dos monoplazas diseñados y fabricados, y varias competiciones en Hockenheim (Alemania), y Montmeló (Barcelona) con resultados a cada cual más prometedor, se parte de la base y experiencia de los diseños anteriores y se mejoran o modifican según el caso. El sistema de potencia eléctrica es probablemente el que más se desea cambiar. Por este motivo debe ser rediseñado completamente desde cero, con unos requisitos más ambiciosos impuestos por el equipo y sujeto a una normativa realmente restrictiva como es la de la *FSAE*.

El equipo está organizado en distintos departamentos, coordinados por el Director Técnico, y el *Team Manager*. Los departamentos que lo forman son Aerodinámica, Chasis, Suspensión, Motor, Interior Electrónica y Organización y Marketing. En concreto, yo formo parte del Departamento de Electrónica, y mi labor consiste en el diseño del sistema de potencia eléctrica, incluyendo batería y electrónica de potencia.

1. Requisitos del equipo.

- Se desinstalará el alternador del motor:* con el objetivo de ganar potencia mecánica y reducir drásticamente el peso se opta por eliminar el alternador, por lo que no habrá generación interna de energía en el sistema. El monoplaza deberá llevar almacenada suficiente energía eléctrica como para terminar la competición con cierto margen de seguridad.
- Dimensiones máximas:* El espacio dentro del monoplaza es reducido, por tanto, el tamaño de la batería (elemento más voluminoso) deberá ser menor de las dimensiones especificadas por el Departamento de Interior. Inicialmente serán de (190mm [de largo] x 90 mm [de ancho] x 190 mm [de alto]).
- Posicionamiento en el coche:* La batería se situará en la parte trasera, detrás del piloto, y en la zona inferior para así mantener lo más bajo posible el centro de gravedad. Ésta es una zona en la que la temperatura y la ventilación son factores a tener en cuenta a la hora de realizar los estudios previos.
- Reducción de peso:* El sistema completo debe suponer una pérdida de peso importante respecto al sistema del monoplaza anterior, de forma que sea mucho más rentable el eliminar el alternador. La batería es la que determina en este caso el peso prácticamente total del sistema, por lo que se deberá hacer un estudio exhaustivo para optimizarla lo máximo posible.
- Presupuesto:* El equipo destinará al Departamento de Electrónica una suma determinada de dinero (1000 €), por lo que el coste total será un factor limitante.

2. Normativa de la competición.

Las competiciones en las que el equipo ARUS participa son *FSAE Spain*, en Barcelona, y *FSAE Germany*, en Hockenheim. Ambas están sujetas a las normas generales de la Formula Student, sin embargo, la de Alemania sí tiene además reglas propias para su competición. Por tanto, habrá que basarse en las normas de la competición alemana.

- a) *Kill-switch*: el sistema debe poseer **dos** interruptores generales [1, p. IC4.1] que, actuando sobre ellos, permitan detener completamente el monoplaza. Uno *rotativo* primario, por el cual pase **toda** la corriente del coche y que permita aislar toda fuente o almacenamiento de energía del resto del coche [1, p. IC4.2]; y otro *push/pull* secundario, situado en el salpicadero, de forma que el piloto pueda detener el coche en caso de emergencia [1, p. IC4.3]. También especifica normas de montaje.
- b) *Baterías* [1, p. IC4.4]:
 - Deben estar sujetas con seguridad al chasis.
 - Toda batería de celda húmeda localizada en la zona del piloto debe estar aislada en una caja no conductora *marine-type*.
 - El borne positivo de la batería debe estar aislado.
 - Las baterías basadas en tecnología de Litio deben estar separadas del piloto por un *firewall*, deben tener una carcasa rígida y que retrase la combustión en caso de que se produzca, y la protección para sobrecorriente de las celdas debe ser del orden o menor que la descarga máxima de las mismas.
- c) *Brakeover-travelswitch*: en caso de rotura del pedal de frenos, debe haber un interruptor que automáticamente corte la corriente tanto al motor como a la bomba de combustible [1, p. IC4.5]
- d) *Voltaje máximo*: en cualquier parte del coche nunca se deberán superar los 60V DC o 24V AC, exceptuando bujías, inyectores o dentro de sistemas prefabricados (siempre que la salida sí sea menor de 60V) [1, p. IC4.6].

3 ESTUDIOS PREVIOS

El que ha comenzado bien está a la mitad de la obra

- Horacio -

El sistema eléctrico debe incluir un almacenamiento de energía eléctrica, un sistema de control y reparto de ésta hacia el resto de dispositivos y debe estar equipado con los elementos de seguridad apropiados. La disposición de sus elementos también puede jugar un factor clave para su diseño, pues puede suponer variaciones de peso y complejidad (cableado), problemas de temperatura o ventilación, suponer un peligro potencial para el piloto o para la integridad del monoplaza, etc.

3.1 Batería: alternativas y viabilidad.

El método más común para el almacenamiento de energía eléctrica son las baterías. Aunque hay otros sistemas como los supercondensadores (de los cuales se hablará más adelante), éstas son con diferencia las más usadas en automoción, principalmente debido a la cantidad de energía que pueden almacenar. En vehículos eléctricos, los cuales necesitan grandes cantidades de energía, se usan baterías. Éstos pueden ser, en primera instancia, una pista desde la que partir, pues al no tener alternador se necesitarán unas reservas importantes. Se estimará en un principio de unos 20-25 AH.

Sin embargo, la capacidad de almacenamiento no es el único factor a tener en cuenta. La relación capacidad/peso es crítico en el monoplaza. Asimismo, no todas las baterías tienen la misma capacidad de descarga, o trabajan bien a ciertos regímenes de temperatura. El tamaño de la batería también está restringido, y la normativa de la competición establece restricciones adicionales de seguridad para ciertos tipos de batería (*Litio*). Por supuesto, el coste también ha de tenerse en cuenta.

Los componentes del coche trabajan en un régimen de tensión máximos entre 10 y 15 voltios, siendo óptimo de 12-14 V. La tensión máxima de la batería no ha de exceder los 15 V, y cuando llegue al nivel de 10 V se ha de haber aprovechado la máxima energía posible, pues ya no funcionarían los distintos componentes, y si aún queda energía almacenada en la batería, pero no es capaz de ofrecer un nivel de tensión adecuado, ésta energía quedará totalmente desaprovechada.

Físicamente, una batería se distingue por la tecnología de acumulación que emplea, por la disposición interna de sus celdas y por los sistemas de protección que pueda llevar incorporados.

3.1.1 Tecnología de *Pb-ácido*.

Hasta hace no mucho, las baterías de *Pb-ácido* eran las más usadas en automoción, tanto a nivel civil como competitivo. Esto se debe principalmente a su bajo coste y fácil fabricación. Además proporcionan una gran fiabilidad y seguridad. Admiten corrientes de descarga suficientemente grandes (~200 A) y son muy fáciles de encontrar en el mercado.

Sus ciclos de vida útil dependen drásticamente de la profundidad de descarga. Teniendo en cuenta que el motor de arranque necesita del orden de 150 A, el número de ciclos disminuirá notoriamente. Sin embargo, esto se ve compensado por la baja frecuencia de uso a la que está destinada un coche de competición (no se usa diariamente, al contrario de los coches particulares) y a su reducido coste.

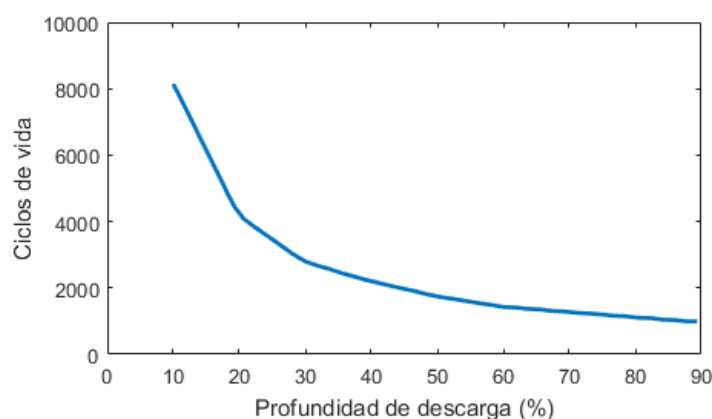


Ilustración 1: Ciclos de vida en función de la profundidad de descarga media.

El problema de este tipo de baterías es su peso. El plomo es un material muy pesado, por lo que para baterías muy grandes no son viables. Esto, sumado además a su baja densidad de energía (30 Wh/kg) [2], hace que el peso se dispare a medida que se requiera más capacidad. Ésta es la razón por la que no se usan en vehículos eléctricos [3]. Por ejemplo una batería de 12V 20 AH pesaría unos 8 kg.

Otro aspecto negativo de las baterías *Pb-ácido* es su régimen de descarga. A medida que se descargan, la tensión entre sus bornes disminuye progresivamente.

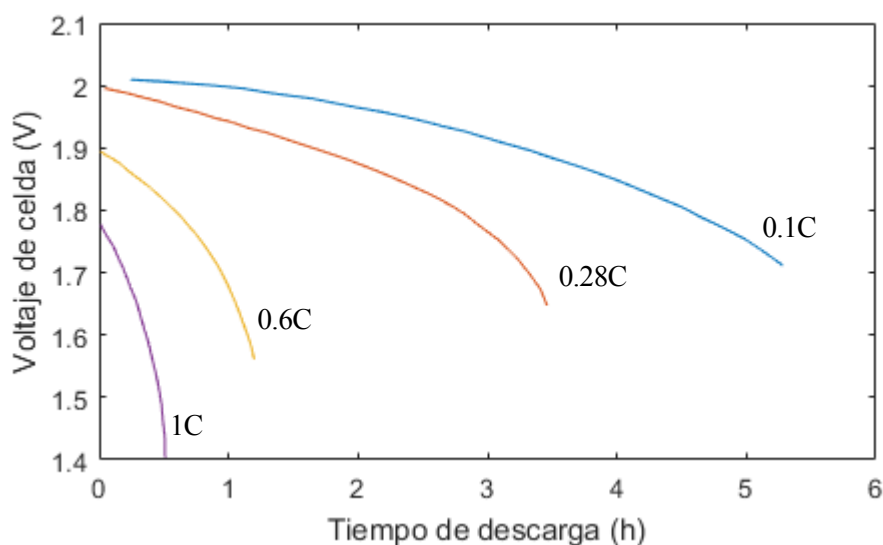


Ilustración 2: Caída de tensión máxima de celda para distintos regímenes de descarga.

Esto supone que la capacidad de energía que se puede aprovechar es mucho menor (del orden del 60% en algunas. Por último, son altamente contaminantes [2].

3.1.2 Tecnología de Níquel.

Dentro de este grupo se incluyen múltiples tipos de baterías, pero algunas al no ser usadas en automoción no se estudiarán en tanta profundidad. Por ejemplo, las baterías de Ni-Fe no pueden servir debido a la relación energía volumen tan pobre que proporcionan (30 Wh/l) y a su baja eficiencia, del orden del 65%. Se suelen usar en aplicaciones que requieran descargas o sobrecargas profundas, y que requieran una vida útil muy elevada. Las baterías de Ni-Cd también se descartan debido a su baja densidad de energía y a su susceptibilidad al *efecto memoria*.

Un caso aparte son las baterías de Ni-MH. Con una energía específica de hasta 120 Wh/kg, y una densidad específica de hasta 300 Wh/l, se han llegado a usar en vehículos de propulsión totalmente eléctrica, como el *General Motors EV1* [4, pp. 10-27, 106-109] o el *Honda EV Plus* [5], y en vehículos híbridos como el *Toyota Prius* [6] o el *Honda Insight* [3]. Sin embargo, su aplicación principal es para electrónica de consumo, y por tanto una batería que tenga las propiedades que se necesitan no se encuentra en el mercado. Además, las baterías de *Litio* están desplazando tanto a estas como a las de plomo.



Ilustración 3: Imagen de la batería de un Toyota Prius.

3.1.3 Tecnología de Litio.

Las baterías de Litio son relativamente jóvenes, y constituyen un buen almacenamiento de energía con un peso muy reducido, pues el elemento principal en el que se basan es uno de los más ligeros del planeta, y no un metal pesado como ocurría con sus predecesoras. Existen dentro de ellas diferentes tipos los cuales proporcionan distintas prestaciones. A saber:

a) Ión-Litio.

Son baterías muy ligeras y con una gran densidad de energía (entre 100-265 Wh/kg) [7]. Además son más resistentes al *efecto memoria* [8]. Estas baterías, al igual que sus hermanas, poseen una gran ventaja con respecto a las de Pb-ácido, y es la estabilidad de la tensión máxima en función del nivel de carga.

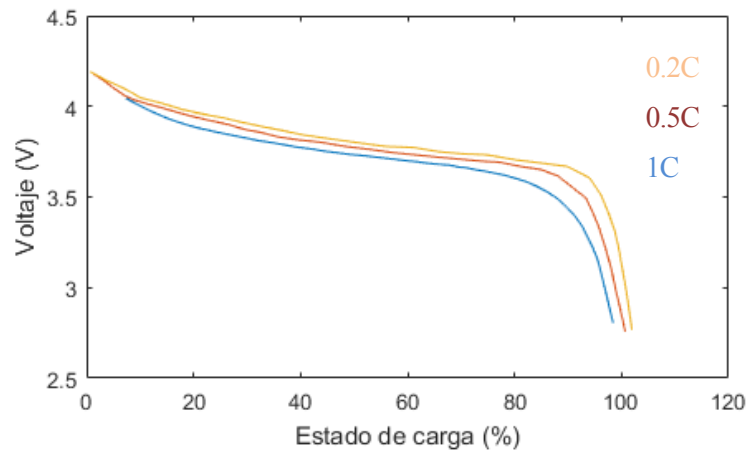


Ilustración 4: Curva de descarga de una batería de Ión-Litio.

Como se puede observar, el valor de tensión medio se mantiene prácticamente constante durante toda la descarga, hasta una caída abrupta cercana al 90% de descarga total. Esto permite que los receptores trabajen a su tensión de alimentación óptima durante todo el tiempo de funcionamiento del monoplaza, sin pérdidas de potencia o disminución de capacidad de trabajo.

Sin embargo, estas baterías no soportan bien los cambios de temperatura: la capacidad de aprovechamiento de la energía varía mucho con la temperatura de trabajo. Teniendo en cuenta la posible situación de la batería en un lugar cercano a focos de calor tales como los colectores, hacen que sea arriesgada su implementación incluso con un buen aislante térmico.

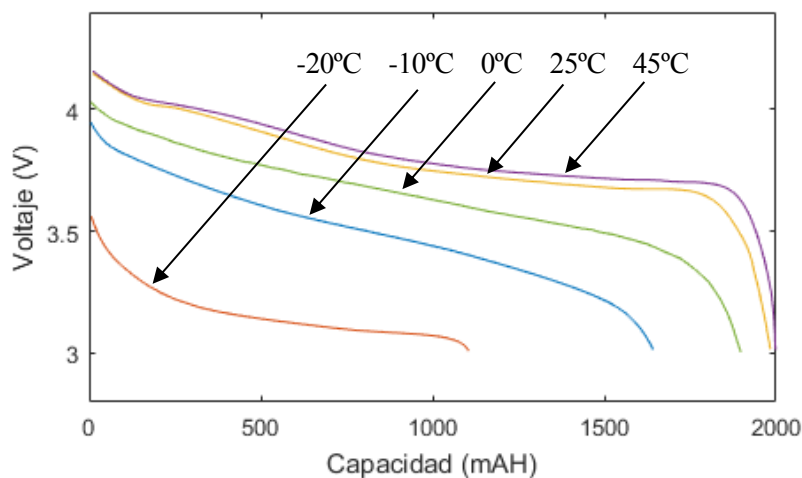


Ilustración 5: Tensión y capacidad de las celdas a distintas temperaturas.

Para aprovechar bien la capacidad de la batería hay que someterla a una temperatura de trabajo cercana a la zona de peligro, en torno a los 50-60°C. El principal problema no es un funcionamiento deficiente (que también), sino un peligro de seguridad grave. Estas baterías son extremadamente sensibles a golpes, vibraciones y temperatura. Son altamente inflamables, y desprenden gases tóxicos en la combustión. De ahí que requieran estrictos sistemas de seguridad y protección.

Finalmente no admiten corrientes de descarga demasiado elevadas. Someterlas a la demanda de corriente estimada del monoplaza con toda probabilidad desencadenaría la situación descrita anteriormente.

