

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño de un sistema de gestión y almacenamiento de energía para nodos IoT



Grado en Ingeniería Eléctrica y Electrónica

Trabajo Fin de Grado

Raúl Arribas Antón
Santiago Tainta Ausejo
Pamplona, 8 de junio del 2023

upna

Universidad Pública de Navarra
Nafarroako Unibertsitate Publikoa

Agradecimientos

Antes que nada, deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. Santiago Tainta Ausejo por permitirme participar en este proyecto. No sólo ha sido una oportunidad para ampliar mis conocimientos y habilidades en el campo de la investigación, sino también una experiencia muy enriquecedora a nivel personal.

Durante todo el proceso, el Dr. Tainta Ausejo ha sido un gran apoyo para mí. Desde el comienzo me ha brindado su orientación y supervisión, guiándome en todo momento y asegurándose de que el proyecto siguiera por el camino correcto. Sus valiosos consejos y sugerencias han sido fundamentales para alcanzar los objetivos establecidos y para desarrollar una investigación de alta calidad.

Por otra parte, quiero destacar que este proyecto no habría sido posible sin la colaboración y el apoyo de mis compañeros de i2tec. Desde el inicio, han estado disponibles para brindarme su ayuda y proporcionarme el material necesario para la realización del proyecto.

Resumen

En este trabajo se llevará a cabo el diseño y desarrollo de un sistema que permita gestionar la energía generada por dos paneles solares de baja potencia (4W a 9V). El sistema empleará una PCB que alimentará una batería de litio de 3,7V y una carga variable que consuma 3,3V o 5V y hasta 2A. Para lograrlo, se debe seleccionar cuidadosamente el tipo de batería, el circuito controlador y los convertidores DC/DC que se implementarán en la PCB. Se estudiarán las ventajas e inconvenientes de implementar un control MPPT real, que permita el seguimiento del punto de máxima potencia de los paneles solares. Además, se compararán diferentes placas comerciales de diversas empresas en este rango de potencia y se realizarán pruebas de funcionamiento para compararlas con el sistema desarrollado.

Palabras clave

- IoT
- Energy harvesting
- Cargador solar
- PCB

Índice

1. Introducción	6
1.1. Motivación	6
1.2. Objetivos	6
1.3. Metodología	7
1.4. Estructura del documento	8
2. Estado del arte	9
2.1. Introducción	9
2.2. Sistemas de captación ambiental	9
2.3. Sistemas de almacenamiento de energía	10
2.4. Baterías de litio	11
2.4.1. Principio de funcionamiento	11
2.4.2. Tipos de baterías de litio	11
2.4.3. Carga y descarga de las baterías de litio	14
2.5. Convertidores DC/DC	16
2.5.1. Introducción	16
2.5.2. Tipos de convertidores conmutados	17
2.5.3. Requisitos	17
2.6. Controladores de carga	17
2.6.1. Introducción	17
2.6.2. Tipos de controladores de carga	18
2.6.3. MPPT	19
2.6.4. Requisitos	21
2.7. Cargadores solares comerciales	21
2.7.1. Adafruit 390	21
2.7.2. Adafruit 4755	22
2.7.3. DFRobot Solar Power Manager 5 V	23
2.7.4. DFRobot Solar Power Manager 9 – 12 – 18 V	24
3. Análisis de los cargadores comerciales	25
3.1. Introducción	25
3.2. Sistema de medida	25
3.2.1. Componentes	26
3.2.2. Montaje	28
3.2.3. Firmware	29

3.3.	DFRobot Solar Power Manager 9 – 12 – 18 V	30
3.3.1.	Introducción.....	30
3.3.2.	Prueba de descarga	31
3.3.3.	Prueba de carga	32
3.3.4.	Prueba de carga – descarga.....	35
3.4.	Análisis de resultados	38
4.	Diseño del sistema	39
4.1.	Introducción	39
4.2.	Componentes	39
4.2.1.	Controlador de carga	39
4.2.2.	Convertidor DC/DC	41
4.3.	Diseño inicial.....	43
4.3.1.	Introducción.....	43
4.3.2.	Esquemático	43
4.3.3.	Partes del esquemático	44
4.3.4.	PCB.....	52
4.3.5.	Montaje de la tarjeta	54
4.3.6.	Pines de test.....	60
4.4.	Problemas encontrados.....	60
4.4.1.	Salida regulada PMID.....	60
4.4.2.	Convertidor DC/DC	62
4.4.3.	Pin /CE conectada a pull - up	63
4.4.4.	Elementos DNP	63
4.4.5.	Limitación de corriente de entrada	63
4.4.6.	Datasheet.....	64
4.5.	Diseño final	64
4.5.1.	Esquemático	64
4.5.2.	PCB	71
5.	Implementación del MPPT.....	72
5.1.	Introducción	72
5.2.	Microcontrolador	72
5.2.1.	Componentes para el ATmega328p	73
5.2.2.	Programación de un ATmega328p	74
5.3.	Configuración de registros por I2C.....	75

6.	Resultados obtenidos.....	77
6.1.	Introducción	77
6.2.	Problemas encontrados en la placa final	77
6.3.	Prueba de descarga	78
6.4.	Prueba de carga.....	79
6.5.	Prueba de carga – descarga subalimentada.....	81
6.6.	Prueba de carga – descarga sobrealimentada	83
6.7.	Comparación de resultados.....	85
7.	Conclusiones y líneas futuras.....	87
7.1.	Conclusiones.....	87
7.2.	Líneas futuras	87
8.	Bibliografía	89
	Anexo A – Código de Arduino para la monitorización.....	95
	Anexo B – Diseño inicial del esquemático	101
	Anexo C – Función de los pines del BQ25895.....	103
	Anexo D – Lista de componentes de la PCB inicial	104
	Anexo E – Diseño de PCB inicial	106
	Anexo F – Diseño final del esquemático.....	107
	Anexo G – Lista de componentes de la PCB final	109
	Anexo H – Diseño de PCB final.....	110
	Anexo I – Listado de registros del BQ25895	111
	Anexo J – Código de Arduino para la implementación del MPPT	127

1. Introducción

1.1. Motivación

La Universidad Pública de Navarra (UPNA) está trabajando en un proyecto de IoT (Internet of Things) que busca controlar el tráfico en vías rurales mediante la detección de personas y animales que transitan por ellas, sin necesidad de supervisión humana constante. Para ello, el prototipo que están desarrollando estará alimentado por un panel solar de baja potencia y unas baterías, ya que no existe acceso a la red eléctrica en esas áreas.

El sistema de alimentación diseñado deberá permitir que el dispositivo consuma muy poca energía durante su funcionamiento normal, pero con intervalos de alto consumo cuando detecte movimiento o cuando transmita información a través de una red de comunicación. Es importante que, durante estos picos de consumo, la batería no alcance sus valores mínimos de carga para evitar su deterioro.

Este proyecto implica un importante desafío técnico ya que el sistema de gestión de la energía debe ser eficiente en el consumo de energía para poder funcionar durante largos períodos de tiempo sin necesidad de intervención humana. La elección de los componentes adecuados, como el panel solar, las baterías y el dispositivo de control, es clave para lograr un sistema fiable y sostenible.

1.2. Objetivos

El objetivo principal de este proyecto es diseñar y caracterizar un sistema de alimentación solar para nodos IoT en entornos rurales remotos. Se utilizará un panel solar de baja potencia (hasta 15W) con un voltaje de 9V. Para lograrlo, se llevarán a cabo las siguientes tareas:

- Realizar un estudio del estado del arte de los sistemas de alimentación por energía solar disponibles comercialmente para aplicaciones de bajo consumo, tanto de circuitos integrados como de placas de desarrollo.
- Desarrollar un sistema de monitorización que pueda medir el voltaje y la intensidad en la salida de la placa solar, la batería y la carga. Este sistema permitirá caracterizar el sistema con una carga real y evaluar su rendimiento para conocer su autonomía real.
- Diseñar y fabricar un sistema de alimentación solar que pueda proporcionar 5V o 3.3V de forma compacta y eficiente. Para lograrlo, se emplearán convertidores DC/DC que transformen la tensión a las deseadas. El sistema utilizará una batería de litio de 3.7V para almacenar la energía y proporcionar energía de forma ininterrumpida a un nodo IoT. Su consumo en modo de bajo consumo será de 100uA y de 30mA cuando esté activo (10 minutos por hora). Además, será capaz de proporcionar una corriente de hasta 2A diariamente durante 10 segundos

para realizar la comunicación inalámbrica y transmitir los datos captados. El sistema de alimentación será gestionable, lo que permitirá controlar su funcionamiento desde un microcontrolador externo y monitorizar el funcionamiento del sistema diseñado para asegurar su correcta actuación.

1.3. Metodología

En primer lugar, se lleva a cabo una búsqueda exhaustiva de fuentes relevantes para realizar una lectura crítica de los artículos y proyectos seleccionados. Luego, se sintetizan los hallazgos y se clasifican en categorías temáticas para facilitar su análisis y sirve como punto de partida para el diseño del sistema. De esta manera, se garantiza una revisión completa y estructurada del estado del arte en el área de estudio.

A continuación, se desarrolla el sistema de medición de tensiones y corrientes basado en Arduino y el INA 3221. Tras implementarlo en un cargador solar de la marca DFRobot para realizar pruebas se observan los ciclos de carga y descarga de las baterías, así como un ciclo de uso estándar. Cabe destacar que estos cargadores están diseñados para la gestión de sistemas con paneles fotovoltaicos de baja potencia.

Tras haber seleccionado los circuitos integrados y los convertidores DC/DC más adecuados a los requisitos del proyecto, se procede al diseño y fabricación de una PCB para el sistema. Esta placa se somete a pruebas exhaustivas para evaluar su desempeño y se registran los errores encontrados. Se identifican posibles soluciones para corregir dichos errores y se realiza un rediseño de la placa para mejorar su eficiencia y fiabilidad.

Después, se diseñará un sistema para implementar un microcontrolador encargado del cálculo del MPPT (Maximum Power Point Tracking) en el proyecto. Se seleccionarán los componentes óptimos para el diseño y se realizará la programación del microcontrolador.

Finalmente, se procede a realizar una evaluación detallada de los resultados obtenidos en el proyecto, comparando el rendimiento del sistema diseñado con los cargadores solares comerciales disponibles en el mercado. Se verifica que el sistema diseñado cumple con las especificaciones requeridas y presenta una mejora significativa en cuanto a la eficiencia de carga y la capacidad de gestión de paneles solares. Se concluye que el sistema desarrollado tiene un potencial de aplicación en sistemas fotovoltaicos y se proponen posibles mejoras y líneas de investigación futuras.

1.4. Estructura del documento

La estructura del documento consta de varios apartados que se detallan a continuación. En primer lugar, se presenta el estado del arte, que consiste en una revisión bibliográfica exhaustiva de los avances y tecnologías existentes en el área de estudio, lo cual es fundamental para contextualizar el proyecto.

A continuación, se encuentra el apartado de evaluación de los cargadores comerciales, donde se describe la creación de un sistema de medición de potencia para evaluar las características y realizar pruebas de varios sistemas en el mercado. Esto permitirá obtener una comparativa y análisis de los cargadores disponibles en el mercado.

En el apartado de diseño del sistema se detalla el proceso seguido para llevar a cabo el proyecto. Se presenta una descripción detallada del diseño del sistema, los componentes utilizados, los cálculos realizados y la construcción y ensamblado del sistema. Además, se expondrá el rediseño realizado a lo largo del proyecto.

El siguiente apartado es implementación del MPPT, donde se describe el diseño de un sistema de control de MPPT mediante un microcontrolador ATmega328P. Este algoritmo permitirá que el sistema desarrollado consiga optimizar la carga de la batería en función de la radiación luminosa recibida.

En el apartado de resultados se exponen la información obtenida en el proyecto, comparados con los objetivos planteados, y se realiza una evaluación crítica de los mismos y de los problemas encontrados.

Por último, en el capítulo conclusiones y líneas futuras se presenta una reflexión sobre los logros obtenidos, las limitaciones encontradas y posibles mejoras futuras que se podrían implementar para continuar el desarrollo del proyecto.

Para completar el trabajo se incluye una Bibliografía con una lista de las fuentes consultadas para la realización del proyecto, así como los Anexos. Estos anexos contienen cualquier información adicional que complemente o amplíe el contenido principal del documento, como esquemas, diseños, firmware, listas de componentes, etc.

2. Estado del arte

2.1. Introducción

En la actualidad, el mercado ofrece una amplia variedad de sistemas para la gestión de la energía en sistemas fotovoltaicos de baja potencia. Estos sistemas suelen estar diseñados para gestionar la energía que se obtiene de paneles solares de baja potencia y proporcionar una salida de energía en formato DC, generalmente en 5V o 3,3V, para alimentar dispositivos electrónicos de baja potencia, como nodos IoT.

Sin embargo, para proyectos específicos como el que se describe, donde se requiere una intensidad máxima de 2 A, las opciones comerciales disponibles son limitadas. La mayoría de los cargadores solares comerciales que ofrecen salidas de 5V y 3,3V proporcionan como máximo 1,5 A de intensidad máxima. Sin embargo, para este proyecto, se necesita un sistema que pueda proporcionar una corriente de 2 A.

Además, otra limitación de los sistemas comerciales es que suelen incorporar pocas protecciones. Por ejemplo, no es habitual encontrar el control de temperatura de las baterías o la limitación en su descarga. Estas son características importantes que aseguran el correcto funcionamiento del sistema y prolongan la vida útil de la batería. Por lo tanto, en proyectos específicos es necesario diseñar y fabricar una PCB personalizada que se adapte a las necesidades específicas del proyecto.

2.2. Sistemas de captación ambiental

Los sistemas de captación ambiental, también conocidos como “Energy harvesting” [1], son tecnologías que se han desarrollado para aprovechar la energía que se encuentra en el entorno natural, como la energía solar, la eólica, la hidráulica, la térmica y la mecánica. Su objetivo es recolectar energía a partir de estas fuentes ambientales para luego utilizarla en dispositivos electrónicos y sensores. Existen diversas tecnologías de captación ambiental, algunas de las cuales incluyen:

- Paneles solares, que utilizan celdas fotovoltaicas para convertir la energía del sol en electricidad.
- Turbinas eólicas, que aprovechan la energía del viento para generar electricidad.
- Generadores termoeléctricos, que convierten la diferencia de temperatura entre dos materiales en electricidad.
- Generadores piezoeléctricos, que convierten la energía mecánica en electricidad.
- Generadores hidroeléctricos, que aprovechan la energía de las corrientes de agua para generar electricidad.

Estos sistemas se han vuelto cada vez más populares debido a su capacidad para proporcionar energía de manera autónoma y sostenible en lugares remotos o de difícil acceso. Además, también pueden ser utilizados para reducir la dependencia de combustibles fósiles y disminuir la huella de carbono en diferentes aplicaciones.

2.3. Sistemas de almacenamiento de energía

La selección de la fuente de almacenamiento de energía es un aspecto crucial en proyectos de alimentación solar. Dos opciones comunes son los supercondensadores y las baterías. Los supercondensadores son similares a los condensadores electrolíticos, pero disponen de capacidades varios ordenes de magnitud mayores. Además, tienen tiempos de carga y descarga muy reducidos, lo que los hace ideales para aplicaciones donde se necesitan picos de energía rápidos, así como un tiempo de vida superior a las baterías [2]. A diferencia de las baterías, que se deterioran después de cientos o miles de ciclos de carga-descarga, los supercondensadores son capaces de soportar hasta un millón de ciclos de carga y descarga sin mostrar signos de desgaste. [3]

Los supercondensadores presentan ciertas desventajas frente a las baterías, como por ejemplo, una baja densidad de energía en comparación con de las baterías. Además, los supercondensadores pueden tener un alto coste debido a los materiales de carbono utilizados para los electrodos. Otra desventaja es su alta tasa de autodescarga, que puede ser de entre 10 y 40 % por día. [4]

Por otro lado, las baterías son fundamentales en proyectos donde no se tiene acceso a la red eléctrica. Existen diferentes tipos de baterías en el mercado, que varían en función de su capacidad y de los materiales utilizados en su fabricación. Existen varios tipos de baterías que se utilizan para distintas aplicaciones.

Uno de los tipos más importantes de baterías son las baterías de plomo-ácido. Estas se usan en automóviles y sistemas de respaldo de energía. También existen las baterías de iones de litio, que se usan en dispositivos electrónicos portátiles y vehículos eléctricos. En este proyecto, se descartaron las baterías de ácido debido a su necesidad de mantenimiento regular, su impacto negativo en el medio ambiente y su peso y volumen significativos. Por tanto, para este proyecto en particular se decidió emplear baterías de litio debido a su precio razonable, tamaño compacto y versatilidad. Las baterías de litio también tienen una tasa de autodescarga relativamente baja, lo que las hace ideales para aplicaciones de baja potencia y bajo consumo energético.

2.4. Baterías de litio

2.4.1. Principio de funcionamiento

El funcionamiento de las baterías de litio se basa en el movimiento de iones de litio a través de un electrolito que separa dos electrodos. La transferencia de los iones entre el cátodo y el ánodo permite la generación de energía eléctrica. Cuando la batería está en uso, los iones de litio se mueven del ánodo al cátodo, produciendo una corriente eléctrica que se puede utilizar para alimentar un dispositivo. Durante la descarga, los iones de litio se desplazan a través del electrolito desde el ánodo al cátodo, mientras que los electrones fluyen a través del circuito externo, produciendo energía eléctrica.

