



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño

Desarrollo de una carga electrónica regulable para el
análisis y clasificación de baterías de ion litio

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR/A: Huet Sanchis, Joan

Tutor/a: Fernández Díaz, Román

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería del
Diseño

Desarrollo de una carga electrónica regulable para el
análisis y clasificación de baterías de ion litio

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

AUTOR: Huet Sanchis, Joan

TUTOR: Fernández Díaz, Román

CURSO ACADÉMICO: 2021/2022

RESUMEN

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado (TFG) es el desarrollo de un circuito que actúe como una carga electrónica regulable para realizar un análisis del estado de carga de baterías de tecnología ion litio. Este trabajo surge como respuesta a la necesidad detectada por el alumno durante su periodo de prácticas en la empresa Ford. Actualmente, el mantenimiento de las baterías que alimentan las Powertools de toda la planta de Almussafes (+800 herramientas) se realiza de manera muy ineficiente, desmontando las baterías que presentan problemas para testear individualmente las celdas que las forman. El alumno pretende diseñar una herramienta electrónica de caracterización que permita analizar y clasificar el estado de las baterías sin necesidad de desmontarlas, mejorando de esta manera la eficiencia de las acciones de mantenimiento en la planta. El alcance de este TFG incluye los siguientes puntos: - Revisión del estado del arte de las tecnologías de almacenamiento de energía basadas en baterías electroquímicas; profundizando en las baterías de ion litio y en las celdas 18650 - Estudio de los métodos actuales para el análisis y clasificación de baterías. - Definición de especificaciones del circuito de caracterización de baterías. - Diseño del circuito y selección de componentes. - Simulación del circuito propuesto - Implementación y validación del circuito.

Palabras clave: carga electrónica regulable; baterías de ion litio; simulación; electrónica de potencia

ABSTRACT

The objective of this Final Degree Project (TFG) is the development of a circuit that acts as an adjustable electronic load to carry out an analysis of the state of charge of lithium-ion technology batteries. This work arises in response to the need detected by the student during his internship at Ford company. Currently, the maintenance of the batteries that feed the Powertools of the entire Almussafes plant (+800 tools) is carried out in a very inefficient way, dismantling the batteries that present problems to individually test the cells that form them. The student intends to design an electronic characterization tool that allows analysing and classifying the state of the batteries without the need to disassemble them, thus improving the efficiency of maintenance actions in the plant. The scope of this TFG includes the following points: - Review of the state of the art of energy storage technologies based on electrochemical batteries; digging deeper into lithium-ion batteries and 18650 cells - Study of the current methods for the analysis and classification of batteries. - Definition of battery characterization circuit specifications. - Circuit design and component selection. - Simulation of the proposed circuit - Implementation and validation of the circuit.

Key words: adjustable electronic load; lithium-ion batteries; simulation; power electronics

RESUM

L'objectiu d'aquest Treball Fi de Grau (TFG) és el desenvolupament d'un circuit que actuï com una càrrega electrònica regulable per fer una anàlisi de l'estat de càrrega de bateries de tecnologia ió liti. Aquest treball sorgeix com a resposta a la necessitat detectada per l'alumne durant el període de pràctiques a l'empresa Ford. Actualment, el manteniment de les bateries que alimenten les Powertools de tota la planta d'Almussafes (+800 eines) es fa de manera molt ineficient, desmuntant les bateries que presenten problemes per testejar individualment les cel·les que les formen. L'alumne pretén dissenyar una eina electrònica de caracterització que permeti analitzar i classificar l'estat de les bateries sense necessitat de desmuntar-les, millorant així l'eficiència de les accions de manteniment a la planta. L'abast d'aquest TFG inclou els punts següents: - Revisió de l'estat de l'art de les tecnologies d'emmagatzematge d'energia basades en bateries electroquímiques; aprofundint en les bateries de ió liti i les cel·les 18650 - Estudi dels mètodes actuals per a l'anàlisi i la classificació de bateries. - Definició de les especificacions del circuit de caracterització de bateries. - Disseny del circuit i selecció de components. - Simulació del circuit proposat. - Implementació i validació del circuit.

Paraules clau: càrrega electrònica regulable; bateries de ió liti; simulació; electrònica de potència

CONTENIDO

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
RESUM	4
DOCUMENTO Nº1: MEMORIA	8
DOCUMENTO Nº2: PLIEGO DE CONDICIONES	52
DOCUMENTO Nº3: PRESUPUESTO	58
DOCUMENTO Nº4: PLANOS	63
ANEXO I: CÓDIGO INTERFAZ DE USUARIO	65
ANEXO II: CÓDIGO FIRMWARE ARDUINO	69

INDICE DE FIGURAS

Ilustración 1. Evolución de la capacidad en la batería de los smartphones.....	16
Ilustración 2. Evolución del precio de las baterías de litio ion expresado en dólares por Wh. ..	16
Ilustración 3. Evolución de la vida útil de una batería en base a la profundidad de descarga .	18
Ilustración 4. Evolución de la vida útil de una batería en función de la tasa de descarga.....	19
Ilustración 5. Evolución de la capacidad real de una batería en función de la temperatura	20
Ilustración 6. Análisis de la resistencia interna en corriente continua	22
Ilustración 7. Carga electrónica comercial modelo "2380-120-60" de la marca Keithle	24
Ilustración 8. Etapa de alimentación.....	25
Ilustración 9. Etapa de control de corriente	26
Ilustración 10. Etapa de sensor de corriente	27
Ilustración 11. Etapa de sensor de tensión	28
Ilustración 12. Etapa de control del ventilador.....	29
Ilustración 13. Etapa de potencia.....	30
Ilustración 14. SOA del MOSFET IXFH96N15P.....	31
Ilustración 15. Conexiones de Arduino con el prototipo	33
Ilustración 16. Arduino UNO	33
Ilustración 17. Variación de la resistencia térmica en presencia de ventilación forzada	35
Ilustración 18. Circuito de simulación en LT Spice	36
Ilustración 19. Corriente que circula por el MOSFET con 5V en el DAC.....	36
Ilustración 20. Tensión a la entrada del sensor de corriente en función de la corriente en la resistencia de potencia	37
Ilustración 21. Tensión en el sensor de voltaje en función de la tensión de la batería	37
Ilustración 22. Vista de la interfaz de usuario.....	38
Ilustración 23. Interfaz de usuario en funcionamiento en modo CC y 1A	39
Ilustración 24. Diagrama de flujo de la interfaz de usuario	39
Ilustración 25. Envío de tramas de la interfaz por el puerto serie.....	40
Ilustración 26. Diagrama de flujo del firmware de Arduino.....	41
Ilustración 27. Vista de todos los componentes insertados en la placa	45
Ilustración 28. Vista de las soldaduras por la parte inferior de la placa	46
Ilustración 29. Vista del prototipo conectado.....	46

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparativa entre distintas tecnologías de baterías.....	15
Tabla 2. Pruebas en el modo CC con a fuente a 3V.....	47
Tabla 3. Pruebas en el modo CC con la fuente a 5V.....	47
Tabla 4. Pruebas con el modo CP	48
Tabla 5. Pruebas con el modo CR.....	48
Tabla 6. Costes de las herramientas para el desarrollo del proyecto	59
Tabla 7. Coste del hardware del prototipo	60
Tabla 8. Costes del software del prototipo	61
Tabla 9. Coste de las reuniones.....	61
Tabla 10. Coste del diseño y montaje	61
Tabla 11. Coste de redacción	62
Tabla 12. Coste total del proyecto	62

DOCUMENTO Nº1: MEMORIA

MOTIVACIÓN.....	10
OBJETIVO.....	11
1 INTRODUCCIÓN.....	12
1.1 CONCEPTOS GENERALES Y PANORAMA ACTUAL DE LAS BATERÍAS	12
1.2 TIPOS DE BATERÍAS	13
1.2.1 BATERÍAS ALCALINAS	13
1.2.2 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO.....	13
1.2.3 BATERÍAS DE NÍQUEL	13
1.3 BATERÍAS DE LITIO.....	14
1.3.1 PROBLEMAS DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO	17
1.3.2 SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS (BMS)	17
1.3.3 CELDAS 18650	17
1.3.4 MOTIVOS CAUSANTES DEL ENVEJECIMIENTO PREMATURO EN LAS BATERÍAS DE ION LITIO	18
2 MÉTODOS ACTUALES PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO	21
2.1 MÉTODOS DE DESCARGA DIRECTA	21
2.2 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA INTERNA	21
3 CARGA ELECTRÓNICA REGULABLE	23
4 ESTUDIO TEÓRICO DEL CIRCUITO Y JUSTIFICACIÓN DE COMPONENTES.....	24
4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	24
4.2 ETAPA DE ALIMENTACIÓN	25
4.3 CONTROL DE CORRIENTE	26
4.4 SENSOR DE CORRIENTE	27
4.5 SENSOR DE TENSIÓN	28
4.6 CONTROL DEL VENTILADOR	29
4.7 ETAPA DE POTENCIA	30
4.8 PLACA DE CONTROL	32
5 CÁLCULOS TÉRMICOS.....	34
6 SIMULACIÓN.....	36
7 INTERFAZ DE USUARIO.....	38
7.1 COMUNICACIÓN.....	40

8	FIRMWARE	41
8.1	INICIALIZACIÓN.....	42
8.2	BUCLE PRINCIPAL	42
8.3	LEER CORRIENTE Y TENSIÓN	43
8.4	CONTROL DE TEMPERATURA	44
9	MONTAJE.....	45
10	VALIDACIÓN	47
10.1	PRUEBAS EN MODO CORRIENTE CONSTANTE	47
10.2	PRUEBAS EN MODO POTENCIA CONSTANTE	48
10.3	PRUEBAS EN MODO RESISTENCIA CONSTANTE	48
10.4	DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	48
11	CONCLUSIONES	49
12	FUTURAS LÍNEAS	50
13	BIBLIOGRAFÍA.....	50

MOTIVACIÓN

El presente trabajo, surge del descubrimiento de una carencia en el taller de reparaciones eléctricas del departamento de montaje de la fábrica Ford Almussafes (de aquí en adelante, taller de eCATS).

Solo en la planta de montaje de la factoría Ford, se estima que hay más de 800 baterías de litio que suministran energía eléctrica a un sinfín de herramientas eléctricas tales como: destornilladores eléctricos, taladros, radiales portátiles....

Estas baterías, eventualmente dan problemas a medida que pasa el tiempo por distintos motivos; desgaste excesivo de una o varias celdas que componen la batería, desconexiones de las celdas conectadas en serie a través de puntos de soldadura que hacen que la batería deje de funcionar completamente, etc.

Usualmente, los operarios de la planta acuden al taller de eCATS con sus herramientas, manifestando problemas como “La batería no funciona” o “La batería no dura ni 10min”.

Actualmente, el único método de diagnóstico de estas baterías es abrir su carcasa (con el tiempo que esto conlleva, teniendo en cuenta la cantidad de baterías pendientes de análisis) y analizar cada una de las celdas individualmente (estas celdas, son pilas 18650 de diferentes fabricantes) y una vez detectado el problema, sustituir las pilas que estén en mal estado, volver a soldar la batería y cerrarla en la carcasa.

El problema que nos encontramos es que, sin abrir la batería, actualmente no hay ningún método de asignar prioridades de reparación y teniendo en cuenta que la cantidad de baterías que se deben reparar es muy elevada, sería muy recomendable poder asignar un orden de importancia a estas reparaciones, para que mientras las que están en peor estado se reparan, las que todavía pueden funcionar lo sigan haciendo.

OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es diseñar y construir una carga electrónica adaptable que permita el diagnóstico de baterías de distintos tipos y que implemente los métodos de caracterización que se utilizan habitualmente en entornos industriales. Se busca aportar una solución integral al problema planteado en la motivación y para ello, se desarrollarán las siguientes actividades:

- Estudio previo de los parámetros relacionados con diferentes tipos de baterías, especialmente de litio y focalizándose en celdas 18650
- Análisis los distintos componentes y diseño teórico de un circuito que sea capaz de ofrecer la solución requerida.
- Desarrollo de la programación del controlador del dispositivo, así como de una pequeña interfaz de usuario para interactuar con el dispositivo
- Implementación del circuito propuesto en una placa de desarrollo.

1 INTRODUCCIÓN

Antes de empezar a profundizar en sistemas de análisis, trataremos algunos conceptos generales más básicos que nos ayudarán a comprender los siguientes apartados.

1.1 CONCEPTOS GENERALES Y PANORAMA ACTUAL DE LAS BATERÍAS

Las baterías, son dispositivos de almacenamiento de energía eléctrica. Se componen de elementos más básicos llamados celdas. Estas celdas, pueden ser primarias (en el caso de que estas solo se puedan usar una vez) o secundarias (donde el proceso químico que sufren los electrodos puede ser revertido y, por tanto, se pueden usar varias veces). En el caso de estas últimas, conviene conocer el concepto de ciclo de carga, que se utilizará en el futuro, y que hace referencia a una carga y descarga completa de la capacidad de la batería.

Las baterías, se componen de un electrodo positivo y otro negativo. El principio de funcionamiento básico es el de la reacción de oxidación-reducción (redox) dónde una de las sustancias químicas pierde electrones (se oxida) y la otra gana electrones (se reduce). Cuando este proceso termina, se dice que la batería está descargada. En función del tipo de celdas que esté compuesta, podrá invertirse el proceso para recargarla o no.

La capacidad de una batería, por otro lado, es la cantidad de energía eléctrica que esta puede almacenar. Normalmente, se indica en Amperios Hora (Ah) y esta capacidad está determinada por la propia naturaleza de la batería. Este dato indica la cantidad de energía que se puede suministrar antes de agotarse. Por ejemplo, una batería de 5Ah de capacidad, podrá suministrar 5A de energía durante una hora, antes de agotarse.

Otro aspecto importante que se debe tener en cuenta con las baterías es su vida útil o ciclo de vida, que es la cantidad de ciclos de carga que es capaz de soportar hasta ser inservible. Cuando una batería deja de ser útil se convierte en un potencial contaminante tanto de agua como de suelo, y se deben seguir unas pautas muy rigurosas de reciclaje para que la degradación de los componentes químicos no afecte al medio ambiente.

El uso principal de una batería es el de proporcionar energía eléctrica a dispositivos que no están conectados a una red de alimentación y, por tanto, el desarrollo en las calidades de las baterías va de la mano del avance de la tecnología electrónica.

Las baterías tienen un papel fundamental en el mundo actual, móviles, portátiles, patinetes, coches... Vivimos en un mundo donde el objetivo principal en muchos aspectos es la portabilidad y, por tanto, diseñar productos que funcionen con baterías en lugar de por cable esta exponencialmente en crecimiento.

Esto ha multiplicado la inversión que se realiza en el desarrollo de la tecnología de las baterías, ya que tecnologías con mayor capacidad, o misma capacidad con menor peso, significan avances

muy importantes en los productos finales. Paralelamente, la irrupción creciente del vehículo eléctrico hace suponer que esta tendencia no va a hacer más que aumentar.

1.2 TIPOS DE BATERÍAS

Existen diferentes tecnologías de las baterías dependiendo de la composición química de sus electrodos. Las más importantes y comúnmente utilizadas son:

1.2.1 BATERÍAS ALCALINAS

Las pilas alcalinas son de las baterías más populares en el mercado. Son las más conocidas porque son tan versátiles que pueden adaptarse a todo tipo de tamaños y usos. También se diferencian de otras opciones tradicionales en que, aunque tienen el mismo voltaje (capacidad de generar energía para alimentar dispositivos) y dimensiones que estas opciones, su vida útil es de 4 a 9 veces mayor.

Las pilas alcalinas funcionan con una reacción entre el zinc metálico y el dióxido de manganeso y utilizan hidróxido de potasio como electrolito frente a los cloruros de otras pilas como la salina. Es ideal para juguetes o dispositivos que requieran más potencia. Además, tiene una vida más larga, lo que significa que no hay necesidad de reemplazarlas tan a menudo.

Hay que tener en cuenta que las pilas alcalinas son dañinas para el medio ambiente y siempre se recomienda reciclarlas en contenedores especializados. [15]

1.2.2 BATERÍAS DE PLOMO-ÁCIDO

Comúnmente, el ámbito asociado a este tipo de baterías siempre ha sido como baterías de vehículos automóviles, aunque también se usa en otros ámbitos y para otros fines como, por ejemplo, en paneles fotovoltaicos.

La batería utiliza un electrolito que contiene una solución de ácido sulfúrico y agua destilada. En términos generales, cada batería consta de celdas o pares de electrodos. Ánodo con placa de plomo. Durante la carga, el sulfato de plomo del cátodo se reduce a metal y el sulfato de plomo del ánodo se convierte en óxido de plomo. Este proceso genera electricidad mediante el intercambio de electrones.