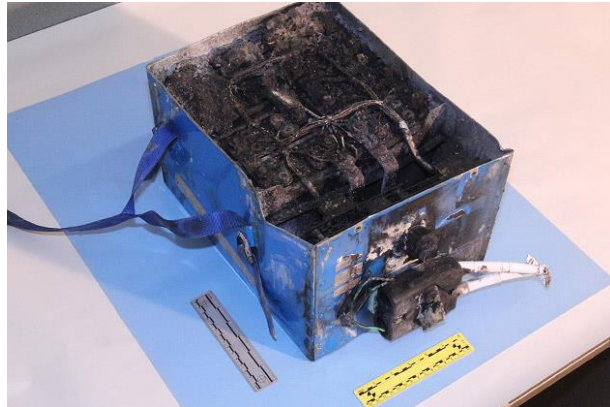


Ilustración 6: Batería de Ión-Litio del Boeing 787 calcinada tras un mal funcionamiento.

b) LiPo

El nombre corresponde a la abreviatura de *Lithium Polymer Battery*. Poseen características muy similares a las de Ión-Litio, pero admiten regímenes de descarga mayores. Aunque el nombre puede resultar confuso, emplean el mismo tipo de tecnología que las de Ión-Litio. La diferencia radica en la configuración interna de las celdas. En lugar de ser cilíndricas éstas son planchas o “plaquetas”, que permiten ahorrar un 20% de peso para la misma capacidad [9]. La carcasa que las contiene es plástica y razonablemente flexible, lo cual permite cierto grado de compresión para aplicaciones con un espacio reducido.

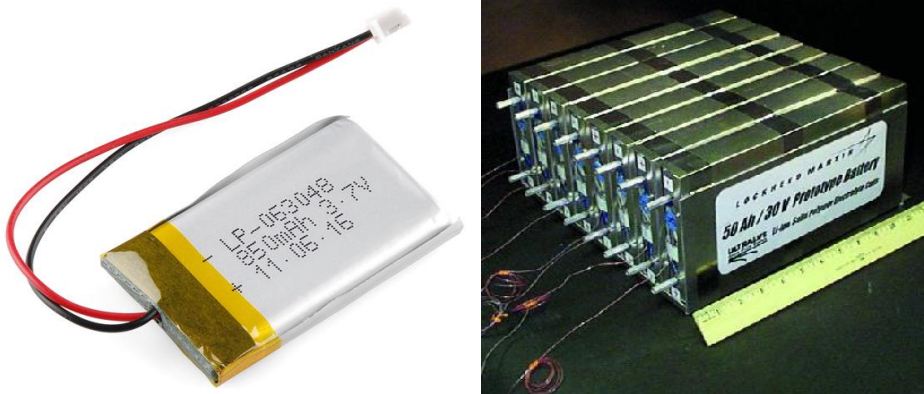


Ilustración 7: Plaquetas de tecnología Lipo.

Se emplean mucho en vehículos eléctricos. Normalmente se emplean varias plaquetas conectadas para conseguir los niveles requeridos de potencia y capacidad, aunque cada vez hay más plaquetas en el mercado con altas capacidades (algunas de hasta 50 AH).

Muchas empresas de automovilismo como *Hyundai* [10] o *Kia Motors* [11] lo emplean en sus vehículos eléctricos e híbridos. También se emplean en aeromodelismo, por ejemplo en el *AlisportSilent 2 Electro* [12] o el *PipistrelWATTsUP* [13].

Por desgracia, a pesar de que ofrecen un margen de descarga más amplio, tienen los mismos problemas de seguridad que las anteriores. Son muy sensibles a sobrecarga, descargas profundas, sobrecalentamientos, cortocircuitos, golpes, etc. Existen métodos de seguridad para evitar el fallo catastrófico del dispositivo, por lo que en caso de que no hubiera una opción más segura, sería una candidata factible.

c) LiFePO_4

Las baterías de litio-ferrofosfato son baterías de ión-litio con un cátodo de fosfato de hierro-litio. Con una relación capacidad/peso muy alta propia de las baterías de esta familia, aunque ligeramente menor que las otras dos, estas baterías destacan por su estabilidad, seguridad y durabilidad. Gracias a que se evita el riesgo de combustión son ampliamente usadas en aeronáutica y automoción.



Ilustración 8: Diferentes celdas de tecnología LiFePO_4 . Las más eficientes en cuanto a capacidad son las plaquetas.

Son baterías que no requieren ningún tipo de mantenimiento, y mantienen su potencia al 100% hasta su agotamiento. No contienen elementos acuosos ni materiales tóxicos.

Tienen una densidad de capacidad media de 130 Wh/kg, y las celdas pueden alcanzar un ratio de descarga de 30C. Pueden llegar hasta los 3000 ciclos de carga/descarga y son altamente resistentes al efecto memoria. Además funcionan bien a temperaturas relativamente elevadas, de hecho, a unos 60°C el rendimiento aumenta aproximadamente un 10% [14].

Sus numerosas ventajas hacen de estas baterías la mejor opción para el monoplaza.

3.1.4 Otras tecnologías.

Existen más tipos de baterías con distintos métodos de almacenamiento de energía, pero al estar en desarrollo aún no están perfeccionadas, o su exclusividad en el mercado hacen que su coste sea inasumible.

Una de ellas pertenece a la familia de las de Litio, y son las “verdaderas” *Lithium Polymer*. A diferencia de aquellas que comparten su nombre, sus celdas no están formadas por Ión-Litio, sino por un electrolito polimérico en lugar de líquido. Estas celdas serían delgadas y flexibles, pudiendo confeccionarse con distintas geometrías sin riesgo de pérdida de capacidad. Además serían totalmente seguras. Aún no han sido totalmente desarrolladas, y por lo tanto, comercializadas.

Las baterías más recientes son las de grafeno, finalmente desarrolladas aquí en España, con una relación capacidad/peso hasta 30 veces mejor que las de Litio, y mucho más compactas. Totalmente seguras y estables, y con capacidad de descargas profundas sin pérdida de ciclos de vida. Sin embargo el coste de estas baterías está al nivel de equipos profesionales de *Formula 1*.

3.1.5 Supercondensadores.

Son dispositivos electroquímicos capaces de sustentar una densidad de energía inusualmente alta en comparación con los condensadores normales, presentando una capacidad miles de veces mayor que la de los condensadores electrolíticos de alta capacidad. Algunos pueden llegar a los 5000 F, pero a partir de 500 F dejan de tener un tamaño aceptable para el monoplaza.

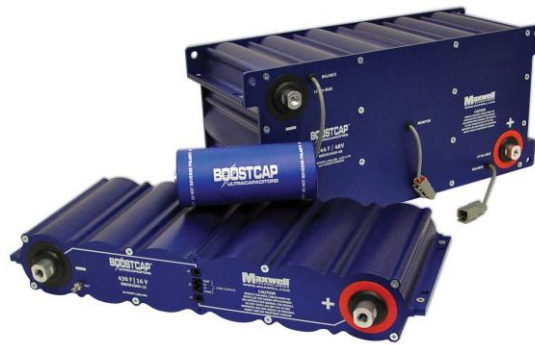


Ilustración 9: Ejemplos de arrays de supercondensadores como módulos de arranque de motores eléctricos.

Pueden admitir unos regímenes altísimos de descarga, en cambio la relación capacidad/volumen no es realmente factible. Sin embargo, una combinación de estos con una batería ligera puede ser muy buena opción: si para el arranque se usan supercondensadores, se puede reducir drásticamente la capacidad de descarga máxima necesaria de la batería, por lo que se abriría un gran abanico de nuevas posibilidades. Además reduciría complejidad del sistema de protección de la batería.

Según la norma IC4.4 las baterías que empleen tecnología de Litio deben tener una protección de sobredescarga del orden de la de las celdas [1, p. IC4.4]. Sin usar supercondensadores, para una batería de LiFePO_4 habría que instalarle un sistema de seguridad superior a los 200 A para poder arrancar, lo cual es muy complejo tanto hallarlo en el mercado como diseñarlo, suponiendo claro está que las celdas admitan tal nivel de descarga.

3.2 Sistema de control. Alternativas y viabilidad.

La siguiente parte a estudiar es el circuito de control. Consistirá en un circuito impreso, al cual llegarán dos entradas de la batería, señales del *cockpit* y señales de la ECU del motor, y el número de salidas dependerá de los componentes a alimentar.

En primer lugar se plantean dos opciones. ¿Se usará un circuito puramente eléctrico, o sería conveniente controlarlo con un microprocesador? ¿Qué ventajas proporciona cada una? La respuesta está clara: es considerablemente mejor utilizar lógica digital.

Un circuito totalmente eléctrico, sin microcontrolador (como puede ser un sistema de transistores MOSFET), las únicas ventajas que proporciona es la sencillez en el diseño y evitar fallos de funcionamiento debido a ruido en las señales. Para esto último existen técnicas y métodos para reducir notablemente sus efectos, así que en realidad, sólo tiene una ventaja.

Por otro lado, un sistema de electrónica de potencia controlado por un microprocesador ofrece infinidad de ventajas:

- Versatilidad en el diseño.
- Sensorización.
- Control preciso de lo que está ocurriendo en el circuito en todo momento.
- Cálculos internos de nivel de batería.

- Posibilidad de comunicación con el resto de PCBs.
- Posibilidad de aislamiento en caso de fallos.
- Funciones pre-programadas.
- Programación de protocolos de emergencia (conviene recordar que se está hablando de la unidad *maestra* en el coche, por lo que en caso de accidente o fallo de algún dispositivo de importancia es éste el que puede detenerlo o desconectar alguna parte).

Una vez decidido cual va a ser la estructura básica, se deben estudiar dos aspectos: qué elementos de electrónica de potencia, entre todos los que existen y la cantidad de combinaciones posibles que cumplen este funcionamiento, son los más adecuados, y qué microprocesador, entre todos los que hay en el mercado se puede elegir.

3.2.1 Dispositivos semiconductores y electrónica de potencia.

Básicamente, el funcionamiento de cada uno de estos elementos es el de un interruptor automático. Cuando el microcontrolador determine que es necesario cerrar uno de estos “interruptores”, mandará una señal que activará el dispositivo. Se usan multitud de elementos diferentes, sin embargo cada uno ofrece prestaciones específicas, o funcionan correctamente bajo ciertas condiciones. Se deberán evaluar las diferencias entre estos: transistores BJT, transistores MOSFET, tiristores, tiristores GTO, IGBTs y relés.

En cuanto a los transistores BJT o MOSFET, hay ciertas diferencias entre ellos:

- Los MOSFET:
 - Se controlan por tensión con una impedancia de entrada muy elevada ($10^7 - 10^{12}\Omega$).
 - Generan menos ruido.
 - Son más estables con la temperatura.
 - Se controlan como resistencias controlados por tensión para valores pequeños de tensión drenaje-fuente.
 - Pueden conmutar corrientes elevadas y manejan potencias mucho más altas.
 - Son más resistentes a la radiación.
 - Se pueden dañar debido a electricidad estática.
- Los BJT:
 - Son más lineales.
 - Tienen una mejor respuesta a alta frecuencia.
 - Tienen menor rendimiento, es decir, disipan más energía.

Por sus características no cabe duda que para esta aplicación los MOSFET son mucho mejores que los BJT [15].

Por otro lado, los tiristores son conmutadores biestables. Cierran el circuito al recibir un pulso momentáneo de corriente en su terminal de control, denominada puerta, cuando hay una caída de tensión positiva entre ánodo y cátodo. Sólo pueden ser apagados con la interrupción de la fuente de voltaje, abriendo el circuito, o bien haciendo pasar una corriente inversa por el dispositivo. Si se polariza de forma inversa, se producirá una corriente inversa de fuga que destruiría el tiristor.

Se suelen usar para grandes corrientes o voltajes, y también para controlar corriente alterna. En circuitos electrónicos se usan algunas veces también como interruptores magneto-térmicos. Por sus características y aplicaciones, se puede deducir que no es el dispositivo más adecuado [16].

El tiristor GTO (*Gate Turn-Off thyristor*) es prácticamente igual, pero permite apagarlo mediante una corriente negativa en la puerta. Se suelen usar en circuitos *chopper* e inversores, para niveles de potencia muy elevados en los que no se podría usar MOSFETs o IGBTs [16].

Los IGBTs (*Insulated Gate Bipolar Transistors*) son dispositivos semiconductores que generalmente se aplican como interruptores controlados en electrónica de potencia. Poseen las características de las señales de puerta de los transistores de efecto campo junto con la capacidad de alta corriente y bajo voltaje de saturación del transistor bipolar, mediante la combinación de una puerta aislada FET para la entrada de control y un transistor bipolar como interruptor en un solo dispositivo. El circuito de excitación del IGBT es como el del

MOSFET, mientras que las características de conducción son como las del BJT.

Ofrecen un buen funcionamiento para frecuencias de conmutación de hasta 100 kHz, y ha sustituido a los BJT en muchas aplicaciones. Se usa para altas y medias potencias como fuente conmutada y para control de tracción en motores. Los módulos IGBT pueden manejar corrientes de cientos de amperios y tensiones de hasta 6000 V, por ello se suele utilizar en alta tensión.

En resumen, los IGBT manejan más potencia que los MOSFETs, pero son más lentos, y manejan menos potencia que los tiristores, pero son más rápidos:

POTENCIA	MOSFET < IGBT < Tiristor
VELOCIDAD	Tiristor < IGBT < MOSFET

Tabla 2: Resumen de la comparación entre MOSFET, IGBT y Tiristor.

Para un nivel de potencia bajo como es el del sistema eléctrico de un monoplaza, los MOSFETs son más que suficientes, y además ofrecen una velocidad de respuesta mayor. Cabe decir también que son más económicos que las otras dos opciones ya que no están excesivamente sobredimensionados.

Finalmente, los relés son dispositivos arcaicos que funcionan también como interruptores. Los relés electromecánicos constan de una bobina que acciona un contacto mediante el campo magnético que genera al circular corriente por ella. Sufren un considerable desgaste mecánico y emiten mucho ruido al circuito. Existen también relés de estado sólido, que manejan corrientes mucho más altas, pero son demasiado voluminosos. Los MOSFETs realizarían mucho mejor su función siendo más pequeños, y además permiten ser integrados en un PCB [18].

3.2.2 Microcontrolador.

Existen una vasta variedad de marcas (*Microchip, STM, Cortex, etc*) y dentro de cada uno hay una amplia gama con distintas prestaciones. Aún así hay que distinguir dos grupos bien diferenciados. Los microcontroladores y los microprocesadores. Se podría decir que los primeros son la gama inferior en lo que a capacidad de procesamiento se refiere. Por ejemplo, con un microcontrolador la máxima frecuencia que se puede conseguir es de 16 MHz. Generalmente, los microprocesadores se utilizan cuando se deben realizar múltiples operaciones en paralelo o tratar una gran cantidad de datos multiplexados. Por ejemplo, la misma *DAQ* (adquisición de datos) de este monoplaza necesita de un microprocesador para obtener una velocidad de muestreo adecuada.

Sin embargo esa no es la única diferencia: los microcontroladores pueden trabajar con una tensión de alimentación de 5V, y por lo tanto emitir y recibir señales digitales a 5V, así como leer señales analógicas de 0-5V sin necesidad de una etapa de conversión intermedia. Los microprocesadores sólo pueden operar a 3,3V. Lo que a primera vista parece un detalle no muy relevante, el pensar que sólo supone en una elección distinta de fuente DC/DC es un error. En la misma placa de circuito impreso se encuentran los transistores de potencia, el módulo de comunicación con el resto de PCBs y la conexión a la batería. Todas estas son fuentes de ruido que pueden perturbar el correcto funcionamiento del sistema. Funcionando a 5V la oscilación en la tensión para que se produzca un cambio lógico en la señal debe ser mayor que a 3,3V. A pesar de que la PCB llevará implementados métodos de control de ruido e interferencias, esta robustez extra de las señales de 5V a perturbaciones es muy importante para un sistema crítico como es este [19].

Por familiaridad con el lenguaje de programación, y por la accesibilidad a muchas librerías, se escogerá un microcontrolador *ATmega*, de *Atmel*. Al ser el mismo fabricante de *Arduino*, permitirá realizar los distintos ensayos con exactamente el mismo microcontrolador que el que se implementará definitivamente en la placa.