En el proceso de carga, la dirección del flujo de iones de litio se invierte, y los iones se mueven del cátodo al ánodo. Esto se logra aplicando una corriente eléctrica externa a la batería, que obliga a los iones de litio a volver a su posición original en el ánodo. En este caso, los electrones fluyen en sentido opuesto, desde la fuente de alimentación externa a través del cátodo, a través del electrolito y al ánodo. Este proceso de carga y descarga se puede repetir varias veces en una batería de litio, lo que la hace una opción popular para muchos dispositivos electrónicos portátiles y otros equipos alimentados por baterías. [5]

2.4.2. Tipos de baterías de litio

- Baterías de ion-litio (Li-ion)

Una batería Li-ion se refiere a una tecnología de baterías recargables que utilizan litio como material activo en los electrodos. Las celdas Li-ion se construyen tradicionalmente en cuerpos cilíndricos de metal con carcasas robustas, y las más conocidas en el ámbito comercial son las baterías 18650. **(Figura 1)**



Figura 1 - Batería Li-ion del tipo 18650

Estas baterías constan de tres piezas principales: un electrodo positivo, un electrodo negativo y un electrolito líquido. Tienen un controlador que regula la potencia y el flujo de descarga, evitando sobrecalentamientos y protegiendo la batería de sobrecargas o descargas excesivas. Aunque su precio es menor que el de otras baterías de litio, su rendimiento puede disminuir con el tiempo y con la cantidad de ciclos de carga y descarga a los que se sometan. Por estas características, las baterías Li-ion son ideales para aplicaciones que requieren altas corrientes de descarga, como herramientas eléctricas, vehículos eléctricos y sistemas de almacenamiento de energía. [6]

- Baterías de polímero de litio (Li-Po)

La batería Li-Po, también conocida como batería de polímero de litio, es una variante de la batería Li-ion que utiliza un electrolito de polímero en lugar de un electrolito líquido. A diferencia de las baterías Li-ion, que utilizan celdas cilíndricas o prismáticas, las baterías Li-Po tienen una mayor flexibilidad en cuanto a su forma, pudiendo tener celdas de distintas geometrías y tamaños. Esto las hace ideales para aplicaciones en las que se requiere una batería delgada y flexible, como por ejemplo en dispositivos móviles y drones.

El electrolito de las baterías Li-Po puede ser de tres tipos: un sólido seco, un químico poroso o un electrolito similar al gel, siendo este último el más utilizado. El uso de electrolitos poliméricos permite fabricar baterías más ligeras, más delgadas y de mayor capacidad, en comparación con las baterías Li-ion convencionales. Aunque tienen un precio más elevado, también son capaces de proporcionar una densidad de energía más alta y una tasa de descarga más alta que las baterías Li-ion. Sin embargo, debido a su estructura flexible, pueden ser más vulnerables a las sobrecargas y daños mecánicos. **(Figura 2).**



Figura 2 - Batería Li-Po de formato plano

Aunque estas baterías son más costosas que las baterías Li-ion, son ideales para proyectos que requieren alta capacidad y una forma plana y delgada, como dispositivos portátiles. Sin embargo, las baterías Li-Po tienen una vida útil menor y almacenan menos potencia que las baterías Li-ion. En general, son la opción preferida cuando se necesita una fuente de energía pequeña y ligera. [6]

- **Baterías de litio de alto voltaje (Lithium-HV)**

Las baterías de litio de alto voltaje son una evolución de las baterías de polímero de litio convencionales. La incorporación de un aditivo especial de silicio y grafeno en el terminal positivo de estas baterías las hace más resistentes a los daños que pueden ocurrir en condiciones de voltajes más altos.

Las baterías de litio tradicionales generalmente tienen un límite de voltaje máximo de carga de 4,2 V. Cuando se cargan por encima de este voltaje, pueden sufrir una pérdida significativa de capacidad y una reducción en su vida útil. Sin embargo, con el aditivo de silicio y grafeno en el terminal positivo, las baterías Lithium-HV pueden cargar a un voltaje máximo de 4,35 V sin sufrir estos efectos negativos. La capacidad de carga adicional proporcionada por las baterías Lithium-HV las hace ideales para aplicaciones que requieren una densidad de energía más alta, como los vehículos eléctricos y los sistemas de almacenamiento de energía en el hogar. También pueden ser útiles en dispositivos portátiles y electrónicos de alta gama que requieren una mayor potencia y duración de la batería. Aunque tienen un precio más elevado que las baterías de litio convencionales, su rendimiento y vida útil prolongada pueden compensar su costo adicional en algunas aplicaciones críticas.

- **Baterías de litio-hierro-fosfato (LiFePO4)**

Las baterías de litio-hierro-fosfato (LiFePO4) son un tipo de batería de iones de litio que se caracterizan por su capacidad de soportar una mayor cantidad de ciclos de carga y descarga en comparación con otros tipos de baterías de litio. Además, su rango de voltaje de funcionamiento óptimo se encuentra entre 3,0 y 3,65 V, en lugar del rango más típico de 3,0 a 4,2 V de otras baterías de litio. Esto las hace más estables y menos propensas a sufrir daños por sobrecarga o sobredescarga. También tienen tasas más bajas de autodescarga, lo que significa que pueden almacenar la carga durante períodos más largos sin perder demasiada energía. Aunque estas baterías son más costosas que otras opciones de iones de litio, su vida útil prolongada y su capacidad para soportar ciclos de carga/descarga repetidos las hacen una opción popular en aplicaciones que requieren una fuente de energía duradera y confiable.

2.4.3. Carga y descarga de las baterías de litio

Al utilizar baterías en un proyecto es importante considerar su comportamiento específico. Descargar las celdas por debajo del límite de bajo voltaje (V_{low}) puede causar una disminución en la capacidad de las celdas o incluso provocar un cortocircuito. Por otro lado, la sobrecarga de una celda puede provocar un cortocircuito o una fuga térmica total, lo que puede generar humo y llamas. Para cargar varias celdas a la vez, es necesario que todas tengan el mismo voltaje para evitar dañar alguna de ellas. Además, es importante tener en cuenta que las celdas de litio no deben cargarse demasiado rápido, ya que esto puede aumentar su temperatura de manera excesiva y reducir su vida útil. La temperatura ambiente también afecta el rendimiento de la batería, no debiendo superar los 45°C ni ser inferior a los 5°C.

Debido a todas estas limitaciones, para cargar estas baterías de manera segura es recomendable utilizar un cargador inteligente con los límites de voltaje adecuados, especialmente si se utilizan celdas LiFePO₄ o Lithium-HV. Además, el cargador debe tener un método para detener la descarga de las baterías cuando el voltaje es bajo o la temperatura se encuentra fuera del rango de trabajo. Para proyectos con una sola celda o varias en paralelo, un módulo de carga sencillo es suficiente. Sin embargo, para aplicaciones que utilicen varias celdas en serie, se recomienda utilizar un BMS (Sistema de Gestión de Baterías), que se encargue de la gestión de estas para garantizar la seguridad y la eficiencia del sistema. (**Figura 3**)

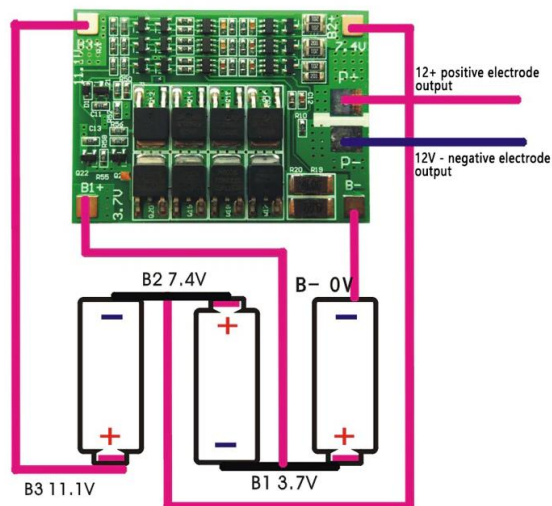
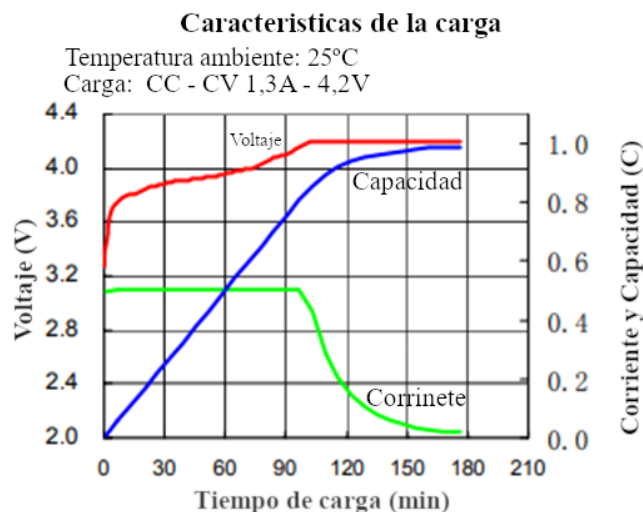


Figura 3 - Representación del montaje de un BMS 3S

La principal función del BMS es garantizar que las celdas de la batería estén equilibradas y que la corriente de descarga no exceda los límites de seguridad, lo que puede ser crítico para evitar problemas como cortocircuitos, sobrecalentamiento y explosiones. En general, el uso de un BMS es crucial para garantizar un funcionamiento seguro y confiable de las baterías recargables, especialmente en aplicaciones que requieren alta capacidad y rendimiento. Es importante seleccionar un BMS adecuado para el tipo de batería que se está utilizando y asegurarse de que esté configurado correctamente para la aplicación específica. [7]

Cuando se carga una batería, se sigue un ciclo de carga que implica suministrar una corriente a la celda para que se cargue. Sin embargo, el proceso de carga no es tan sencillo como parece, ya que se debe controlar la corriente y el voltaje que se le aplica a la batería. En general, existen diferentes etapas de carga en las que varía la corriente y el voltaje suministrado a la batería. En la etapa inicial de carga, la corriente suministrada es alta y constante, lo que permite que la batería se cargue rápidamente. Sin embargo, a medida que la batería se acerca a su capacidad máxima, la corriente suministrada se reduce y el voltaje se mantiene constante.

El proceso de carga también debe tener en cuenta la temperatura de la batería, ya que, si se carga a una temperatura demasiado alta, se puede acortar la vida útil de la batería o incluso dañarla permanentemente. Además, es importante tener en cuenta que no todas las baterías se cargan de la misma manera y que cada tipo de batería requiere un proceso de carga específico. Por lo tanto, es importante conocer las especificaciones de la batería que se va a cargar y seguir las instrucciones adecuadas para evitar daños y maximizar la vida útil de la batería. [8] **(Gráfica 1)**



Gráfica 1 - Ciclo de carga de una batería de litio [8]

2.5. Convertidores DC/DC

2.5.1. Introducción

El uso de convertidores DC/DC es común en diferentes aplicaciones, incluyendo la carga de baterías. Estos dispositivos permiten variar la tensión o intensidad en continua de entrada, convirtiéndolas en valores de referencia de salida. La potencia se mantiene constante, aunque hay pérdidas entre la entrada y la salida debido a la eficiencia del convertidor.

En el caso de la carga de baterías con energía solar, los convertidores DC/DC se utilizan tanto en la entrada como en la salida del cargador solar. En la entrada, permiten que el cargador funcione con voltajes de panel solares inferiores, superiores o iguales al voltaje de la batería. En la salida, los convertidores permiten conectar cargas a diferentes tensiones con el mismo cargador.

Existen dos tipos de convertidores: los lineales y los conmutados. Los convertidores lineales son una opción sencilla para obtener una buena regulación de la tensión de salida. Sin embargo, su eficiencia es baja en comparación con los convertidores conmutados, lo que significa que disipan una gran cantidad de energía en forma de calor. Esto los hace adecuados para aplicaciones de baja corriente y alta precisión, como amplificadores de audio y circuitos de control de instrumentos de medición.

Por otro lado, los convertidores conmutados son más eficientes y se utilizan para aplicaciones de alta potencia. Funcionan mediante el encendido y apagado rápido de un interruptor que controla la corriente que fluye a través de un inductor, lo que permite convertir la tensión de entrada en una tensión de salida diferente. Debido a su alta eficiencia, los convertidores conmutados se utilizan comúnmente en dispositivos de consumo de energía, como cargadores de baterías, suministros de energía para computadoras, sistemas de iluminación LED y control de motores eléctricos. [9]

Es importante tener en cuenta la eficiencia de los convertidores DC/DC, por ello se opta por implementar convertidores conmutados. Su eficiencia suele estar en torno al 90%, para maximizar la eficiencia del sistema de carga de baterías. Algunos cargadores solares incluyen circuitos integrados que ya tienen incorporados convertidores DC/DC, lo que simplifica su diseño y reduce costos de implementación. [10] [11]

2.5.2. Tipos de convertidores conmutados

Los convertidores DC/DC conmutados pueden clasificarse en diferentes tipos según su configuración. Los convertidores Buck o reductores, convierten una tensión de entrada más alta en una tensión de salida más baja, aumentando la corriente en la salida. Los convertidores Boost o elevadores, convierten una tensión de entrada más baja en una tensión de salida más alta, reduciendo la corriente en la salida. Por último, la configuración Buck-Boost permite obtener una tensión de salida fija, independientemente de si la tensión de entrada es mayor, menor o igual a la tensión de salida deseada. Esta configuración es muy útil en aplicaciones de carga de baterías solares donde la tensión de entrada puede variar debido a la variabilidad de la energía solar recibida.

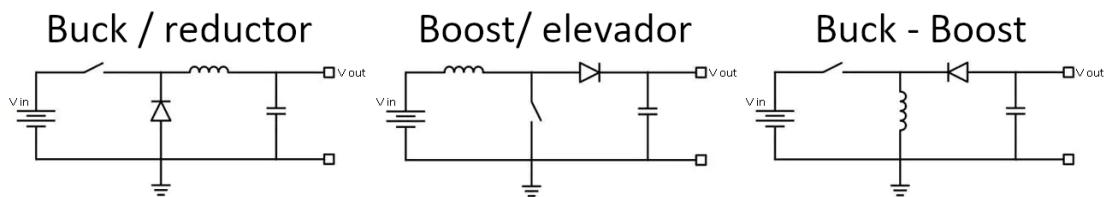


Figura 4 - Esquemas de los convertidores conmutados [12]

2.5.3. Requisitos

Para el sistema a desarrollar se requiere un regulador de tensión con una salida de 3,3 V, capaz de suministrar una corriente de salida de hasta 2 A. Además, se busca maximizar la eficiencia del regulador para reducir el consumo de energía.

2.6. Controladores de carga

2.6.1. Introducción

El controlador de carga es un componente importante en un sistema de energía solar, ya que se encarga de administrar la energía proveniente del panel solar y la batería para alimentar una carga y mantener la batería cargada en todo momento. Estos circuitos integrados pueden tener incorporados los convertidores DC/DC de forma interna, lo que los hace más versátiles y fáciles de usar.

El controlador de carga se conecta entre el panel solar y la batería, y su función principal es regular la carga de la batería. Al recibir la energía del panel solar, el controlador de carga se encarga de controlar la cantidad de energía que se envía a la batería, para que ésta no se sobrecargue ni se descargue en exceso. Además, muchos controladores de carga también incluyen funciones de protección para la batería, como protección contra sobrecarga, sobredescarga y cortocircuitos. También pueden incluir funciones de monitoreo y gestión de la carga, para que el usuario pueda ver en tiempo real el estado de la batería y la carga.

En cuanto a los convertidores DC/DC integrados en los controladores de carga, éstos son responsables de regular la tensión y corriente de entrada del panel solar para que sean compatibles con la tensión de la batería y la carga. Además, en la salida fijan la tensión a un determinado valor diferente al de la batería, lo que permite cargar dispositivos que requieren una tensión específica. En algunos modelos, la tensión de salida puede ser configurable, lo que proporciona una mayor flexibilidad en la elección de la carga.

2.6.2. Tipos de controladores de carga

- Cargador solar

Es un dispositivo diseñado para ser altamente eficiente y consumir la menor cantidad de energía posible durante su funcionamiento. Además, está optimizado para operar con paneles solares, cuya tensión de salida puede variar en función de las condiciones climáticas y la cantidad de luz solar recibida.

Para poder trabajar con paneles solares que generan una tensión variable, el cargador solar tiene un rango de entrada de tensión que le permite adaptarse a las fluctuaciones de la fuente de energía. Esto hace que el cargador solar pueda operar en un amplio rango de situaciones y condiciones, lo que lo convierte en una solución versátil y eficiente. Además, los cargadores solares suelen tener un rango de salidas para poder conectar diferentes tipos de cargas. En muchos casos, la conexión a la batería y la conexión a la carga están separadas, lo que permite una mayor flexibilidad y seguridad en el proceso de carga y descarga.

- Cargador de móvil

En general, los cargadores de móvil suelen ser dispositivos relativamente sencillos, con una funcionalidad limitada y una arquitectura básica. En el mercado existen diferentes tipos de cargadores, con diferentes características y especificaciones, aunque en su mayoría suelen seguir un diseño similar.

En cuanto a la salida, esta suele estar fija a 5V, ya que es la tensión utilizada por la mayoría de los móviles. Esta tensión se mantiene constante mediante el uso de un regulador de tensión, que garantiza que la carga reciba siempre la tensión necesaria para su correcto funcionamiento. En algunos casos, el cargador puede incluir una o varias salidas USB, lo que permite conectar varios dispositivos a la vez. Además, es común que la conexión a la batería esté separada de la conexión a la carga, para garantizar que la carga no afecte el rendimiento de la batería.