Las baterías de plomo-ácido destacan por ser baratas y fáciles de producir. [15]

1.2.3 BATERÍAS DE NÍQUEL

Las baterías basadas en el níquel no destacan por su alto rendimiento energético, pero si por su coste de fabricación, entre los diferentes tipos de baterías de níquel, destacan:

Baterías de Níquel-hierro

Una batería de níquel-hierro (batería NiFe) es una batería con óxido de níquel (III) en la placa positiva, hierro en la placa negativa e hidróxido de potasio como electrolito. El material activo se almacena en un tubo de acero niquelado o en una bolsa perforada. Esta batería fue diseñada por Thomas Edison hace ya más de 100 años y es muy robusta, puede resistir el abuso (sobrecarga, descarga profunda y cortocircuito) y puede tener una larga vida incluso con dicho tratamiento. A menudo se usa en situaciones de respaldo donde se puede cargar continuamente y se puede usar durante más de 20 años. Otras baterías han reemplazado a las baterías de níquel-hierro en la mayoría de las aplicaciones debido a su pobre retención de carga, altos costos de producción y obsolescencia programada. [15]

Baterías de Níquel-Cadmio

Las baterías de níquel cadmio son otro tipo de baterías en desuso debido a sus efectos de memoria y contaminación.

El efecto memoria es un fenómeno que reduce la capacidad de una batería si esta es cargada de forma incompleta. Esto sucede cuando la batería se carga sin descargarse por completo, se pueden formar cristales dentro de la batería a medida que la batería se calienta. Para evitar que esto suceda, debe cargarse la batería por completo y no de forma parcial.

Estas baterías, consisten en un ánodo de cadmio y un cátodo de hidróxido de níquel con hidróxido de potasio como electrolito. Su ventaja es la capacidad de recargarse, pero tiene sus inconvenientes: efecto memoria, baja densidad energética y materiales muy contaminantes (cadmio). Estas son baterías recargables para uso doméstico, pero se desecharon y se reemplazaron por baterías recargables de níquel-metalhidruro (NiMH) . [15]

Baterías de Níquel-Hidruro

Las baterías de níquel-hidruro, son también baterías recargables.

Su principal razón de diseño es sustituir el cadmio y de esta manera, ayudar al medioambiente y reducir costes. El cátodo se compone de una aleación de hidruro metálico. Sus principales ventajas frente a las anteriores son que tienen un efecto memoria menor y que tienen una mayor capacidad. Además, toleran muchos tipos de uso. Por ejemplo, las baterías de NiMH se utilizan en todo tipo de vehículos híbridos, además de en electrónica de consumo. [15]

1.3 BATERÍAS DE LITIO

Son las baterías más predominantes en la actualidad. Las podemos encontrar en la mayoría de los dispositivos electrónicos de consumo actuales tales como teléfonos móviles, portátiles, auriculares... Se caracterizan por su alta eficiencia energética (superior al 85%).

Baterías de Iones de Litio

Las baterías de ion litio suelen ser las más comunes en electrónica y en los dispositivos de la vida cotidiana. Son ligeras y de pequeño tamaño, pero pese a ello, ofrecen un gran rendimiento, tienen una gran densidad de energía y además prácticamente no tienen efecto memoria. Los principales inconvenientes de estas baterías son que su vida útil no es demasiado larga (aunque esto dependerá siempre de la intensidad con la que se use la batería) y no tienen una gran duración.

Además de esto, son bastante sensibles a los cambios de temperatura y corren riesgo de sobrecalentamiento, haciéndolas menos robustas que otros tipos de baterías como por ejemplo las de níquel-cadmio.

A pesar de esto, se consideran baterías seguras y su degradación suele ser gradual con el paso del tiempo.

Batería de Polímeros de Litio

Una progresión de las anteriores son las baterías formadas por polímeros de litio (LiPo), su principal ventaja radica en una mayor densidad energética. En este caso, el polímero no es líquido, sino que es semisólido.

Los usos y aplicaciones de esta batería son los mismos que las baterías de iones.

El problema más importante de estas baterías es que se tiene que vigilar la descarga, pues una descarga profunda que las deje por debajo del 30% de su capacidad, las puede dejar inservibles.

A continuación, en la tabla 1, se muestra una tabla comparativa con las principales características de las diferentes tecnologías de baterías [5]:

Tipo de Batería	Plomo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Densidad de Energía (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Densidad de Potencia	180	150	250-1000	1800
Voltaje Nominal (V)	2	1,25	1,25	3,6
Temperatura de funcionamiento (°C)	60	(-20) -60	(-20)-60	(-20)-60
Ciclo de Vida	200-300	1500	300-500	500-1000
Eficiencia de Carga (%)	79	-	-	100
Eficiencia Energética (%)	70	60-90	75	80
Tolerancia de Sobrecarga	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
Autodescarga	Baja	Moderado	Alta	Muy Baja
Estabilidad Térmica	Menos estable	Menos estable	Menos estable	Más estable

Tabla 1. Comparativa entre distintas tecnologías de baterías

La venta comercial de las baterías de litio empezó en el año 1991 y desde entonces, el crecimiento de esta tecnología ha sido exponencial.

El aumento en las ventas de vehículos eléctricos por sus ventajas y, sobre todo, por su capacidad de nulas emisiones, es el factor que más ha afectado a la progresión y el desarrollo de este tipo de baterías. Gracias a esto, cada vez las baterías son de mayor capacidad y a precios cada vez ms bajos, no obstante, las baterías de ion litio siguen sin ser la opción más económica del mercado. En la ilustración 1 se muestra la evolución de la capacidad de las baterías de los teléfonos a lo largo de los años. [13]

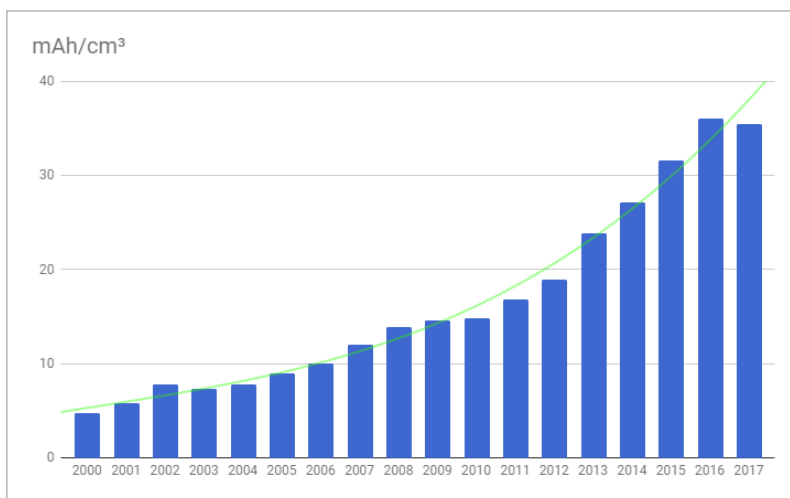


Ilustración 1. Evolución de la capacidad en la batería de los smartphones

En la ilustración 2, se muestra la evolución del precio de las baterías expresado en \$/Wh. [14]

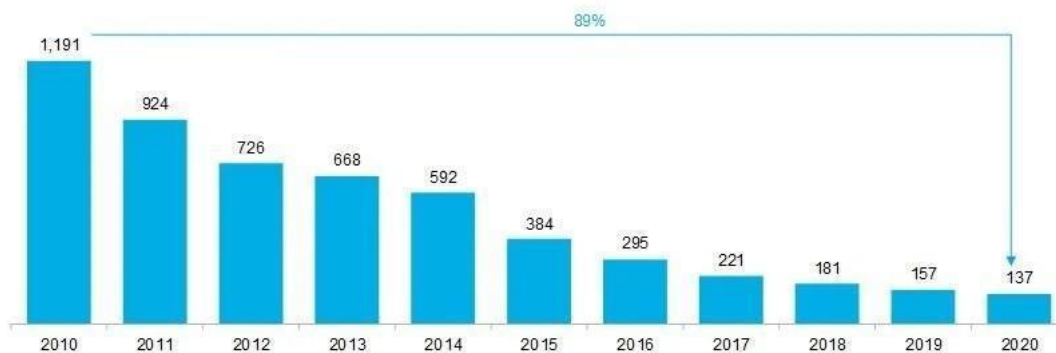


Ilustración 2. Evolución del precio de las baterías de litio ion expresado en dólares por Wh.

1.3.1 PROBLEMAS DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO

A pesar de las ventajas ya mencionadas frente a otras tecnologías, las baterías de litio pueden presentar diversos problemas y riesgos (incluso de explosión) si no se tienen en cuenta algunas consideraciones o no se utilizan dentro de las recomendaciones del fabricante.

Golpes, caídas o compresiones son las causas físicas más comunes de destrucción de baterías, pero también someterlas a sobrecargas, corrientes demasiado intensas o temperaturas elevadas pueden destruir este tipo de baterías con facilidad. Los problemas más relevantes relacionados con el uso de las baterías son la sobrecarga, la fatiga térmica y el desarrollo de dendritas de litio. Todos ellos, pueden causar a la batería deterioros severos y en el peor de los casos, pueden causar explosiones.

1.3.2 SISTEMA DE GESTIÓN DE BATERÍAS (BMS)

El crecimiento en el uso de baterías de litio en diversos ámbitos que no abarcaba anteriormente, como la automoción, ha propiciado el desarrollo de sistemas que mejoren la vida útil de estas baterías, ya que son muy costosas y difíciles de sustituir. Estas mejoras han ido con el tiempo extendiéndose a todo tipo de tamaños de baterías.

Un aspecto muy importante al momento de trabajar con baterías es identificar sus fallos. Como sabemos, una batería está compuesta por un conjunto de celdas y, dentro de este conjunto de celdas, es posible que una de ellas tenga un funcionamiento anormal y esto cause problemas en la batería, como pueda ser pérdida de la capacidad total o parcial o desconexiones esporádicas, esto se debe a que cuando una o varias celdas están en mal estado, estas pueden que se caguen y descarguen más rápido de lo normal y, por lo tanto, que no sean capaces de cumplir con su aplicación.

El sistema de gestión de baterías (Battery Management System, por sus siglas en inglés) es un dispositivo prácticamente indispensable y muy relevante para evitar los problemas mencionados anteriormente en las baterías de litio.

El deterioro de una batería viene marcado por una serie de parámetros internos y externos. Los parámetros internos son aquellos que corresponden a la propia construcción de la batería, así como la tecnología empleada. Los parámetros externos son aquellos que conciernen al propio uso de la batería y las condiciones en las que se usa.

El BMS, es un sistema de control en tiempo real que controla diversos factores externos para asegurar el funcionamiento correcto de la batería y su envejecimiento prematuro. [1]

1.3.3 CELDAS 18650

Una celda 18650 es una pila de ion litio. Su nombre proviene de sus medidas; 18mm x 65mm.

Este tipo de pilas tienen una tensión nominal de 3.6V y su capacidad suele estar entre 2600mAh y 3500mAh dependiendo de la calidad del proceso de fabricación, así como de la calidad de esta. Del mismo modo, hay modelos que disponen de BMS, lo cual las hacen infinitamente superiores a los modelos que no disponen de esta tecnología, y ligeramente más grandes en longitud(1mm-1,5mm).

Este tipo de celda es del tipo recargable y está presente en todo tipo de dispositivos alimentados por electricidad, siendo uno de los formatos más estandarizados. Se pueden encontrar desde pequeños juguetes o linternas hasta potentes baterías de vehículos eléctricos como los Tesla, por ejemplo.

Las principales ventajas de estas celdas frente a otras similares, como las pilas AA por ejemplo, son su mayor voltaje nominal y su capacidad, debido en gran parte a su tamaño y también a la tecnología ion litio. Esto las hace mucho más versátiles puesto que les permite suministrar mucha más potencia. [2]

1.3.4 MOTIVOS CAUSANTES DEL ENVEJECIMIENTO PREMATURO EN LAS BATERÍAS DE ION LITIO

La tecnología de ion litio es una de las tecnologías que permite almacenar mayor densidad de energía por unidad de espacio lo cual hace de ellas una opción interesante en cualquier aplicación. No obstante, según diversos ensayos realizados a lo largo de los años se sabe que no toleran bien las condiciones extremas y que se debe tener especial cuidado en ciertos aspectos para prolongar al máximo su vida útil.

En primer lugar, la profundidad de descarga tiene una relación directa con la capacidad de la batería en el largo plazo. La gráfica mostrada en la ilustración 3, muestra la pérdida en ciclos de carga en función de la profundidad de la descarga [5]. El presente ensayo, está realizado a temperatura constante y tasa de carga/descarga de 1C.

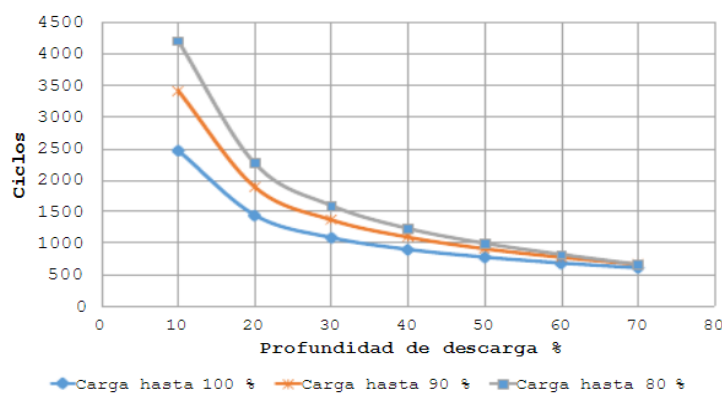


Ilustración 3. Evolución de la vida útil de una batería en base a la profundidad de descarga

De esta gráfica podemos sacar dos conclusiones muy importantes sobre las causas que envejecen la batería.

En primer lugar, vemos como las baterías cargadas al 100%, cuando sufren una descarga del 10%, tienen una media de 2500 ciclos de capacidad, mientras que las cargadas al 80%, cuando sufren una descarga del 10% superan los 4000 ciclos. Además, a medida que aumenta la profundidad de la descarga disminuyen el número de ciclos de la batería.

Por este motivo, las baterías de ion litio deben trabajar idealmente entre el 80% y el 20% de su capacidad máxima para prolongar su vida útil, mantenerse en torno a los 3,7V por celda y nunca cargar sobre los 4,2V o descargar por debajo de los 2,7V.

En la ilustración 4, se puede ver cómo evoluciona la vida útil de las baterías en función de la tasa de descarga. [5]

La tasa de descarga es un parámetro relativo a la capacidad de cada batería y representa que tan intensa es la demanda de corriente por parte de la carga. En una batería de 5Ah, una descarga de 5A constantes, correspondería a una tasa de descarga de 1C, en cambio en una batería de 10Ah, esta misma demanda correspondería a una tasa de 0,5C, y en una batería de 1Ah, equivaldría a una tasa de 5C.

Este concepto es muy importante porque como se ve en la ilustración 4, la tasa de descarga afecta a la vida útil de la batería de forma exponencial.

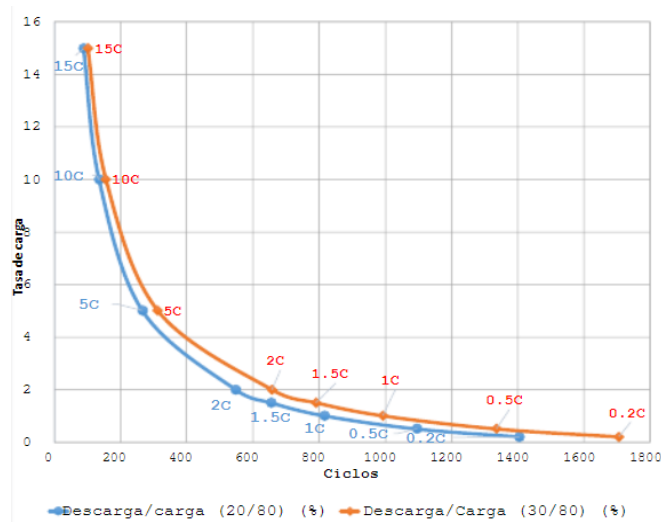


Ilustración 4. Evolución de la vida útil de una batería en función de la tasa de descarga

Observando la línea azul, que corresponde una descarga del 80% al 20%, a una tasa de descarga de 1C obtendríamos 800 ciclos de carga, mientras que a una tasa de descarga 10 veces mayor, obtendríamos menos de 200 ciclos.

Otro factor muy importante al trabajar con baterías de litio es la temperatura.

Como podemos observar en la ilustración 5, a medida que la temperatura disminuye, la capacidad de la batería también disminuye [6], llegando a tener un 25% de diferencia de capacidad entre los 25°C y los -20°C. Cabe destacar también que el uso prolongado en estas condiciones de frío extremas reduce mucho el tiempo de vida de la batería.