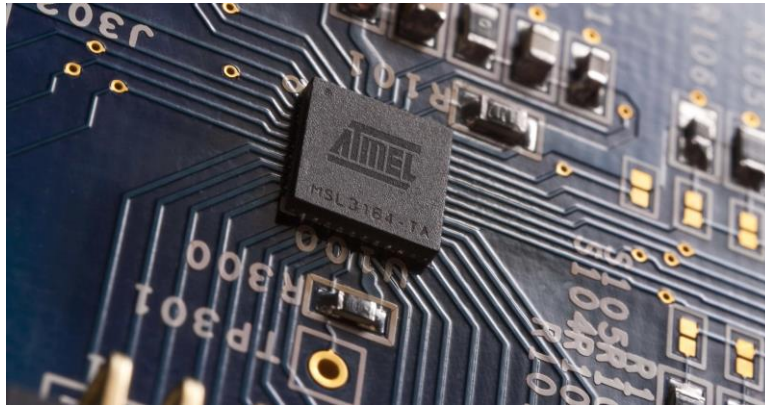


Ilustración 10: Los microcontroladores de los módulos Arduino son fabricados para aplicaciones didácticas o caseras, sin embargo Atmel fabrica los mismos microcontroladores adaptados para automovilismo, con estrictos certificados de seguridad.

4 ENSAYOS Y MEDICIONES

La teoría es asesinada tarde o temprano por la experiencia.

- Albert Einstein -

Antes de comenzar a seleccionar componentes del mercado, o dimensionar los distintos dispositivos en los diseños, es necesario conocer con exactitud los valores que alcanzan las magnitudes eléctricas en el monoplaza. Los tests con el ART-15, el monoplaza del año anterior, han sido muy orientativos con respecto a las características de los elementos que se están buscando, pero además se han realizado mediciones en distintas pruebas con los componentes que serán incorporados al ART-16. Todos los cálculos realizados a partir de los resultados de las pruebas se hacen con respecto al funcionamiento durante la prueba de *Endurance* de FSGermany. Consiste en un circuito con gran número de curvas, en el que no es posible explotar la velocidad punta del monoplaza. El número de vueltas suman un total de 17 km. El tiempo estimado es de 20-30 min. La autonomía que debe aportar la batería se establecerá a 1 h, de forma que se tenga margen para solventar cualquier contingencia.

4.1 Ensayos de potencia y consumo.

Las pruebas consisten en mantener en funcionamiento los dispositivos durante un intervalo de tiempo en el cual se realizan varios encendidos y apagados rápidos. De esta forma se puede apreciar tanto el comportamiento en régimen permanente como en el transitorio del arranque.

Por ejemplo, estos son los resultados de dos componentes cuyo funcionamiento es completamente distinto, y son muy representativos de los distintos elementos del sistema.

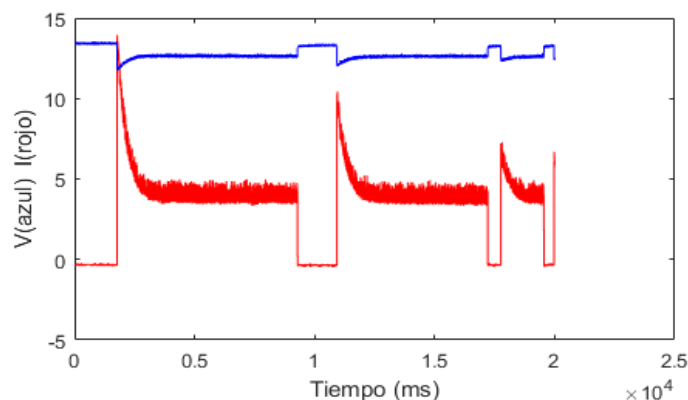


Ilustración 11: Resultados de un test de funcionamiento del ventilador de la refrigeración.

El ventilador del circuito de refrigeración del motor consiste básicamente en un motor eléctrico que funciona de forma constante durante un intervalo de tiempo. A diferencia del motor del actuador del embrague, este no necesita un momento de giro muy fuerte, sino que ha d mantenerse girando a gran velocidad durante un período de tiempo relativamente largo. Eso quiere decir que a la hora de estudiar el consumo de energía se considerarán los valores de tensión e intensidad en régimen permanente, y se supondrá que está activado todo el tiempo (en realidad, la ECU es la que decide en que momento se activa en función de la temperatura del motor). Se puede observar en los distintos arranques del ventilado un pico importante de intensidad, así como una leve caída de la tensión máxima de la batería. Esto se debe a que para comenzar a mover el ventilador desde el reposo, el motor necesita mucha más fuerza que la que supone mantener girándolo cuando ya está revolucionado. Estos transitorios no se tendrán en cuenta en el consumo de energía, pero sí que se tendrán en cuenta en la capacidad de descarga máxima necesaria de la batería. Hay varios dispositivos cuyo funcionamiento es similar, como la bomba de combustible o la bomba de agua.

En contraposición a estos, hay otros elementos cuyo funcionamiento es muy diferente:

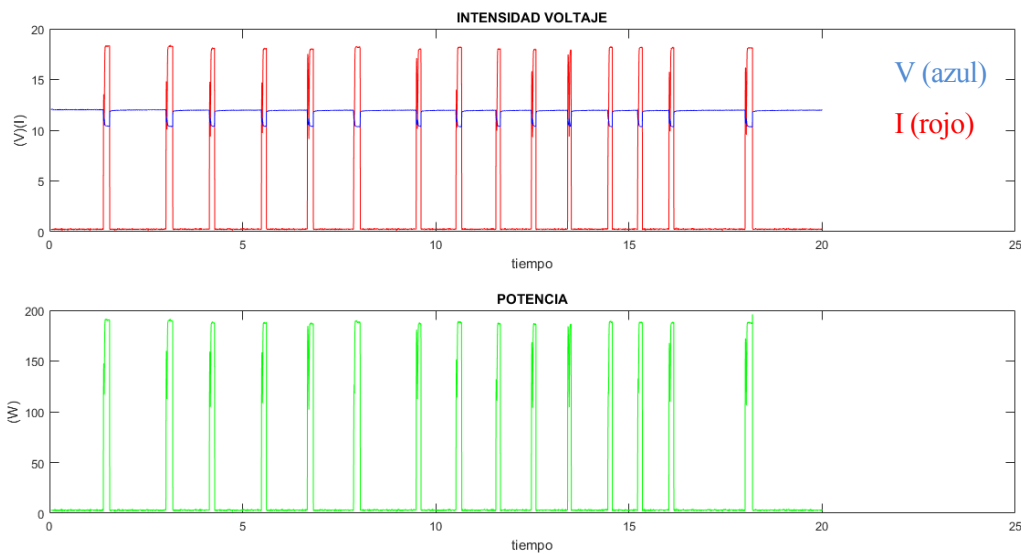


Ilustración 12: Resultados de la prueba del Paddle.

El *Paddle* es el actuador de la caja de cambios. Cuando el motor embraga, el *Paddle* se encarga de subir o bajar marcha con un golpe rápido e intenso a la caja de cambios. Es un actuador electromecánico. Consiste en un solenoide, que al circular corriente por él genera un campo magnético que mueve una barra metálica ensamblada a la transmisión del motor.

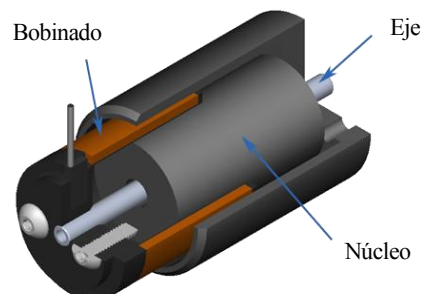


Ilustración 13: Esquema del actuador electromecánico.

A diferencia del anterior, éste requiere de una gran fuerza para ejecutar su función, pero, por supuesto, no actúa continuamente. Su funcionamiento se caracteriza por pulsos muy elevados de corriente (y la respectiva caída de tensión máxima) y con una intensidad en régimen permanente nula. En el consumo de energía se calculará un consumo medio en función de la frecuencia de los pulsos. Otros elementos con funcionamiento similar son los inyectores, las bujías y el actuador del embrague. La frecuencia de los pulsos variará mucho durante el funcionamiento del monoplaza, siendo unas frecuencias siempre claramente superiores a otras (por ejemplo, la frecuencia de ignición de las bujías siempre va a ser mucho mayor que las veces que actúe el *Paddle*, mientras que éste y el actuador del embrague tiene frecuencias similares puesto que su funcionamiento está ligado). Para el cálculo se supondrá un régimen de revoluciones medio.

En la siguiente tabla se resumen los resultados de los tests y los valores de las magnitudes críticas para el diseño de la batería:

Componente	Corriente permanente	Corriente de pico	Potencia	Tipo de funcionamiento
Ventilador	5.02 A	~14 A	65.26 W	Continuo
Bomba combustible	3.34 A	~11 A	40.08 W	Continuo
Bomba agua	7.47 A	~17 A	89.93 W	Continuo
Inyectores	0 A	2.46 A	18.72 W	Pulsos
Bujías	0 A	5.71 A	68.52 W	Pulsos
<i>Paddle</i>	0 A	~18 A	198 W	Pulsos
Actuador embrague	0 A	~18 A	198 W	Pulsos
<i>Link G4 Storm (ECU)</i>	~230 mA	0 A	2.8 W	Continuo
EPMS	~160 mA	0 A	2 W	Continuo
DAQ + Sensores	~420 mA	0 A	5 W	Continuo
Volante	~250 mA	0 A	3 W	Continuo
TOTAL	13.89 A	86.47 A	C: 208.07 W P: 483.24 W	-

Tabla 3: Resumen de resultados de las pruebas de consumo de los componentes del monoplaza

4.2 Ensayos de temperatura

La batería se situará en la zona del *cockpit*, entre el piloto, del cual va separado por un *firewall*, y el motor, separado por un aislante térmico. Justo al otro lado del aislante se encuentran los colectores, probablemente el element con mayor temperature del monoplaza. Por tanto hay que asegurarse que la temperatura del *cockpit* se mantiene en un valor aceptable.

El aislante usado es una colcha de fibra cerámica *Kaowol 2300*. Está compuesta de fibras resultantes de la fusión de materias primas como alúmina y sílice de alta pureza, colectadas en una malla de banda continua y mecánicamente tejidas para agregar resistencia a la tensión e integridad de superficie. Está diseñada para una temperatura de uso máximo de 1260°C. Sus aplicaciones principales son en aislamiento de hornos y calentadores que manejen altas temperaturas, reformadores, hornos de pirólisis, hornos de tratamiento térmico, entre otros. Es de color blanco cremoso. Fabricada bajo el proceso de soplado-centrifugado, con doble agujado y fibras largas. Cumple con la norma ASTM-892-93 (*Standard Specification for High-Temperature Fiber Blanket Thermal Insulation*) [20].

<i>Espesor</i>	25.44 mm	
<i>Densidad estandar</i>	128 kg/m ³	
<i>Temperatura máx</i>	1260°C	
<i>Temperatura fusion</i>	1760°C	
<i>Composición</i>	Alúmina	46-49 %
	Sílice	49-55 %
	Impurezas	1-2 %
<i>Conductividad térmica</i>	260°C	0.0605 W/mK
	540°C	0.1250 W/mK
	815°C	0.2130 W/mK
	980°C	0.2720 W/mK

Tabla 4: Especificaciones del aislante.

El ensayo consistía en un varios tests de 5, 10 y 20 minutos de duración, en el que se hacía correr el ART-15, el monoplaza de la temporada 2014/2015, el cual lleva el mismo motor (de una *Honda CBR 600RR 2006*) que el ART-16. Se instaló el nuevo aislante y mediante un termómetro de infrarrojos se obtenían las medidas.

- Test de 5 min: Temperatura del aislante de 47.2°C.
- Test de 10 min: Temperatura del aislante de 49.1°C.
- Test de 20 min: Temperatura del aislante de 54.7°C.

La duración máxima de la *Endurance* oscila entre 20-25 minutos, por lo que los valores de temperatura en el *cockpit* usando este aislante son satisfactorios.

5 PROYECTO DE DETALLE

*Los científicos estudian el mundo tal y como es.
Los ingenieros crean el mundo que nunca ha sido.
- Theodore von Kalman -*

En esta sección se describirá con todo detalle tanto el sistema completo como cada uno de los elementos que lo integran. En primer lugar, se elegirá la batería y supercondensadores adecuados y todo lo relacionado a su acondicionamiento en el monoplaza. En cuanto a la PCB, se profundizará en su funcionamiento, se seleccionarán los elementos correctos y se aplicarán diversas técnicas de trazado con el fin de asegurar el correcto aislamiento a EMI.

5.1 Batería y supercondensadores

5.1.1 Supercondensadores

Se dispondrá de un paquete de 6 supercondensadores en serie, conectados exclusivamente al motor arranque. El arranque se llevará a cabo mediante un relé activado desde la PCB. El circuito se diseñará de forma que la batería en ningún momento se encuentre en cortocircuito con el motor de arranque. Cuando al sistema se le da la orden de arrancar, detecta el nivel de tensión de los supercondensadores, y en función de éste decide mediante qué sistema de almacenamiento de energía se quiere arrancar. La carga ofrecida por los supercondensadores es suficiente para realizar varios arranques, pero, como se verá más adelante, la batería escogida tiene una corriente máxima de descarga muy elevada, y esto ha permitido la preparado para arrancar con batería en el caso de que fuese necesario.

Por pantalla, en el volante, al piloto se le mostrará constantemente el nivel de carga de la batería, y habrá un indicador que se iluminará en caso de que la carga de los SC sea insuficiente para arrancar. Estos valores se los enviará la PCB del sistema de potencia por CAN bus a la PCB del volante.

El modelo de supercondensador usado será el *KEMET S501LF357V2R7U*.

CARACTERÍSTICAS	VALOR
Capacidad	350 F
Voltaje medio	2,7 V
Voltaje a plena carga	2,85 V
ESR, DC \leq [10 ms]	2,7 m Ω
Inductancia \pm 30 mA	150 nH
Corriente de pico [1s]	243
Energía almacenada	0.35 Wh
Densidad de potencia	10.2 kW/kg
Diámetro (D)	35 mm
Longitud (L)	62 mm
Distancia entre bornes (S)	23 \pm 0,1 mm
Longitud de borne (LL)	5,9 \pm 1,0 mm
Volumen	0,06 L
Peso	0,066 kg

Tabla 5: Características principales de los supercondensadores KEMET

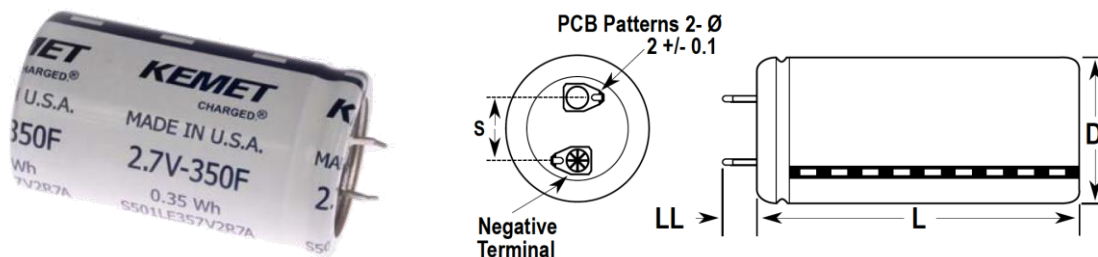


Ilustración 14: Imagen de un Supercondensador Kemet y dimensiones.

5.1.2 Elección de la batería.

La batería que se utilizará es la EarthX modelo ETX1200.

CARACTERÍSTICAS	VALOR	VALORES MÍNIMOS
Tecnología	LiFePO ₄	-
Tensión nominal	13,2 V	12-15 V
Capacidad	24,8 AH	
Corriente de pulso máx.	1200 A [3s] [25°C] [>9 V]	~90 A
Descarga continua máx.	150 A	~20 A
Tensión a plena carga	13,9 – 14,6 V	12-15 V
Corriente de recarga	0,8 – 30 A	-
Ciclos de vida [1C]	4000 ciclos [25°C]	-
Ciclos de vida [10C]	2000 ciclos [25°C]	-
Peso	3,5 kg	-
Dimensiones	168mm x 86mm x 175mm	190mm x 90mm x 190mm
Resistencia a humedad	IP 66	IP-66
Rango de temperatura	-30°C – 60°C	30°C – 60°C
Protección a sobrecorriente	BMS	BMS

Ilustración 15: Características principales de la batería ETX1200.

Se observa la corriente de descarga tan elevada que admite. Esto permite arrancar el monoplaza usando la batería en el caso en el que hubiera un fallo en los supercondensadores, o no tengan carga suficiente si se han de hacer arranques no previstos.