- Cargador de baterías

En el caso de los cargadores de baterías, la tensión de entrada se mantiene fija a un valor determinado, que suele coincidir con el del rectificador que se utiliza. La tensión de salida también suele ser fija, con un valor de 3,7V, que es el que necesita la batería para cargar correctamente. A diferencia de los cargadores de móvil, estos dispositivos no suelen tener una salida específica para la carga, por lo que se suelen conectar en paralelo a la batería para recargarla. **(Figura 5)**

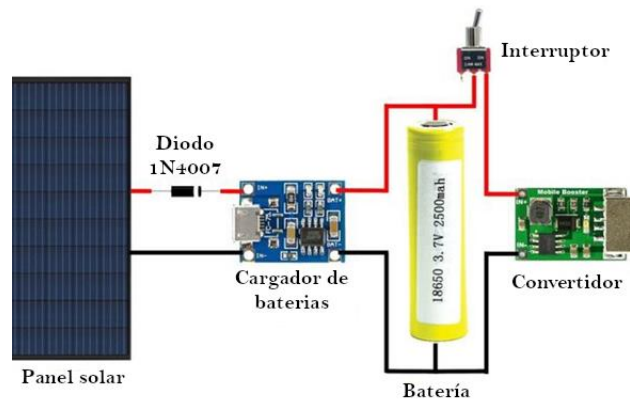
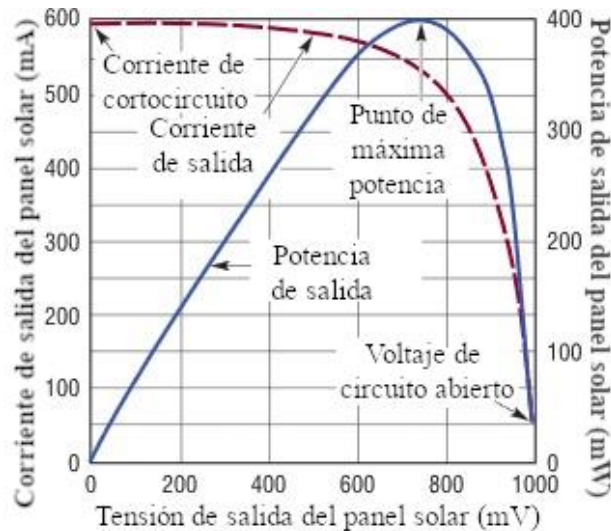


Figura 5 – Montaje de un cargador de baterías

2.6.3. MPPT

El MPPT (Maximum Power Point Tracking) es una técnica utilizada en sistemas de energía solar para maximizar la cantidad de energía obtenida de un panel solar. Esto se logra rastreando el punto de máxima potencia (MPP) del panel solar y ajustando la carga en consecuencia para asegurar que la mayor cantidad de energía posible se esté produciendo.

Un sistema de energía solar completamente autónomo que utilice baterías recargables necesita de un controlador de carga con MPPT para optimizar la carga de la batería utilizando la energía solar disponible. El MPPT es capaz de ajustar continuamente la carga en función de las condiciones de iluminación, garantizando así que la batería esté cargada de manera óptima. Con un sistema de energía solar bien diseñado y un controlador de carga con MPPT, es posible lograr una independencia real de la red eléctrica, permitiendo que la energía necesaria se obtenga de una fuente renovable y sostenible. **(Gráfica 2)**



Gráfica 2 - Gráfica MPPT de un panel fotovoltaico [13]

En la **Gráfica 2** se tomaron los datos para el MPPT a una iluminación constante por lo que la gráfica se mantenía siempre igual, sin embargo, en condiciones reales, la luminosidad del sol puede variar y por lo que se tendrá que calcular la gráfica en tiempo real. Por lo tanto, el MPPT debe ser capaz de adaptarse a estas variaciones y mantener el punto de máxima potencia en todo momento para maximizar la producción de energía. Si la luminosidad disminuye, el MPPT debe disminuir su voltaje de seguimiento hasta mantenerse en el punto de máxima potencia óptimo. A este proceso se le llama Control del Pico de Máxima Potencia o MPPC. De esta manera, se puede aprovechar al máximo la energía disponible y lograr una mayor eficiencia en el sistema. [13]

En las aplicaciones solares de baja potencia, alcanzar el MPPT puede resultar demasiado complejo, costoso y energéticamente ineficiente al utilizar algoritmos y circuitos complejos. En cambio, una opción más viable es variar la carga del panel de forma periódica mientras se mide el voltaje y la corriente para forzar el punto óptimo de funcionamiento. Cuando se alcanza este punto, el voltaje de salida del panel solar se mantiene constante, independientemente del nivel de iluminación, y se conoce como voltaje de potencia pico (VMP).

En consecuencia, algunos cargadores solares pueden mantener la máxima transferencia de energía para un panel solar específico aprovechando esta característica, sin necesidad de utilizar circuitos y algoritmos complejos de MPPT. Por ejemplo, el chip LT3652 logra esto simplemente programando el nivel de voltaje de entrada mínimo al VMP del panel. El VMP deseado se programa mediante un divisor de resistencia. Si durante la carga, la energía necesaria por el LT3652 supera la energía disponible del panel solar, el bucle de regulación de entrada reduce la corriente de carga. Es importante destacar que esto no es un MPPT real, ya que no busca automáticamente el punto de máxima transferencia de energía, sino que se le indica el punto de trabajo deseado con el divisor de tensión. [14]

2.6.4. Requisitos

Para el controlador de carga en el sistema a desarrollar se utilizará un circuito integrado de alta eficiencia y bajo consumo en reposo. Es importante que el controlador de carga tenga una entrada de tensión de al menos 9 V y una salida de corriente de al menos 2 A. También es importante que la conexión a la batería esté separada de la conexión a la carga y que el controlador tenga la mayor cantidad de protecciones posible. Para optimizar la eficiencia del sistema, es deseable que el controlador de carga tenga un MPPT real incorporado como característica opcional.

2.7. Cargadores solares comerciales

A continuación, se procederá a examinar cuatro placas de circuito impreso de uso comercial, dos fabricadas por Adafruit Industries [15] y dos por DFRobot Electronics [16]. Estas placas tienen una funcionalidad similar a la que se desea implementar en este proyecto. Además, se han llevado a cabo pruebas en las placas de DFRobot Electronics para evaluar su desempeño en diversas situaciones.

2.7.1. Adafruit 390

La placa Adafruit 390 [17] está diseñada para aceptar una entrada de tensión de 5 a 6 V y proporcionar una salida de 3,7 o 4,2 V. Está optimizada para paneles solares de la marca Adafruit y no incorpora un MPPT real, lo que significa que, si se utiliza con un panel de mayor potencia, se puede dañar la placa. Esta placa está basada en el circuito integrado BQ24074 [18] de Texas Instruments.



Figura 6 - Montaje del cargador Adafruit 390

Para alimentar la placa, se puede usar un cargador con conector de barril, un panel solar o un miniUSB. Dispone de varios indicadores, incluyendo un LED que cambia de color para indicar si la batería está cargada, en proceso de carga o descargando, y otro que indica cuando la batería tiene una tensión baja.

La corriente máxima de carga se puede seleccionar mediante la conexión de diferentes pads, que varían de 50 mA a 1 A. Sin embargo, es importante tener cuidado con la corriente que exige la carga ya que, si supera 1 A, puede quemar el controlador de carga. Esta placa también dispone de un monitoreo de la temperatura de la batería soldando un termistor NTC de 10 k Ω , que no viene incluido en el kit de la placa. Esto es muy útil para proyectos al aire libre donde las celdas puedan alcanzar temperaturas extremas de 0 °C o 50 °C. [19]

2.7.2. Adafruit 4755

La placa Adafruit 4755 [20] tiene una capacidad de carga de 0,5 a 1,5 A y puede cargar baterías Li-ion y Li-Po de 3,7 y 4,2 V. Está diseñada para ser utilizada con los paneles fotovoltaicos de Adafruit y, por lo tanto, no incluye un MPPT real. Se basa en el circuito integrado BQ24074 [18] de Texas Instruments.



Figura 7 - Montaje del cargador Adafruit 4755

Para cargar la batería, se puede utilizar un cargador de barril de 5 a 10 V, un puerto USB tipo C o un panel solar de 6 a 10 V. La placa tiene dos LEDs que indican cuando está encendida y cuando se está cargando la batería. También permite compartir la carga generada por el panel solar entre la batería y la carga.

Para monitorear la temperatura de la batería, se puede soldar un termistor NTC de 10 k Ω en la placa, aunque no viene incluido en el kit de la placa. Esta función es especialmente útil para proyectos al aire libre donde las celdas solares pueden alcanzar temperaturas extremas, como 0 °C o 50 °C. [21]

2.7.3. DFRobot Solar Power Manager 5 V

El módulo de gestión de energía solar DFRobot Solar Power Manager 5 V [22] es una solución eficiente para paneles solares de baja potencia. Cuenta con un MPPT real, que maximiza la eficiencia del panel solar y está basado en el circuito integrado CN3065 [23].

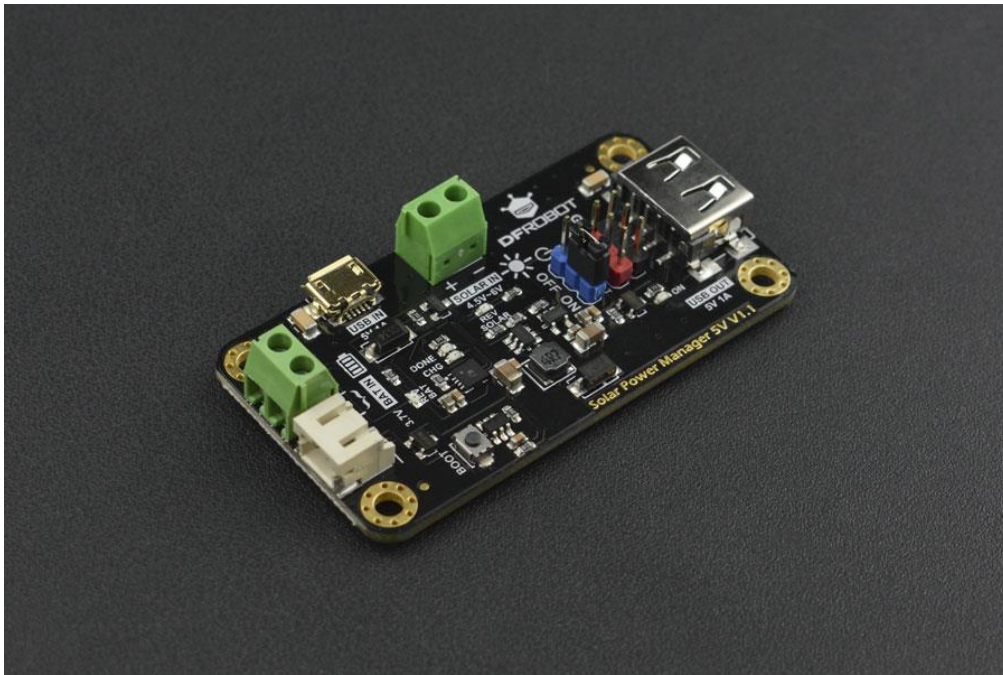


Figura 8 - Cargador DFRobot 5V

Este módulo puede cargar una batería de litio de 3,7 V con una corriente de hasta 900 mA, utilizando un cargador USB o un panel solar. Dispone de un convertidor DC/DC controlable de alta eficiencia, con una salida de 5 V a 1 A a través de un puerto USB.

Además, el módulo incorpora varias funciones de protección para la batería, el panel solar y la salida, lo que mejora la estabilidad y seguridad de los proyectos solares. El DFRobot Solar Power Manager 5 V cuenta con dos versiones, la V1.0 que se recomienda usar con una batería Li-Po de 3,7 V con circuitos de protección para mejorar la seguridad de la batería, y la versión V1.1 más reciente que agrega dos protecciones adicionales contra sobre corriente y sobre descarga de la batería. Esta última versión permite utilizar una batería Li-Po de 3,7 V con o sin circuitos de protección. [24]

2.7.4. DFRobot Solar Power Manager 9 – 12 – 18 V

El DFRobot Solar Power Manager 9 – 12 – 18 V [25] es un módulo de gestión de energía solar de pequeña potencia y alta eficiencia, que utiliza un MPPT real para maximizar la eficiencia del panel solar. Este módulo está basado en el circuito integrado LTC3652 [26] de Analog Devices.

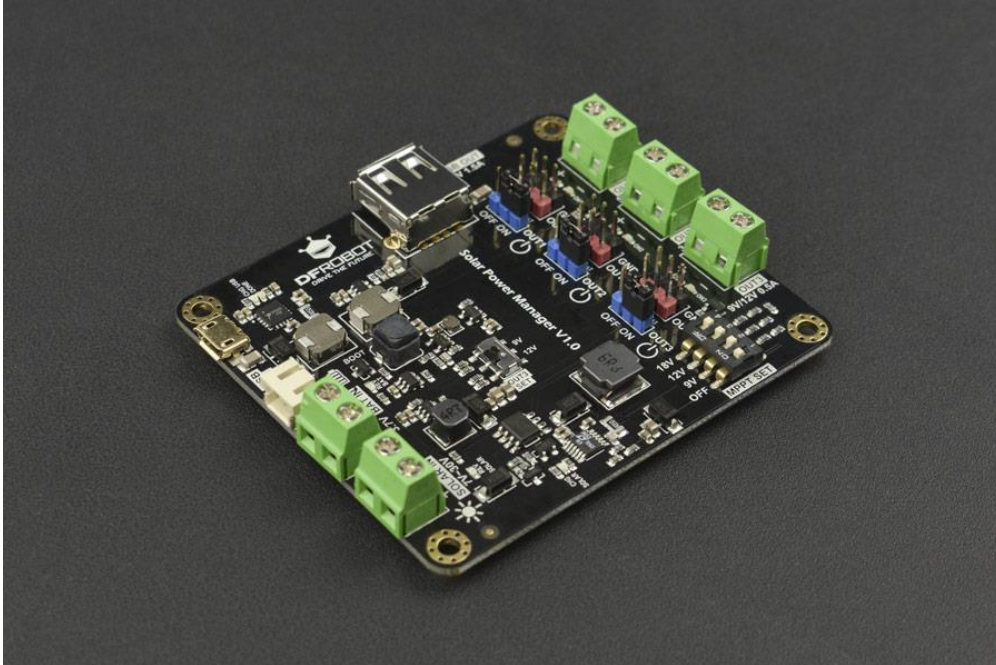


Figura 9 – Cargador DFRobot 9-12-18V

Con una entrada de 7 a 30 V proveniente de un panel solar o de un cargador USB, este módulo puede proporcionar una corriente de carga de hasta 2 A para una batería de litio de 3,7 V. Además, cuenta con tres convertidores DC-DC de alta eficiencia, controlables individualmente con un interruptor ON/OFF. Estos convertidores incluyen una salida de 5 V a 1,5 A, una salida de 3,3 V a 1 A y una salida de 9V/12V a 0,5 A.

El DFRobot Solar Power Manager 9-12-18 V también está equipado con varias funciones de protección, incluyendo protección de conexión inversa de la batería y del panel solar, protección contra sobrecalentamiento de salida, y protección contra sobre corrientes y cortocircuitos. Estas características aumentan la estabilidad y seguridad del sistema en general. [27]

3. Análisis de los cargadores comerciales

3.1. Introducción

En este capítulo se presentan las diferentes pruebas realizadas en los cargadores solares de DFRobot para evaluar su rendimiento en diferentes situaciones. Estas pruebas incluyen mediciones de carga, descarga y carga-descarga para obtener datos precisos sobre la eficiencia del cargador solar. Para realizar estas mediciones se desarrolló un sistema de monitorización que utiliza un INA3221, un dispositivo de medición de corriente y voltaje, junto con un Arduino UNO para recopilar y gestionar los datos de las mediciones. La información recopilada se almacenó en un módulo microSD y así poder ser analizada posteriormente. Estas pruebas aseguran que los cargadores solares de DFRobot cumplen con los estándares de calidad y eficiencia, y proporcionan información valiosa para mejorar y optimizar el diseño de los cargadores solares.

3.2. Sistema de medida

A continuación, se pasará a describir el sistema de medida desarrollado para verificar la funcionalidad de los cargadores solares. Este sistema ha de medir el voltaje y la corriente a la salida de la placa solar, de la batería y a la entrada de la carga, siendo capaz de almacenar dicha información para su procesamiento posterior. **(Figura 10)**

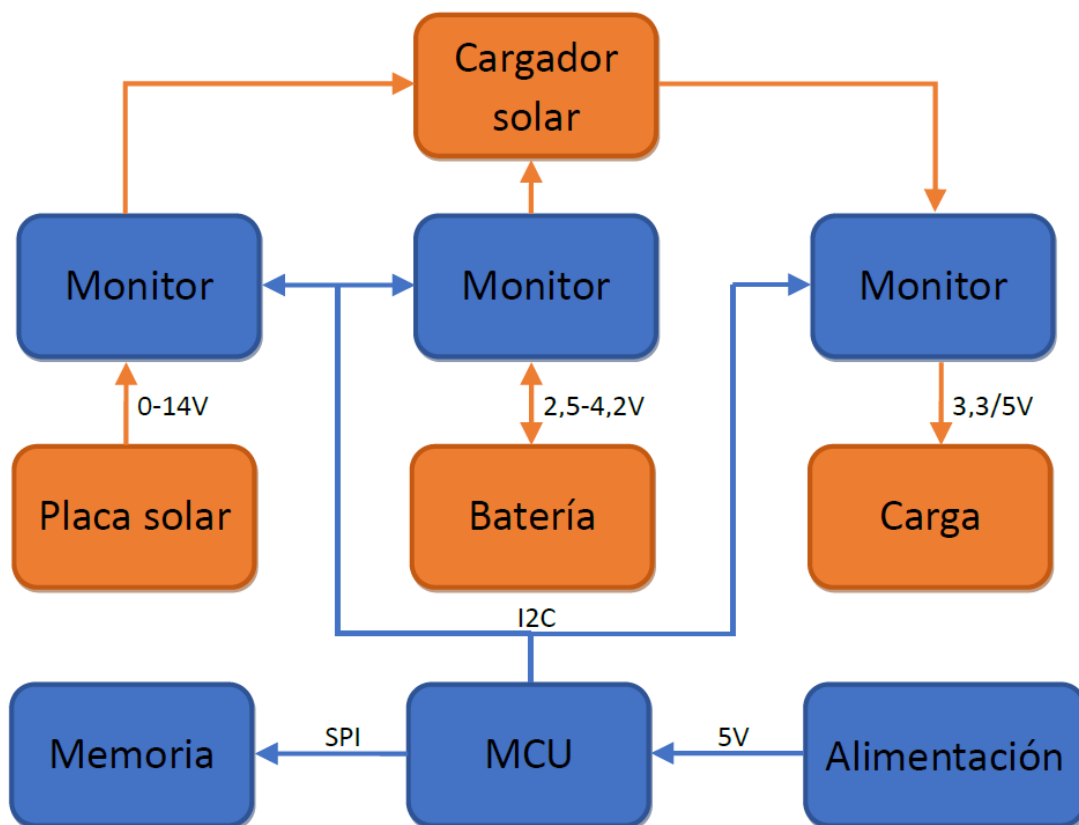


Figura 10 - Diagrama de montaje del sistema de medida

3.2.1. Componentes

- INA3221

El INA3221 [28] es un circuito integrado que se utiliza para medir la corriente y la tensión en un sistema eléctrico. Cuenta con tres canales de medición, cada uno de ellos equipado con una resistencia shunt de valor conocido. Estas resistencias shunt se colocan en serie con el cable que se quiere medir y permiten medir la corriente que circula por él mediante la medición de la tensión que cae en la misma. Además, el INA3221 también puede medir la tensión a la entrada de cada una de las resistencias.