Estos tres factores corresponden a los motivos más evidentes y estudiados que existen sobre la degradación de las baterías y sobre los que podemos actuar, pero existen muchos otros factores de la propia producción o ensamblado de las baterías que hacen que, aunque trabajen bajo las mismas condiciones, varíen en sus prestaciones de unas a otras.

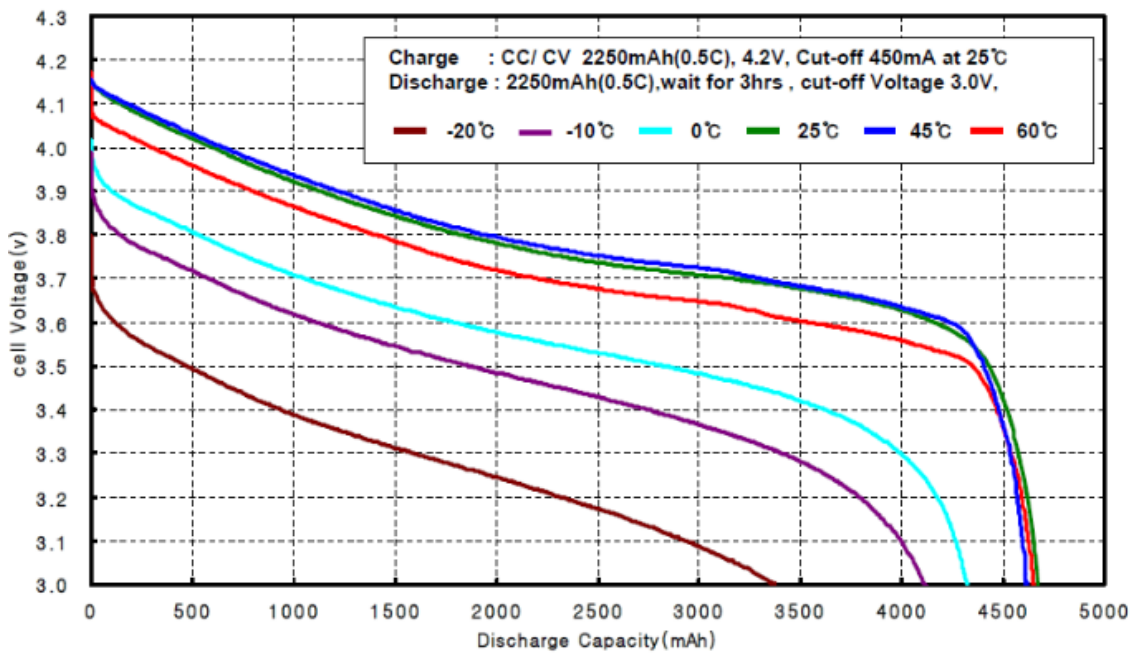


Ilustración 5. Evolución de la capacidad real de una batería en función de la temperatura

2 MÉTODOS ACTUALES PARA EL ANÁLISIS DEL ESTADO DE LAS BATERÍAS DE ION LITIO

2.1 MÉTODOS DE DESCARGA DIRECTA

Una forma de estimar la capacidad de una pila consiste en cargarla y descargarla completamente de forma controlada sin superar los límites de sobre descarga.

Los métodos de descarga directa consisten en descargar la batería bajo unas condiciones conocidas y controladas y que, en base al comportamiento observado en estas, nos permiten sacar conclusiones del estado de la batería. Los métodos más comunes en este tipo de análisis son:

- Descarga a resistencia constante (CR): Es el método más sencillo para descargar una batería. Consiste en situar una resistencia conocida en bornes de la batería y, conociendo la tensión nominal de la batería, estimar la corriente de descarga mediante la ley de ohm:

$$I = \frac{V}{R}$$

Cabe recalcar que, debido a la caída de tensión de la batería, la corriente irá disminuyendo a medida que se descarga puesto que es directamente proporcional a esta. [16]

- Descarga a corriente constante (CC): En este segundo caso, el parámetro que no variará de principio a fin será la corriente. Esta prueba es común en los fabricantes de baterías para el control de calidad antes de lanzarlas a la venta. [16]
- Descarga a potencia constante (CW): Este método de descarga es útil cuando se desea saber cuál sería el tiempo máximo de duración de la batería a la máxima potencia de una herramienta, por ejemplo. [16]

2.2 ANÁLISIS DE LA RESISTENCIA INTERNA

El término resistencia interna, es un concepto que nace para explicar el funcionamiento no ideal de las baterías, puesto que la batería no tiene propiamente una resistencia dentro de ella, pero está formada por componentes que hacen que no se comporte de forma ideal, es decir, no tiene resistencia 0Ω al paso de la electricidad.

Cabe destacar que la resistencia interna y su aumento no poseen una relación lineal con la capacidad de la batería, así que su valor tan solo nos podrá indicar el envejecimiento para poder prevenir algunos posibles fallos.

Existen diferentes métodos para calcular la resistencia interna, pero los más importantes son:

- Resistencia interna en CC: Este método, consiste en medir la diferencia de voltaje entre una carga ligera o nula y una carga fuerte, que haga descender bastante la tensión en la batería. Posteriormente, dividiendo esa variación de tensión entre la variación de la carga aplicada, se obtiene la resistencia interna. Es importante recalcar que este proceso completo debe durar entre 1 y 10ms, ya que de lo contrario otros factores químicos de la batería podrían afectar a los resultados.

Se suele realizar esta prueba cuando la batería va a trabajar con cargas continuas como una bombilla incandescente, por ejemplo. En la ilustración 6, se muestra una gráfica que ejemplifica el procedimiento de medida [9].

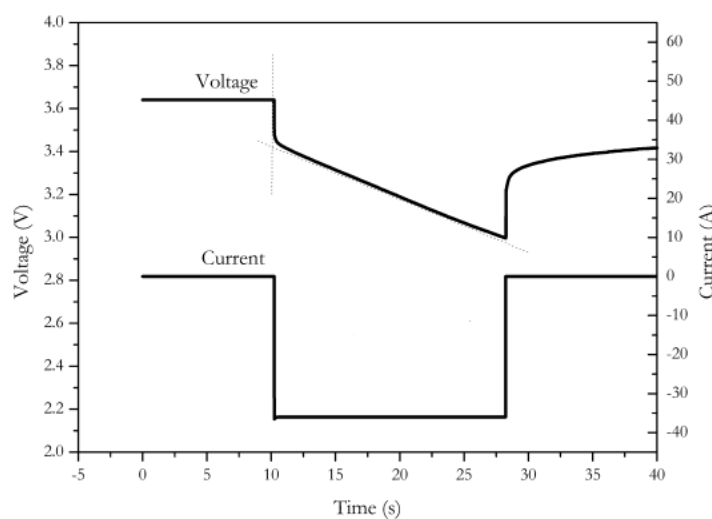


Ilustración 6. Análisis de la resistencia interna en corriente continua

- Resistencia interna en CA: La medida de la resistencia interna a una frecuencia fija de corriente alterna es común en las aplicaciones prácticas. Este método es un método rápido que no deteriora la batería. La prueba de 1KHz es la más extendida. Como este método depende mucho de la frecuencia, no tiene sentido comparar los resultados de las resistencias si no están sometidos a la misma frecuencia, porque ambos pueden ser muy distintos y ambos pueden ser válidos. El valor obtenido a través de este método también es completamente diferente al que se puede obtener con el método anterior. Usualmente, se realiza este tipo de prueba cuando la batería va a trabajar con dispositivos digitales. [9]
- Espectroscopia electroquímica de la impedancia (EIS): Este método tiene la desventaja de requerir equipos de laboratorio de coste muy elevado, así como de mucho tiempo y científicos cualificados capaces de analizar los resultados. Este método, consiste en aplicar una perturbación senoidal de tensión de frecuencia variable a la batería, tras lo cual se registra la respuesta de este en corriente, dentro de una celda electrolítica. La precisión de la espectroscopia de impedancia está influenciada por la reactancia

parásita, la configuración del instrumento y la incertidumbre debido a la selectividad de frecuencia limitada del método de medición. La selectividad de frecuencia limitada suele ser el efecto dominante. [9]

3 CARGA ELECTRÓNICA REGULABLE

Las cargas electrónicas regulables, también conocidas como cargas programables, son dispositivos de laboratorio utilizados por técnicos e ingenieros para probar proveedores de energía eléctrica, como podrían serlo una fuente de alimentación regulable o una batería.

El funcionamiento básico de estos dispositivos es similar, constan de una etapa de control, donde se mide a tiempo real como varía la tensión en la batería a medida que avanza la descarga, así como la corriente que se está generando. En la etapa de potencia, constan de uno o varios MOSFET trabajando en zona lineal que se encargan de controlar la corriente.

Un ejemplo de estos dispositivos lo podemos encontrar en la ilustración 7 [12].

Generalmente, las más sofisticadas, muestran un aspecto como el de la figura 7, y se caracterizan por tener las siguientes características:

- Capacidad de utilizar 3 métodos de análisis de descarga directa (CC, CR, CW)
- Capacidad de disipación de potencia elevada: (>400W) Esto se debe a que utilizan varias líneas de potencia, disipadores activos (ventiladores) y pasivos (radiadores)
- Alta resolución en las medidas utilizando resistencias muy precisas y componentes digitales de alta resolución.
- Puertos de conexión a un ordenador para realizar gráficas en tiempo real.
- Modos de medida inteligente de capacidad con reloj interno y modo de cálculo de la resistencia interna.
- Precio elevado, generalmente en torno a 1000€ o superior, debido a que es un instrumento de medida que requiere de electrónica precisa para que será fiable.



Ilustración 7. Carga electrónica comercial modelo "2380-120-60" de la marca Keithle

4 ESTUDIO TEÓRICO DEL CIRCUITO Y JUSTIFICACIÓN DE COMPONENTES

El objetivo fundamental del proyecto es ser capaces de diseñar un dispositivo de funcionamiento similar a las cargas electrónicas comerciales pero adaptado a nuestra necesidad específica, que será analizar baterías de herramientas de 18V y 2Ah (5 celdas 18650 conectadas en serie).

La tasa de descarga máxima se establecerá en 1C por dos motivos. En primer lugar, por ser considerada una tasa segura que no dañara las baterías durante la prueba y, en segundo lugar, para minimizar los requisitos de disipación de potencia que son un factor muy limitante en este tipo de dispositivos.

4.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

- Potencia mínima: 45W (debido a que se pretenden analizar baterías compuestas por 5 celdas 18650 en serie, cada una de las cuales se sitúa en 4,2V si está cargada completamente, tendremos una tensión con la batería plenamente cargada de 21V, y para poder descargarla a 1C, es decir, 2A constantes, se requiere que el dispositivo sea capaz de disipar como mínimo 42W de forma ininterrumpida sin sufrir daños)
- Corriente máxima: 2A (como se ha mencionado anteriormente, no se desea poder superar la tasa de descarga de 1C y, por tanto, se limitará vía software).
- Protección ante temperatura crítica.

- Control automático del ventilador.
- Modo corriente constante (CC)
- Modo Potencia Constante (CP)
- Modo Resistencia constante (CR).
- Control de usuario mediante software específico.

4.2 ETAPA DE ALIMENTACIÓN

Para todo lo que concierne a la alimentación del circuito se ha optado por emplear reguladores de tensión. El motivo de esta decisión reside en que se requiere de una referencia de tensión precisa y fiable, además, la fuente solo disponía de una salida, y se requieren tensiones de 12V y 5V para alimentar todas las partes del circuito.

Para ello, se han utilizado dos circuitos integrados, el L7812 y el L7805, dos reguladores de tensión de 12 y 5V respectivamente, dispuestos según las recomendaciones del fabricante.

La fuente de alimentación se conecta a los pines J1 y J2 y desde las líneas de 12V y 5V, se alimentan todos los componentes del circuito.

En la ilustración 8, se ve como se han implementado todos estos componentes.

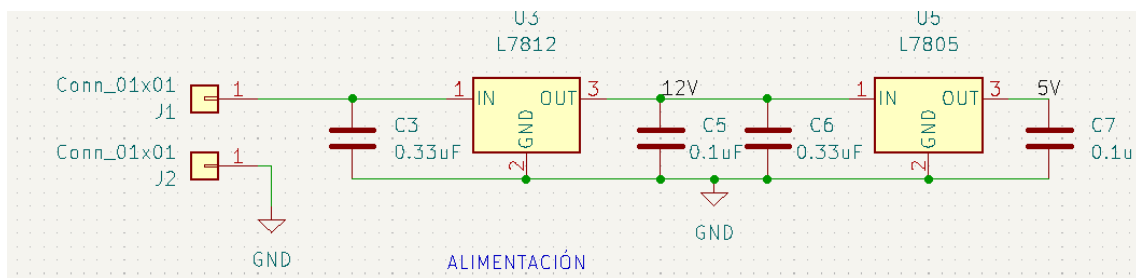


Ilustración 8. Etapa de alimentación

4.3 CONTROL DE CORRIENTE

En esta etapa, es donde, en base a la programación y al tipo de descarga que se desea aplicar, se envía una señal a la puerta del MOSFET desde el cual se controlará la corriente drenada de la batería.

En la ilustración 9, se observan todos los componentes que permiten llevar un control efectivo de la descarga.

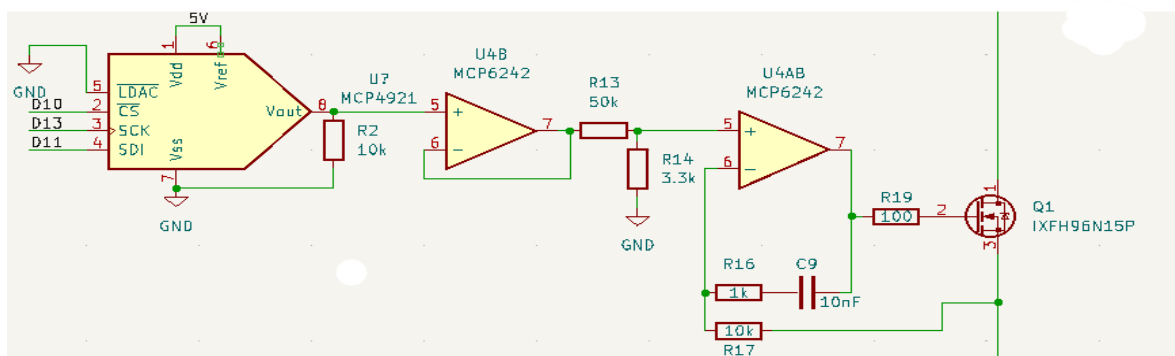


Ilustración 9. Etapa de control de corriente

Observando el circuito de izquierda a derecha, en primer lugar, nos encontramos con el MCP4921. Se trata de un convertor digital analógico de 12 bits de resolución. Resulta indispensable puesto que la placa de control utilizada (un Arduino UNO como se verá más adelante) dispone de ADC's de 8 bits, lo cual nos daría una resolución demasiado baja. El MCP4921, sin embargo, proporciona una resolución de 1.22mV. El protocolo de comunicación utilizado por el MCP4921 es SPI, y a la entrada se muestran los correspondientes pines conectados al micro Arduino.

A continuación, se observa el MCP6242, este es un chip que cuenta con dos amplificadores operacionales por integrado. El primero actúa como buffer para adaptar impedancias entre la salida del ADC y el posterior divisor de tensión. A través de este divisor de tensión se va a limitar la corriente máxima que circulará por el MOSFET, por lo que debe tener una precisión elevada. No obstante, las resistencias utilizadas son de una tolerancia del 10%, y es por ello que la resistencia R14 se sustituye por un potenciómetro de 4.7K, para poder realizar un ajuste fino una vez implementado el circuito. El siguiente operacional es el encargado de aplicar la tensión calculada a la puerta del MOSFET, para conseguir el flujo de corriente deseado. La red RC formada en la realimentación negativa del amplificador, tiene por objeto amortiguar el efecto oscilatorio que se puede producir en el MOSFET debido a la capacitancia en la puerta de este. La segunda red, cierra el lazo para tener prácticamente la misma tensión a ambas entradas del operacional, y por tanto también en la red de potencia a partir del MOSFET.

4.5 SENSOR DE TENSIÓN

Este circuito requiere un sensor de tensión por diversos motivos:

- En primer lugar, es importante conocer en todo momento como evoluciona la caída de tensión en la batería para no descargarlas por debajo de una tensión de seguridad que dañaría las células.
- En segundo lugar, para los modos de potencia y resistencia constante, se debe conocer el valor instantáneo de la tensión para ir ajustando la intensidad y que la potencia o resistencia equivalente se mantenga.