La carcasa debe ser rígida y retrasar la combustión en caso de que se produzca [1, p. IC4.4]. El plástico de la carcasa esta catalogado como 94-HB en la *UL yellowcard*. El UL-94 (*Standard for Safety of Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances testing*) es un certificado de inflamabilidad de plásticos.

El rango HB es el máximo y significa que en horizontal la combustión es muy lenta. Para espesores menores de 3 mm, el ratio de combustión es de menos de 76 mm/min, o la combustión finaliza antes de llegar a los 100 mm.



Ilustración 16: Batería ETX1200.

5.2 PCB.

5.2.1 Descripción del funcionamiento básico

El funcionamiento del “cerebro” del sistema debe cubrir las siguientes funcionalidades:

- Gestión inteligente de la potencia eléctrica coordinada con la ECU y con las instrucciones del piloto.
- Monitorización constante del flujo de energía por el monoplaza y del estado de carga de batería y supercondensadores.
- Comunicación con la *DAQ* y *Volante*.
- Garantizar la seguridad y fiabilidad del sistema.
- Admitir reprogramación y posibilidad de ampliación para años futuros.

El sistema eléctrico del monoplaza, como ya se vió en el apartado de ensayos, consta de las bombas de combustible y agua, ventilador, *paddle shifter*, actuador del embrague, inyectores, bujías y el resto de electrónica (*DAQ*, *ECU* y *Volante*). Además de estos hay 16 sensores diferentes, cuya alimentación se realizará desde la *DAQ*, por lo que en cuanto a funcionamiento estarán ligados a ésta.

La ECU es la que controla el funcionamiento de todo lo relacionado con el motor, pero el modo de activación no es el mismo para todos los elementos:

- Para las bombas de gasolina y agua y el ventilador, llegarán como entradas a la PCB de potencia dos señales de la ECU. En función de si es un 1 o 0, se proporcionará alimentación a dichos componentes.
- En cuanto a inyectores y bujías, el procedimiento es ligeramente distinto. La PCB de potencia estará programada para que en cuanto el contacto sea activado, se les proporcione automáticamente alimentación. En este caso será la ECU la que juegue con la conexión a tierra abriendo y cerrando el circuito. Esta distinción se debe a que a diferencia de bomba y ventilador, estos elementos trabajan con pulsos. Son chispas intermitentes muy rápidas, eso supone que el tiempo de respuesta necesario sea muy alto y por tanto sea mucho mejor que la centralita se encargue directamente a tener otro intermediario.

La electrónica general será activada automáticamente también al iniciar. Para el caso de los dispositivos de cambios de marcha semi-automático, el procedimiento es similar a inyectores y bujías. Puesto que su funcionamiento es controlado por un microcontrolador distinto, la PCB de potencia le proporcionará la alimentación y mediante un sistema de transistores conectados a tierra efectuará los cambios. Aunque este sistema se encuentre en la misma placa su diseño no se incluye en este proyecto, aunque sí influirá en la disposición general de los componentes y en las técnicas de trazado de compatibilidad EMC.

Para controlar la cantidad de energía consumida se conectarán tres sensores de intensidad de corriente DC. La razón principal es que no se podrá concentrar toda la intensidad del sistema en una pista. La corriente se dividirá en dos filas, equilibradas en la medida de lo posible, de forma que el límite de corriente que pueda medir el sensor se reduce a la mitad (y por tanto el coste es mucho menor). El tercer sensor es exclusivo para la circuitería de cambios de marcha (recuérdese que trabaja con picos de más de 20 A como se ve en la **fig**).

Por otro lado, para medir tensión, en la toma de entrada de alimentación a la placa de la batería se conectará un divisor de tensión diseñado para que actúe como sensor analógico, y correctamente calibrado en el código. Con medidas de tensión e intensidad, el microcontrolador integrará en todo momento la potencia consumida del coche, por lo que ofrecerá un valor de energía consumida. Conociendo el valor del fabricante de la capacidad a plena carga de la batería al régimen de temperaturas estimado durante el intervalo de funcionamiento, proporcionará una medida consistente del estado de carga de la batería. No sólo será enviado al volante. Estos datos serán transmitidos a la *DAQ*, de forma que queden almacenados en el *datalogger* y permita estudiar mejoras en la eficiencia de consumo eléctrico del monoplaza.

Por tanto, es necesario un método de comunicación con el resto del sistema. Existen multitud de protocolos de comunicación diferentes: *I²C*, *Serial*, *CAN bus*... Se escogerá este último por dos razones principales: Es más rápido que *Serial* y más sencillo de programar que *I²C*, y la razón principal es que es el más utilizado con diferencia en automoción. Por el *CAN* se transmitirán los datos de consumo y estado de carga de los supercondensadores (llegará como entrada a la PCB un cable del borne positivo de los supercondensadores, y con un divisor de tensión se calculará el estado de carga de estos. En el *Volante* se activará un indicador LED en función de la tensión actual de los supercondensadores). Por supuesto no sólo transmite información, también recibirá por este medio la señal de activación de la recarga de SC.

Como dispositivos de protección se conectará una etapa de fusibles para cada uno de los componentes.

Por último, se ha de ser consciente de que el equipo desarrollará un nuevo monoplaza para la siguiente temporada, así que es muy posible que se añadan componentes eléctricos nuevos, por lo que el sistema debe estar preparado para futuras ampliaciones. Deberá haber en la placa unos transistores extra, y además la PCB debe contar con la circuitería necesaria para la reprogramación del microcontrolador y permitir así la completa integración de nuevos dispositivos.

5.2.2 Celda básica de control.

A la hora de conectar los MOSFETs hay que entender correctamente el funcionamiento y el método de conexión. Estos transistores tienen tres terminales de conexión, denominados *Gate* (puerta), *Source* (fuente) y *Drain* (drenador). Los nodos del circuito se deben conectar entre *Source* y *Drain*, y la señal de control debe excitar el terminal *Gate*.

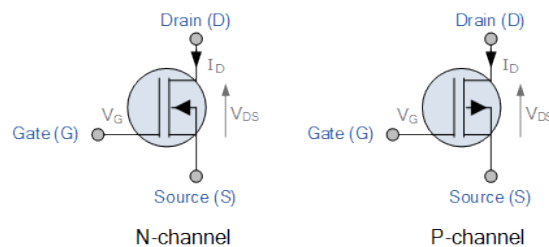


Ilustración 17: Transistores N-MOS y P-MOS.

En primer lugar hay dos tipos: los de canal N y los de canal P. Cada uno tiene un funcionamiento completamente distinto, al igual que su posicionamiento en el circuito.

Los MOSFETs de canal N tienen un funcionamiento a nivel alto, es decir, para activarlos y cerrar el circuito se necesita aplicar una tensión positiva en la puerta. No es la tensión en la puerta lo que controla el transistor, sino la caída de tensión entre *Gate* y *Drain*. Mientras que V_{GD} es 0V, el N-MOS permanecerá como circuito abierto, y si supera una tensión umbral, comenzaría a conducir en régimen activo, es decir, se comportaría como una resistencia disipadora de potencia. Al alcanzar la tensión de saturación cortocircuitará los terminales *Drain* y *Source*. Por tanto, durante todo el período de funcionamiento deberá trabajar en los regímenes de corte y saturación, y nunca estar en activa, puesto que habría grandes pérdidas de energía y sobrecalentaría toda la placa, pudiendo provocar una situación peligrosa. Estos transistores se deben conectar entre carga (al *Drain*) y tierra (*Source*).

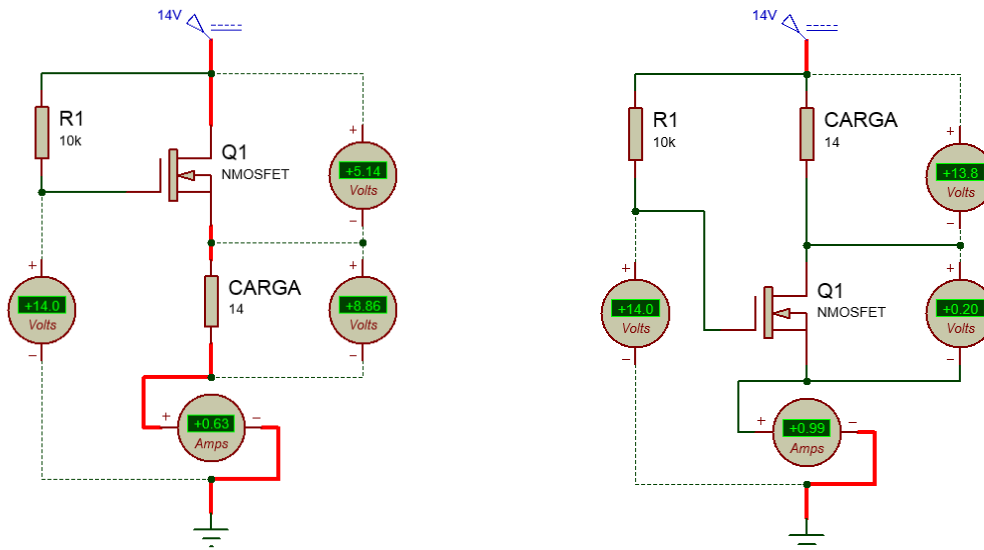


Ilustración 18: Transistor N-MOS colocado de formas distintas. Hay que evitar que caiga elevada tensión en el transistor.

Esto tiene una consecuencia especialmente negativa para un monoplaza de competición. El cableado deberá incluir tanto cables desde el terminal positivo de la batería hacia los componentes, y de éstos hasta la placa, y finalmente de la placa a la batería. En cambio, si se pudiera conectar entre batería y componentes, para el retorno de éstos hacia la batería se puede utilizar el chasis como tierra, ahorrando la mitad del cableado, y por tanto, peso y coste adicional.

Utilizar el chasis como retorno conectándolo al nodo negativo de la batería no es una práctica recomendable. Normalmente, los blindajes a EMI de la electrónica se conecta a tierra, sin embargo, al igual que como ocurre en las aeronaves, aquí no es posible, es un sistema flotante. El objetivo de los blindajes es crear un camino de menor impedancia a las interferencias electromagnéticas para que no afecten a la PCB. Lo óptimo sería conectarlos al chasis, que es la mayor masa posible para usarla como tierra flotante. Si se conecta al nodo negativo de la batería, básicamente se está puentando la protección con el circuito, por lo que el blindaje perdería toda su eficacia, por no decir que por la geometría del chasis se comportaría como una antena, y sería mucho peor. Sin embargo, el chasis, por la propia configuración del motor, debe ir conectado a la batería (el motor de arranque utiliza como GND toda la estructura del motor y chasis). Por tanto, los blindajes serán los que queden flotantes, y se añadirá una etapa de filtrado a la entrada de cada PCB.

Los MOSFETs de canal P tienen un funcionamiento a nivel bajo. Mientras que la caída de tensión entre *Gate* y *Drain* sea -12 V, el circuito está completamente cerrado, y para abrirlo es necesario unos 12 V en *Gate*, de forma que la caída de tensión entre ambas sea 0 V. El funcionamiento de corte, activa y saturación es similar a los N-MOS. A diferencia de sus hermanos estos se deben conectar entre fuente y carga para que funcionen correctamente.

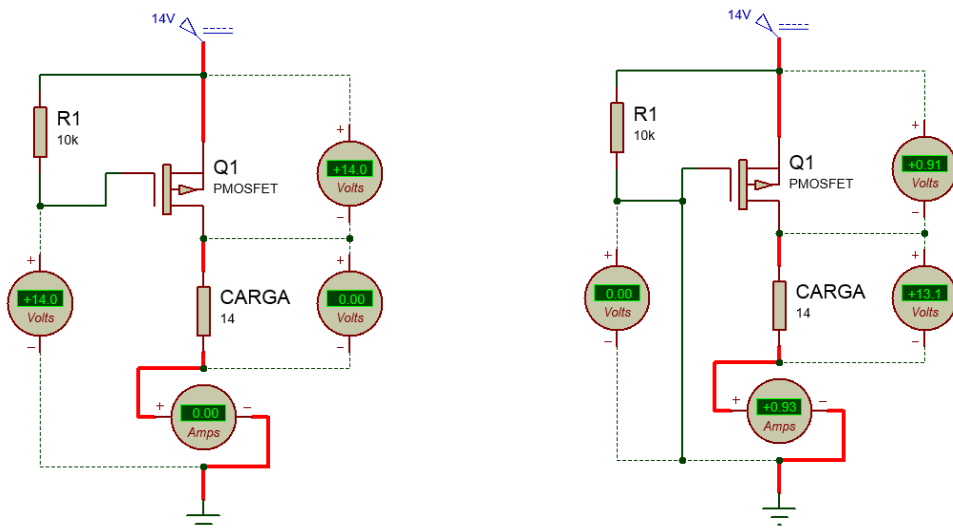


Ilustración 19: P-MOS funcionando a nivel alto y bajo.

PROBLEMA: y un problema muy importante, el transitorio. Justo al accionar el *kill-switch*, el P-MOS ve en *Drain* los 12 V, mientras que el microcontrolador aun debe iniciarse, por lo que hasta que se inicia, en Gate hay una indeterminación al no dar señal alguna el microcontrolador. Esto se puede solucionar con una resistencia de *pull-up*. Esto no es todo. Las señales que emite el ATmega son de 0 ó 5 V, no 12 V, por lo que no sería capaz de activar el transistor.

Se proponen dos soluciones:

- Una sería elevar el nivel de tensión. Existen módulos MOSFET capaces de transformar internamente señales de 3,3 o 5 V a 14V. Sería necesaria otro convertidor DC-DC para estabilizar a 14 V la alimentación de este dispositivo, puesto que la tensión nominal de la batería es de 13,8 V, además de que se pueden producir perturbaciones que alteren los niveles de referencia y producir activaciones no deseadas de componentes.
- La segunda opción, que es por la que se ha optado, consiste en utilizar el siguiente subcircuito en lugar del transistor:

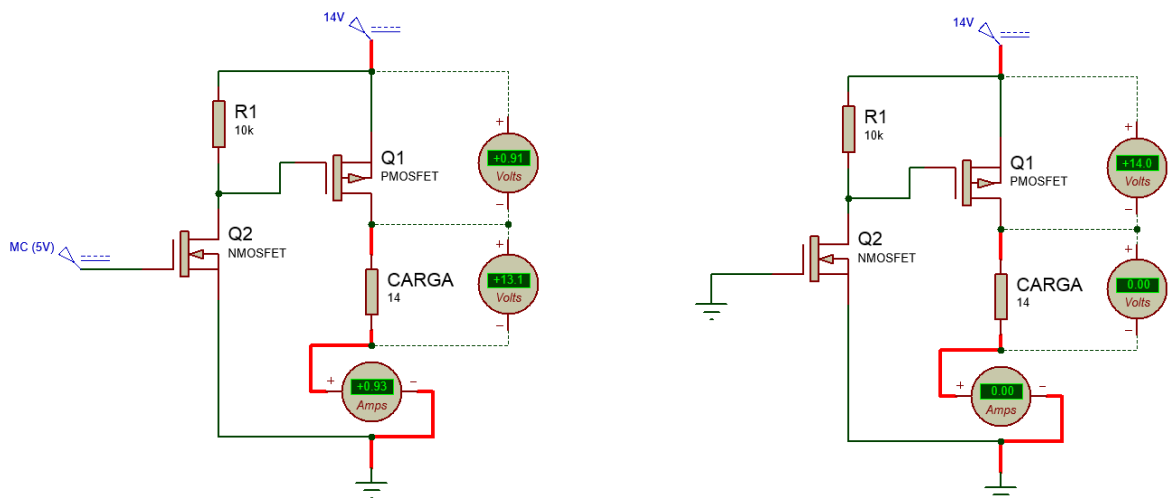


Ilustración 20: Celda básica de funcionamiento del sistema.

Inicialmente, la V_{GD} del P-MOS se encuentra a 0 V, por lo que el circuito se encuentra abierto. Al recibir una señal a 5V en el N-MOS, la tensión en la puerta del transistor P-MOS converge a 0V, por tanto aparece un nivel bajo, y el circuito se cierra completamente. Utilizando este subcircuito se consiguen tres objetivos: eliminar el transitorio problemático que aparecía con los P-MOS individuales, controlar con señales a 5V un circuito con un nivel de tensión de 14V, y por último conseguir un funcionamiento con lógica directa en lugar de inversa (esto simplemente hace la programación más intuitiva).