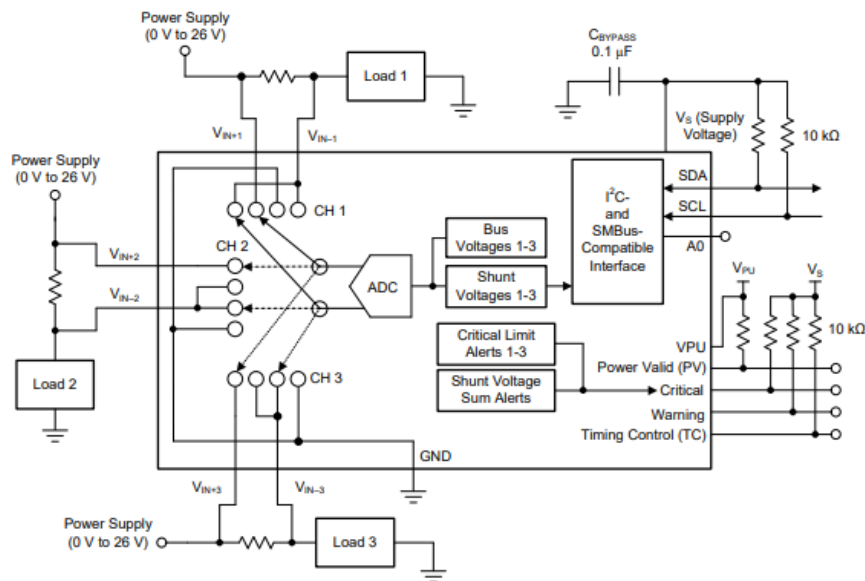


Figura 11 - Esquema del INA3221 [28]

El INA3221 se comunica con el microcontrolador, en este caso Arduino UNO, a través del bus I2C, lo que lo hace muy fácil de usar en proyectos electrónicos. La comunicación a través del bus I2C permite al INA3221 enviar datos de medición al Arduino UNO de forma rápida y eficiente.

Para la programación de este circuito con un Arduino UNO, se ha utilizado la librería “SDL_Arduino_INA3221.h”, que permite una comunicación sencilla y eficiente con el módulo INA3221. Con esta librería, es posible leer los valores de tensión y corriente de los tres canales del INA3221 de forma fácil y rápida, lo que simplifica el proceso de control y monitorización del consumo de energía en el circuito. [29]

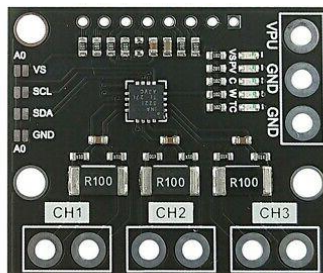


Figura 12 - INA3221

- **Arduino UNO**

Arduino [30] es una plataforma de desarrollo ampliamente utilizada en proyectos de electrónica y programación. Se trata de una placa electrónica de hardware libre que incluye un microcontrolador reprogramable (Atmega328p [31]) y una serie de pines hembra para establecer conexiones con sensores y actuadores, tanto digitales como analógicos.

Arduino cuenta con una amplia variedad de modelos disponibles, cada uno con características específicas. En este proyecto, se ha utilizado la versión Arduino UNO [32] debido a su versatilidad, facilidad de programación y tamaño adecuado para el proyecto.

En este caso, se utiliza el bus I2C para la comunicación entre Arduino y el INA3221. El bus I2C es un protocolo de comunicación de dos hilos que se basa en la arquitectura maestro-esclavo. En este protocolo, Arduino actúa como el maestro y el INA3221 como el esclavo. El maestro inicia y coordina la comunicación, mientras que el esclavo espera a que el maestro se comunique con él. En el proyecto, se utilizan los pines analógicos A4 y A5 para la conexión del bus I2C. El INA3221 utiliza tres resistencias Shunt de valor conocido para medir la tensión y la corriente en cada canal, y proporciona esta información al Arduino para su procesamiento y almacenamiento en el módulo microSD. [33]

- **Módulo microSD**

El módulo microSD es un dispositivo de almacenamiento de datos muy utilizado en proyectos que requieren el almacenamiento de grandes cantidades de información de forma permanente. Consiste en una pequeña tarjeta de memoria flash que se conecta a través de un adaptador a los pines digitales de la placa Arduino.

La mayoría de los módulos microSD vienen equipados con el acondicionamiento necesario para ser utilizados con Arduino. Esto significa que el módulo suele tener un regulador de voltaje incorporado que permite alimentarlo con una fuente de alimentación de 5V, y una interfaz de comunicación que permite la transmisión de datos entre la placa Arduino y la tarjeta de memoria.

Una vez que el módulo microSD está conectado correctamente, es posible utilizar librerías específicas de Arduino para leer y escribir datos en la tarjeta de memoria. La información se almacena en formato “.txt”, lo que permite una fácil lectura y escritura de datos por parte del usuario. El uso de un módulo microSD puede ser muy útil en proyectos que requieren la recolección y almacenamiento de datos de forma continua, como en sistemas de monitoreo.

Para la implementación de un módulo MicroSD en un proyecto Arduino, se puede utilizar la librería "SD.h". Esta librería permite el acceso a una tarjeta MicroSD de forma fácil y sencilla mediante comandos simples en el código. La librería "SD.h" incluye funciones para la inicialización de la tarjeta MicroSD, la creación, escritura y lectura de archivos. Con esta librería, se puede hacer un registro de datos o almacenar información importante para el proyecto en la tarjeta MicroSD. [34]

Para hacer la comunicación entre el Arduino y el módulo microSD se utiliza la librería "SPI.h". Esta es una librería incluida en el entorno de programación de Arduino que permite la comunicación mediante el protocolo SPI (Serial Peripheral Interface) con dispositivos externos como sensores, pantallas y otros dispositivos. [35]



Figura 13 - Modulo microSD

- Resistencia de valor conocido

Para realizar las pruebas de descarga se ha decidido emplear una resistencia de 47 Ω en el sistema. Esta resistencia se utiliza para simular la carga y se le aplicará una tensión de 5 V, lo que resulta en una potencia de 531,91 mW. Para evitar problemas de sobrecalentamiento y daños en la resistencia, se ha seleccionado una resistencia de 1W de potencia nominal, que es capaz de soportar la potencia que circulará por ella.

En cuanto a la prueba de carga-descarga, se utilizan dos resistencias: una de 560 Ω y otra de 5,6 k Ω . Por otro lado, para la prueba de carga no se implementa ninguna resistencia ya que se desea medir la corriente y la tensión sin carga conectada.

3.2.2. Montaje

Para realizar las pruebas se realizó el montaje de la **Figura 14**. Es importante prestar atención a la conexión a tierra tanto del cargador solar como del INA 3221. Si la conexión a tierra no se realiza adecuadamente, las mediciones que se obtengan pueden ser incorrectas. Por lo tanto, es esencial que se conecten correctamente para garantizar mediciones precisas y confiables.

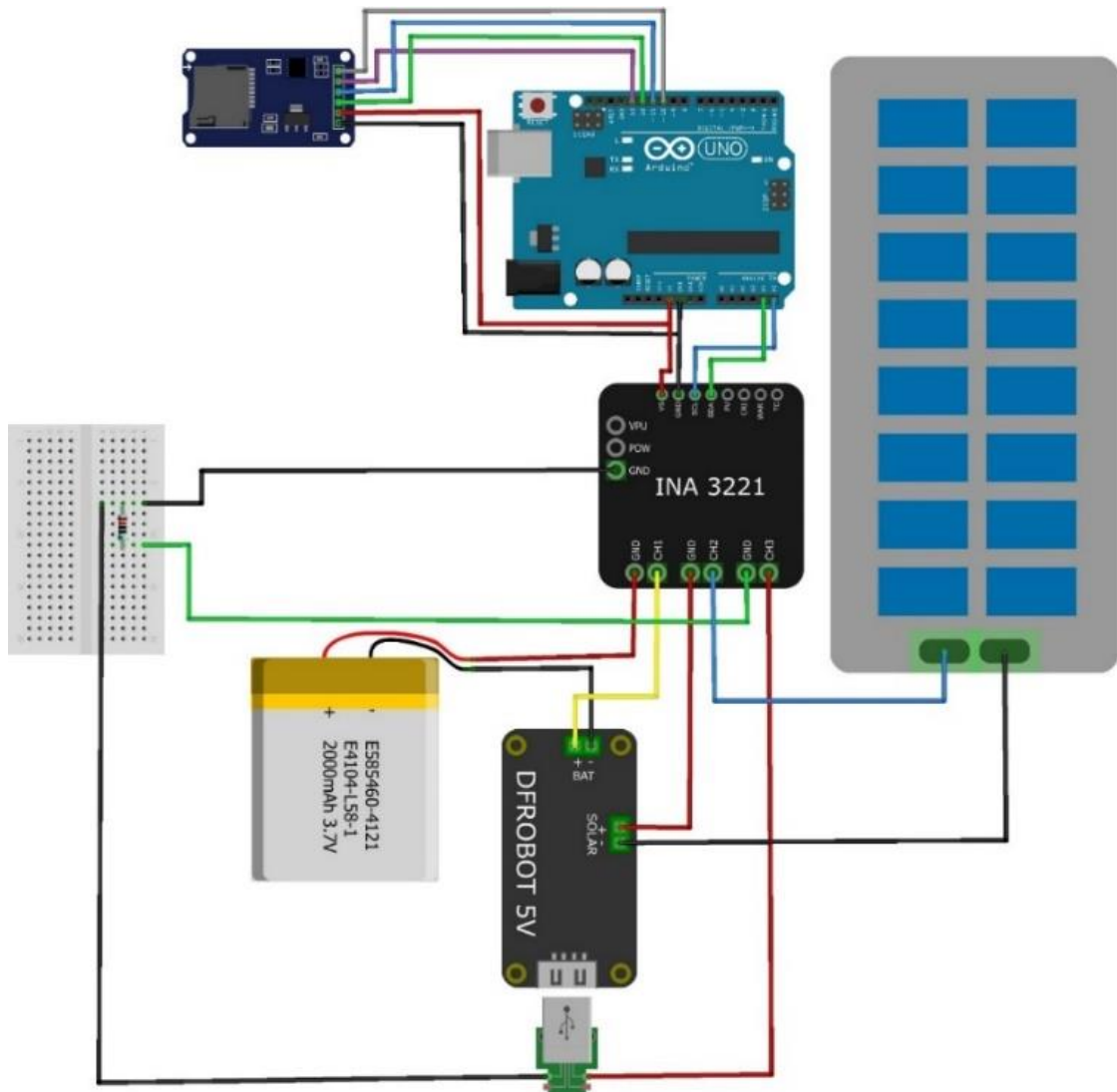


Figura 14 – Representación del montaje empleado en las pruebas

3.2.3. Firmware

El firmware implementado consta de una función principal y cuatro subrutinas. La primera subrutina se encarga de actualizar la fecha en la que se realiza la medida. Las otras tres subrutinas son responsables de tomar las medidas de cada canal del INA 3221. Estas subrutinas utilizan el bus I2C para comunicarse con el INA3221 y tomar la medida de la tensión y corriente de cada canal. Además, la función principal llama a estas subrutinas y guarda los valores medidos en una tarjeta microSD. El código desarrollado para este programa puede encontrarse en el **Anexo A – Código de Arduino para la monitorización**.

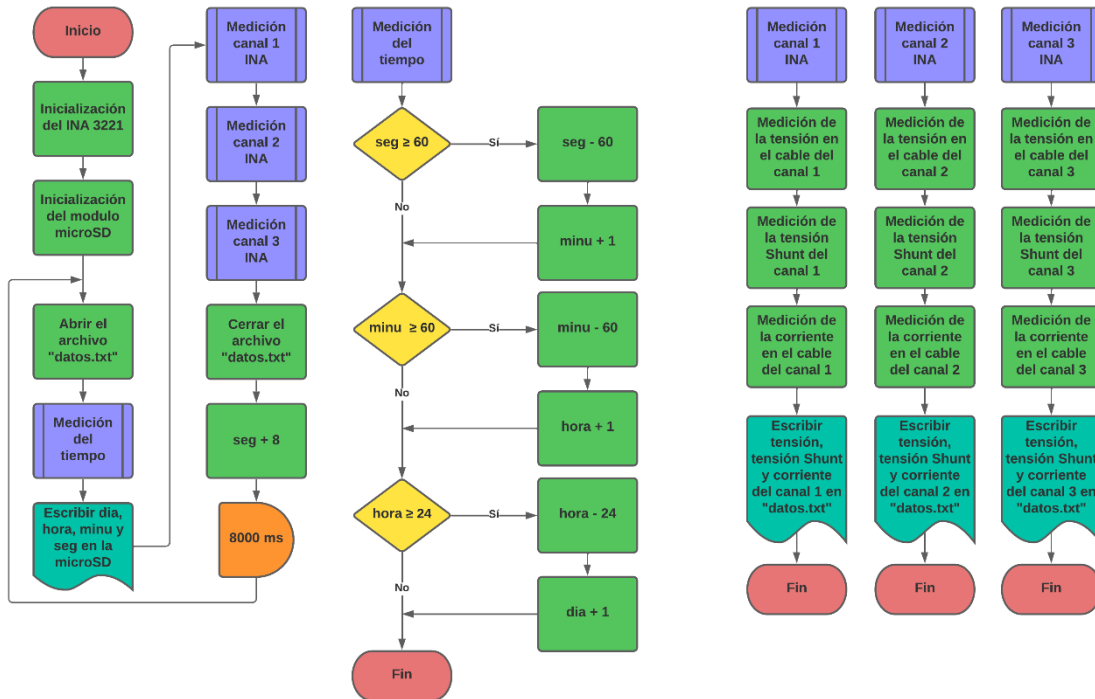


Diagrama de flujo 1 – Código para hacer las pruebas a la placa de DFRobot

El código de Arduino comienza incluyendo cuatro librerías: "Wire.h" para la comunicación por I2C, "SDL_Arduino_INA3221.h" para utilizar el INA 3221, "SD.h" para usar el módulo SD y "SPI.h" para la comunicación por SPI. Para la comunicación con el INA, se definen tres variables, una para cada canal: el canal 1 es para la batería, el canal 2 para el panel solar y el canal 3 para la salida de carga. El pin 10 se define para establecer la comunicación con el módulo microSD. Por último, se configura el tiempo a cero y se define la duración entre cada medición.

Una vez inicializada la comunicación con el INA, se inicia el bucle, abriendo un archivo de texto con el nombre "datosINA". Se comprueba la diferencia de tiempo y se guarda en la microSD. A continuación, se mide la tensión en el cable, la caída de tensión en la resistencia Shunt y la corriente que circula en cada canal. Luego se guardan los datos en la microSD y se cierra el archivo. Por último, se suma 8 segundos al tiempo total y se espera hasta que finalice la espera, cerrando el bucle.