La ilustración 11, muestra la disposición de todos los componentes

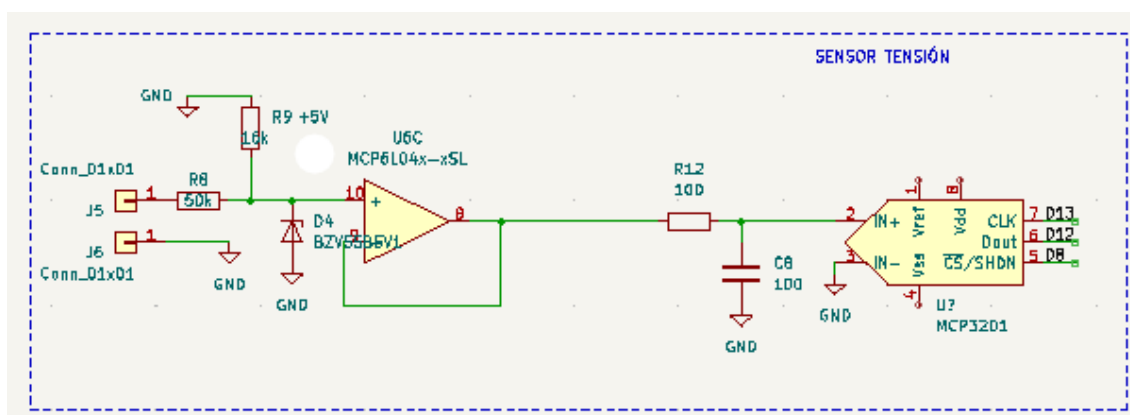


Ilustración 11. Etapa de sensor de tensión

Para la medida de la tensión, se ha optado por una medida a 4 hilos. Es decir, otras conexiones a los polos de las baterías independientes del circuito de descarga. Esto es así porque, en caso de querer mejorar el diseño e incluir la medición de la impedancia interna, esta sería la mejor forma de hacerlo ya que se trata de una resistencia muy pequeña.

En primer lugar, nos encontramos con un divisor de tensión formado por las resistencias R8 y R9. Este divisor de tensión se encarga de que al conectarle una batería formada por 5 celdas 18650 conectadas en paralelo cargadas completamente (4.2V por celda) se transformen los 21V de la entrada a 5.09V a su salida. Inmediatamente después, se dispone de un Zener de protección de 5.1V, para que, en caso de conectar baterías de voltaje superior, se derive el potencial a masa y no cause daños al dispositivo. Lo que resta de este sensor es idéntico a lo mencionado en el sensor de corriente.

4.7 ETAPA DE POTENCIA

En esta última etapa, es donde se da lugar a la propia descarga de la batería. Los componentes que conforman esta etapa se muestran en la ilustración 13.

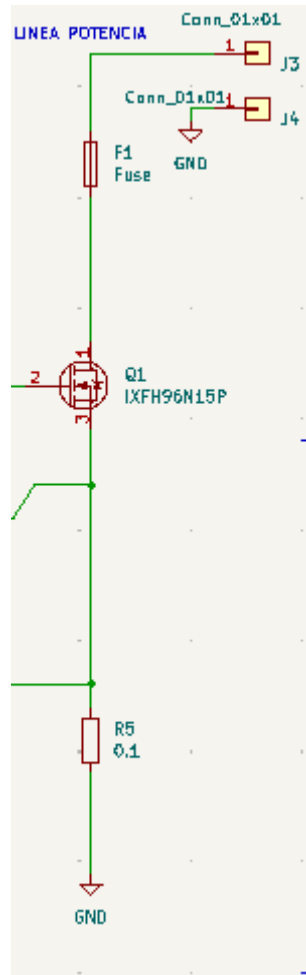


Ilustración 13. Etapa de potencia

En primer lugar, se observan los conectores que van a ambos polos de la batería, independientes del circuito de medida de voltaje.

Siguiendo por el cable positivo nos encontramos un fusible, el cual será de 3A. Su misión, será proteger el MOSFET Q1 ante la exposición a una conducción completa por error en la etapa de control.

El MOSFET de potencia es uno de los componentes más importantes de este diseño, puesto que es el que va a marcar la potencia máxima a la que se puede descargar la batería y es el factor más limitante.

Hay diversas formas de plantear el problema, la primera es utilizar varios MOSFET de menor potencia conectados en paralelo y controlados cada uno por su propio circuito de control independiente, o bien utilizar MOSFET de mayor potencia, empleando menos unidades y por tanto menos componentes auxiliares, simplificando así el diseño.

En este proyecto se ha empleado la segunda opción, el MOSFET utilizado es el IXFH96N15P y ha bastado con uno para cumplir con las especificaciones de diseño como se verá más adelante.

Habitualmente, el uso de los MOSFET suele ser en aplicaciones de conmutación debido a su velocidad en este campo. En estos escenarios, la corriente que suelen soportar los MOSFET es bastante alta, no obstante, cuando se busca una conducción ininterrumpida, esta corriente suele bajar drásticamente o incluso no ser aptos para este tipo de aplicaciones.

Como podemos ver en la ilustración 14, el área segura de operaciones del IXFH96N15P, indica que a 20V, se pueden soportar hasta más de 20A de forma continua (10 veces mayor a los 2A requeridos), aunque eso ocurre a 25°C, puesto que a medida que aumenta la temperatura, esta capacidad disminuye. Como se verá más adelante, la temperatura será un factor más limitante que las características del propio MOSFET.

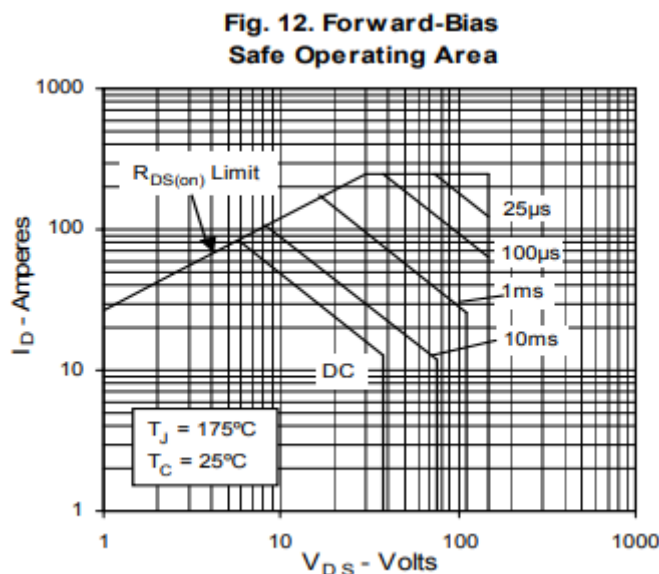


Ilustración 14. SOA del MOSFET IXFH96N15P

4.8 PLACA DE CONTROL

Para el control del proceso que debe llevar a cabo el dispositivo se ha optado por un controlador de propósito general como lo es el Arduino UNO.

El motivo por el que se ha seleccionado esta placa es porque ofrece todas las especificaciones técnicas necesarias para el correcto desarrollo del prototipo, como puedan ser:

- 6 entradas analógicas con un ADC interno de 10 bits. A una de estas entradas irá conectado el sensor de temperatura LM35.
- Interfaz de comunicación SPI. Para poder comunicar el controlador con el DAC y los ADC's, ya que ambos utilizan este protocolo de comunicación.
- 14 salidas digitales. En estos pines se incluyen los pines de comunicación SPI y el pin que se utilizará para llevar un control ON-OFF del ventilador.
- Un puerto serie hardware. A través de este puerto, se conectará la placa al ordenador para programarla y posteriormente para enviar comandos a través de la interfaz de usuario.
- 32KB de memoria Flash y 2KB de SRAM. La programación del firmware ha ocupado aproximadamente un 30% de cada una de ellas, por lo que es suficiente.

Como motivos adicionales que no tienen que ver con las posibilidades técnicas de la placa, se ha decidido utilizar un Arduino UNO debido a que es el controlador más común en la iniciación a la electrónica y esto aumenta el alcance que pueda tener este proyecto.

En la ilustración 15, se muestran los pines utilizados para el desarrollo del proyecto y se indica a que conexiones representan.

Por otro lado, la ilustración 16 muestra una imagen de la placa Arduino UNO [11].

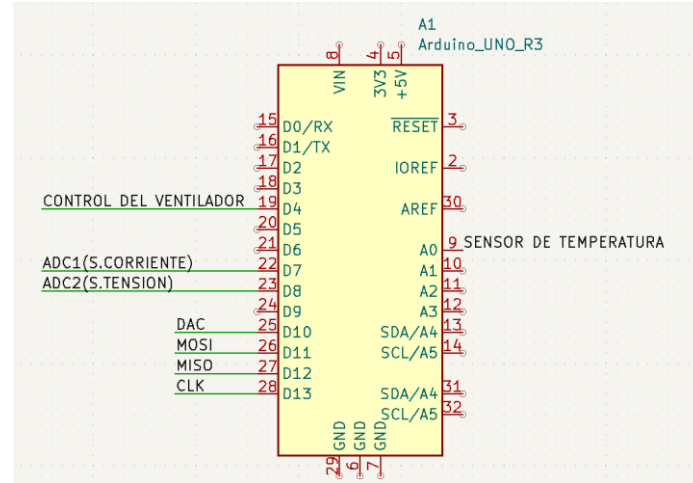


Ilustración 15. Conexiones de Arduino con el prototipo



Ilustración 16. Arduino UNO

5 CÁLCULOS TÉRMICOS

Dado que la temperatura va a ser el factor más limitante en la potencia del dispositivo, se pretende justificar en este apartado el motivo de los distintos elementos de disipación utilizados para que el dispositivo sea capaz de asumir la potencia requerida de forma segura.

La fórmula que se emplea para estimar la temperatura a la que llegará un componente electrónico es la siguiente:

$$T_j = (R_{\theta JC} + R_{\theta CS} + R_{\theta SA}) \cdot P + T_A$$

- T_j Temperatura de unión (*junction temperature*). Indica la temperatura máxima que puede alcanzar la unión antes de dañarse.
De las hojas de datos, sabemos que la máxima temperatura de unión son 175°C .
- $R_{\theta JC}$ Resistencia entre la unión y el encapsulado (*junction to case*). Este valor se mide en las unidades: $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ que indican la cantidad de temperatura que aumentan por cada Watt disipado. De las hojas de datos del componente, conocemos que este valor es $0.31^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- $R_{\theta CS}$ Resistencia entre el encapsulado y el radiador (*case to sink*).
Este valor, depende directamente del tipo de encapsulado que se utilice. Por eso se ha buscado un MOSFET que utilice el encapsulado TO-247, ya que a pesar de ser un poco más caro que el TO-220, ofrece una mucho mejor disipación, debido a su superficie de contacto con el disipador. El TO-247, ofrece una disipación de $0.21^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- $R_{\theta SA}$ Resistencia entre el radiador y el ambiente (*sink to air*). Este valor viene especificado en la hoja de datos del radiador y hace referencia a la capacidad de disipación con una ventilación natural. En el caso del disipador utilizado, es de $3.1^{\circ}\text{C}/\text{W}$
- P Potencia. Se debe tener en cuenta la máxima potencia de descarga. De etapas anteriores, sabemos que son 45W.
- T_A Temperatura ambiente. Es importante la temperatura del entorno ya que afectará a la temperatura máxima del dispositivo. Se estima que la temperatura de una habitación en verano podría estar entorno a los 35°C

El disipador del que se ha dispuesto para realizar el proyecto es el SK434/50SA de la marca Fischer Elektronik. Ha sido necesario utilizar este modelo debido a la escasez de componentes y la dificultad para encontrar alternativas, así que los cálculos térmicos están condicionados a la necesidad de utilizar este radiador.

$$T_j = (0.31^{\circ}\text{C}/\text{W} + 0.21^{\circ}\text{C}/\text{W} + 3.1^{\circ}\text{C}/\text{W}) \cdot 45\text{W} + 35^{\circ}\text{C}$$

$$T_j = 197.9^{\circ}\text{C}$$

Como se observa, la temperatura de la unión llegaría a ponerse a 198°C , dañando por tanto al MOSFET y en consecuencia, la carga electrónica. Como se observa en la ecuación, la mayor limitación radica en la disipación del radiador. Esta disipación se puede mejorar añadiendo al diseño un ventilador que aplique ventilación forzada.

Thermal resistances of any profiles with forced convection

- $R_{thKf} \approx \alpha \cdot R_{thK}$
- R_{thKf} = thermal resistance with forced convection
- R_{thK} = thermal resistance with natural convection
- α = factor of proportion

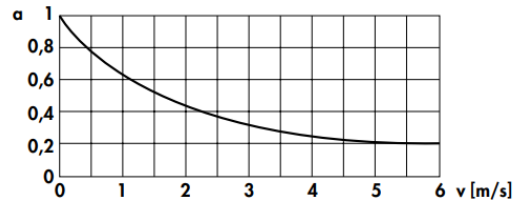


Ilustración 17. Variación de la resistencia térmica en presencia de ventilación forzada

Como se puede ver en la ilustración 17, al aplicar una ventilación de 5m/s , debemos multiplicar la $R_{\theta SA}$ por el factor “a” correspondiente, en este caso, 0,2. Obteniendo así, $R_{\theta SA} = 0.62^{\circ}\text{C}/\text{W}$

Los cálculos con los nuevos datos quedarían de la siguiente manera:

$$T_j = (0.31^{\circ}\text{C}/\text{W} + 0.21^{\circ}\text{C}/\text{W} + 0.62^{\circ}\text{C}/\text{W}) \cdot 45\text{W} + 35^{\circ}\text{C}$$

$$T_j = 86,3^{\circ}\text{C}$$

Con la inclusión del ventilador, el valor se aleja de los 175°C máximos especificados por el fabricante y disponemos de un amplio margen para trabajar con seguridad. De este modo, si se quisiera, se podría aumentar la potencia de la carga hasta los 100W manteniendo una $T_j = 149^{\circ}\text{C}$ y seguiría 26°C por debajo del límite, aunque no es necesario para esta aplicación.

6 SIMULACIÓN

Una vez planteado el diseño del circuito, se procede a simularlo con el software LT Spice para analizar y tener una referencia de las señales que se obtendrían en condiciones ideales. El modelo del circuito se muestra en la ilustración 18:

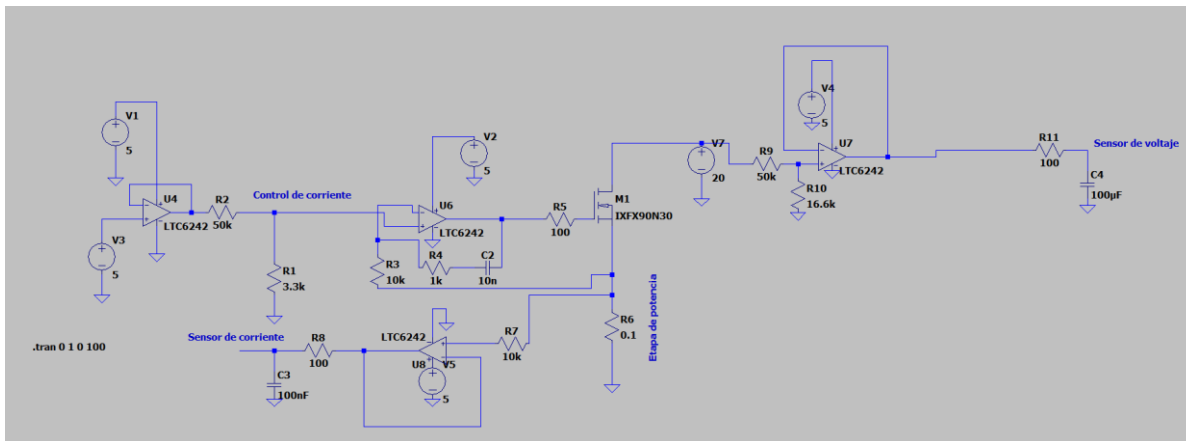


Ilustración 18. Circuito de simulación en LT Spice

La fuente de tensión V3, se usa para simular las tensiones de salida del DAC. Cuando el DAC entregue la máxima tensión, es decir, 5V (su voltaje de referencia) el comportamiento del circuito será el que refleja la ilustración 19.