5.2.3 Microcontrolador.

Como se explicó en la sección de estudios previos, será un microcontrolador la opción más factible para esta aplicación. Las dos familias de microcontroladores de las que se escogerá el micro son *Atmel* y *dsPIC*. La primera tiene la gran ventaja de que al utilizar el mismo entorno que *Arduino*, se pueden encontrar en la red muchas librerías ya creadas, como puede ser la configuración del CAN bus, y por tanto la programación será un trabajo mucho más rápido y eficiente, además de reducir el número de posibles fuentes de error.

El microcontrolador escogido es el *ATMega328-P*. Las especificaciones se muestran en la siguiente tabla.



Ilustración 21: ATMega 328-P Automotive

Arquitectura	8-bit AVR
Memoria Flash	32 kb
RAM	2 kb
EEPROM	1024 byte
Número de pines	32
Máx. Frecuencia	20 MHz
Canales ADC	8 (10 bit – 15 ksps)
Canales PWM	6

Tabla 6: Especificaciones del ATMega 328-P

Este microprocesador ha sido desarrollado de acuerdo al estándar internacional ISO-TS-16949, el cual contiene una serie de estrictos requisitos de resistencia a temperatura, vibraciones, voltaje, etc, que lo certifica para aplicaciones automovilísticas.

5.2.4 Comunicación CAN bus con el sistema general.

Es el más común en vehículos de competición. Acrónimo de *Controller Area Network*, es un protocolo de comunicaciones desarrollado por la firma alemana Robert Bosch GmbH, basado en una topología bus para la transmisión de mensajes en entornos distribuidos. Además ofrece una solución a la gestión de la comunicación entre múltiples CPUs. Las razones que lo sitúan en la cima de las comunicaciones en el automovilismo son, entre otras:

- Alta inmunidad a interferencias, capacidad de autodiagnóstico y la reparación de errores de datos.
- Está normalizado, por lo que simplifica en gran medida la comunicación entre subsistemas de diferentes fabricantes.
- El procesador anfitrión delega la carga de comunicaciones a un periférico inteligente, disponiendo así de más tiempo para ejecutar sus funcionalidades.
- Es una red multiplexada, por lo que reduce en gran medida la cantidad de cableado y elimina las conexiones punto a punto.

El EPMS envía al CAN continuamente los valores de voltaje y de corriente de cada uno de los sensores, además del porcentaje de carga actual de la batería. Todos son almacenados en la adquisición de datos, y el volante utiliza el valor de carga de la batería para mostrarlo por pantalla y el valor de voltaje de los supercondensadores para decidir si encender o no el LED de alarma. Se ha escogido este método en lugar de una variable *flag* para reducir el número de operaciones del microcontrolador.

La adquisición de datos envía continuamente también la carga de la batería, de modo que el sistema lee el porcentaje de carga inicial nada más activar el contacto. En el caso de que la tarjeta SD haya sido sustraída o formateada, enviará por defecto un valor negativo de carga. Inicialmente el programa tiene registrado un valor de carga negativo por defecto. Si al leer el CAN sigue siendo negativo, leerá la memoria EEPROM en la que ha estado almacenando los valores de carga cada cierto tiempo. El volante enviará una variable *flag* que significa que la batería se ha recargado completamente de forma externa, y el sistema podrá actualizar el valor de la carga.

Los registros enviados continuamente siguen la siguiente estructura. El primer término es una ID asociada a cada dispositivo conectado a la red (0x00, 0x01 por ejemplo). A continuación es un conjunto de 8 datos. En la programación de cada dispositivo se establece qué lee y qué envía cada uno. La ECU, en este caso el único dispositivo pre-fabricado, emite una serie de valores auxiliares asociadas a sensores del motor. Los que no son usados emiten un valor por defecto de **90**.

El registro emitido por el EPMS sería el siguiente

0x00	V_{SC}	V_{Bat}	$I_{sensor\ 1}$	$I_{sensor\ 2}$	$I_{sensor\ 3}$	$E_{Bat}(\%)$	-	-
------	----------	-----------	-----------------	-----------------	-----------------	---------------	---	---

Tabla 7: Registro emitido por el EPMS

Los registros emitidos por las otras placas siguen una estructura similar, y para obtener un dato simplemente hay que ejecutar el comando adecuado, especificando ID, número de datos y coordenada del dato dentro de la serie.

5.2.5 Sensorización.

El sistema de potencia debe estar continuamente monitoreado y regulado. Un fallo catastrófico puede causar el fin del monoplace en la competición, o lo que es peor, puede comprometer la seguridad del piloto. La batería cuenta con diversas protecciones de serie, sin embargo puede no llegar a ser suficiente. El cableado recorre prácticamente todo el coche, estando en contacto con bujías, inyectores y depósito de gasolina, por lo que un mal funcionamiento puede tener graves consecuencias.

Por otro lado, la electrónica de serie de la batería dispone de una salida auxiliar que proporciona una señal discreta (**ref.**). A saber:

- Si es 0 constante significa que la batería está funcionando bien y dispone de carga suficiente.
- Si es una señal intermitente, puede ser que necesite recargarse, o que haya un desbalance en las celdas internas, ya sea por sobrecarga de algunas durante la recarga, o por una descarga desequilibrada.
- Si la señal es 1 continua, quiere decir que el BMS ha sufrido un fallo *hardware*.

Una vez solucionado el problema, se ha de establecer un 0 para reiniciar el BMS.

Como se puede observar no hay medios para saber que nivel de carga tiene en cada momento, magnitud que sería muy interesante para estudiar en las distintas pruebas previas a la competición. Por tanto, se necesita un sistema de monitorización de descarga o energía consumida. Para ello se utilizarán sensores de corriente continua y un divisor resistivo para la tensión instantánea de la batería.

Los sensores de intensidad escogidos son los sensores de efecto *Hall* ACS712:



Ilustración 22:
Sensor ACS712.

- Sensor analógico.
- Rango de $\pm 30A$. Sensibilidad de 66 mV/A .
- Tensión normal de funcionamiento $5V$.
- Ancho de banda de $80kHz$.
- Otras propiedades, como bajo ruido, efecto de histéresis casi nulo, etc.

La tensión de batería y supercondensadores se medirá con un divisor resistivo correctamente calibrado.

5.2.6 Protección EMC y blindaje a EMI.

Uno de los aspectos más problemáticos de la electrónica es el de las interferencias electromagnéticas, ya sean conducidas o radiadas. De hecho, un buen diseño de cara a la protección ante dichos agentes ruidosos consiste en más de la mitad del diseño global del sistema, siendo más crítico en función del entorno de funcionamiento. En coches eléctricos, por ejemplo, el núcleo magnético del rotor genera tal cantidad de emisiones que hace que la electrónica de a bordo deba ser tremendamente robusta. En este caso, el mayor generador de emisiones era el alternador, y ya no forma parte del monoplace. Eso no quiere decir que no haya que proteger el sistema, en absoluto. Siguen habiendo muchos cambios bruscos de corriente y continuamente hay flujo de energía, por lo que siempre hay interferencias. Además hay que tener en cuenta una cosa, y es que ahora el elemento más ruidoso es la placa del sistema de potencia eléctrica, puesto que todo el paso de corriente converge aquí y es donde se toman las medidas de regulación. Justo al lado se sitúa la placa de Adquisición de datos, a la cual llegan medidas de numerosos sensores analógicos, especialmente sensibles a las interferencias.

En conclusión, hay que proteger tanto el EPMS del exterior, como el exterior del EPMS. Es más, en el mismo circuito impreso hay elementos de señal y de potencia, por lo que habrá que emplear varias técnicas de trazado de circuitos para evitar que los problemas provengan de interferencias intrasistema. Cabe decir que no es una ciencia exacta, sino que es fruto de la experiencia con dispositivos electrónicos.

En primer lugar, hay que hacer frente a dos tipos de interferencias, según su origen: *intersistema*, cuando es un dispositivo ajeno el que afecta a otro, e *intrasistema*, cuando son los mismos elementos internos los que se afectan los unos a los otros.

La más “fácil”, o más precisamente, la que a priori es más simple el diseño, es la protección a ruido externo. Se emplearán distintas medidas:

- Uso de cable *Ethernet* de pares trenzados y apantallados para señales analógicas, mucho más sensibles al ruido que las digitales.
- Estudio de conexión a tierra en el chasis. No es para nada recomendable el uso del chasis como retorno de corrientes. Al ser una masa amplia de acero y de geometría irregular, la impedancia es muy pequeña y se comporta como una gran antena. Sin embargo, por la propia configuración del motor de arranque se ha de conectar a tierra.. Se estudiará por donde se producirán los retornos principales de corriente y se evitarán en la medida de lo posible acoplamientos.
- Se introducirá la placa en una caja de material ferromagnético, lo más lisa y continua posible, y realizando las uniones de mecanizado con la mayor superficie de contacto posible. Aunque parezca simple, se ha de hacer con cuidado ya que puede comportarse como antena en lugar de blindaje y entonces estaría empeorando la situación.

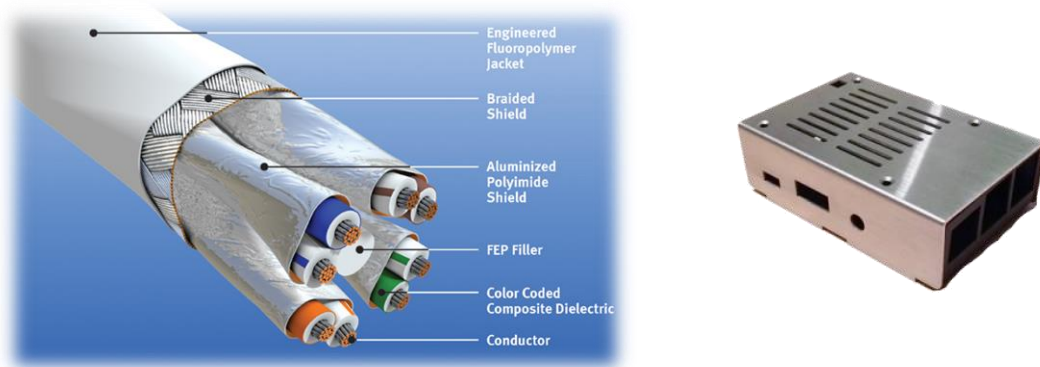


Ilustración 23: Imágenes de un cable apantallado con aplicaciones militares y un ejemplo de caja blindada.

En cuanto a las medidas internas, es una ciencia mucho más abstracta. Los comportamientos de los circuitos impresos en ocasiones pueden llegar a ser impredecibles cuando se someten a carga, y es complicado encontrar el foco o focos del problema sin ensayos de prueba y error. En este caso, la placa es muy completa: contiene elementos de electrónica de potencia, muy emisores de ruido, elemento de señal digitales emisores de ruido como el microprocesador, y elementos sensibles como las pistas analógicas y el módulo del CAN bus. Por tanto, el diseño del circuito impreso no es sencillo, y requerirá de técnicas y pasos a tener en cuenta.

La estructura de la placa se ha sectorizado. Tiene una división principal, que separa electrónica de potencia y electrónica de señal, y dentro de éstas hay subdivisiones.

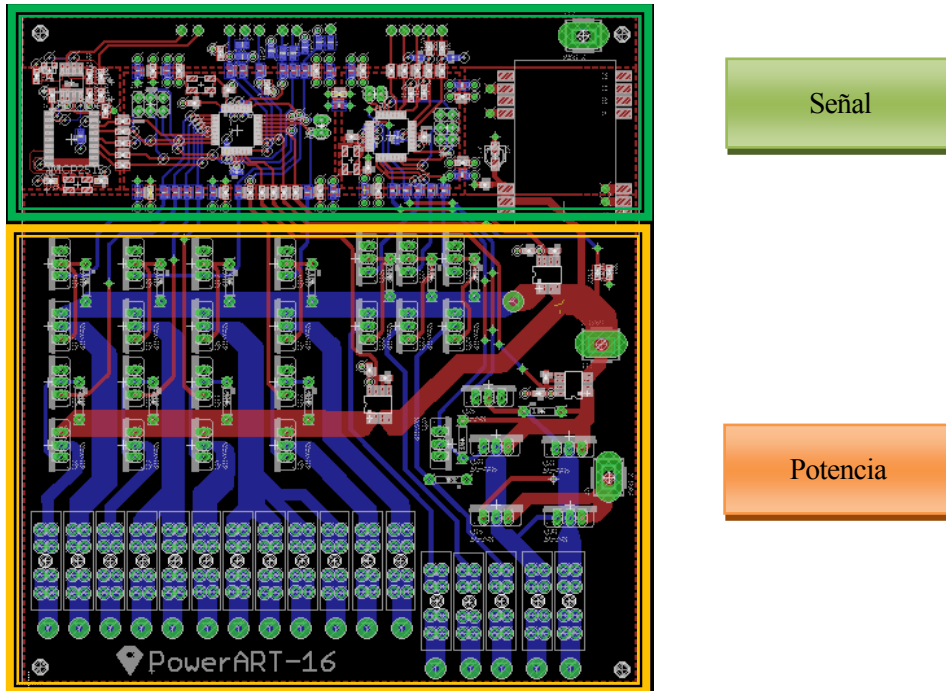


Ilustración 24: Distribución general de la PCB.

- La parte de potencia consta de un sector de transistores MOSFETs pertenecientes al circuito del EPMS (1), otro de transistores pertenecientes al cambio de marchas (2), y por último la zona de fusibles y salidas de potencia (3). Aquí se encuentran también localizados los sensores de tensión y corriente (4).

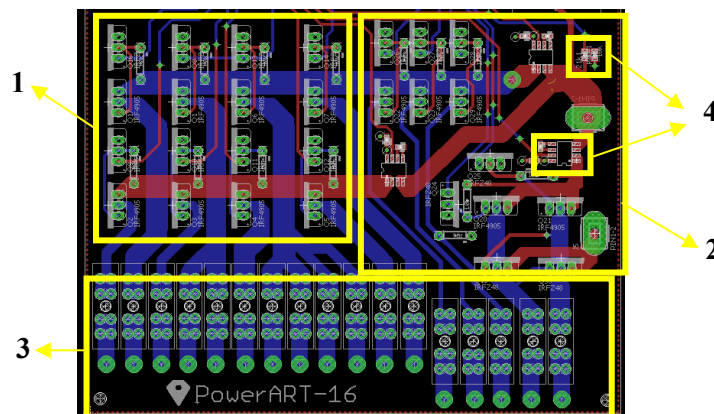


Ilustración 25: Distribución de la zona de potencia.

- La zona de señal está dividida en cinco sectores, a saber: la fuente DC-DC (5), el microcontrolador del EPMS (6), el microcontrolador del cambio de marchas (7), el circuito del CAN bus (8) y las entradas y salidas de señal (9).

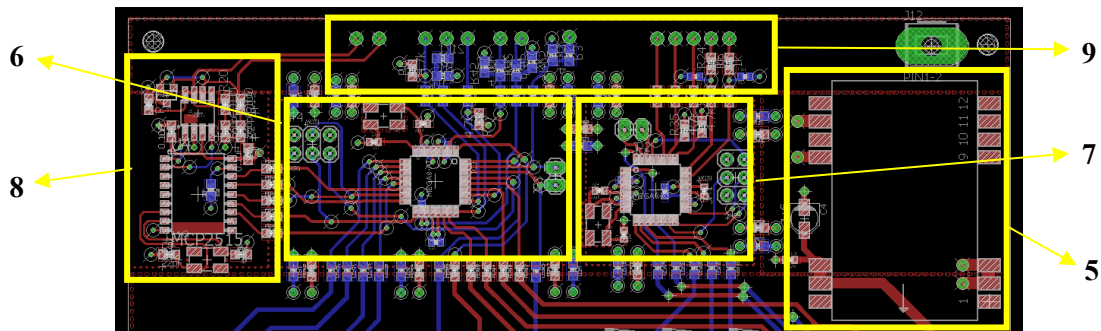


Ilustración 26: Distribución de la zona de señal.

Esta división, además de separar componentes ruidosos y sensibles, facilita la localización del foco del error en caso de que se produzca y hace las reparaciones más intuitivas.

La placa del circuito seguirá una estructura de 4 capas, con un grosor estándar de pista de $35 \mu\text{m}$ para las de señal. Las pistas de potencia tienen $70 \mu\text{m}$ de espesor. Este es el valor máximo que ofrece nuestro fabricante y generalmente, es el mayor valor que se oferta para fabricación industrial.