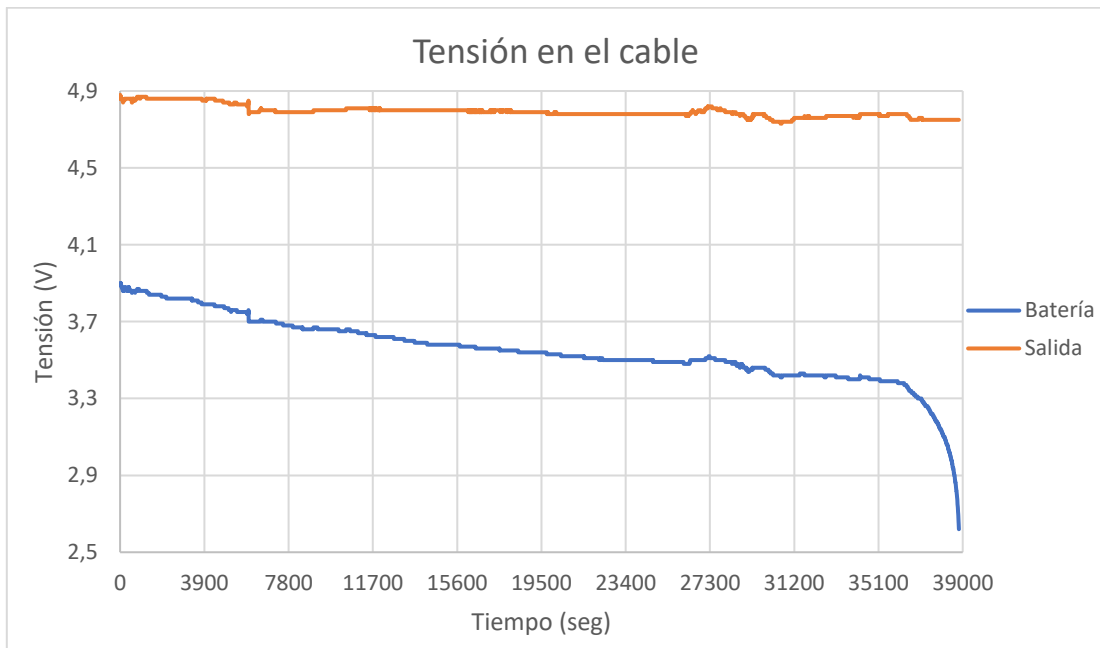
3.3. DFRobot Solar Power Manager 9 – 12 – 18 V

3.3.1. Introducción

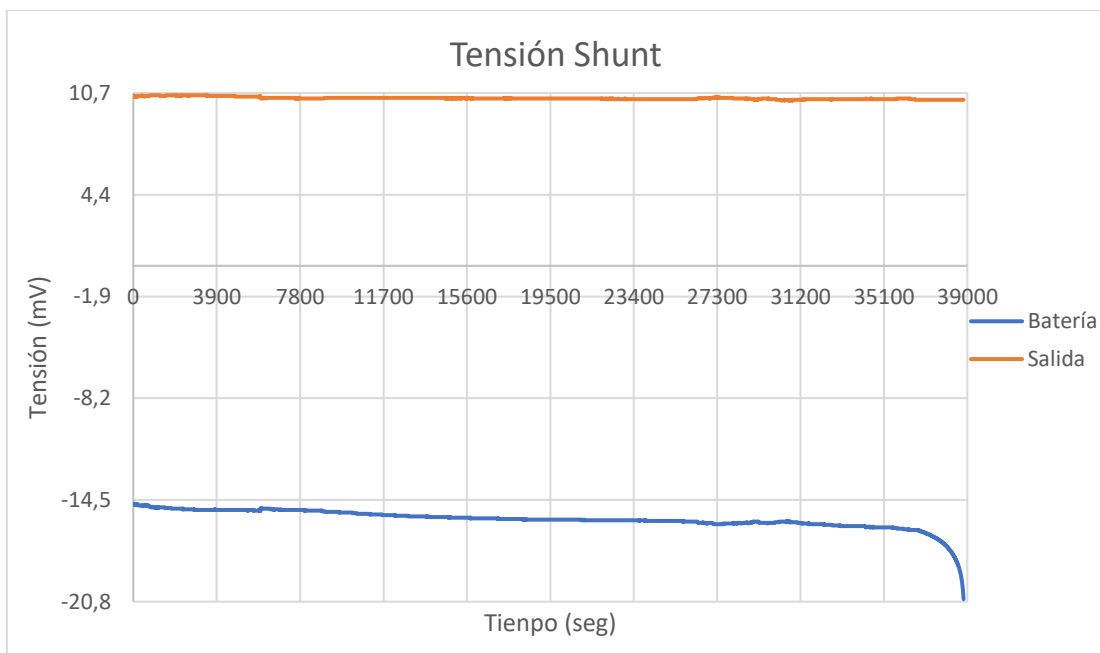
Para evaluar el funcionamiento del sistema de caracterización se usó la placa Solar Power Manager 9 – 12 – 18 V de la marca de DFRobot. Esto se debe a que esta placa tiene características similares a las que se quiere conseguir en el proyecto, esta utiliza un MPPT real con una entrada de 7 a 30 V y dispone de 2 salidas, una de 5 V a 1,5 A y otra de 3,3 V a 1 A

3.3.2. Prueba de descarga

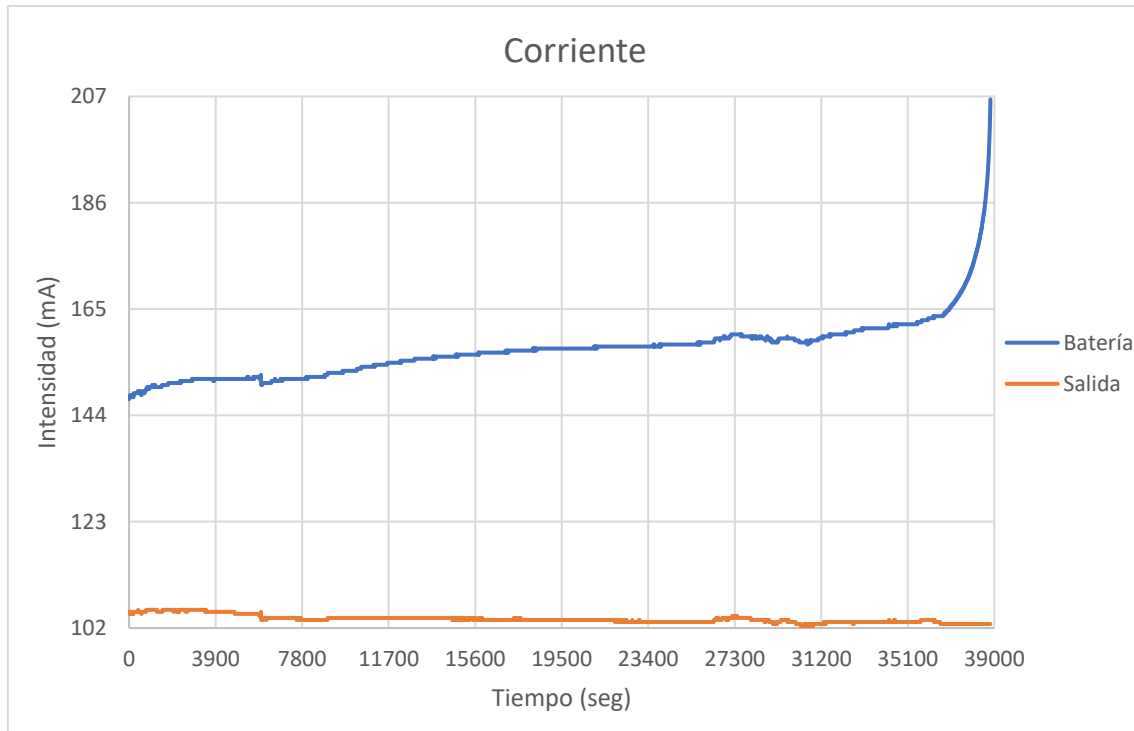
Para realizar la prueba de descarga, se desconecta el panel solar y se conecta una batería de 2000 mAh y 3,7 V completamente cargada. Se añade una resistencia de 47 Ω de 1 W en la carga para simular la descarga. Durante la prueba se tomaron medidas de tensión y corriente de la batería utilizando el INA3221 y el Arduino UNO. Después de realizar la prueba de descarga, se obtuvieron tres gráficas que representan la evolución de la tensión y corriente de la batería a lo largo del tiempo. Estas gráficas permiten analizar el comportamiento de la batería durante la descarga y determinar su capacidad real.



Gráfica 3 - Tensión del cable en la prueba de descarga de la placa de DFrobot



Gráfica 4 - Tensión Shunt en la prueba de descarga de la placa de DFrobot



Gráfica 5 - Corriente en la prueba de descarga de la placa de DFrobot

La duración de la prueba fue de 10 hora y 47 minutos, se tomó una medición cada 8 segundos y se registraron tres gráficas. La **Gráfica 3** muestra una disminución progresiva de la tensión hasta 3,4 V, a partir del cual la tensión disminuye de forma exponencial.

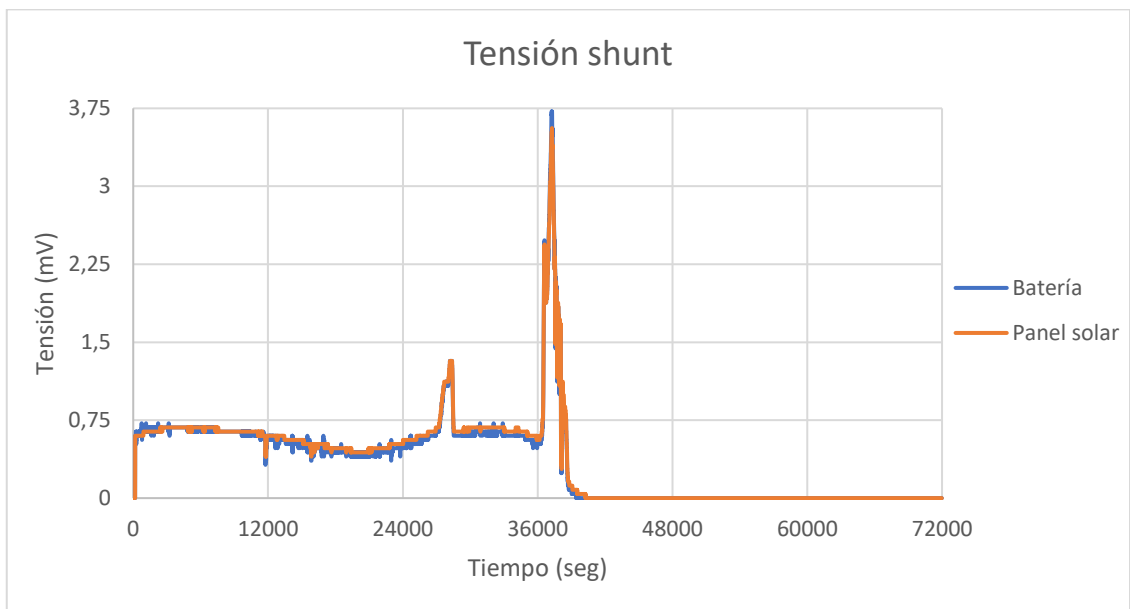
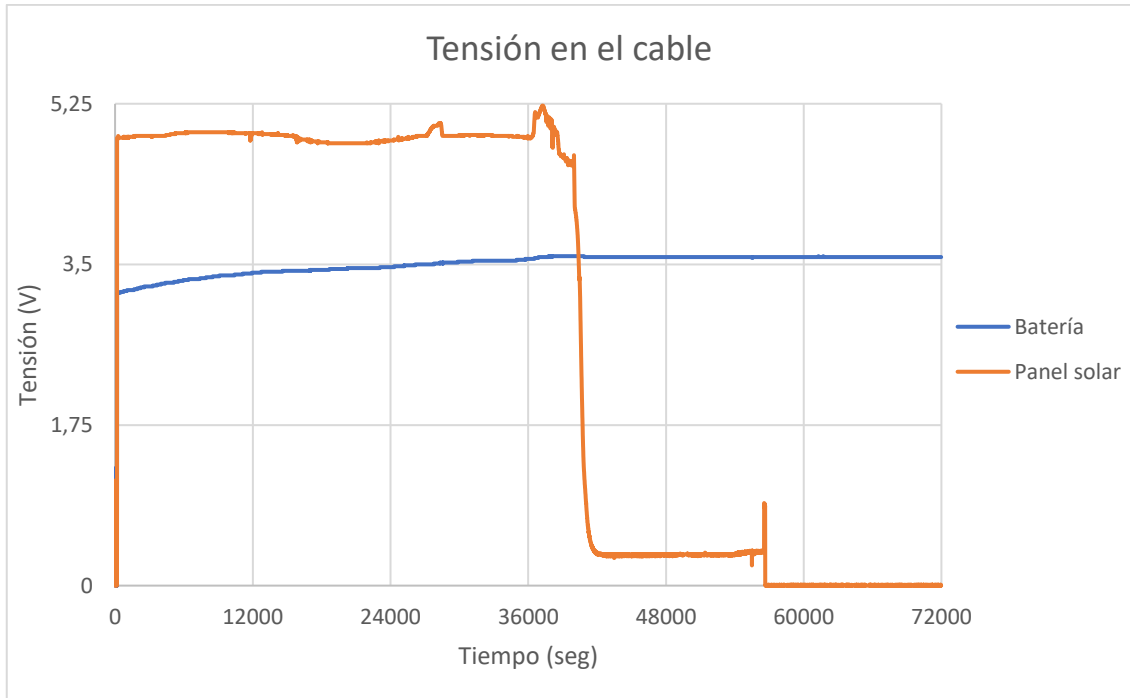
También se observa en la **Gráfica 4** que la batería se está descargando y que la carga está consumiendo energía, ya que la tensión Shunt de la batería es negativa y la de la carga es positiva. Además, en la **Gráfica 5** se puede ver cómo la batería aumenta la corriente que entrega para compensar la disminución de la tensión, manteniendo la potencia constante en la carga.

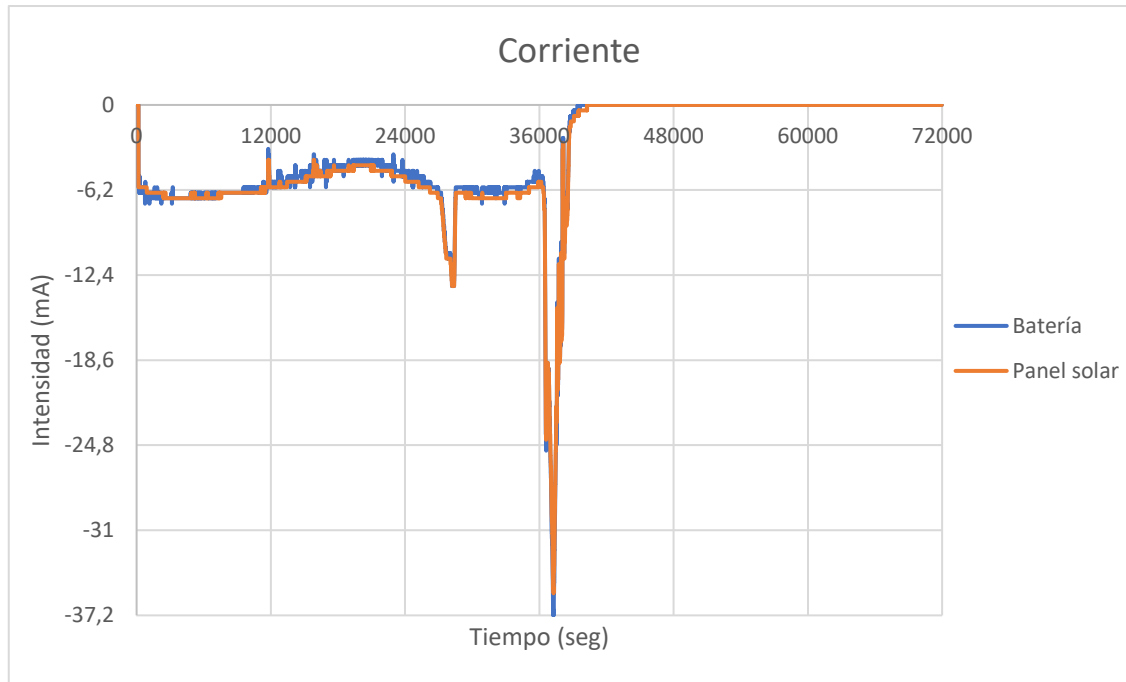
De acuerdo con los resultados de la prueba, se obtiene que la potencia media generada por la batería es de 557,73 mW, mientras que la potencia media consumida en la carga es de 497,5 mW. Por lo tanto, la eficiencia obtenida ha sido del 89,2%. Esta disminución en la eficiencia se debe al consumo de los LEDs de la placa, así como del circuito integrado del cargador y de los reguladores DC/DC.

3.3.3. Prueba de carga

Para llevar a cabo la prueba de carga, se ha conectado un panel solar de 9 V y 440 mA y una batería de 2000 mAh y 3,7 V descargada. Además, se ha asegurado que la salida esté en vacío para evitar cualquier carga que pueda consumir la batería. Durante la prueba, se han registrado medidas de tensión y corriente de la batería utilizando el INA3221 y el Arduino UNO, lo que ha permitido realizar un seguimiento preciso del proceso de carga.

Una vez finalizada la prueba de carga, se han obtenido tres gráficas que muestran la evolución de la tensión y corriente de la batería a lo largo del tiempo. Estas gráficas proporcionan información valiosa sobre el comportamiento de la batería durante la carga y permiten determinar el tiempo necesario para cargarla completamente.





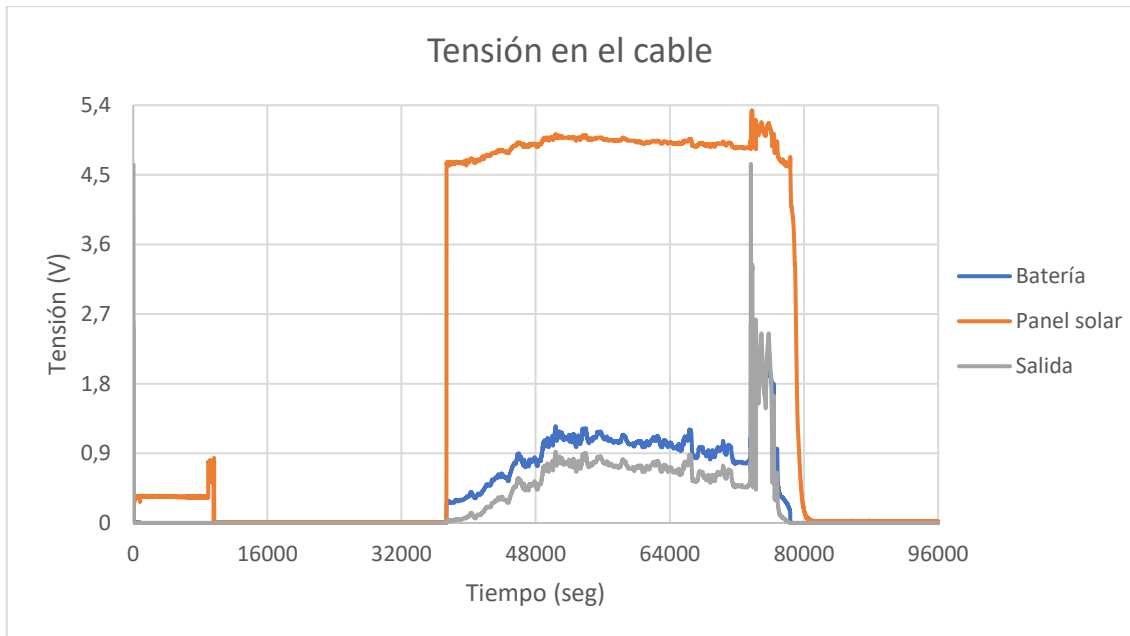
Gráfica 8 - Corriente en la prueba de carga de la placa de DFrobot

En la prueba (**Gráfica 6**) se observó un comportamiento esperado del sistema, donde la tensión de la batería aumentaba progresivamente mientras el panel solar estaba iluminado, manteniéndose una vez se corta la carga. Esto es debido a que el panel solar generaba energía que era transferida a la batería a través del controlador de carga. La **Gráfica 7** muestra que la tensión que recibe la batería es proporcional a la generada por el panel solar, lo que indica que el sistema está funcionando de manera efectiva. En la **Gráfica 8**, se puede observar cómo el panel solar aporta energía al sistema y la batería la recibe. Además, se puede ver que, al igual que en la prueba de carga, hay un pico de corriente para compensar cuando la tensión empieza a disminuir. Este pico de corriente es necesario para que la batería pueda mantener su nivel de carga.