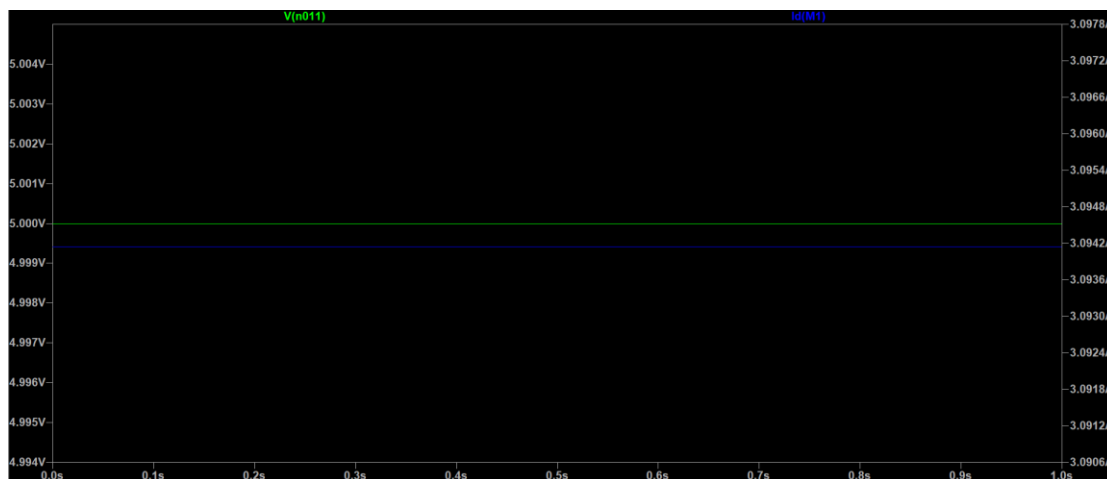


Ilustración 19. Corriente que circula por el MOSFET con 5V en el DAC

Como se observa, la corriente que circula por el MOSFET en caso de que el DAC entregue 5V serán 3,09A. Como el objetivo es descargar las baterías a 2A, estos 1,09A extra nos servirán como margen para posibles compensaciones en un futuro en caso de no obtener el valor deseado.

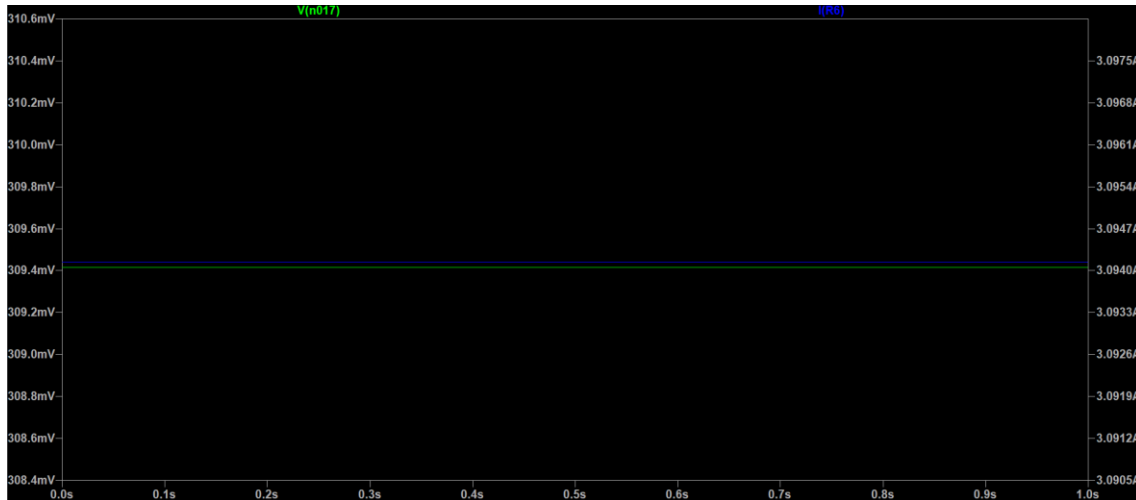


Ilustración 20. Tensión a la entrada del sensor de corriente en función de la corriente en la resistencia de potencia

En la ilustración 20, se ve que cuando la corriente que circula por la etapa de potencia son estos 3,09A, se genera una caída de tensión en la resistencia de $0,1\Omega$ de 309mV. Esta señal es llevada al ADC que la discretiza y la manda al Arduino para conocer así el valor de la corriente en todo momento.

En la ilustración 21, se ve como al asignar un valor de 20V a la fuente V7 que es la que simula la batería, se obtienen 4.98V a la salida del sensor de tensión. Esto significa que la división del valor de la tensión de la batería entre 4 funciona de forma adecuada.

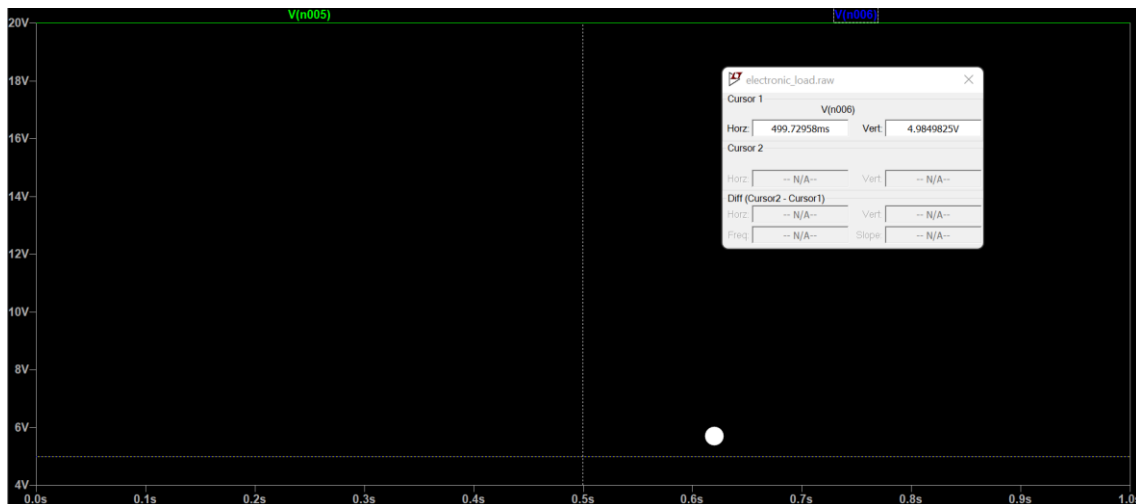


Ilustración 21. Tensión en el sensor de voltaje en función de la tensión de la batería

7 INTERFAZ DE USUARIO

La interfaz de usuario se ha diseñado con el objetivo de brindar una mejor experiencia al momento de trabajar con el prototipo. Además, facilita su uso a cualquier usuario, ya que limita y gestiona los comandos que se envían por el puerto serie en función de la combinación de tipo de descarga y tasa deseada.

La interfaz ha sido desarrollada en el programa Visual Studio Basic, mediante lenguaje C# (C Sharp). En la ilustración 22 se muestra el diseño de la interfaz en funcionamiento.



Ilustración 22. Vista de la interfaz de usuario

El diseño de la interfaz es bastante simple, cuenta con un menú desplegable donde se puede seleccionar uno de los modos de trabajo: Corriente constante, Resistencia Constante y Potencia constante. Inmediatamente debajo, se encuentra una ventana de texto donde el usuario debe introducir la cantidad en las unidades propias de cada modo de trabajo, que se muestran de forma emergente (A, W, Ohm) entre el cuadro de texto y el botón aplicar cuando seleccionas cualquier modo de trabajo. Cuando ya se tiene todo seleccionado, se pulsa el botón aplicar y el indicador OFF rojo, pasa a ON verde. Del mismo modo, en la etiqueta 7, aparecen las medidas en tiempo real que se están realizando cada 100ms gracias a un temporizador. Al pulsar el botón detener, la descarga para inmediatamente y el indicador vuelve a la posición OFF.

Como ejemplo, si se elige el modo de Corriente constante y se indica que se quiere descargar a 1A una batería de 18V, el aspecto de la interfaz sería el que se ve en la ilustración 23.



Ilustración 23. Interfaz de usuario en funcionamiento en modo CC y 1A.

Para facilitar la comprensión del funcionamiento, se ha creado el siguiente diagrama de flujo.

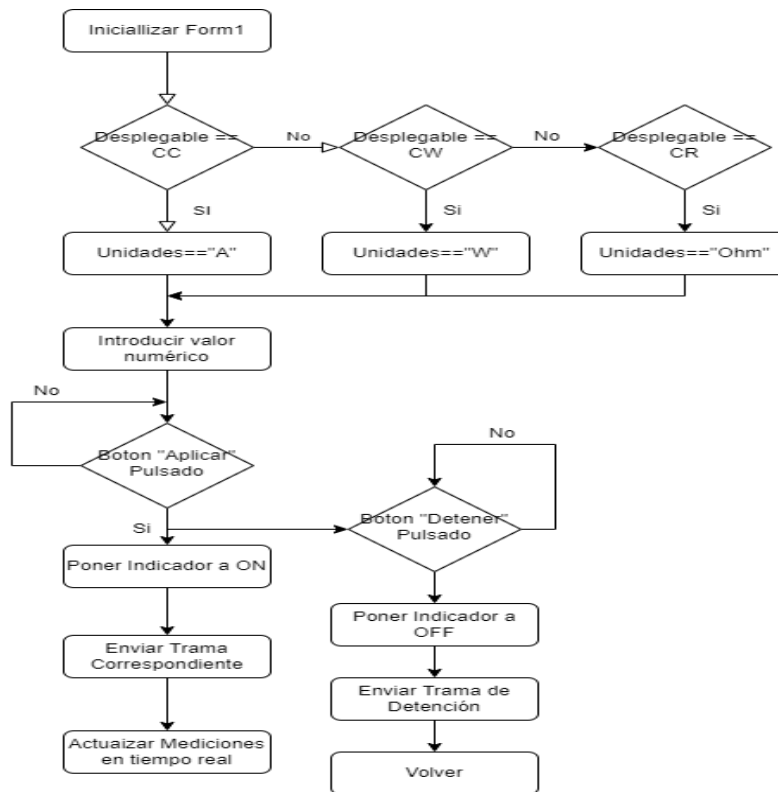


Ilustración 24. Diagrama de flujo de la interfaz de usuario

7.1 COMUNICACIÓN

Para la comunicación entre la interfaz y el firmware del dispositivo, se han codificado unas tramas de caracteres a modo de comandos que se envían a través del puerto serie y se interpretan posteriormente en el firmware. Estas tramas llevan en la primera posición la inicial del modo de descarga en mayúscula, y el resto corresponde a la tasa. Para detener la descarga, el comando que se envía es “S” de Stop. Como ejemplo, si desde la interfaz de usuario se selecciona el modo corriente constante y se le indica 1.023 Amperios, al pulsar el botón aplicar, el comando enviado tendrá la forma “C1.023”. Si se pulsa el botón detener, se enviará la trama “S”.

En la ilustración 24, se puede ver a la derecha cómo llegan las distintas tramas al firmware enviadas por la interfaz.

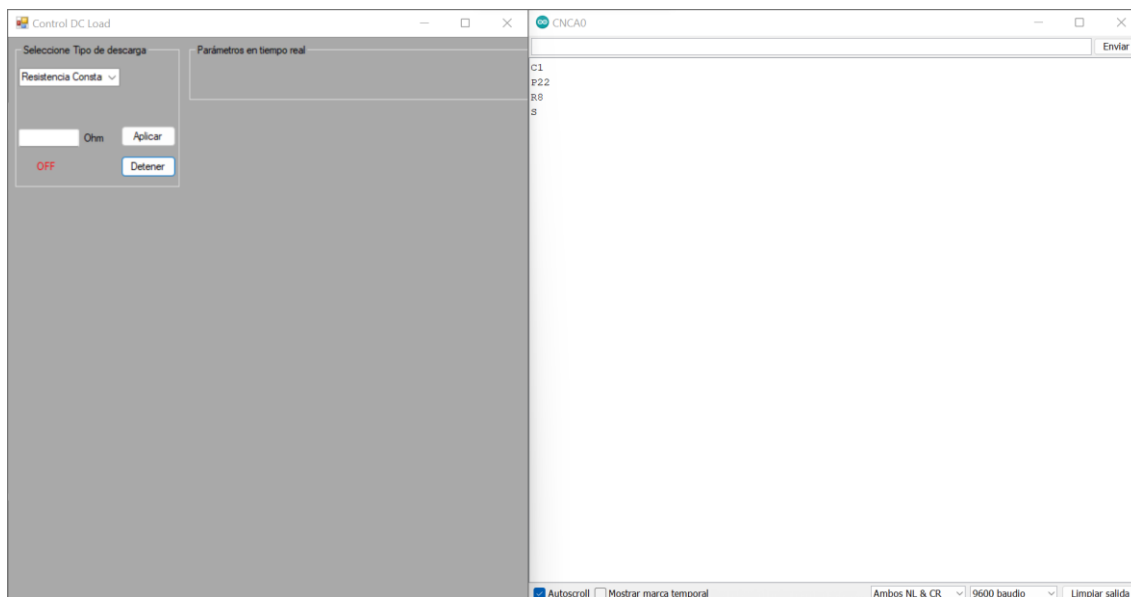


Ilustración 25. Envío de tramas de la interfaz por el puerto serie

8 FIRMWARE

El Firmware del controlador se ha desarrollado en el entorno que proporciona Arduino para programar sus propias placas, Arduino IDE.

Este software es gratuito y de código abierto, y permite desarrollar el código en su totalidad, así como un acceso directo muy útil al monitor serie para realizar pruebas antes de sincronizarlo con la interfaz.

El primer paso para el desarrollo del firmware ha sido crear un diagrama de flujo para plasmar lo que debe contener el programa.

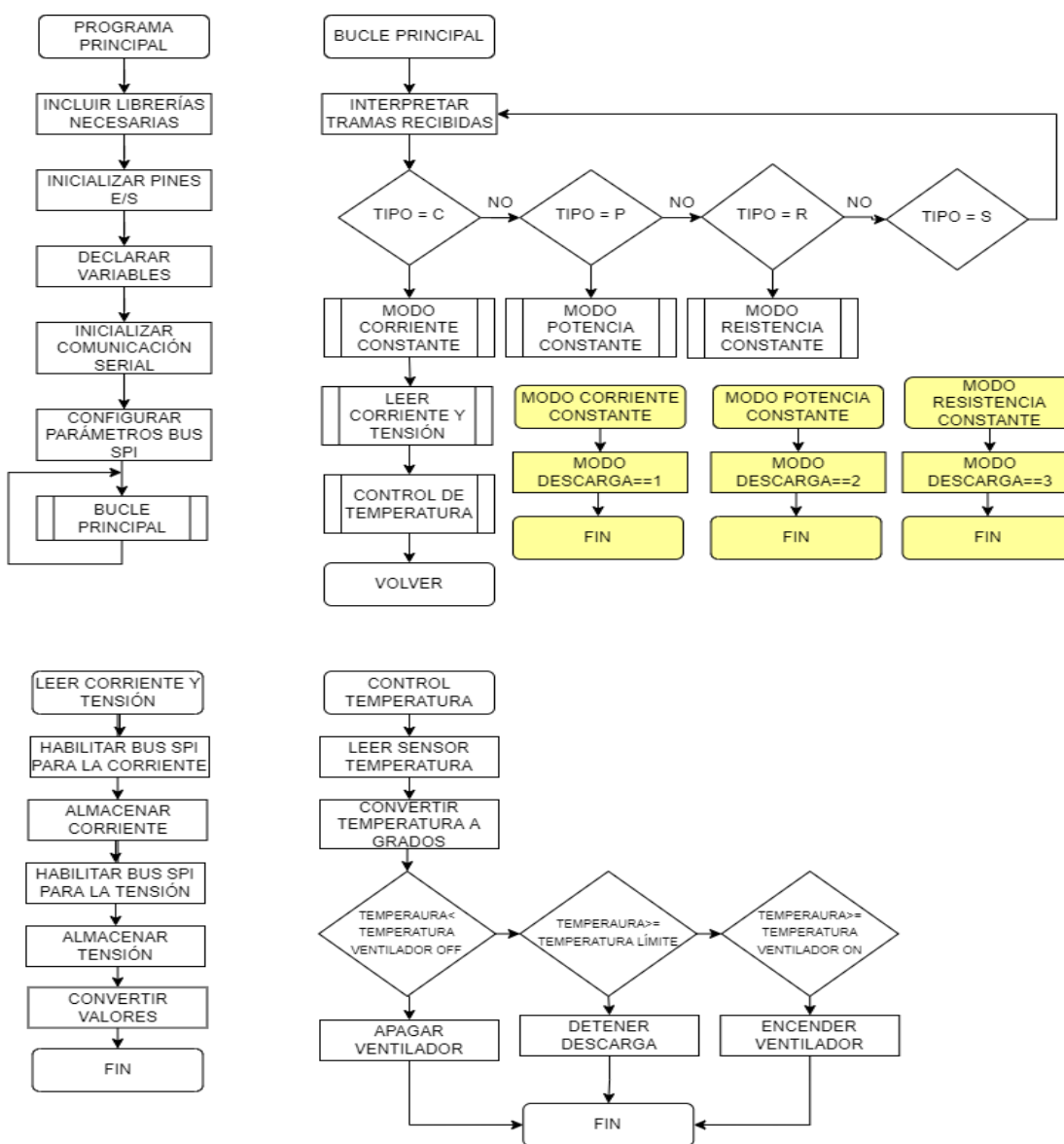


Ilustración 26. Diagrama de flujo del firmware de Arduino

8.1 INICIALIZACIÓN

Tal como se plantea en el flujograma, en la función void setup() de Arduino se realiza toda la inicialización, se indican los pines de entradas y salidas, se reinicia el DAC y se configuran los protocolos de comunicación, ajustando una velocidad al puerto serie de 9600 baudios, y una frecuencia de reloj para la comunicación SPI de 1,5MHz, ya que esta es la máxima velocidad a la que el ADC puede dar 100 muestras por segundo, según su hoja de especificaciones.

```
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  myDac.begin();
  myDac.analogWrite(0);
  SPI.beginTransaction(SPI_1500000, MSBFIRST, SPI_MODE0);
  SPI.begin();

  pinMode(DAT, INPUT);
  pinMode(CS_ADC_CORRIENTE, OUTPUT);
  pinMode(CS_ADC_TENSION, OUTPUT);

  pinMode(VENTILADOR, OUTPUT);

  digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE, LOW); // CS se pone a nivel alto y bajo porque no se
  digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE, HIGH); //conoce el estado inicial

  digitalWrite(CS_ADC_TENSION, LOW); //
  digitalWrite(CS_ADC_TENSION, HIGH); //

  digitalWrite(CLK, LOW);

  analogReference(INTERNAL); // Arduino internal reference para el control de temperatura
  myDac.analogWrite(0); //reset DAC a 0
}
```