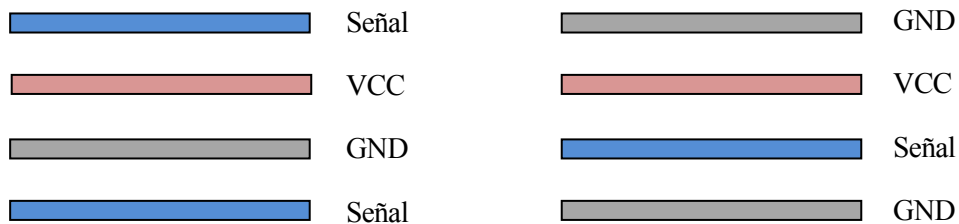


Ilustración 27: Configuraciones a 4 capas más comunes. Opción A (izq) y B (der).

Estas dos configuraciones son las más empleadas y las que ofrecen un mejor comportamiento. Se ha escogido la **opción A** por varios motivos: al ser una placa de electrónica de potencia, las corrientes que circulan por muchas de las pistas son considerablemente altas. Esto hace que aunque se dimensionen correctamente, pueden comportarse como un foco de generación de calor, por tanto las pistas externas favorecen la refrigeración natural. Por otro lado la **opción B** es muy usada en entornos de muchas interferencias (los planos de GND externos actúan como jaula de Faraday) o en placas con lógica de alta velocidad. Al no ser ninguno de estos casos, se ha optado por la primera.

Tener planos de alimentación y tierra de referencia es muchísimo más beneficioso para el funcionamiento del equipo que una PCB a dos capas. Generalmente los planos deben ser lo más continuos posibles, ya que cualquier discontinuidad puede hacer que dos señales retornen por el mismo lugar y se generen acoplamientos. Sin embargo, los cortes adecuados pueden mejorar notoriamente el comportamiento del sistema. Para ello se debe estudiar con mucho cuidado los recorridos más probables de retorno de corrientes en el plano, de forma que se puedan forzar a circular por una zona designada.

La GND de la señal es la misma que la de la batería. Por tanto, se han dispuesto dos conexiones al negativo de la batería. Una al lado de la fuente DC-DC y otra cercana al puente H del circuito del embrague. El retorno de los pulsos del actuador del embrague automático se produce a través de la placa, por lo que al realizar una conexión directa a batería justo al lado se evita que pulsos altísimos de corriente circulen por la placa.

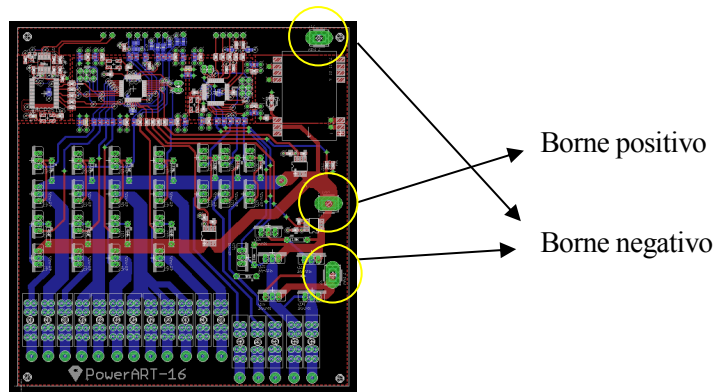


Ilustración 28: Tomas de la batería.

Se ha trazado un corte de separación entre la zona digital y la de potencia dejando sólo una unión en la zona de la fuente. Esto hace que las inducciones debidas a las perturbaciones de corriente circulen libremente hacia la zona de señal, sino que se le ha forzado un camino en el que inevitablemente alcanzan la toma de GND antes que cualquier otro componente. Esta medida disminuye notablemente el denominado *ground bounce*. Este fenómeno se refiere a perturbaciones en la tensión de los planos de referencia cuando se producen por ejemplo conmutaciones bruscas de corriente. No se ha separado totalmente ya que a las celdas de transistores llegan señales eléctricas del microcontrolador y no se debe cortar el retorno. Se han establecido uniones adicionales de ferrita. Estos elementos actúan como filtros paso bajo y su objetivo es homogeneizar la tensión en los planos de referencia y evitar desequilibrios de carga.

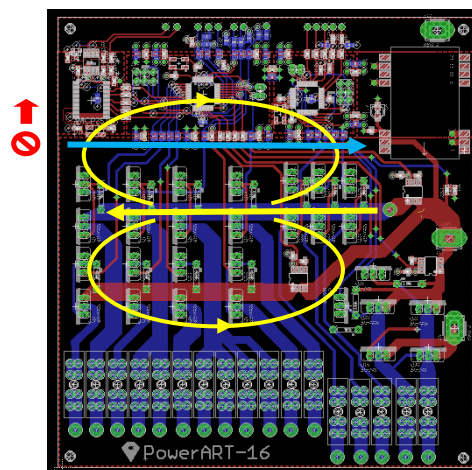
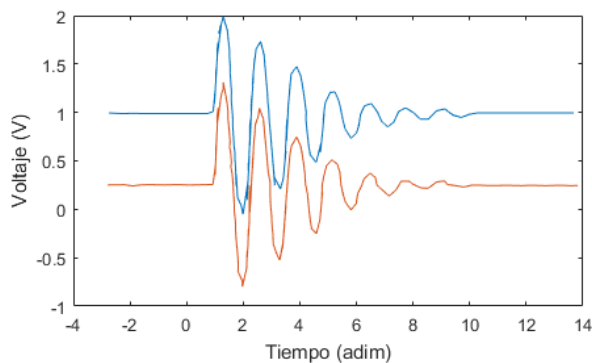


Ilustración 29: Las perturbaciones de corriente generan emisiones conducidas y radiadas que afectan al sistema. La franja sin cobre de separación hace que no sigan su camino natural, sino que se fuerzan a retornar a la fuente.

Dentro de la zona de señal se encuentran los componentes más importantes y especiales: los microcontroladores. Son el cerebro del sistema y por tanto lo último que debería fallar. A su vez, son elementos emisores de ruido, y si además, como es este caso, tienen conectado un cristal externo, los hace aún más problemáticos y en consecuencia son un foco de problemas a controlar.

La solución escogida es la técnica denominada “microisla” (*moat*). Consiste en trazar un perímetro vacío de cobre a modo de “foso”. De esta forma se encierra un cuadrilátero de planos ruidosos generalmente llamados “sucios”. Estos planos se conectan a los planos principales o “limpios” en varios puntos uniformemente repartidos por el perímetro mediante ferritas (filtros paso bajo). De esta forma se evita que el ruido salga de la zona, o si se produce una emisión descontrolada de interferencias no penetre a los planos del microcontrolador. Cuantas más ferritas haya, más homogénea y robusta es la referencia. Toda señal que entre o salga de la microisla debe estar filtrada en la frontera, y sólo deben entrar en la zona las que se salgan o vayan al microcontrolador. Si se trazaran pistas sin tener esto en cuenta se rompería el aislamiento y no sería efectivo.

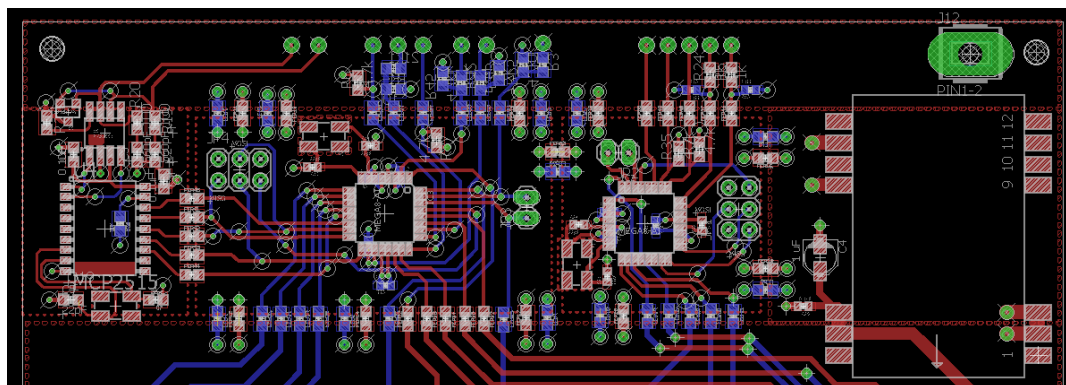


Ilustración 30: Las ferritas delimitan las dos áreas restringidas para los microcontroladores y su electrónica asociada. Las líneas discontinuas marcan la zona sin cobre.

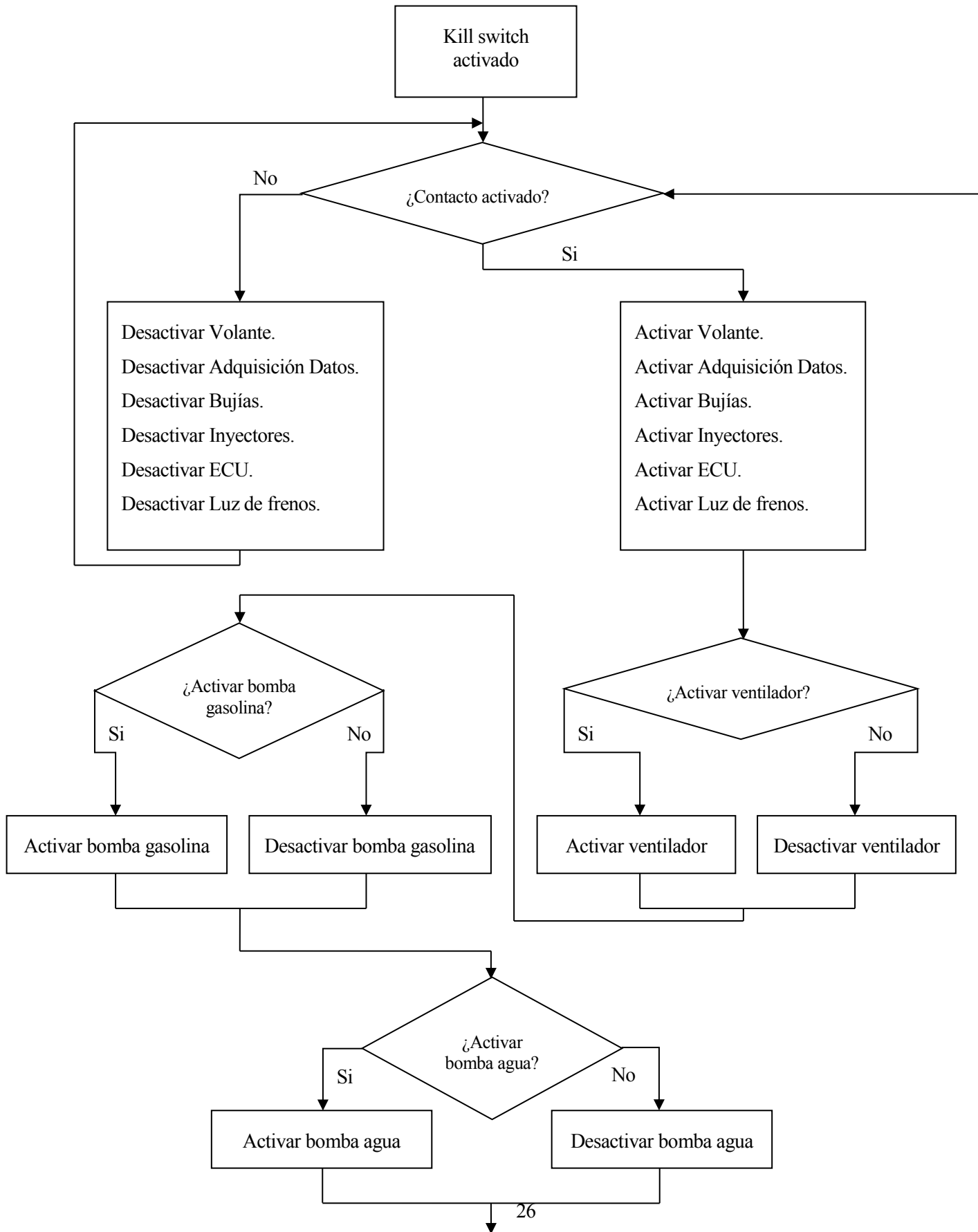
Las pistas son externas, y la anchura mínima para las de mayor corriente se ha calculado de acuerdo a la norma ICP-2221. La temperatura ambiente se ha supuesto la más desfavorable: 60°C.

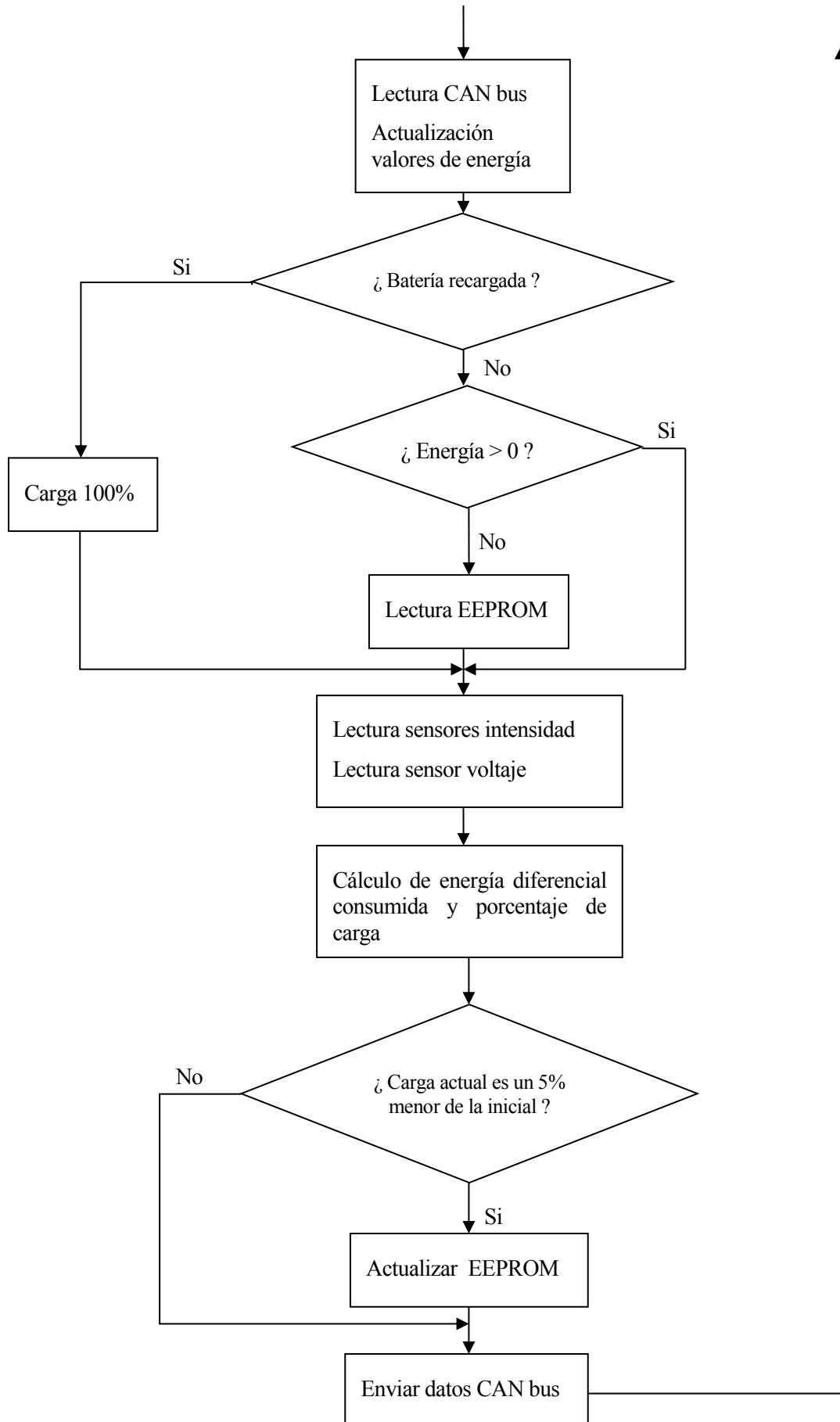
Pista	Intensidad max (A)	Espesor (μm)	Anchura (mm)	Resistencia ($\text{m}\Omega$)	ΔT (°C)	P disipada (mW)
Relé SC	0.05	70	2.1844	5.332	0	0.01333
Relé Batería	0.05	70	2.1844	5.332	0	0.01333
Bomba gasolina	3.4	70	3.8100	3.372	1	38.98
Bomba agua	7.5	70	5.0800	2.221	3	124.9
Ventilador	5	70	5.0800	2.221	1	55.525
Volante	0.15	70	4.5720	2.354	0	4.614
DAQ	1					
Lambda	0.15					
Luz de frenos	0.10					
Inyectores	1.5 (0.01s)	70	5.0800	2.221	Max ~7	~222.1
Bujías	15.56 (0.01s)				Depende del régimen de revoluciones	Depende del régimen de revoluciones
ECU	0.1846					
Paddle	18 (0.25s)					
Auxiliar	-	70	3.8100	3.372	-	-

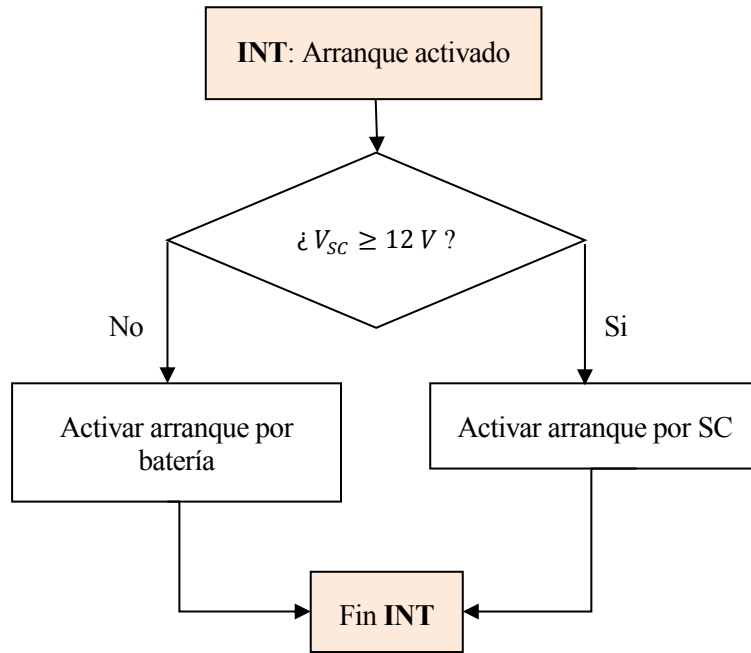
Tabla 8: Parámetros de las pistas de potencia.