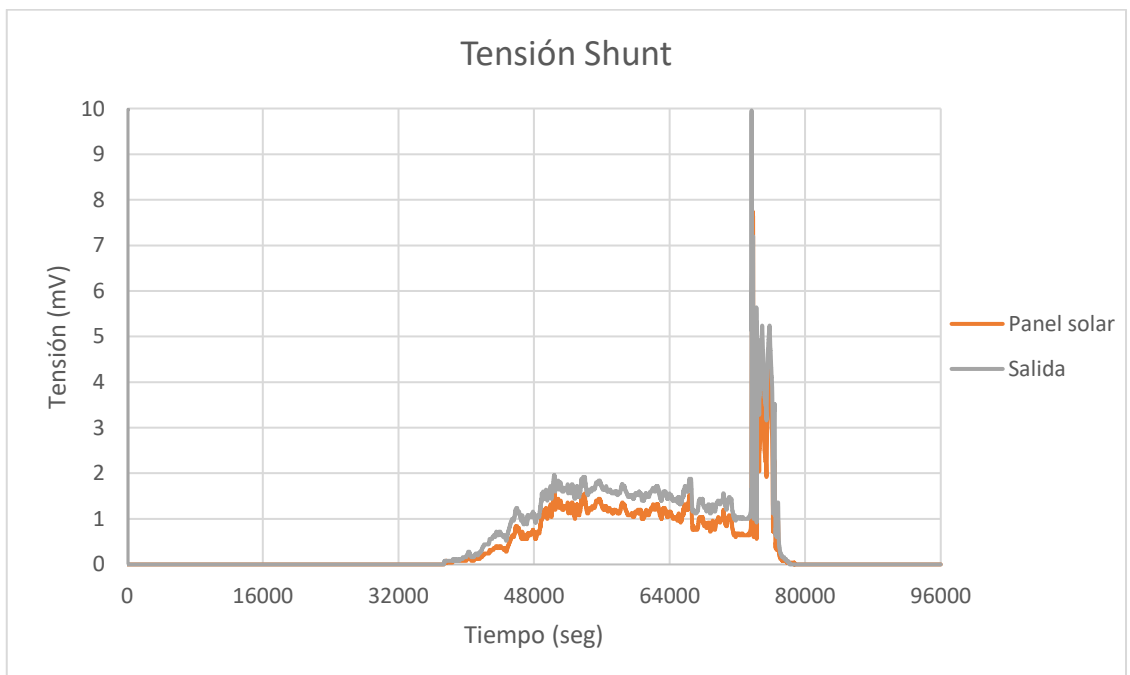
Es importante destacar que la duración de la prueba fue de 19 horas y 59 minutos, se tomó una medición cada 8 segundos, lo que permitió obtener datos suficientes para comprobar el funcionamiento del sistema durante un período prolongado de tiempo. Los resultados de la prueba muestran que la potencia media consumida por la batería es de 12,36 mW, mientras que la potencia media generada en la carga es de 10,37 mW. En consecuencia, se obtiene una eficiencia del 83,88%. Es importante destacar que esta reducción en la eficiencia se debe al consumo de los LEDs de la placa, así como del circuito integrado del cargador y de los reguladores DC/DC.

3.3.4. Prueba de carga – descarga

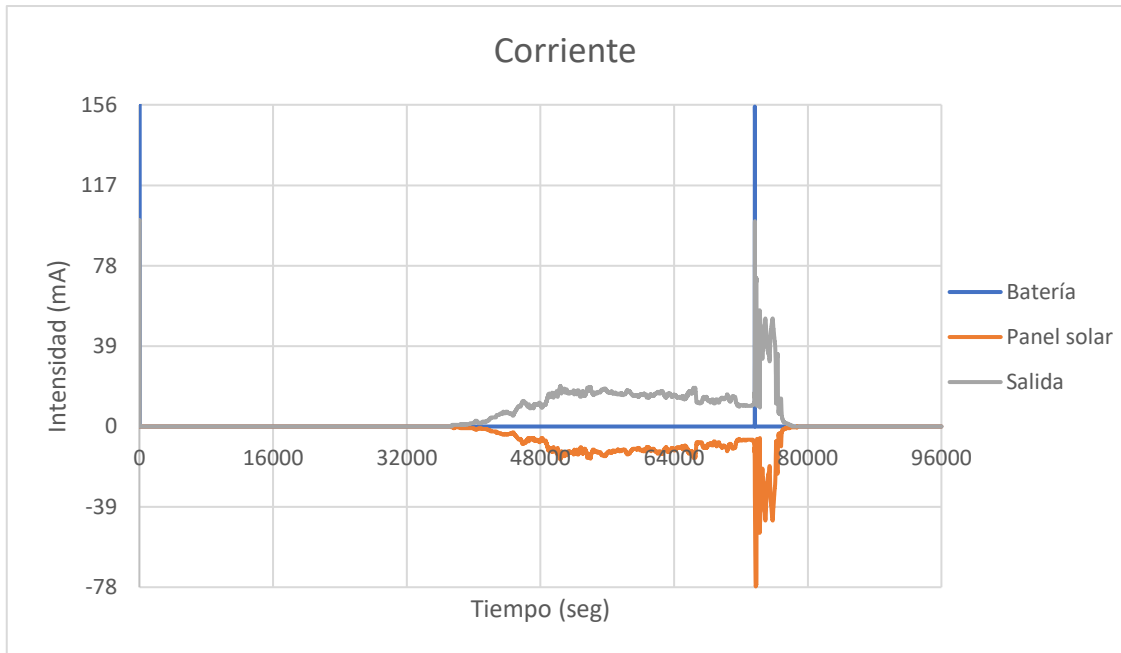
Se ha llevado a cabo una prueba de carga-descarga utilizando un panel solar de 9V y 440 mA, una batería de 2000 mAh y 3,7 V y una resistencia de 47 Ω de 1 W en la salida para garantizar un consumo constante de energía. Durante la prueba, se han medido la tensión y la corriente de la batería utilizando el INA3221 y el Arduino UNO para un seguimiento preciso del proceso de carga.



Gráfica 9 - Tensión del cable en la prueba de carga - descarga de la placa de DFrobot



Gráfica 10 - Tensión Shunt en la prueba de carga - descarga de la placa de DFrobot

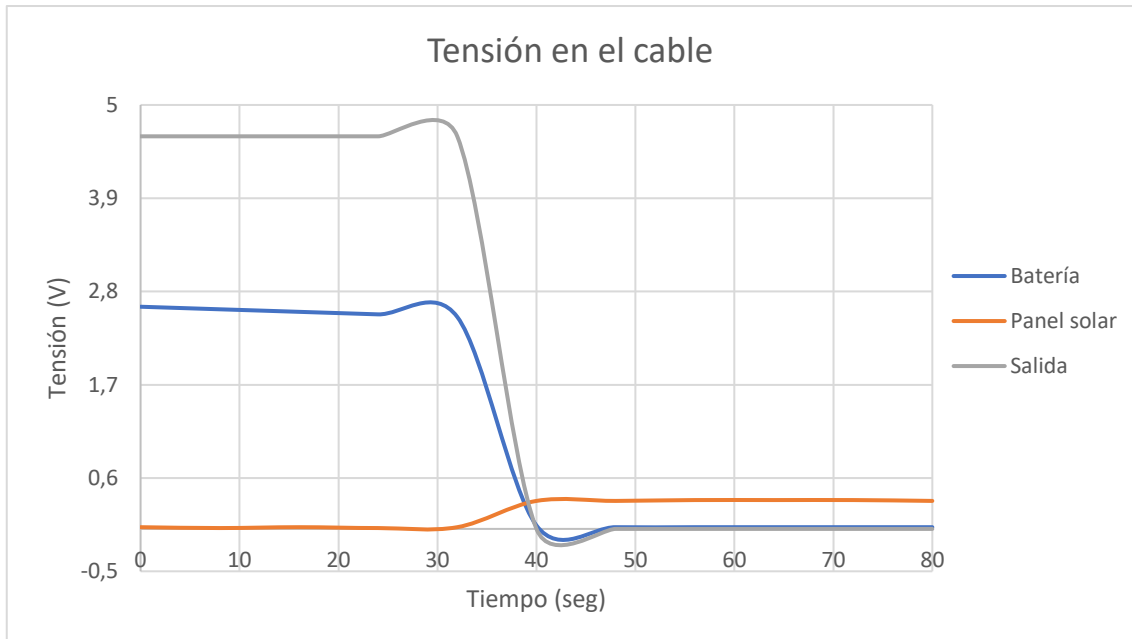


Gráfica 11 - Corriente en la prueba de carga - descarga de la placa de DFrobot

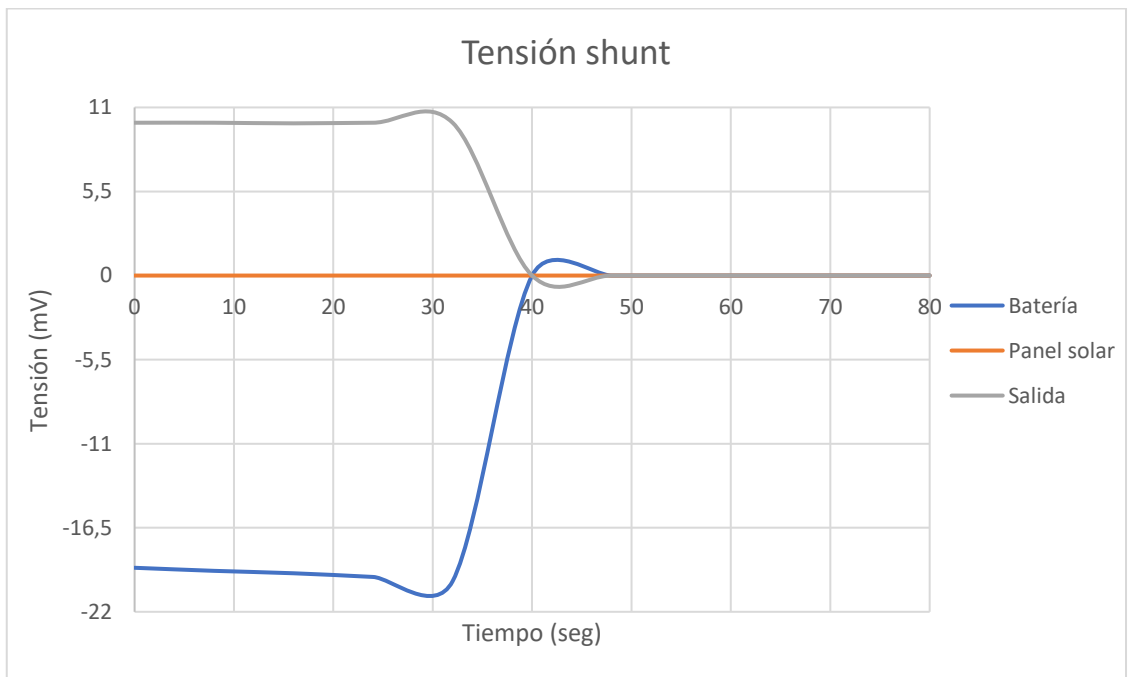
Se ha llevado a cabo una prueba de carga - descarga durante 26 horas y 40 minutos, se tomó una medición cada 8 segundos, en la cual se han registrado tres gráficas para su análisis. La Gráfica 9 refleja que el panel solar ha generado energía de forma constante durante un período de tiempo, sin embargo, la salida de la carga no ha sido constante ya que ha seguido la curva de la carga de la batería. Esto se debe a que la resistencia utilizada en la carga ha sido dimensionada de forma inadecuada, siendo demasiado pequeña y consumiendo una corriente excesiva, lo que ha impedido que la batería se cargue de forma adecuada.

En la **Gráfica 10** y la **Gráfica 11** se observa que la batería no ha logrado cargarse por completo debido a que la carga ha consumido prácticamente toda la corriente generada por el panel solar. A excepción del momento en que el panel generó la máxima potencia, donde la batería logró cargarse con una corriente de unos 160 mA durante un corto período de tiempo.

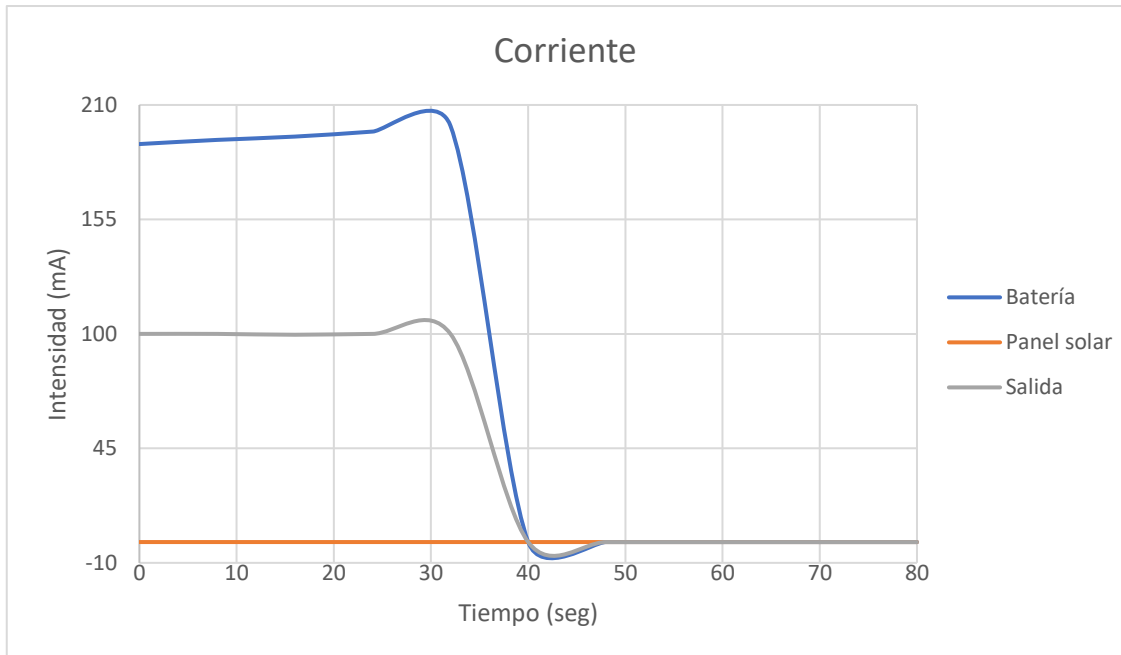
Durante la prueba se instaló una batería casi agotada con una tensión de 2,62V. Al reducir la ventana de tiempo a los primeros 80 segundos de la prueba, se puede observar en la **Gráfica 12** que, al llegar a la tensión mínima de la batería, la PCB activó la protección contra sobredescarga y desconectó la batería. Además, en las **Gráfica 13** y **Gráfica 14** se puede apreciar un consumo constante de la carga en la salida de la PCB.



Gráfica 12 - Tensión del cable inicial en la prueba de carga - descarga de la placa de DFrobot



Gráfica 13 - Tensión Shunt inicial en la prueba de carga - descarga de la placa de DFrobot



Gráfica 14 - Corriente inicial en la prueba de carga - descarga de la placa de DFrobot

3.4. Análisis de resultados

En la prueba de descarga, se descargó la batería a través de una resistencia de 220 ohmios y se midió la duración de la descarga. La batería duró aproximadamente 3 horas y 20 minutos antes de que su voltaje cayera por debajo de 3 V. Obteniendo una eficiencia del 89,2% debido a las pérdidas en la placa. En la segunda prueba, se observó que la batería se cargó durante aproximadamente 6 horas. La eficiencia de carga fue del 83,88%, lo cual indica que la energía generada por el panel solar no se utiliza de manera óptima debido al consumo de los componentes del circuito. En la última prueba de carga-descarga, se utilizó una resistencia de carga demasiado pequeña, lo que hizo que la batería se descargara más rápido de lo que se cargaba. Como resultado, la batería nunca se cargó. Se pudo comprobar el buen funcionamiento de la PCB ya que cumplía con sus funcionalidades. Además, se observó que la protección contra sobredescarga, incorporada en la PCB, desconectó la batería cuando la tensión descendió a su valor mínimo.

La eficiencia es un parámetro clave en cualquier sistema de energía renovable, ya que determina la cantidad de energía que se puede obtener a partir de la fuente de energía renovable en comparación con la cantidad de energía consumida. En el caso de la prueba de carga, se obtuvo una eficiencia del 83,88%, lo que indica que el sistema de carga es bastante eficiente a pesar de la disminución en la eficiencia debido al consumo de los componentes de la placa. En general, se puede concluir que es importante tener en cuenta el consumo de los componentes del circuito para garantizar una eficiencia óptima. Además, se demostró la utilidad de la PCB de protección contra sobredescarga para proteger la batería de posibles daños.

4. Diseño del sistema

4.1. Introducción

Para el proyecto se ha decidido diseñar una PCB que cumpla con ciertas especificaciones. La placa debe contar con una entrada de tensión para un panel solar que oscile entre 4 y 14 V, así como con dos salidas de 5 y 3,3 V que entreguen una corriente de 3 y 2 A respectivamente. Asimismo, se ha incluido una entrada para baterías de 3,7 V con capacidad de hasta 5000 mAh.