8.2 BUCLE PRINCIPAL

Las tramas recibidas desde la interfaz de usuario se procesarán de la forma que se muestra en la siguiente imagen, dónde el primer valor se almacenará en una variable TIPO, almacenando la letra correspondiente al tipo de descarga, y el resto se almacenará en una matriz de caracteres llamada buf_valor, que posteriormente se transforma a float y se almacena como valor_convertido

```
void loop() {

  if (Serial.available() > 0) {

    int rlen = Serial.readBytes(buf, BUFFER_SIZE);

    Serial.print("Tipo: ");
    tipo = buf[0];
    Serial.print(tipo);

    //Serial.print(" Cantidad: ");
    for(int i = 1; i < rlen; i++){
      //Serial.print(buf[i]);
      buf_valor[i-1]= buf[i];
    }

    valor_convertido = atof(buf_valor);

    //Serial.print(" valor convertido: ");
    //Serial.print(valor_convertido);
  }
}
```

```
    leer_corriente_tension();

    if (modo_descarga == 1) {
        Serial.print("Estamos en corriente");
        corriente_deseada = valor_convertido;
        mostrar_corriente = corriente_deseada;

        control_FET = corriente_deseada*1365,574*factor_de_compensacion; // El numero se justifica con cálculos
        control_DAC = control_FET;
    }

    if (modo_descarga == 2) {
        Serial.print("Estamos en potencia");
        potencia_deseada = valor_convertido;
        corriente_deseada = potencia_deseada/(voltaje_actual);

        control_FET = corriente_deseada*1365,574*factor_de_compensacion; // El numero se justifica con cálculos
        control_DAC = control_FET;
    }

    if (modo_descarga == 3) {
        Serial.print("Estamos en resistencia");
        resistencia_deseada = valor_convertido;
        corriente_deseada = (voltaje_actual)/resistencia_deseada;

        control_FET = corriente_deseada*1365,574*factor_de_compensacion; // El numero se justifica con cálculos
        control_DAC = control_FET;
    }
    myDac.analogWrite(control_DAC);
    control_refrigeracion();
```

En el bucle principal, se llama a la función leer_corriente_tension que escribirá en el puerto serie la corriente y la tensión en todo momento y también se controlará la señal que se envía al DAC en esta etapa, según el modo de descarga seleccionada. Finalmente, se llama a la función control_refrigeración para monitorizar la temperatura.

8.3 LEER CORRIENTE Y TENSIÓN

Para leer la tensión y la corriente, se utilizará la función leer_corriente_tension mencionada en el bucle principal.

```
void leer_corriente_tension() {

    unsigned int reading_CORRIENTE = 0; // "reading" is the raw ADC value
    unsigned int reading_TENSION = 0; // "reading" is the raw ADC value

    digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE, LOW);
    reading_CORRIENTE = SPI.transfer16(0x0000); // "reading" captured, but it needs
    digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE, HIGH); // the following 2 line to clean it up:

    digitalWrite(CS_ADC_TENSION, LOW);
    reading_TENSION = SPI.transfer16(0x0000); // "reading" captured, but it needs
    digitalWrite(CS_ADC_TENSION, HIGH); // the following 2 line to clean it up:

    reading_CORRIENTE = reading_CORRIENTE << 3;
    reading_CORRIENTE = reading_CORRIENTE >> 4;
    reading_TENSION = reading_TENSION << 3;
    reading_TENSION = reading_TENSION >> 4;

    voltage_CORRIENTE = reading_CORRIENTE * (5.0 / 4095); // Using 5V Ref IC
    voltage_TENSION = reading_TENSION * (5.0 / 4095); // Using 5V Ref IC
    corriente_actual = voltage_CORRIENTE * 10;
    voltaje_actual = voltage_TENSION*4.1;
    Serial.print("CORRIENTE = ");
    Serial.println( corriente_actual, 3); // voltage shown on terminal (1mv res.)
    delay(250); // Adjust delay as needed
    Serial.print("TENSION = ");
    Serial.println(voltaje_actual, 3); // voltage shown on terminal (1mv res.)
    delay(250); // Adjust delay as needed
```

En esta función, se almacena el valor entre 0 y 4095 que otorga el ADC en las variables con el prefijo Reading_ y se transforman a tensión en las variables con prefijo voltage_ con la siguiente fórmula

$$Tensión = Valor\ ADC * \frac{V_{ref}(5V)}{4096}$$

Una vez obtenido el valor transformado, en el caso del sensor de corriente, se multiplica x10 para obtener el valor en Amperios, y en el caso de la tensión se multiplica x4.1 para compensar el divisor de tensión de 0.23 a la entrada del ADC.

8.4 CONTROL DE TEMPERATURA

Para el control de temperatura, se hace uso de la función control_refrigeración()

```
void control_refrigeracion(){

temperatura = analogRead(pinLM35);

temperatura_grados = (1.1 * temperatura * 100)/1024.0;

Serial.print("La temperatura es:");
Serial.println(temperatura_grados);

delay(1000);

if (temperatura_grados<temperatura_ventilador_apagado){
    digitalWrite(VENTILADOR, LOW);
}
else if (temperatura_grados >=temperatura_ventilador_encendido){
    digitalWrite(VENTILADOR, HIGH);
}
if (temperatura_grados>=temperatura_limite){
    myDac.analogWrite(0);
}

}
```

En esta función, se almacena la tensión que entrega el LM35 en función de la temperatura medida (10mV/°C) en la variable temperatura. Se transforma a grados centígrados multiplicando por la tensión de referencia interna (1.1V) y dividiendo por los valores del ADC interno (1024) y se almacena en la variable temperatura_grados. Esta variable, se compara con distintos valores preasignados para saber si se debe encender o apagar el ventilador, o si se debe detener la descarga debido a un exceso de temperatura.

9 MONTAJE

Para la implementación física del circuito, se ha optado por componentes electrónicos de tipo inserción, por lo que el método de montaje ha sido mediante estación de soldadura con estaño, como se muestra en las ilustraciones 27 y 28.

Como se muestra en la ilustración 29, para dotar de robustez al circuito, se ha atornillado la placa diseñada, así como el ventilador, a una base de madera que la mantiene inmóvil.

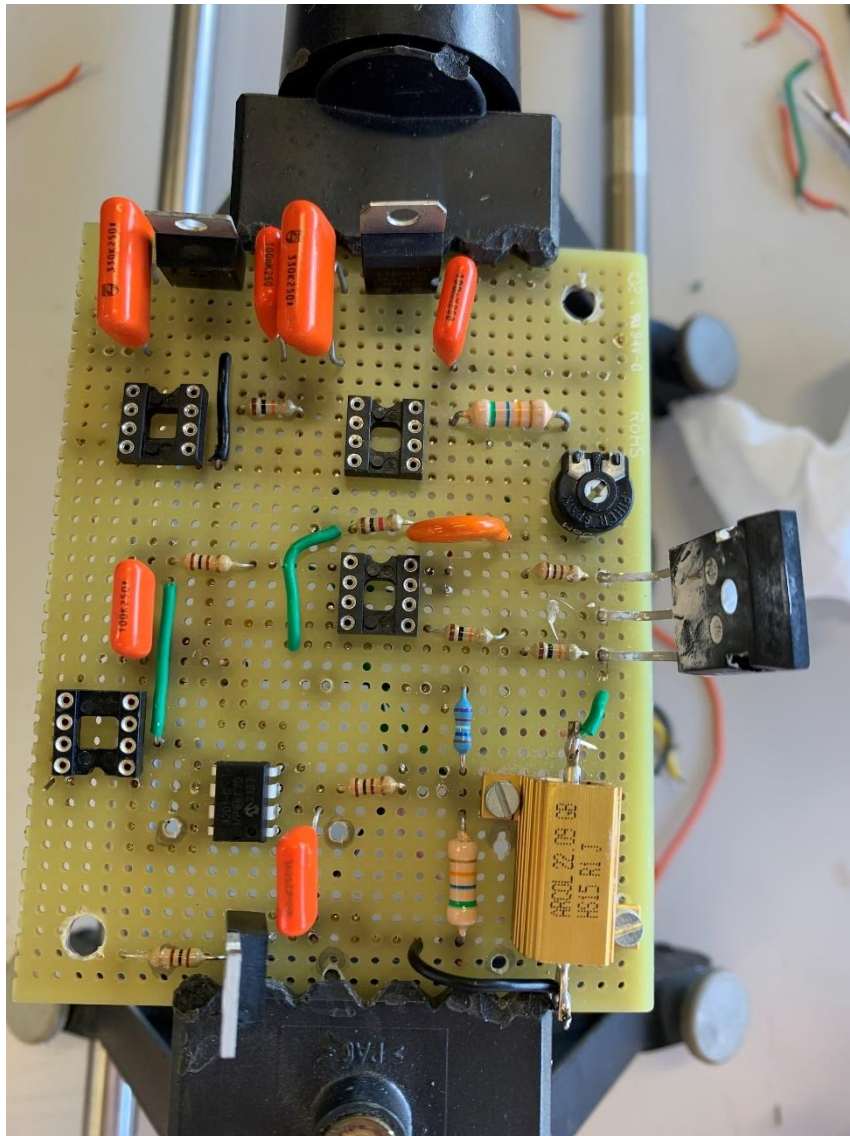


Ilustración 27. Vista de todos los componentes insertados en la placa

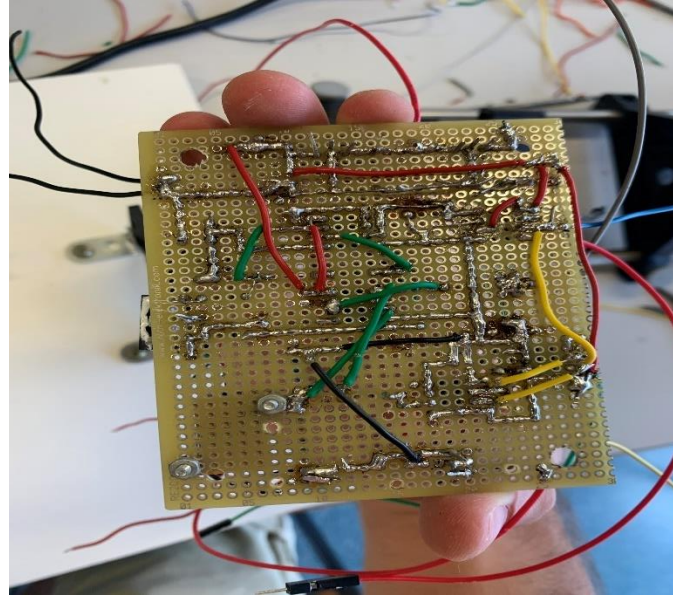


Ilustración 28. Vista de las soldaduras por la parte inferior de la placa

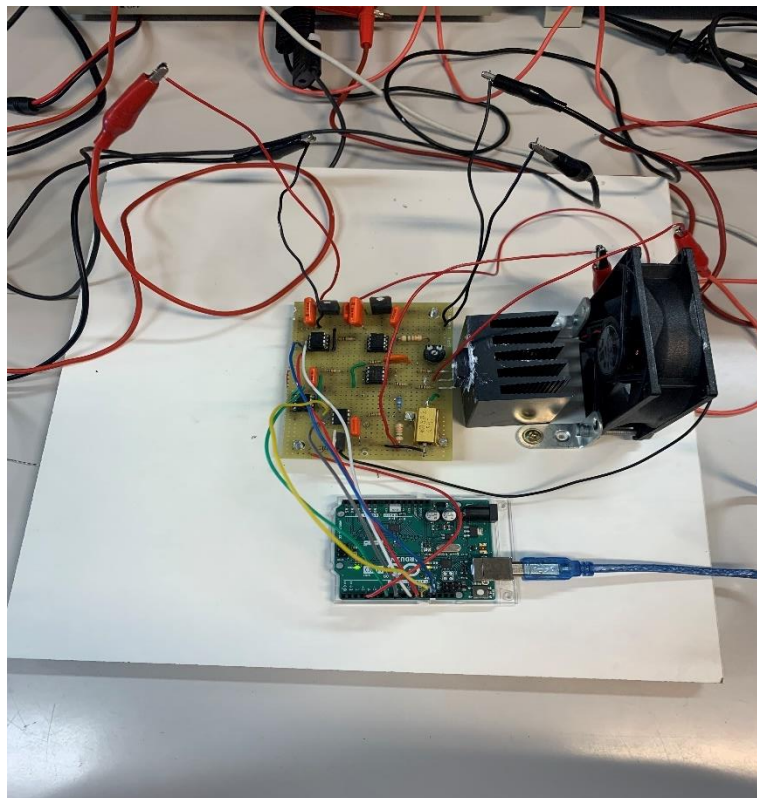


Ilustración 29. Vista del prototipo conectado

10 VALIDACIÓN

Para las pruebas del prototipo, se ha utilizado una fuente de alimentación regulable de 0-30V 0-5A disponible en el laboratorio. Estas pruebas han sido realizadas en los tres modos de trabajo disponibles, durante tiempos controlados y monitorizando en todo momento la temperatura.

La corriente y la tensión medida, son el resultado de los sensores del prototipo, mientras que la tensión y la corriente real son los que indica la propia fuente de alimentación. Esto no es del todo correcto, dado que la misma fuente está conectada a la etapa de control y alimenta el ventilador, por lo que la medida de corriente no es exacta. De todos modos, se hace así para evitar poner las manos dentro del dispositivo en funcionamiento y garantizar la seguridad.

10.1 PRUEBAS EN MODO CORRIENTE CONSTANTE

La duración de todas las pruebas a modo corriente constante ha sido de 5 min por comando.

3V EN LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN						
COMANDO ENVIADO	CORRIENTE MEDIDA	TENSIÓN MEDIDA	CORRIENTE REAL	TENSIÓN REAL	TEMPERATURA INICIAL (°C)	TEMPERATURA FINAL (°C)
C0	0.183A	3.033V	0.15A	3.1V	26.11	26.87
C0.2	0.330A	3.033V	0.32A	3.1V	26.21	27.04
C0.4	0.537A	2.968V	0.47A	3.1V	26.32	27.96
C0.6	0.720A	2.965V	0.62A	3.1V	25.90	29.04
C0.8	0.867A	2.954V	0.78A	3.1V	26.10	30.02
C1.0	1.103A	2.955V	0.96A	3.0V	26.00	30.30

Tabla 2. Pruebas en el modo CC con a fuente a 3V

5V EN LA FUENTE DE ALIMENTACIÓN						
COMANDO ENVIADO	CORRIENTE MEDIDA	TENSIÓN MEDIDA	CORRIENTE REAL	TENSIÓN REAL	TEMPERATURA INICIAL (°C)	TEMPERATURA FINAL (°C)
C0.2	0.332A	4.918V	0.31A	5.1V	25.97	27.03
C0.5	0.581A	4.908V	0.55A	5.1V	26.11	28.33
C0.7	0.728A	4.904V	0.70A	5.1V	26.88	29.01
C0.9	0.884A	4.845V	0.86A	5.1V	26.27	29.41
C1.0	0.981A	4.830V	0.94A	5.1V	26.58	29.61
C1.5	1.502A	4.991V	1.42A	5.1V	27.14	32.29
C2.0	1.917A	4.957V	1.93A	5.1V	26.89	34.41

Tabla 3. Pruebas en el modo CC con la fuente a 5V

10.2 PRUEBAS EN MODO POTENCIA CONSTANTE

Durante las pruebas del modo de potencia constante, la duración se ha mantenido en 5min excepto en las pruebas más exigentes de 30w y 36w debido a un incremento muy rápido de la temperatura, que podía poner en peligro la integridad del dispositivo.