5.2.7 Programación y código.

Los procesos que ejecuta el micro se pueden representar en el siguiente diagrama de flujo. El código se encuentra adjunto en el anexo,







6 PRESUPUESTO.

Compra sólo lo necesario, no lo conveniente.

Lo innecesario, aunque cueste un solo céntimo, es caro.

- Séneca -

A continuación se ha elaborado una hoja de presupuesto final del sistema. En éste presupuesto no entran ni los cables ni los conectores, puesto que estos elementos se han incluido en el presupuesto del cableado.

Componente	Unidades	Precio unitario (€)	Pack mínimo	Número packs (€)	Descuento	Precio total (€)
ETX1200	1	645	1	1	Patrocinio -20%	516
SC Kemet	6	19.98	1	1	Patrocinio -100%	0
PCB + fabricación	1	406.93	5	1	Patrocinio -100%	0
DC-DC TracoPower	1	24.79	1	1	-	24.79
IRF4905	8	1.80	1	1	-	14.4
IRFZ44N	8	0.98	1	1	-	7.84
Portafusibles	17	1.46	1	1	-	24.82
ATMega328-P	1	3.20	1	1	-	3.2
ACS712	3	3.92	1	1	-	11.76
Condensador 22pF	6	0.02	25	1	-	0.5
Condensador 560 pF	2	0.06	50	1	-	3
Condensador 100nF	14	0.02	25	1	-	0.5
Condensador 1nF	3	0.01	200	1	-	2

Componente	Unidades	Precio unitario (€)	Pack mínimo	Número packs (€)	Descuento	Precio total (€)
Condensador 22nF	2	0.08	50	1	-	4
Condensador tántalo 1uF	1	0.24	5	1	-	0.96
Ferrita	54	0.06	50	2	-	3
Resistencia 100	2	0.02	50	1	-	1
Resistencia 1k	2	0.01	50	1	-	0.5
Resistencia 4.7k	7	0.02	50	1	-	1
Resistencia 7.7k	1	0.04	5	1	-	2
Resistencia 21k	2	0.10	5	1	-	0.5
Resistencia 10k	16	0.02	50	1	-	1
PESD1CAN	1	0.29	20	1	-	5.8
MCP2515	1	1.58	1	3	-	4.74
MCP2551	1	0.98	1	3	-	2.94
Oscilador 16MHz	2	1.63	1	4	-	6.52
Caja metálica	1	22.20	1	1	Patrocinio -100%	0

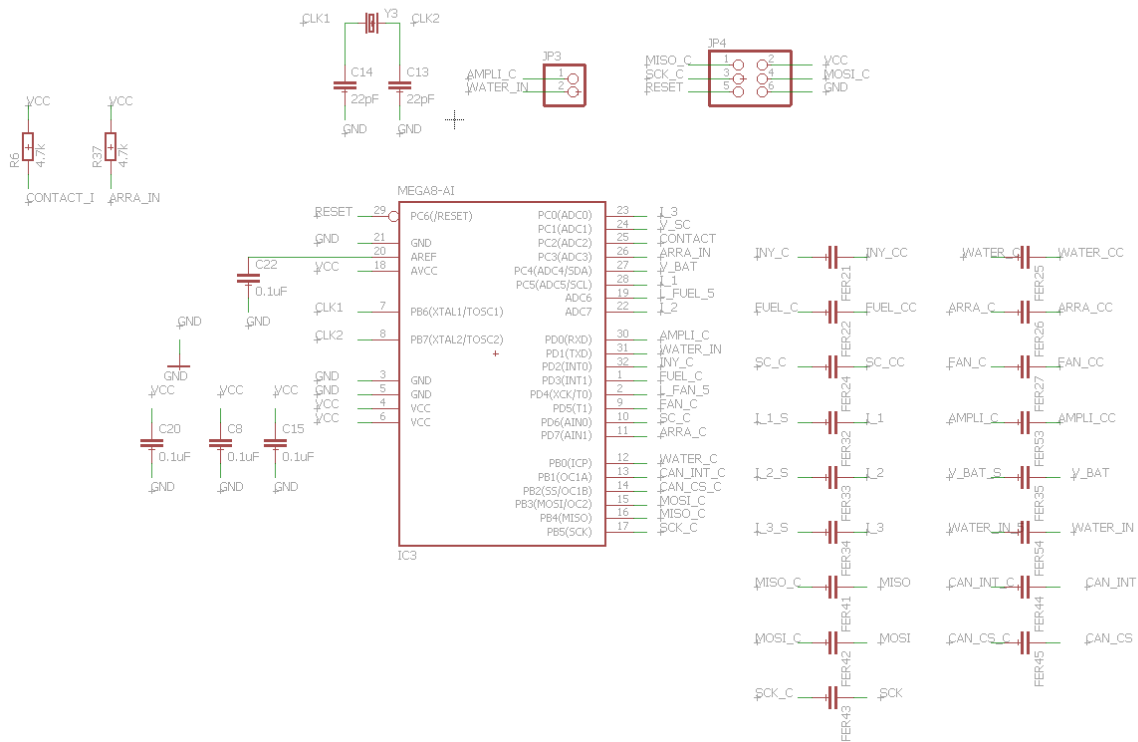
TOTAL 642.77 €

Con un presupuesto máximo de 1000 €, el coste del sistema de potencia eléctrica es más que aceptable. Muchos de los componentes de los packs se usarán también en el volante y la adquisición de datos, y gracias a la colaboración de varios patrocinadores se disponen de prácticamente 250 € netos para cables y conectores.