4.2. Componentes

4.2.1. Controlador de carga

Para cumplir con los objetivos marcados, el controlador de carga debe contar con una entrada de tensión mínima de 9 V y una salida de corriente de al menos 2 A. Es fundamental que el controlador de carga tenga una conexión separada entre la batería y la carga y, a su vez, posea una amplia gama de medidas de protección. La inclusión de la característica MPPT es opcional, aunque pueda optimizar aún más la eficiencia.

En la **Tabla 1** muestra una comparación entre varios controladores de carga y sus características. Los controladores que cumplen con los parámetros necesarios se muestran en recuadros verdes, los que están en el límite se muestran en amarillo y los que no cumplen se muestran en rojo. Cada controlador se evalúa en función de su tensión de entrada, intensidad de salida, protecciones y consumo en reposo. También se indica si tienen MPPT incorporado o no.

Diseño de un sistema de gestión y almacenamiento de energía para nodos IoT

Tabla 1- Comparativa de cargadores solares

	Tensión de entrada (V)	Intensidad máxima (mA)	V uvlo (V)	Salidas	Protecciones	MPPT
BQ24074 [18]	4,35 – 26	100/500	3,3	bat y sal	Sobrevoltaje / cortocircuito / temperatura	No
BQ25895 [36]	3,9 – 14	3250	-	bat y sal	Voltaje batería / corriente batería / temperatura / tensión / corriente	No
CN3065 [37]	4,4 – 6	1000	3,7	bat	Temperatura	No
CN3165 [38]	4,4 – 6	900	2,4	bat	Temperatura	No
CN3767 [39]	6,6 – 30	4000	5,2	bat	Contra corriente / descarga de la batería / carga batería	Si
LT3652 [40]	4,95 – 32 (40 V abs máx.)	2000	4,6	bat	Temperatura	Si
LT8490 [41]	6 – 80V	10000	3,04	bat	Ninguna	Si
LTC4162 [42]	4,5 – 35	3200	4,4	bat y sal	Temperatura / tensión entrada / descarga batería /carga batería	Si
MAX77827 [43]	1,8 – 5,5	1800/3100	2,05/1,68	sal	Corriente / temperatura /descarga	No
MCP73831 [44]	3,75 – 6	500	3,4	bat	Contracorriente / corriente	No
MCP73833 [45]	3,75 – 6	1000	3,4	bat	Contracorriente	No
MCP73871 [46]	Vreg+0,3 – 6	1800	Vreg + 0,07	bat y sal	Contracorriente / temperatura /corriente	No
SPV1050 [47]	2,5 – 20	-	2,1	bat y sal	Sobre tensión / carga batería /descarga batería	Si
TC4056A (TP4056) [48]	4,5 – 6,5	1000	4,3	bat	Corto circuito / corriente / contracorriente	No

Después de analizar la tabla comparativa de controladores de carga, se ha seleccionado el BQ25895 como la mejor opción para este proyecto. Este circuito controlador de carga fue originalmente diseñado como un cargador para móviles, pero cumple con los parámetros necesarios y puede ser utilizado para la implementación de un cargador solar en un diseño de PCB.

Este circuito integrado tiene los pines de la batería separados de los de la carga, proporcionando una tensión constante de 5 V a 3,25 A como máximo y otra salida regulada entre 3,5 y 4,7 V a 3,25 A. Aunque estas salidas están sobredimensionadas para el proyecto, se ajustarán a las necesidades al limitar la corriente. Además, cuenta con múltiples protecciones integradas y una alta eficiencia energética debido a su bajo consumo de potencia.

Una de sus limitaciones es que no tiene un MPPT integrado, aunque se puede agregar un controlador externo para calcularlo. Sin embargo, debido a que estos microprocesadores consumen mucha energía cuando trabajan en reposo, no se incluirá en el diseño. El bus I2C se puede usar para cambiar la configuración interna y se puede conectar al HOST a través del mismo bus I2C para una mayor eficiencia. Este bus se puede utilizar mediante un conector Molex o mediante cuatro pines macho.

4.2.2. Convertidor DC/DC

En este caso, se requiere un regulador de tensión que reduzca la tensión de entrada de 5 V a una tensión de salida de 3,3 V. El convertidor de tensión debe ser capaz de suministrar una corriente de salida de hasta 2 A.

Además, para maximizar la eficiencia del regulador y reducir el consumo de energía, se deben considerar varios factores. Uno de los principales factores que afecta la eficiencia del regulador es la caída de tensión o "dropout voltage" que se produce entre la entrada y la salida del regulador. La caída de tensión puede ser una fuente significativa de pérdidas de energía, por lo que se debe buscar un regulador con una caída de tensión baja.

En la **Tabla 2** se presenta una comparación de varios convertidores comerciales. Los convertidores que cumplen los parámetros necesarios se indican en recuadros verdes, los que están en el límite se indican en recuadros amarillos, y los que no cumplen los parámetros necesarios se indican en recuadros rojos

Tabla 2 - Comparativa reguladores DC/DC

	Tensión de entrada (V)	Tensión de salida (V)	Corriente de salida (A)	Eficiencia (%)	Consumo en reposo (μ A)
TPS63060 [49]	2,5 – 12	2,5 – 8	5V buck Vin < 10V 2A / 5V boost Vin > 4V 1,3A	> 93	60
TPS63061 [50]	2,5 – 12	0,6% - 5%	5V buck Vin < 10V 2A / 5V boost Vin > 4V 1,3A	> 93	60
S6BP201A [51]	2,5 – 42	5	-	> 90	20
LM3668 [52]	2,8 – 5,5	3,3	1	> 90	45
FAN48610UC50X [53]	2,5 – 4,8	5	1	> 84	125
ADP2504 [54]	2,3 – 5,5	2,8 – 5,5	1	> 80	38
TPS63000 [55]	1,8 – 5,5	1,2 – 5,5	> 0,8	> 96	50
ISL91110IRNZ-T7A [56]	1,8 – 5,5	3,3	2	> 95	35

Se ha optado por utilizar el convertidor DC/DC ISL91110IRNZ-T7A del tipo Buck-boost en el proyecto. Este dispositivo proporciona una salida de voltaje constante de 3,3 V a partir de una entrada de voltaje de 1,8 a 5,5 V. Se conecta a la salida de 5 V para poder obtener las dos salidas de voltaje necesarias. Al funcionar como reductor, la corriente de salida máxima aumenta. Además, el ISL91110IRNZ-T7A es un circuito integrado altamente eficiente que consume muy poca potencia en reposo.

4.3. Diseño inicial

4.3.1. Introducción

Para llevar a cabo el diseño de la PCB se ha utilizado el software DesignSpark PCB, el cual brinda una gran versatilidad gracias a la gran cantidad de componentes que incluye. En caso de que un componente específico no esté incluido en la biblioteca, se puede importar desde sitios web de venta de componentes o incluso diseñarlo manualmente.

Para diseñar el esquemático se han utilizado las datasheets de los dos circuitos integrados necesarios [57] [58]. También se ha tomado como referencia la placa BQ25895EVM-664 desarrollada por Texas Instruments. [59]. También, se han añadido cuatro pads en cada esquina de la PCB para poder añadir unos soportes con tornillos de métrica M3, lo que facilita su instalación en un sistema más grande. Finalmente, se han incorporado unos pines de prueba en la PCB para poder hacer pruebas y comunicarse por el protocolo I2C, permitiendo una mayor flexibilidad en el desarrollo y facilita la depuración de posibles fallos.

4.3.2. Esquemático

El esquemático puede dividirse en 8 grupos, tal como se muestra en la **Figura 15**. (Anexo B – Diseño inicial del esquemático)

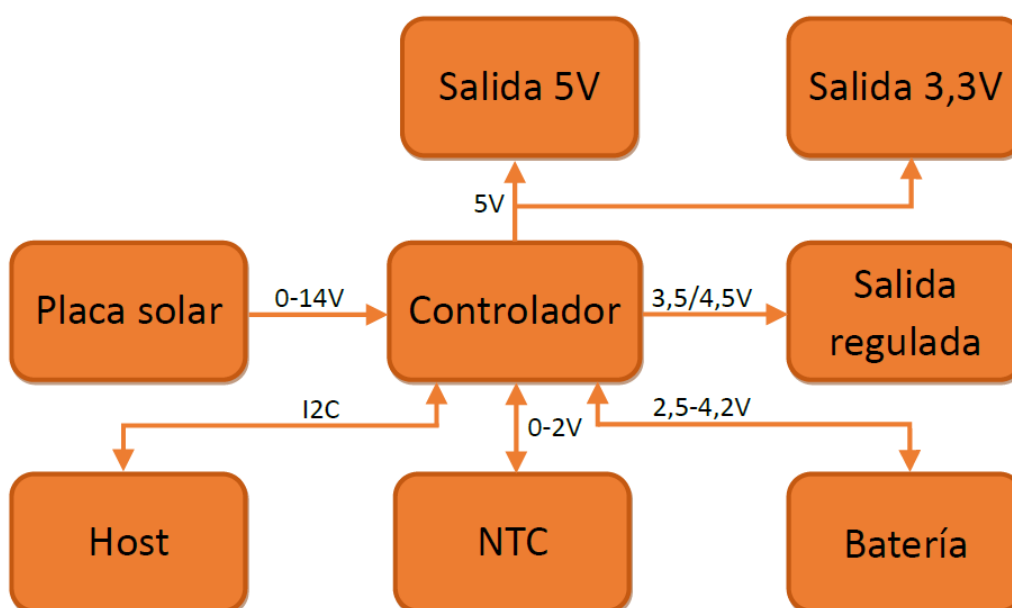


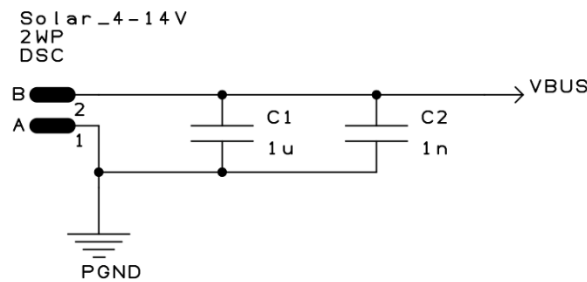
Figura 15 – Diagrama del esquemático para la PCB

4.3.3. Partes del esquemático

- Conexión del panel solar

La conexión del panel solar consta de dos partes, una bornera de dos conectores para el panel solar y un filtro formado por dos condensadores. El filtro formado por dos condensadores se coloca en la entrada del circuito para filtrar el ruido y evitar que la tensión de entrada presente variaciones bruscas, ya que la fluctuación en la tensión de entrada del panel solar puede generar problemas en el circuito y en la carga de la batería. Los condensadores actúan como almacenadores temporales de carga eléctrica y permiten que la tensión de entrada se mantenga más estable, sin variaciones bruscas.

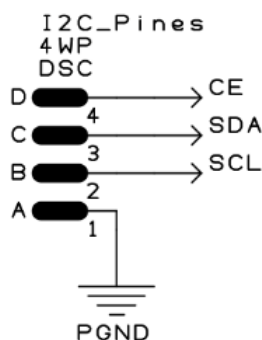
Además, es importante tener en cuenta que la bornera de dos conectores para el panel solar debe ser compatible con la conexión utilizada en el panel solar, ya que existen diferentes tipos de conectores. También se debe prestar atención a la polaridad de los conectores para evitar dañar el circuito. **(Esquemático 1)**



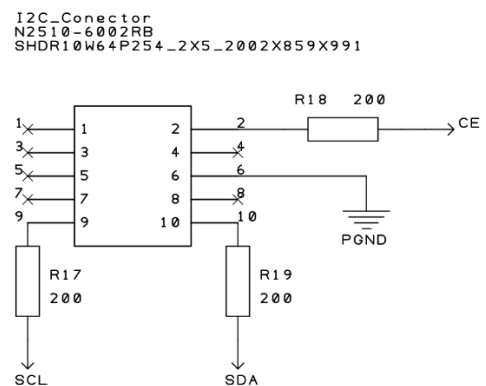
Esquemático 1 – Conexión para el panel solar

- HOST

Existen dos opciones para utilizar el bus I2C, se puede realizar una conexión mediante cuatro pines macho (**Esquemático 2**) o a través de un conector Molex de 10 pines (**Esquemático 3**).



Esquemático 2 – Conexión host por pines macho



Esquemático 3 – Conexión host por conector Molex

En el **Esquemático 2** se puede observar una conexión directa mediante 4 pines macho para utilizar el bus I2C. Estos pines tienen funciones específicas:

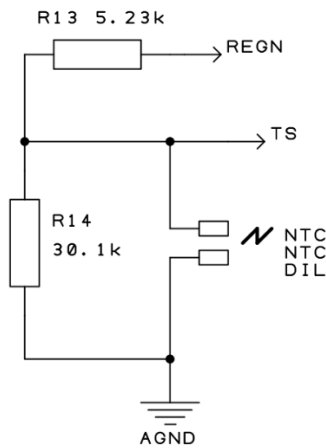
- CE (Chip Enable): es el habilitador de la carga, permite activar o desactivar el cargador de batería.
- SDA (Serial Data): es la línea de transmisión de datos, permite la comunicación de datos en serie entre la placa y el dispositivo controlador.
- SCL (Serial Clock): es la línea de transmisión de la señal de reloj, es utilizada para sincronizar la transferencia de datos entre la placa y el dispositivo controlador.
- GND (Ground): es la conexión de tierra, sirve para unificar las tierras de la placa y el dispositivo controlador y asegurar una correcta referencia de potencial entre ambos.

En el **Esquemático 3** se puede observar una conexión mediante un conector Molex de 10 pines para utilizar el bus I2C. Sin embargo, en este caso solo se usan 4 pines del conector, los cuales tienen las mismas funciones que los 4 pines macho del esquemático 2. En este caso, se utilizan resistencias de 200 ohm para limitar la corriente que fluye a través de los pines del conector Molex.

- NTC

El NTC de 10 k Ω se utiliza para controlar la temperatura de la batería y está conectado a un divisor de tensión (**Esquemático 4**). La resistencia R14 está en paralelo a un NTC, se utiliza para compensar la no linealidad de la curva de temperatura-resistencia del NTC, lo que permite obtener una respuesta más lineal y precisa del sensor. [60]

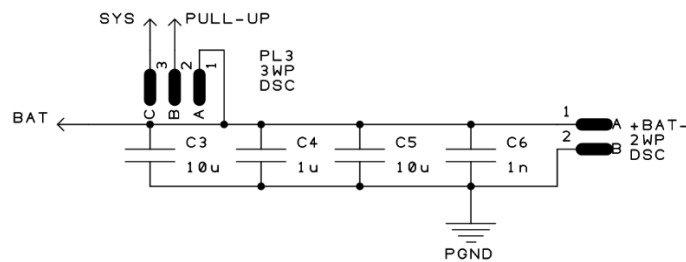
Además, se crea un divisor de tensión entre R13 y la resistencia equivalente de R14 y el NTC. Cuando la temperatura de la batería aumenta, la resistencia del NTC disminuye, lo que genera una caída en el voltaje que recibe el pin TS. Cuando alcanza un determinado valor de tensión, lo que provoca que el controlador de carga desconecte la batería para evitar daños por sobrecalentamiento. Esta es una medida de protección importante para garantizar la seguridad y prolongar la vida útil de la batería.



Esquemático 4 – Conexión NTC

- Conexión de la batería

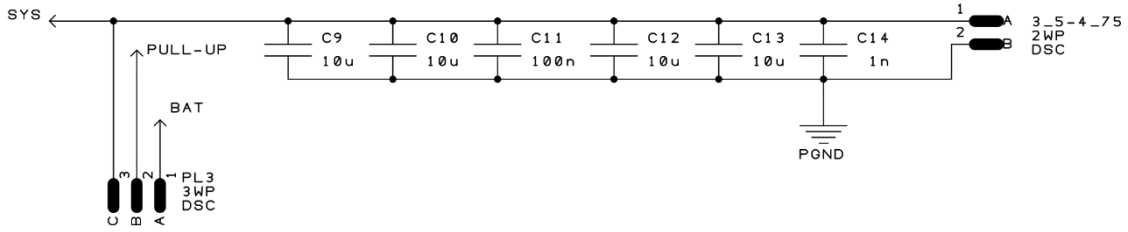
Se compone de tres partes: un pin para alimentar el pull-up, una bornera de dos conectores para la batería y un filtro (**Esquemático 5**). El filtro está diseñado para atenuar las altas frecuencias debidas a uno de los convertidores DC/DC interno del controlador de carga. Esta conexión es importante para mantener una buena calidad de señal y evitar interferencias que puedan afectar al correcto funcionamiento del controlador de carga y, por lo tanto, a la carga de la batería.



Esquemático 5 – Conexión para la batería

- Conexión de la salida regulada

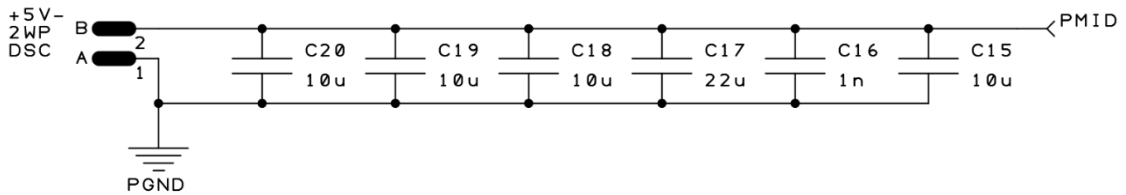
Se compone de tres partes: un pin para alimentar el pull-up, una bornera de dos conectores para la salida regulada y un filtro (**Esquemático 6**). El filtro está diseñado para atenuar las altas frecuencias debidas a uno de los convertidores DC/DC internos del controlador de carga, lo que permite obtener una salida más limpia y estable. Es importante contar con esta salida regulada ya que permitirá alimentar otros dispositivos externos al sistema que requieran de una tensión de hasta 4,75V.