COMANDO ENVIADO	CORRIENTE MEDIDA	TENSIÓN MEDIDA	CORRIENTE REAL	TENSIÓN REAL	POTENCIA REAL	TEMPERATURA INICIAL (°C)	TEMPERATURA FINAL (°C)
P2	0.575A	4.032V	0.55A	4.1V	2.255W	26.10	27.71
P5	0.983A	4.996V	0.96A	5.0V	4.8W	26.96	29.02
P8	0.991A	8.132V	0.97A	8.2v	7.954W	26.58	30.22
P10	1.014A	9.862V	0.99A	9.9V	9.8W	27.07	34.61
P15	1.064A	14.831V	1.02	14.9V	15.198W	27.52	40.11
P30	1.993A	14.806V	1.98A	14.9	29.502W	29.1	48.98 (90SEG)
P36	2.05A	17.882V	2,02A	17.9	36.158W	28.91	49.21 (30SEG)

Tabla 4. Pruebas con el modo CP

10.3 PRUEBAS EN MODO RESISTENCIA CONSTANTE

La duración de las pruebas a resistencia constante ha sido de 5min cada comando.

COMANDO ENVIADO	CORRIENTE MEDIDA	TENSIÓN MEDIDA	CORRIENTE REAL	TENSIÓN REAL	RESISTENCIA REAL	TEMPERATURA INICIAL (°C)	TEMPERATURA FINAL (°C)
R5	0.925A	4.992V	0.92A	5.1V	5.54 OHMS	25.82	30.47
R10	0.527A	4.821V	0.53A	4.9V	9.24 OHMS	26.31	29.68
R20	0.518A	9.832	0.52A	10.1V	19.42 OHMS	26.65	30.85

Tabla 5. Pruebas con el modo CR

10.4 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez realizadas las pruebas, los resultados obtenidos son bastante satisfactorios. La medida de tensión ha tenido un error máximo de 200mV, no obstante, medir exactamente este error no es sencillo ya que la fuente solo cuenta con una unidad decimal, mientras que el sensor de tensión tiene 3, esto provoca que, para diversas posiciones del cursor, el indicador de la fuente de alimentación no presente variaciones, pero si el sensor de tensión, que tiene mayor resolución en la medida.

En cuanto al sensor de corriente, presenta un error en el peor de los casos de 100mA, para mejorar estas medidas, tanto en el sensor de corriente como en el de tensión, se podrían haber

utilizado convertidores de mayor resolución o resistencias de mayor calidad con una menor tolerancia.

Todos los modos de trabajo han mostrado un funcionamiento correcto. En el caso del modo corriente constante, al variar la tensión de la fuente, la corriente se ha mantenido constante. En el caso de los modos de potencia y resistencia constantes, la corriente se va ajustando a medida que decae la tensión para mantener el valor indicado.

Aunque se le mande una señal 0 al DAC, existe un consumo mínimo de 120mA que se debe al offset de los amplificadores.

A pesar de que no se ha realizado una prueba con baterías reales, la prueba de 36W se ha realizado a 18V y 2A, que son las especificaciones que se buscaba que fuese capaz de satisfacer el prototipo. La prueba se ha detenido debido al incremento de temperatura, para no arriesgar la integridad del dispositivo, pero el tiempo que ha durado, ha funcionado de forma correcta.

11 CONCLUSIONES

Antes de valorar los resultados obtenidos con el prototipo, merece la pena hacer hincapié en los conocimientos obtenidos durante el estudio realizado del estado del arte.

Las baterías (cualquiera que sea su tipo, aunque especialmente las de ion litio) han experimentado un brutal crecimiento en los últimos años y todo indica a que va a seguir la misma tendencia en el futuro. Esto tiene su lado positivo, como es su implementación en los vehículos para evitar las emisiones, por ejemplo, pero también su lado negativo, y es su dificultad de reciclaje. Por lo tanto, aunque es importante investigar para mejorar su tecnología y así aumentar su capacidad, también es importante investigar en dispositivos que sirvan para analizar su estado y así poder prolongar su vida útil y es en esto en lo que se ha basado este proyecto.

En cuanto a los objetivos fijados al inicio de este proyecto para el prototipo, se consideran cumplidos todos ellos puesto que:

- Se ha desarrollado un software intuitivo capaz de comunicarse con el firmware para que pueda ser utilizado por cualquier usuario.
- Se ha programado el firmware del controlador para que incluya diversos modos de trabajo, así como protección ante sobrecalentamiento, como se exigía en las especificaciones técnicas.
- Se ha diseñado, simulado e implementado un circuito electrónico capaz de cumplir con los requerimientos planteados.

12 FUTURAS LÍNEAS

Como futuras mejoras de este proyecto, se propone:

- Encapsular el dispositivo en algún tipo de caja que permita su transporte y su uso fuera del laboratorio.
- Mejorar el firmware para que sea capaz de desarrollar más funciones, como por ejemplo medir la resistencia interna equivalente.
- Mejorar los componentes del circuito y aumentar la resolución de los elementos digitales para obtener mayor precisión en las medidas.
- Al tratarse de un proyecto escalable, aumentar la potencia máxima del dispositivo para mejorar la versatilidad y poder utilizarlo en aplicaciones que requieran mayor potencia.

13 BIBLIOGRAFÍA

[1] Andrea Vezzini, *“Lithium-Ion Battery Management”*, 2014.

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444595133000157>

[2] “The ultimate guide to the 18650 batteries”, 2021.

[https://www.fenixlighting.com/blog/the-ultimate-guide-to-the-18650-battery/#:~:text=An%2018650%20battery%20is%20a,mili%2Damp%2Dhours\).](https://www.fenixlighting.com/blog/the-ultimate-guide-to-the-18650-battery/#:~:text=An%2018650%20battery%20is%20a,mili%2Damp%2Dhours))

[3] “How to Prolong the Life of an 18650 Battery?”, 2017.

https://www.instructables.com/How-to-Prolong-the-Life-of-an-18650-Battery/?_ga=2.13740593.724233026.1651823395-2096544874.1651823395

[4] August Neverman, “Everything you need to know about the 18650 Battery”, 2021.

https://commonsensehome.com/18650-battery/?_ga=2.111168898.724233026.1651823395-2096544874.1651823395#:~:text=18650%20protected%20batteries%20have%20an,over%20current%20and%20short%20circuit

[5] Iván Patricio Pazmiño, “Análisis de los factores que intervienen en el envejecimiento prematuro de las baterías de ion-litio mediante modelo teórico validado en laboratorio”, 2020.

https://www.researchgate.net/publication/348856252_Analisis_de_los_factores_que_intervienen_en_el_envejecimiento_prematuro_de_las_baterias_de_ion-litio_mediante_modelo_teorico_validado_en_laboratorio

[6] Claudio Danilo Burgos Mellado, “Estimación del estado de carga para un banco de baterías basada en modelación difusa y filtro extendido de Kalman”, 2013.

https://www.researchgate.net/figure/Figura-16-Prueba-de-capacidad-de-acumulador-ion-litio-polimero-De-la-figura-anterior-se_fig6_322753108

[7] “How to measure internal resistance”, 2021.

<https://batteryuniversity.com/article/bu-902-how-to-measure-internal-resistance#:~:text=A%20voltmeter%20measures%20the%20open,divided%20by%20current%20Oequals%20resistance>).

[8] “Analysis and Interpretation of AC-measurements on Batteries used to assess State-of - Health and Capacity-condition”, 1995.

<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=499055>

[9] Hans-Georg Schweiger, “Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion Cells”, 2010.

https://www.researchgate.net/publication/51984362_Comparison_of_Several_Methods_for_Determining_the_Internal_Resistance_of_Lithium_Ion_Cells/download

[10] Junran Peng, “Design of Programmable DC Electronic Load”, 2016.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7823557>

[11] “Características técnicas del ARDUINO UNO”, 2018.

<https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/CaracteristicasArduino.pdf>

[12] “DC Electronic Load Series 2380”, 2022.

<https://www.tek.com/en/products/sources-and-supplies/series-2380>

[13] “Un vistazo a la evolución de las baterías para smartphones”, 2017.

<https://www.muycomputer.com/2017/11/12/evolucion-las-baterias-smartphones/>

[14] “El precio de las baterías ion-litio bajan un 89% desde 2010”, 2020.

<https://www.technosun.com/es/blog/precio-baterias-ion-litio-bajan-89-por-ciento-desde-2010/>

[15] David López Sánchez, “Tecnologías de baterías”, 2019.

<https://uvadoc.uva.es/bitstream/handle/10324/37778/TFG1267.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

[16] G Olmo Esteban “Caracterización de baterías de litio para el estudio del envejecimiento”, 2019

https://oa.upm.es/57278/1/TFG_GUILLERMO_OLMO_ESTEBAN.pdf

DOCUMENTO Nº2: PLIEGO DE CONDICIONES

1 INTRODUCCIÓN	53
2 NORMATIVA GENERAL	53
3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS.....	54
3.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROTOTIPO	54
3.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MATERIALES.....	55
3.2.1 COPONENTES ELECTRÓNICOS Y CIRCUITOS INTEGRADOS.....	55
3.2.2 CABLEADO	56
3.2.3 PLACA PCB	57
3.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EJECUCIÓN	57

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento, resumirá y delimitará las características técnicas del prototipo.

En la hipotética situación que hubiese algún problema durante la ejecución del proyecto, se deberá poner en constancia al promotor siempre que sea posible y, si esto no es posible, se deberán seguir los principios de buena práctica.

2 NORMATIVA GENERAL

En el presente apartado, se definen las diferentes leyes que debería cumplir el prototipo y que son de obligado cumplimiento en el caso de querer comercializarlo.

- **Real Decreto 1053/2014, del 12 de diciembre.** En el ámbito nacional, define la normativa para las instalaciones eléctricas de baja tensión
- **Real Decreto 186/2016, del 6 de mayo.** Esta norma sustituye a su predecesora, el Real Decreto 1580/2006, de 22 de diciembre y rige la compatibilidad electromagnética de los equipos eléctricos y electrónicos. Establece los procedimientos de evaluación y protección para evitar las EMI (interferencias electromagnéticas) entre dispositivos.
- **Directiva 2011/65/UE.** Es de aplicación a los aparatos que necesitan corriente eléctrica o campos electromagnéticos para funcionar adecuadamente. Aparatos necesarios para generar, transmitir, y medir tales corrientes y campos y que están diseñados para utilizar una tensión nominal no superior a 1000 V en corriente alterna y 1500 V en corriente continua, se restringe la utilización de determinadas sustancias peligrosas como el plomo, el mercurio, el cadmio, el cromo hexavalente, los bifenilos polibromados (PBB) y los difeniléteres polibromados (PBDE) estableciéndose determinados límites.
- **DOUE-L-2020-81228.** Modifica la Decisión de Ejecución (UE) 2019/1956 en lo que se refiere a las normas armonizadas para determinados aparatos electrodomésticos

3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

3.1 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL PROTOTIPO

- Tanto el dispositivo electrónico, como su disipador y el ventilador, deben ir atornillados a una base de madera de 10mm de espesor que garantice la rigidez del conjunto y que impida el movimiento del ventilador, así como servir de soporte para el disipador.
- El tamaño total del dispositivo no deberá superar los 330x280x70mm, coincidiendo con las medidas utilizadas para la base de madera de 10mm de espesor. En todo caso, el tamaño se puede reducir utilizando una base de 220x140 como mínimo, pero manteniendo la altura de 70mm para garantizar la robustez.
- El peso del dispositivo con la base de sujeción utilizada es de 714 gramos.
- La alimentación será realizada a través de una fuente de alimentación RUIZ 30V regulables y 10A de corriente máxima. Cualquier fuente de alimentación regulable con una tensión superior a 12V y una corriente superior a 1A es apta siempre y cuando cumpla la normativa correspondiente.
- El funcionamiento correcto debería ser conectar el dispositivo a la alimentación y a la batería con los cables determinados para cada caso, y mediante un programa creado en Visual Studio poder controlar la potencia de descarga.
- La potencia máxima se limitará vía software a 45W, aunque el dispositivo es capaz de trabajar a más potencia, para ello se requerirá de personal técnico para comprobar las modificaciones oportunas para garantizar este salto de potencia con seguridad.
- El rango de tensiones óptimos para la alimentación de la batería será de entre 12V y 15V, nunca superando los 18V para no comprometer los reguladores de tensión
- Las baterías aptas para analizar con este dispositivo son exclusivamente baterías de 18V y 2Ah o en todo caso baterías de potencia inferior. El promotor no se hace responsable del uso del dispositivo en baterías de mayor potencia.
- Los distintos modos de trabajo que se disponen son: Modo corriente constante, modo potencia constante y modo resistencia constante.
- La temperatura del dispositivo nunca deberá superar los 100°C. Esto no debería suceder debido al sistema de control de temperatura que integra, que debería apagar el dispositivo en caso de superar la temperatura límite, pero en caso de que esto no

ocurriera, será responsabilidad del usuario cortar la alimentación para evitar averías o posibles incendios.

3.2 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS MATERIALES

3.2.1 COPONENTES ELECTRÓNICOS Y CIRCUITOS INTEGRADOS

- Todos los condensadores utilizados en el proyecto son del tipo cerámico y con una tolerancia de la serie “K”, es decir, $\pm 10\%$. El uso de condensadores con peor tolerancia puede influir negativamente en el funcionamiento correcto del dispositivo. Unos condensadores de mejor tolerancia serán recomendables, siempre y cuando se mantengan las capacidades nominales de estos.
- Tanto el regulador de tensión de 12V como le de 5V son de la marca STMicroelectronics y presentan una tolerancia en la tensión de salida del 2%. Se pueden utilizar otros reguladores siempre que la tolerancia sea igual o inferior y que el encapsulado siga siendo el TO-220, para favorecer la disipación de temperatura.
- Las resistencias utilizadas presentan una tolerancia de $\pm 10\%$, excepto la resistencia de potencia que es de $\pm 5\%$. Esta decisión es el resultado de la búsqueda de abaratar costes y de las dificultades para encontrar componentes. Sería recomendable utilizar las resistencias lo más precisas posibles, especialmente para la etapa de control de corriente.
- El conversor digital-analógico es de la marca Microchip y posee una resolución de 12 bits y tecnología de comunicación SPI. Es conveniente utilizar los propuestos, pero en caso de no ser posible, se recomienda que se mantenga la resolución y el bus de comunicación en la alternativa para no necesitar modificar el programa.
- Los amplificadores operacionales utilizados son los MCP6242 de microchip, que incluyen 2 operacionales por cada integrado. Sus características principales son la salida y entrada rail-to-rail y la alimentación entre 1.8V y 5.5V single supply, lo cual nos permite no requerir alimentación negativa.
- El fusible utilizado en la etapa de potencia debe ser de 3A para proteger al MOSFET en caso de un fallo en el programa que lo ponga en conducción completa.

- El MOSFET de la etapa de potencia debe ser el IXFH96N15P, sus principales características para esta aplicación son los 480W de potencia máxima, la capacidad de trabajar en la zona continua y el encapsulado TO-247.
- El Zener utilizado debe ser de 5.1V y 500mW de potencia como mínimo, en el prototipo se utiliza el BZX79-C5V1 de la marca Nexperia, que cumple con las características descritas.
- El sensor de temperatura recomendado es el LM35, su tamaño permite unirlo al disipador de temperatura, tiene un rango de temperatura entre -55°C y 150°C lo cual lo hace apto para el prototipo. Su resolución típica es de $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$
- El ventilador utilizado es un ventilador axial, fabricado por RS Pro, que tiene unas dimensiones de 80x80x25mm, potencia de 2.9W, velocidad de 3100rpm y un caudal de $68\text{m}^3/\text{h}$.
- El MOSFET utilizado para el control del ventilador es el IRF830APBF, utiliza el empaquetado TO-220 y tiene una corriente máxima en el terminal drain de 5A a 25°C, como la corriente máxima del ventilador son 250mA, este MOSFET es más que suficiente.
- En cuanto al disipador, se utiliza uno de la marca Fischer Elektronik, de 50x50x40mm y 3.1 K/W de poder de disipación con ventilación natural, que mejora con el ventilador mencionado anteriormente.
- La placa de control es un Arduino UNO, basado en el microcontrolador ATmega328P. Las características principales de la placa son:
 1. Velocidad de reloj de 16MHz
 2. Voltaje de trabajo de 5V
 3. 14 pines digitales y 6 pines analógicos
 4. 1 puerto serie por hardware
 5. Memoria: 32KB Flash, 2KB RAM y 1KB Eeprom
- Los conversores analógico-digital son los MCP32021 de la marca Microchip, al igual que con el DAC, la tecnología de comunicación es SPI y la resolución es de 12 bits.