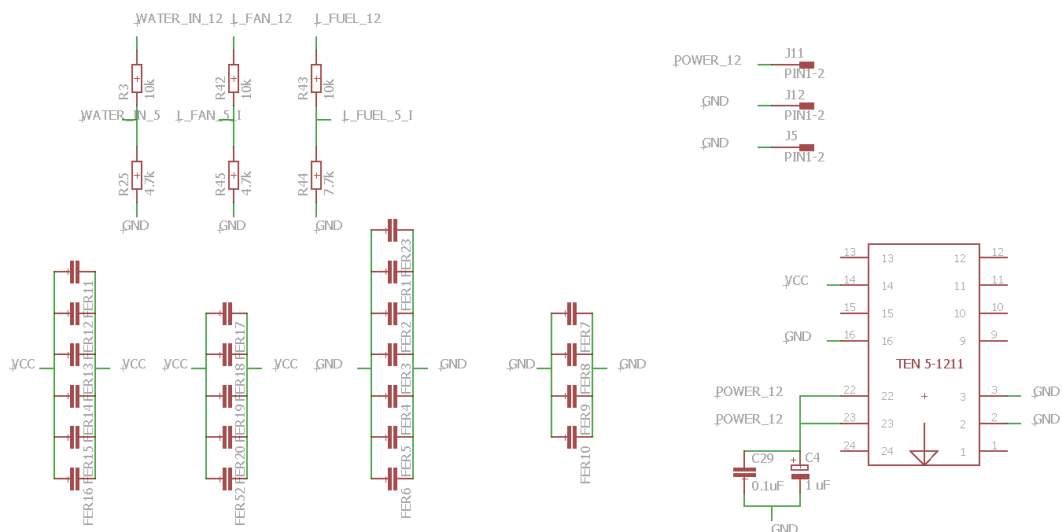
7 ESQUEMÁTICO Y LAYOUT

7.1 Esquemático.

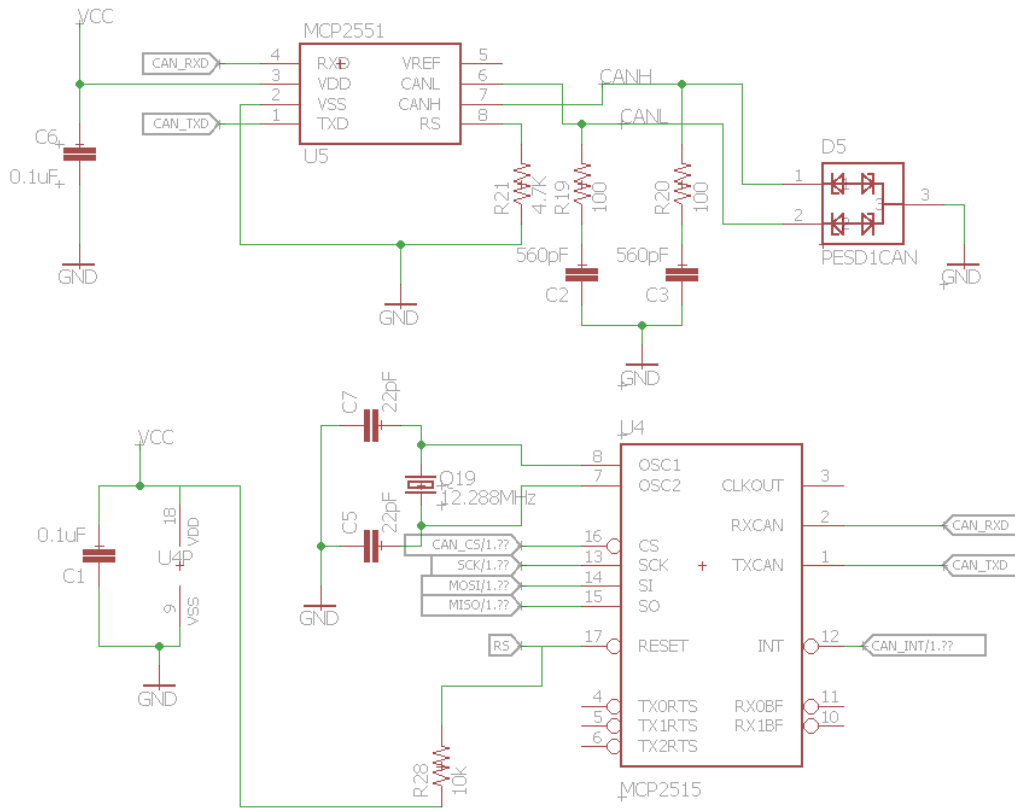
MICROPROCESADOR



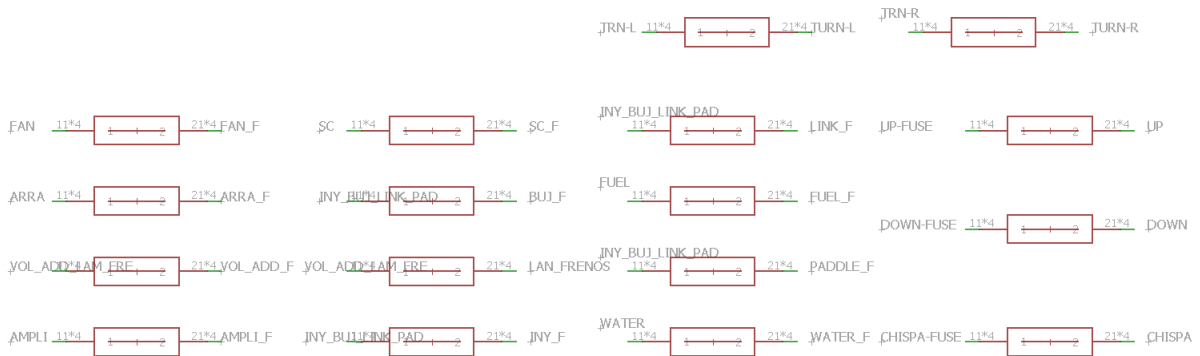
ALIMENTACION, ADAPTACIÓN Y PROTECCION



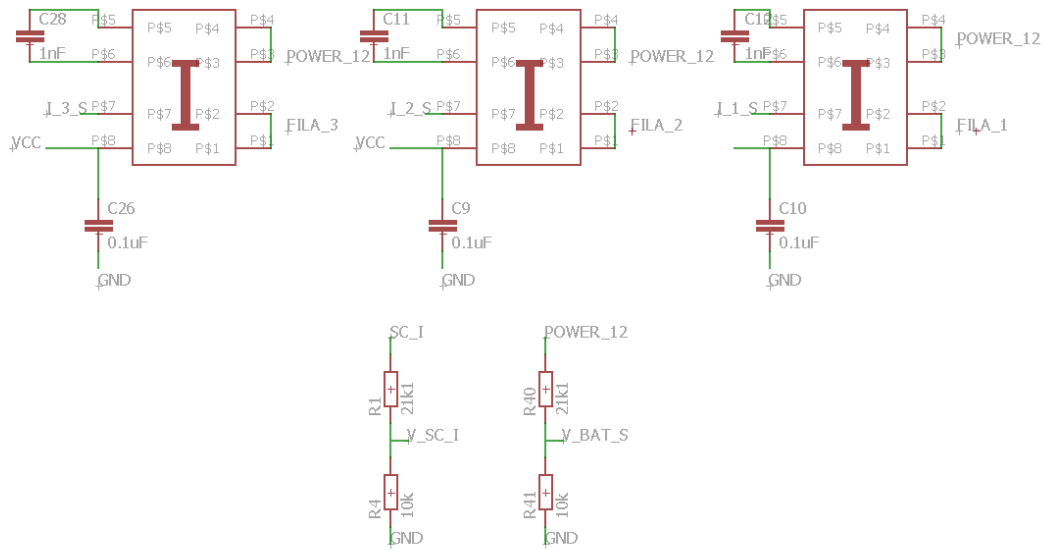
CAN Bus



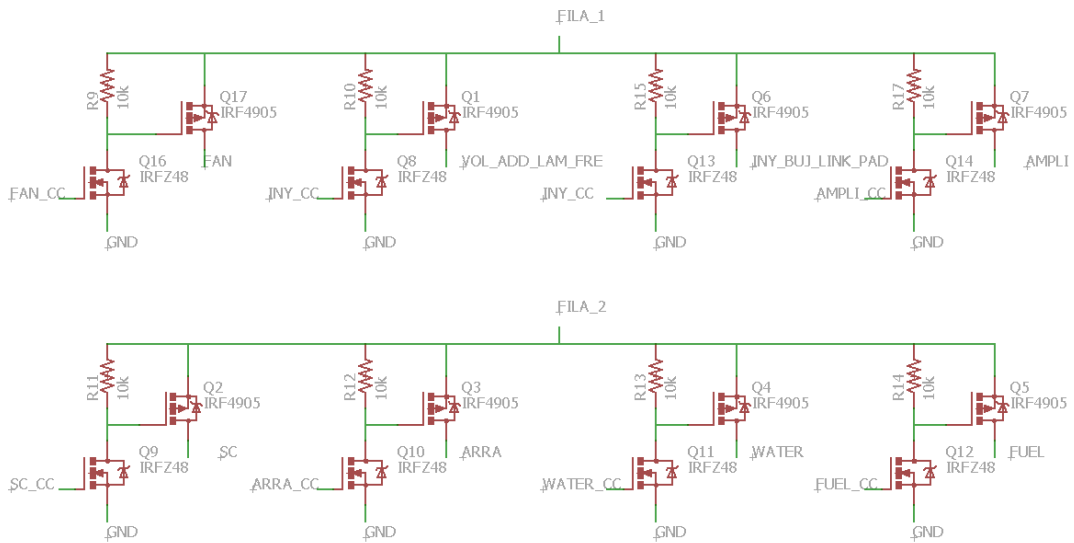
FUSIBLES Y SALIDAS



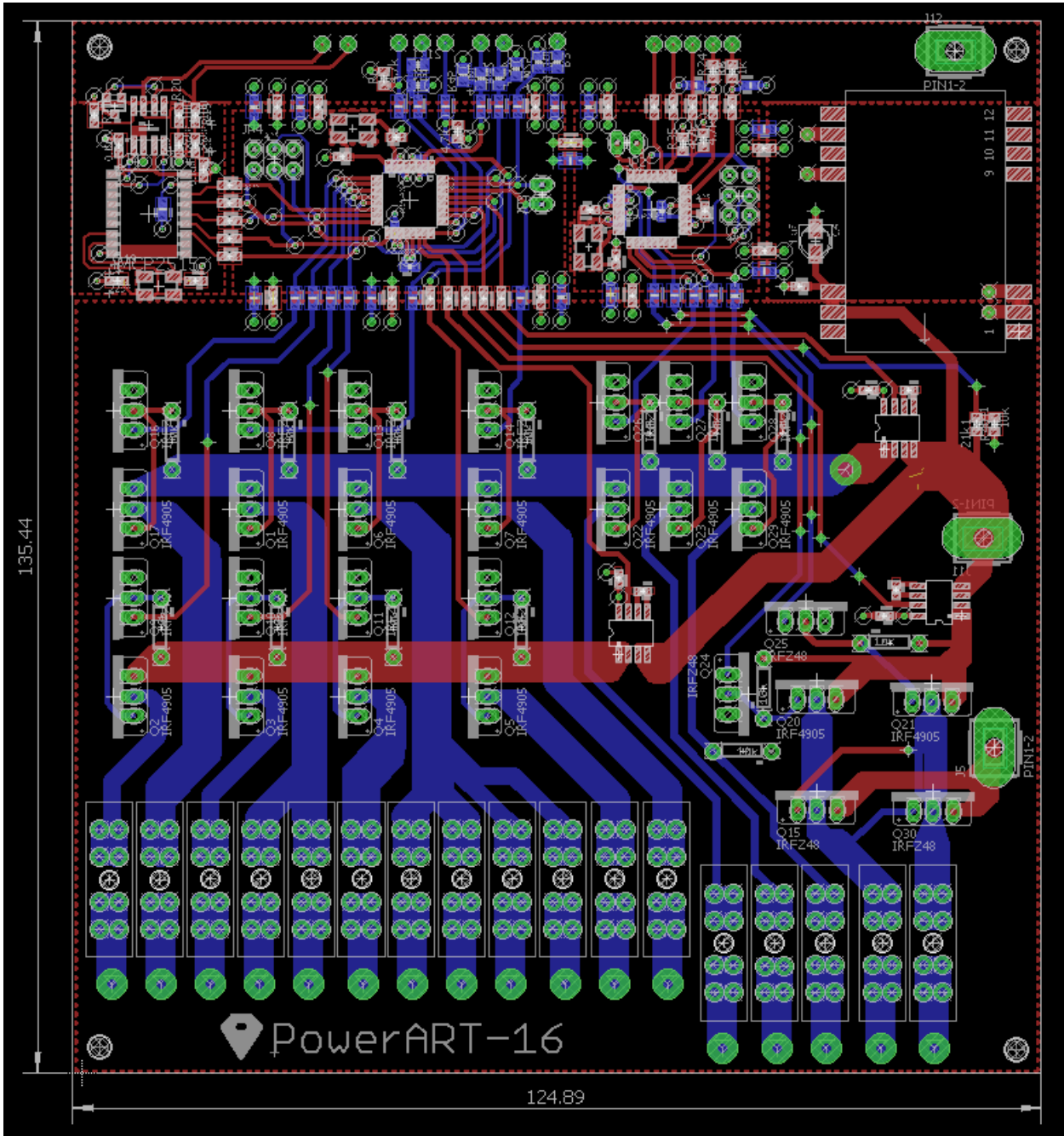
SENSORIZACION



SISTEMA DE TRANSISTORES



7.2 Layout.



8 CONCLUSIONES

Un hombre con una idea es un loco hasta que triunfa.

- Mark Twain -

- La Formula Student es un evento a nivel mundial que cada vez cobra más fuerza. Hoy en día es la mayor competición universitaria existente, y probablemente alcance niveles mayores con el paso de los años.
- Existen multitud de tecnología de almacenamiento de energía. La tecnología de Litio está desplazando a las de plomo y níquel, pero es posible que en un futuro próximo las de grafeno consigan hacerse con el mercado.
- Realizar las pruebas necesarias y obtener los datos suficientes marca la diferencia entre el éxito y el fracaso de un proyecto.
- El circuito de la competición FSAE pone a prueba la respuesta en curva y la aceleración del monoplaza. Esto supone que el ciclo de trabajo de la batería no sea uniforme, y no se llegue a ningún régimen permanente.
- Las interferencias electromagnéticas son un problema real en todos los dispositivos electrónicos. Es necesario cumplir unas pautas de diseño que pueden evitar el fallo catastrófico del sistema, la mayoría de las veces impredecible.
- Un sistema de electrónica de potencia de un coche debe estar siempre comunicado a la ECU, puesto que es esta unidad quien controla el funcionamiento del motor, y el sistema eléctrico se encarga de suministrarle potencia.
- La comunicación CAN bus es la más utilizada en automovilismo. Además de que se ha estandarizado, es debido a sus numerosas ventajas tales como la fiabilidad y la reducción de cableado.

REFERENCIAS

- [1] FSAE, *2016 Formula SAE® Rules*, SAE International, 2016.
- [2] I. Cowie, «All About Batteries, Part 3: Lead-Acid Batteries,» *EETimes*, 13 Enero 2014. [En línea]. Available: http://www.eetimes.com/author.asp?section_id=36&doc_id=1320644. [Último acceso: 12 Noviembre 2015].
- [3] T. Economist, «In search of the perfect battery,» *The Economist*, 8 Marzo 2008. [En línea]. Available: <http://www.economist.com/node/10789409>. [Último acceso: 12 Noviembre 2015].
- [4] S. Boschert, *Plug-in Hybrids: The Cars that will Recharge America*, Gabriola Island, Canada: New Society Publishers, 2006.
- [5] J. Korzeniewski, «Honda EV Plus The Full History,» *Autoblog*, 25 Noviembre 2008. [En línea]. Available: <http://www.autoblog.com/2008/11/25/honda-ev-plus-the-full-story-pinbox-for-top-ten-post/>. [Último acceso: 16 Noviembre 2015].
- [6] C. Jensen, «With Prius V, Toyota’s Marquee Hybrid Tries On New Silhouette,» *The New York Times*, 11 Enero 2011. [En línea]. Available: http://wheels.blogs.nytimes.com/2011/01/10/with-prius-v-toyotas-poster-child-tries-on-new-silhouette/?scp=1&sq=Toyota%20prius%20V&st=cse&_r=0. [Último acceso: 16 Noviembre 2015].
- [7] G. C. Congress, «Panasonic Develops New Higher-Capacity 18650 Li-Ion Cells; Application of Silicon-based Alloy in Anode,» *Green Car Congress*, 25 Diciembre 2009. [En línea]. Available: <http://www.greencarcongress.com/2009/12/panasonic-20091225.html>. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].
- [8] L. González, «¿Sufren de “efecto memoria” las baterías de ion-litio?,» *Forococheselectricos*, 20 Abril 2013. [En línea]. Available: <http://forococheselectricos.com/2013/04/Baterias-ion-litio-efecto-memoria.html>. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].
- [9] H. E. Inc., «Lithium,» *Harding Energy Inc.*, [En línea]. Available: <http://www.hardingenergy.com/lithium/#phosphate>. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].
- [10] W. Brown, «2011 Hyundai Sonata Hybrid: Hi, tech. Bye, performance,» *The Washington Post*, 19 Agosto 2011. [En línea]. Available: https://www.washingtonpost.com/business/2011/08/18/gIQAWuPJ_story.html. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].
- [11] Electromaps, «Kia Soul EV,» *Electromaps*, [En línea]. Available: <http://www.electromaps.com/coches-electricos/kia/soul-ev>. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].
- [12] Alisport, «Alisport Web Site,» *Alisport*, [En línea]. Available: <http://www.alisport.com/eu/eng/silent2electro.htm>. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].

- [13] Pipistrel, «Pipistrel Web Site,» Pipistrel, [En línea]. Available: <http://www.pipistrel.si/news/wattsup-the-new-2seat-electric-trainer-took-its-maiden-flight>Hash=745a0119cc. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].
- [14] Bateriasdelitio.net, «Baterías LiFePO4,» Bateriasdelitio.net, 5 Junio 2014. [En línea]. Available: <http://bateriasdelitio.net/?p=104>. [Último acceso: 16 Noviembre 2016].
- [15] J. Quiroz, «Comparación FET vs BJT,» [En línea]. Available: <https://es.scribd.com/doc/99408354/Comparacion-FET-vs-BJT>. [Último acceso: 21 Noviembre 2016].
- [16] D. Christiansen y C. K. Alexander, Standard Handbook of Electrical Engineering, McGraw-Hill, 2005.
- [17] Wikipedia, «Tiristor GTO,» Wikipedia, [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Tiristor_GTO. [Último acceso: 01 12 2015].
- [18] R. F. Graf, Diccionario de Electrónica, Ediciones Pirámide, S.A., 1984.
- [19] J. D. V. Tous, «Diferencias entre microcontroladores y microprocesadores,» Monografías, [En línea]. Available: <http://www.monografias.com/trabajos27/microcontroladores/microcontroladores.shtml>. [Último acceso: 01 12 2015].

BIBLIOGRAFÍA.

- López Veraguas, Joan Pere. «*Compatibilidad electromagnética y seguridad funcional en sistemas electrónicos*». Marcombo S.A., 2006. ISBN 9788426716439.
- J. Quiroz, «Comparación FET vs BJT,»
- FSAE, *2016 Formula SAE® Rules*, SAE International, 2016.
- <https://es.wikipedia.org/>
- <http://www.monografias.com/>
- R. F. Graf, «*Diccionario de Electrónica*», Ediciones Pirámide, S.A., 1984
- <https://www.washingtonpost.com/>
- <http://wheels.blogs.nytimes.com/>
- <http://www.atmel.com/>
- <https://www.sparkfun.com/>
- <https://www.astm.org/>
- <http://www.iso.org/>
- <http://earthxbatteries.com/>

ANEXO I: NORMATIVA *FSAE*.

Este anexo es el fragmento de la normativa de la FSAE referente a electricidad y electrónica para vehículos de combustión.

ANEXO II: CÓDIGO.

```
#include <SPI.h>
#include <mcp_can.h>
#include <EEPROM.h>

// DIGITAL INPUTS
const int fanIn = 4;
const int fuelIn = A6;
const int arraIn = A3;
const int contact = A2;
const int waterIn = 1;
const int inputs[]={fanIn,fuelIn, arraIn, contact, waterIn};

// ANALOG INPUTS
const int intSensor1 = A5;
const int intSensor2 = A7;
const int intSensor3 = A0;
const int vBat = A4;
const int vSC = A1;
const int analogInputs[]={intSensor1, intSensor2, intSensor3, vBat, vSC};

// OUTPUTS
const int arraBatOut = 7;
const int fuelOut = 3;
const int fanOut = 5;
const int VALFIBLP = 2;
const int arraSCOut = 6;
const int waterOut = 8;
const int ampli = 0;
const int outputs[]={arraSCOut, fanOut, arraBatOut, VALFIBLP, waterOut,
                    fuelOut, ampli};
```

```
const int SPI_CS_PIN = 10;

MCP_CAN CAN(SPI_CS_PIN);

unsigned char flagRecv = 0;
unsigned char len = 0;
unsigned char bufECU0[8];
unsigned char bufECU1[8];
unsigned char bufVOL[8];
unsigned char bufDAQ[8];
unsigned char bufEPMS[8] = {0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0};
unsigned char canId;

// Escritura y lectura en la EEPROM
int dir_carga = 0;
byte carga;
int carga_anterior=0;

int t=0;
int inc_t=0;
float E=-1;
float inc_E=0;
float V=0;
float I=0;
float P=0;

void setup()
{
  for(int j=0; j<5; j++)
  {
    pinMode(inputs[j], INPUT);
  }

  for(int j=0; j<5; j++)
  {
    pinMode(analogInputs[j], INPUT);
  }

  for(int j=0; j<7; j++)
  {
```

```
    pinMode(outputs[j], OUTPUT);
}

attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(arrIn), arranque, CHANGE);

CAN.begin(CAN_500KBPS);

}

void canRead()
{
    if(CAN_MSGAVAIL == CAN.checkReceive())           // check
    {
        flagRecv = 1;
        switch (CAN.getCanId()) {
            case 0:
            case 1:
                CAN.readMsgBuf(&len, bufECU1);
                break;
            case 2:
                CAN.readMsgBuf(&len, bufDAQ);
                break;
            case 3:
                break;
            case 4:
                CAN.readMsgBuf(&len, bufVOL);
                break;
        }
    }
}

void loop()
{
    for(int j=0; j<7; j++)
    {
        digitalWrite(outputs[j], LOW);
    }

    while (digitalRead(contact)==0)
    {
```

```

digitalWrite(VALFIBLP, HIGH);

////////////////////////////////// FAN ////////////////////////////////////
if (digitalRead(fanIn)==HIGH || bufVOL[1] == 255)
{
    digitalWrite(fanOut, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(fanOut, LOW);
}

////////////////////////////////// WATER ////////////////////////////////////
if (digitalRead(waterIn)==HIGH || bufVOL[2] == 255)
{
    digitalWrite(waterOut, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(waterOut, LOW);
}

////////////////////////////////// FUEL ////////////////////////////////////
if (digitalRead(fuelIn)==HIGH)
{
    digitalWrite(fuelOut, HIGH);
}
else
{
    digitalWrite(fuelOut, LOW);
}

//////////////////////////////////
//////////////////////////////////
/////////BATERIA/////////
//////////////////////////////////
//////////////////////////////////

V=analogRead(vBat);
I=analogRead(intSensor1)          +          analogRead(intSensor2)          +
  analogRead(intSensor3);

```



```

P=V*I;

descBat();

////////////////////////////////////
////////////////////////////////////

////////////////////////////////////CAN BUS////////////////////////////////////

bufEPMS[1] = carga;
bufEPMS[2] = intSensor1;
bufEPMS[3] = intSensor2;
bufEPMS[4] = intSensor3;
bufEPMS[5] = vBat;
bufEPMS[] = {0, carga, intsensor1, intsensor2, intsensor3, vBat, 0, 0};
CAN.sendMsgBuf(0x03, 0, 8, bufEPMS);
}
}

void descBat()
{
  if (E == -1) {
    E=(EEPROM.read(dir_carga)/100)*327;
  }

  if (millis()>inc_t) {
    inc_t=millis()-inc_t;
  }
  else {
    inc_t=millis();
  }
  t=t+inc_t;

  inc_E=P*inc_t*0.001;
  E=E-inc_E;
  carga=round(100*(E/327));

  //Escritura en la EEPROM
  if (carga-carga_anterior>=5)
  {
    EEPROM.write(dir_carga, carga);
  }
}

```

```
carga_anterior=carga;

inc_t=millis();
}

void arranque() {
  if (digitalRead(arrain)==LOW) {
    if (VSC > 12) {
      digitalWrite(arrasCOut,HIGH);
    }
    else {
      digitalWrite(arrabatOut, HIGH);
    }
  }
  else {
    digitalWrite(arrabatOut, LOW);
    digitalWrite(arrasCOut,LOW);
  }
}
}
```