3.2.2 CABLEADO

Para el cableado, se utilizará cable de $0,5\text{mm}^2$ tanto para la parte de control como para la parte de potencia, debido a que es capaz de soportar hasta 6A de forma segura este cableado estará recubierto de una película aislante de PVC que deberá cumplir la norma UNE 21031-3:1992, que

regula los cables aislados con policloruro de vinilo de tensiones nominales U/O inferiores o iguales a 450/750V

3.2.3 PLACA PCB

Para el montaje de todos los componentes del circuito, se ha utilizado una placa experimental microperforada y estañada, a excepción del Arduino, del dissipador y ventilador, que van anclados a la tabla. La placa tiene unas medidas de 80x100mm.

3.3 ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE EJECUCIÓN

- El método de soldadura empleado para la unión de componentes y cables es la soldadura blanda con estaño.
- La conexión con la placa Arduino se hace a través de cables con terminales macho de 2.54mm
- La programación del dispositivo se realiza en el entorno IDE de Arduino, donde se puede desarrollar, compilar y cargar el programa a la propia placa.
- La programación de la interfaz de usuario se realizará con Visual Studio, a través de esta interfaz se interactuará con el dispositivo para introducir el modo de trabajo o la tasa de descarga.

DOCUMENTO Nº3: PRESUPUESTO

1 COSTES DE HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	59
2 COSTES DE HARDWARE DEL PROYECTO.....	59
3 COSTES DE SOFTWARE DEL PROYECTO.....	61
4 COSTES DE PERSONAL DEL PROYECTO.....	61
5 COSTE TOTAL DEL PROYECTO.....	62

1 COSTES DE HERRAMIENTAS PARA LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO

Herramienta	Cantidad	Precio Unitario (€)	Total(€)
Xiaomi Mi Laptop Air	1	660,00€	660,00€
Fuente de alimentación	1	59,99€	59,99€
Soldador	1	22,99€	22,99€
Estaño	1	6,60€	6,60€
Multímetro	1	16,99€	16,99€
Taladro	1	44,99€	44,99€
Otros (Alicates, tijeras, pinzas...)	1	30,00€	30,00€
		Total	841,56€

Tabla 6. Costes de las herramientas para el desarrollo del proyecto

2 COSTES DE HARDWARE DEL PROYECTO

Componente	Descripción	Cantidad	Precio Unitario (€) IVA incl.	Total(€)
UVY1HR33MDD	Capacitor 330nF	2	0,27€	0,54€
UVY1HOR1MDD	Capacitor 100nF	4	0,21€	0,84€
L7812ACV	Regulador de tensión de 12V	1	1,04€	1,04€
L7805ACV	Regulador de tensión de 5V	1	1,09€	1,09€
MCP4921-E/P	Convertor Digital-Analógico	1	4,02€	4,02€
MCP6242-E/P	Amplificador operacional dual	2	0,75€	1,50€
LR1F51K	Resistencia 50K Ω	2	0,234€	0,468€
707-7701	Resistencia 3.3K Ω	1	0,255€	0,255€
707-8221	Resistencia 1K Ω	1	0,237€	0,237€

562R5GAS10	Capacitor 10nF	1	1,42€	1,42€
707-7587	Resistencia 100Ω	4	0,281€	1,124€
563-649	Fusible 3A	1	0,407€	0,407€
IXFH96N15P	MOSFET de potencia	1	2,98€	2,98€
HS15 R1 J	Resistencia de potencia 0,1Ω	1	4,69€	4,69€
3296W-1-302LF	Potenciómetro 4,7kΩ	1	1,22€	1,22€
YR1B16K9CC	Resistencia 16,6KΩ	1	0,772€	0,772€
707-8300	Resistencia 10KΩ	3	0,21€	0,63€
1N5338BRLG	Zener de 5,1V	1	0,57€	0,57€
LM35CAZ/NOPB	Sensor de temperatura LM35	1	10,36€	10,36€
668-8839	Ventilador	1	7,05€	7,05€
IRF830APBF	MOSFET de control del ventilador	1	2,27€	2,27€
SK434/50SA	Disipador térmico	1	8,24€	8,24€
Arduino UNO	Placa de control	1	28,31€	28,31€
MCP3201-CI/P	Convertor Analógico-Digital	2	4,978€	9,956€
Cableado		1	2,58€	2,58€
Tabla de sujeción		1	11,99€	11,99€
Pletinas de sujeción		2	0,48€	0,96€
Pasta térmica		1	7,68€	7,68€
Tornillos 5mm		6	0,12€	0,72€
Tuercas 5mm		6	0,09€	0,54€
			Total	114,46€

Tabla 7. Coste del hardware del prototipo

3 COSTES DE SOFTWARE DEL PROYECTO

Programa	Licencia(s)	Precio / Licencia(s) (€)	Total(€)
KiCad 6.0	1	0,00€	0,00€
LT Spice XVII	1	0,00€	0,00€
Arduino IDE	1	0,00€	0,00€
Visual Studio Basic	1	0,00€	0,00€
Microsoft 365 Individual	1	69,99€	69,99€
Total			69,99€

Tabla 8. Costes del software del prototipo

4 COSTES DE PERSONAL DEL PROYECTO

Reuniones				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/h)	Total(€)
Román Fernández (Tutor)	h	7	25,00€	175,00€
Joan Huet (Ingeniero)	h	7	10,00€	70,00€
Total				250,00€

Tabla 9. Coste de las reuniones

Diseño y montaje				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/h)	Total(€)
Román Fernández (Tutor)	h	15	25,00€	375,00€
Joan Huet (Ingeniero)	h	170	10,00€	1700,00€
Total				2075,00€

Tabla 10. Coste del diseño y montaje

Redacción				
Descripción	Unidad	Cantidad	Precio (€/h)	Total(€)
Román Fernández (Tutor)	h	5	25,00€	125,00€
Joan Huet (Ingeniero)	h	150	10,00€	1500,00€
			Total	1625,00€

Tabla 11. Coste de redacción

5 COSTE TOTAL DEL PROYECTO

Descripción	Precio (€)
Coste de las herramientas utilizadas	841,56€ €
Coste del hardware que compone el proyecto	114,46€
Coste del software necesario para el desarrollo del proyecto	69,99€
Coste de las reuniones de los involucrados	250,00€
Coste del desarrollo, montaje y programación del dispositivo	2075,00€
Coste de la redacción de la documentación técnica	1625,00€
Total	4976,01€

Tabla 12. Coste total del proyecto

El presupuesto de ejecución de la carga electrónica regulable presentada en este proyecto asciende a CUATRO MIL NOVECIENTOS SENTA Y SEIS EUROS CON UN CÉNTIMO.

DOCUMENTO Nº4: PLANOS

ANEXO I: CÓDIGO INTERFAZ DE USUARIO

```
using System;
using System.Windows.Forms;

namespace Segunda_Prueba_De_interfaz
{
    public partial class Form1 : Form
    {
        /// <summary>
        /// Required designer variable.
        String mStr;
        /// </summary>
        ///
        char[] trama;

        public Form1()
        {
            InitializeComponent();
        }

        private void button1_Click(object sender, EventArgs e)
        {
            try
            {
                button2.Enabled = true;
                textBox1.Visible = true;
            }
            catch (Exception error)
            {
                MessageBox.Show(error.Message);
            }
        }

        private void Form1_Load(object sender, EventArgs e)
        {
            try
            {
                serialPort1.PortName = "COM8";
                serialPort1.Open();
                timer1.Start();
                label1.Visible = false;
                label2.Visible = false;
                label3.Visible = false;
            }
            catch (Exception error)
            {
                MessageBox.Show(error.Message);
            }
        }

        private void Form1_FormClosing(object sender, FormClosingEventArgs e)
        {

```

```
        if (serialPort1.IsOpen)
            try
            {
                serialPort1.Close();
            }
            catch (Exception error)
            {
                MessageBox.Show(error.Message);
            }
        }

private void button2_Click(object sender, EventArgs e)
{

    try
    {
        string tipo = comboBox1.Text;
        if (tipo == "Resistencia Constante")
            serialPort1.Write("R");
        if (tipo == "Potencia Constante")
            serialPort1.Write("P");
        if (tipo == "Corriente Constante")
            serialPort1.Write("C");

        serialPort1.WriteLine(textBox1.Text);
        label12.Text = "ON";
        label12.ForeColor = System.Drawing.Color.Green;

    }
    catch (Exception error)
    {
        MessageBox.Show(error.Message);
    }
}

private void button3_Click(object sender, EventArgs e)
{
    label12.Text = "OFF";
    label12.ForeColor = System.Drawing.Color.Red;
    try
    {
        serialPort1.Write("S");
    }
    catch (Exception error)
    {
        MessageBox.Show(error.Message);
    }
}

private void timer1_Tick(object sender, EventArgs e)
{

    label7.Text = mStr;
}
```

```
private void serialPort1_DataReceived(object sender,
System.IO.Ports.SerialDataReceivedEventArgs e)
{
    mStr = serialPort1.ReadLine();
}

e) private void comboBox1_SelectedIndexChanged(object sender, EventArgs
{
    if (comboBox1.SelectedIndex == 0)
    {
        label1.Visible = true;
        label2.Visible = false;
        label3.Visible = false;
    }
    if (comboBox1.SelectedIndex == 1)
    {
        label1.Visible = false;
        label2.Visible = true;
        label3.Visible = false;
    }
    if (comboBox1.SelectedIndex == 2)
    {
        label1.Visible = false;
        label2.Visible = false;
        label3.Visible = true;
    }
}
}
```

ANEXO II: CÓDIGO FIRMWARE ARDUINO

```
#include <stdio.h>

#include <stdlib.h>

#include <SPI.h> //

#include <MCP492X.h> // Libreria propia de DAC MCP4921

#define PIN_SPI_CHIP_SELECT_DAC 10

MCP492X myDac(PIN_SPI_CHIP_SELECT_DAC);

const byte DAT = 12; // SPI MISO Pin
const byte CLK = 13; // SPI Clock Pin
const byte CS_ADC_CORRIENTE = 7; // SPI SS Pin (Chip Select)
const byte CS_ADC_TENSION = 8; // SPI SS Pin (Chip Select)
const byte VENTILADOR= 4;
int pinLM35 = A0;

float voltage_CORRIENTE;
float voltage_TENSION;
float corriente_actual ;
float voltaje_actual;

const int BUFFER_SIZE = 10;
char buf[BUFFER_SIZE];
char buf_valor[5];
char tipo;
String modo;
int modo_descarga;
float valor_convertido;
float corriente_deseada;
```

```
float mostrar_corriente;

float control_FET;

float control_DAC;

float factor_de_compensacion=1;

float potencia_deseada;

float resistencia_deseada;

float temperatura;

float temperatura_grados;

float temperatura_ventilador_encendido = 30;

float temperatura_ventilador_apagado = 28;

float temperatura_limite = 70;

int carga;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  myDac.begin();
  myDac.analogWrite(0);
  SPI.beginTransaction(SPISettings(1500000, MSBFIRST, SPI_MODE0));
  SPI.begin();

  pinMode(DAT,INPUT);
  pinMode(CS_ADC_CORRIENTE,OUTPUT);
  pinMode(CS_ADC_TENSION,OUTPUT);

  pinMode(VENTILADOR,OUTPUT);

  digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE,LOW); // CS se pone a nivel alto y bajo porque no se
  digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE,HIGH); //conoce el estado inicial
```



```
digitalWrite(CS_ADC_TENSION,LOW); //
digitalWrite(CS_ADC_TENSION,HIGH); //

digitalWrite(CLK,LOW);

analogReference(INTERNAL);           // Arduino internal reference para el control de
temperaura

myDac.analogWrite(0);                //reset DAC a 0
}

void loop() {

if (Serial.available() > 0) {

int rlen = Serial.readBytes(buf, BUFFER_SIZE);

Serial.print("Tipo: ");
tipo = buf[0];
Serial.print(tipo);

//Serial.print(" Cantidad: ");
for(int i = 1; i < rlen; i++){
//Serial.print(buf[i]);
buf_valor[i-1]= buf[i];
}
}
```

```
valor_convertido = atof(buf_valor);
```

```
    //Serial.print(" valor convertido: ");
```

```
    //Serial.print(valor_convertido);
```

```
  }
```

```
if( tipo == 67)// ASCII
```

```
    modo_corriente_constante();
```

```
if( tipo == 80)// ASCII
```

```
    modo_potencia_constante();
```

```
if( tipo == 82)// ASCII
```

```
    modo_resistencia_constante();
```

```
if( tipo == 83)// ASCII
```

```
    myDac.analogWrite(0);
```

```
leer_corriente_tension();
```

```
if (modo_descarga == 1) {
```

```
    Serial.print("Estamos en corriente");
```

```
    corriente_deseada = valor_convertido;
```

```
    mostrar_corriente = corriente_deseada;
```

```
control_FET = corriente_deseada*1365,574*factor_de_compensacion; // El numero se justifica  
con cálculos
```

```
control_DAC = control_FET;  
}
```

```
if (modo_descarga == 2) {  
Serial.print("Estamos en potencia");  
potencia_deseada = valor_convertido;  
corriente_deseada = potencia_deseada/(voltaje_actual);
```

```
control_FET = corriente_deseada*1365,574*factor_de_compensacion; // El numero se justifica  
con cálculos
```

```
control_DAC = control_FET;  
}
```

```
if (modo_descarga == 3) {  
Serial.print("Estamos en resistencia");  
resistencia_deseada = valor_convertido;  
corriente_deseada = (voltaje_actual)/resistencia_deseada;
```

```
control_FET = corriente_deseada*1365,574*factor_de_compensacion; // El numero se justifica  
con cálculos
```

```
control_DAC = control_FET;  
}
```

```
myDac.analogWrite(control_DAC);  
control_refrigeracion();
```

```
}
```

```
////////////////////////////////////MODO  
CONSTANTE////////////////////////////////////
```

CORRIENTE

```
void modo_corriente_constante(){
```

```
modo = ("C_Constante");
```

```
modo_descarga=1;
```

```
}
```

```
////////////////////////////////////MODO  
CONSTANTE////////////////////////////////////
```

POTENCIA

```
void modo_potencia_constante(){
```

```
modo = ("P_Constante");
```

```
modo_descarga=2;
```

```
}
```

```
////////////////////////////////////MODO  
CONSTANTE////////////////////////////////////
```

RESISTENCIA

```
void modo_resistencia_constante(){
```

```
modo = ("R_Constante");
```

```
modo_descarga=3;
```

```
}
```

```
////////////////////////////////////LEER  
TENSION////////////////////////////////////
```

CORRIENTE

```
void leer_corriente_tension(){  
  
    unsigned int reading_CORRIENTE = 0;  
    unsigned int reading_TENSION = 0;  
  
    digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE,LOW);  
    reading_CORRIENTE = SPI.transfer16(0x0000);  
    digitalWrite(CS_ADC_CORRIENTE,HIGH);  
  
    digitalWrite(CS_ADC_TENSION,LOW);  
    reading_TENSION = SPI.transfer16(0x0000);  
    digitalWrite(CS_ADC_TENSION,HIGH);  
  
    reading_CORRIENTE = reading_CORRIENTE << 3;  
    reading_CORRIENTE = reading_CORRIENTE >> 4;  
    reading_TENSION = reading_TENSION << 3;  
    reading_TENSION = reading_TENSION >> 4;  
  
    voltage_CORRIENTE = reading_CORRIENTE * (5.0 / 4095);  
    voltage_TENSION = reading_TENSION * (5.0 / 4095);  
    corriente_actual = voltage_CORRIENTE * 10;  
    voltaje_actual = voltage_TENSION*4.1;  
    Serial.print("CORRIENTE = ");
```

```
Serial.println( corriente_actual, 3);  
delay(250);  
Serial.print("TENSION = ");  
Serial.println(voltaje_actual, 3);  
delay(250);  
}  
  
////////////////////CONTROL  
REFRIGERACIÓN////////////////////  
  
void control_refrigeracion(){  
  
temperatura = analogRead(pinLM35);  
  
temperatura_grados = (1.1 * temperatura * 100)/1024.0;  
  
Serial.print("La temperatura es:");  
Serial.println(temperatura_grados);  
  
delay(1000);  
  
if (temperatura_grados<temperatura_ventilador_apagado){  
    digitalWrite(VENTILADOR, LOW);  
}  
else if (temperatura_grados >=temperatura_ventilador_encendido){  
    digitalWrite(VENTILADOR, HIGH);
```

```
}  
if (temperatura_grados>=temperatura_limite){  
    myDac.analogWrite(0);  
}  
  
}
```