Esquemático 6 – Conexión de salida regulada

- **Conexión de la salida de 5V**

consta de dos partes: una bornera de dos conectores para la salida de 5V y un filtro (**Esquemático 7**). El filtro se utiliza para atenuar las altas frecuencias generadas por uno de los convertidores DC/DC internos del controlador de carga y garantizar una salida limpia y estable de 5V.

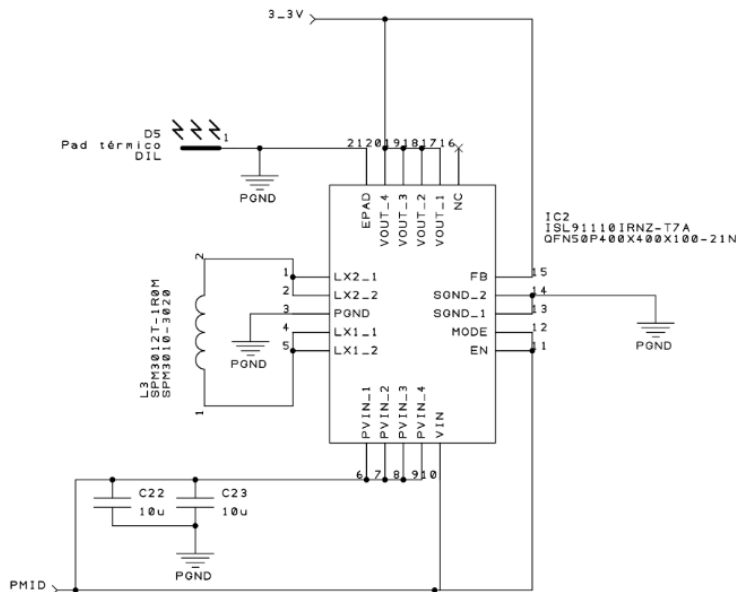


Esquemático 7 – Conexión de salida de 5V

- **Conexión de la salida de 3,3V**

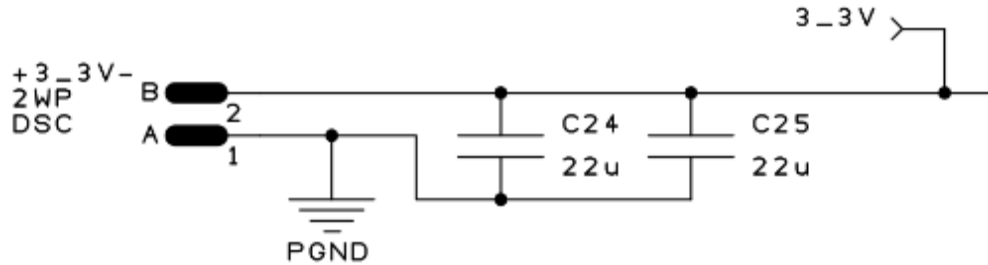
Se divide en dos partes: la primera corresponde al convertidor DC/DC de 5 a 3,3V y la segunda a la conexión de salida de 3,3V.

En la primera parte, se encuentra un filtro que se utiliza para atenuar las altas frecuencias en la entrada del convertidor, la bobina necesaria para el convertidor y al propio convertidor DC/DC. Además, se le ha instalado un pad de disipación. (**Esquemático 8**)



Esquemático 8 – Convertidor DC/DC 3,3V

En la segunda parte, se encuentra una bornera de dos conectores para la salida de 3,3V y un filtro, que se utiliza para atenuar las altas frecuencias debidas al convertidor DC/DC. De esta forma, se logra una salida más estable y libre de ruido, lo que contribuye a un mejor rendimiento del dispositivo.



Esquemático 9 – Conexión de salida de 3,3V

- Controlador de carga

El esquema de la **Figura 16** muestra que el controlador de carga está compuesto por varias partes. Se explica el funcionamiento de cada pin en el **Anexo C – Función de los pines del BQ25895**.

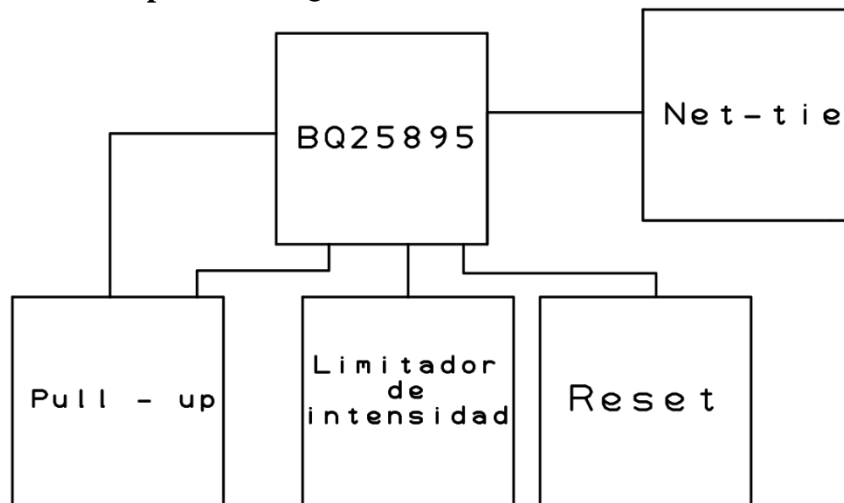
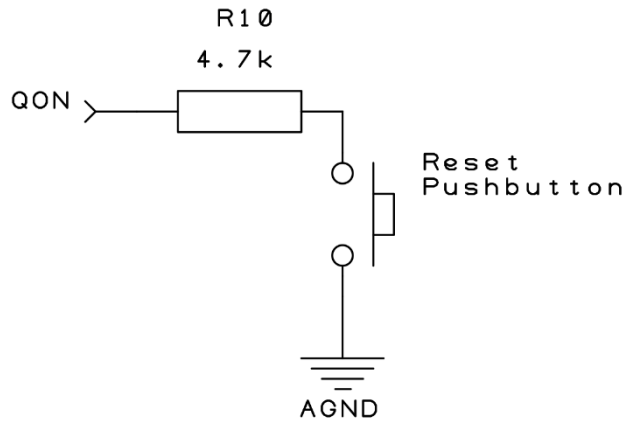


Figura 16 – Diagrama del esquemático del controlador de carga

- Reset

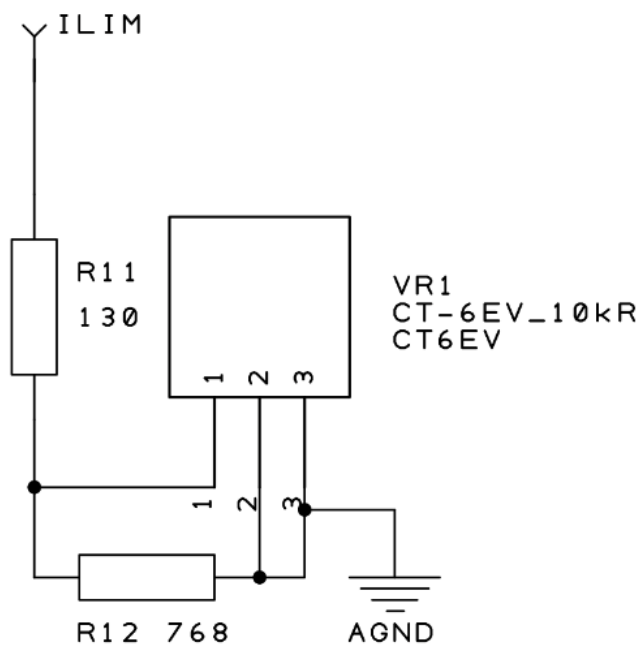
La función de reset está implementada mediante un botón tipo Push Button con una resistencia de pull-up (**Esquemático 10**). La entrada QON está invertida, por lo que, al presionar el botón, se activa el reset del controlador de carga, conectando la entrada a GND y reiniciando el sistema.



Esquemático 10 – Esquemático para reiniciar el controlador de carga

- Limitador de corriente

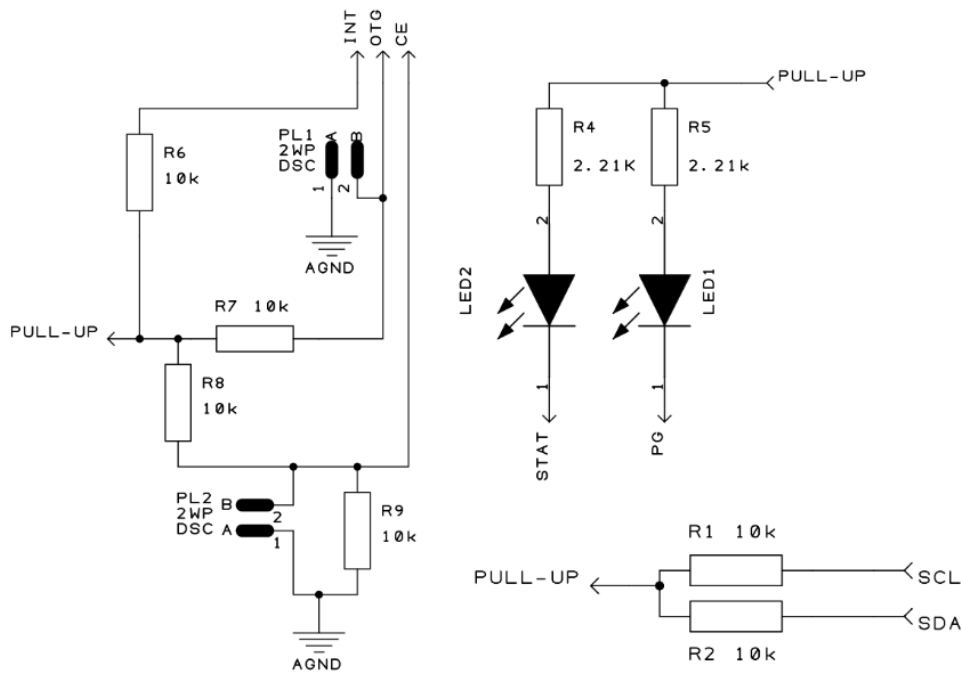
El limitador de corriente es un componente importante del controlador de carga y su función es limitar la corriente máxima de entrada a un valor seguro para la batería y los demás componentes del sistema. Está formado por dos resistencias y un potenciómetro, creando un divisor de tensión (**Esquemático 11**). Variando la resistencia del potenciómetro se puede ajustar la corriente máxima de entrada a un valor deseado. Para calcular el valor máximo de corriente permitido, se puede utilizar la fórmula $I = 380 / R_{lim}$, donde I es la corriente máxima, 380 es un valor de referencia y R_{lim} es la resistencia equivalente entre el potenciómetro y las resistencias. Es importante ajustar adecuadamente la corriente máxima de entrada para proteger la batería y prolongar su vida útil.



Esquemático 11 – Esquemático del limitador de corriente

- Pull – up

Para garantizar el correcto funcionamiento del controlador de carga, se realizan varias conexiones al pull-up (**Esquemático 12**). Se conectan 2 LEDs al pull - up, el LED1 indica que la energía se está suministrando correctamente, mientras que el LED2 indica cuando se desconecta la batería. Además, se conectan varias protecciones en la PCB, incluyendo protección contra sobrecargas, protección contra descargas excesivas y protección contra corriente inversa. Todas estas conexiones al pull-up se realizan a través de resistencias de 10 kΩ, excepto en el caso de los LEDs que utilizan resistencias de 2,21 kΩ para no limitar tanto la corriente.

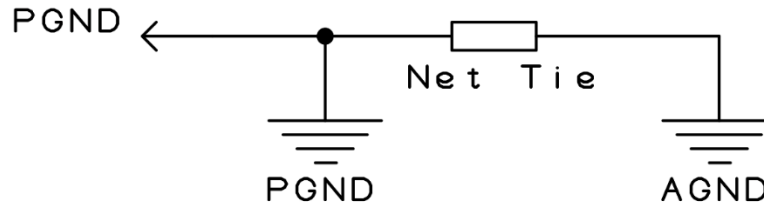


Esquemático 12 – Esquemático de las conexiones pull – up

- Net – tie

La net-tie es una conexión importante dentro de la PCB ya que interconecta las tierras de potencia con las tierras analógicas. En una PCB, hay diferentes secciones que requieren tierras separadas para evitar interferencias y ruidos en el circuito. La net-tie es un punto donde se conectan estas diferentes tierras, asegurando que todas las partes del circuito tengan una referencia de voltaje común y que las señales analógicas no se vean afectadas por ruido de conmutación de los circuitos de potencia (**Esquemático 13**).

La net-tie se logra mediante una conexión eléctrica directa entre las diferentes tierras. Puede ser una conexión física realizada por un cable o una pista en la PCB, o puede ser una conexión virtual realizada a través de un componente de red. En cualquier caso, la net-tie es crucial para el correcto funcionamiento de la PCB, especialmente en aplicaciones donde la precisión y la estabilidad de la señal analógica son importantes, como en amplificadores de audio o en circuitos de medición de alta precisión.



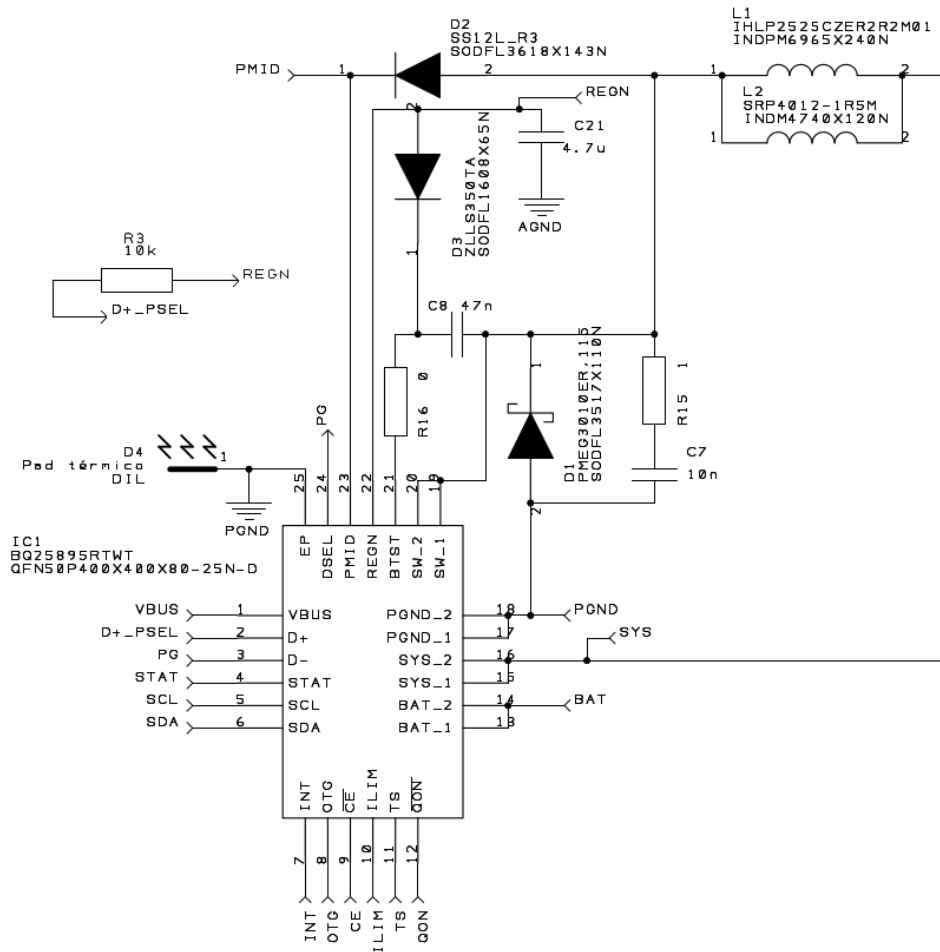
Esquemático 13 – Esquemático conexión net-tie de las tierras

- BQ25895

En el **Esquemático 14** se puede observar el controlador de carga BQ25895 conectado a sí mismo mediante diodos, resistencias y condensadores. Estos componentes son necesarios para regular la modulación por ancho de pulso (PWM) que utiliza el controlador de forma interna. También se pueden apreciar las conexiones al pad térmico y a las bobinas, las cuales son esenciales para hacer funcionar los convertidores internos del controlador. En particular, se incluyen bobinas que se encargan de realizar las funciones del convertidor DC/DC interno. El pad térmico es una conexión de tierra térmica que se utiliza para disipar el calor generado en los componentes que están en contacto con él. En el caso del BQ25895, el pad térmico está diseñado para disipar el calor generado en el convertidor DC/DC interno y en la carga de la batería.

El pad térmico se conecta a un área de cobre en la PCB, que actúa como un disipador de calor. Cuando el convertidor DC/DC o la carga de la batería generan calor, éste se transfiere al pad térmico y de ahí al área de cobre, que se encarga de disiparlo al ambiente. Es recomendable colocar un disipador de calor en el área de cobre correspondiente para mejorar la disipación de calor y evitar que el controlador de carga se sobrecaliente.

Es importante tener en cuenta que la correcta conexión del pad térmico es esencial para asegurar el correcto funcionamiento del BQ25895 y para evitar problemas de sobrecalentamiento. Además, es necesario garantizar que el área de cobre conectada al pad térmico tenga un tamaño adecuado para poder disipar el calor de manera eficiente.



Esquemático 14 – Esquemático de la conexión del controlador de carga

Todos los componentes utilizados están ordenados en el **Anexo D – Lista de componentes de la PCB inicial**.

4.3.4. PCB

La PCB se compone de 6 partes según se puede observar en el **Anexo E – Diseño de PCB inicial**. Dado que la mayoría de los componentes son SMD de tamaño 1206 y los circuitos integrados tienen un tamaño de 3x3 mm, se ha decidido utilizar el método de soldadura por aire caliente. El proceso de soldadura por aire caliente es ampliamente utilizado en la industria electrónica para la fabricación de PCBs. Consiste en aplicar pasta de soldadura en los pads de la PCB, colocar los componentes SMD en su lugar correspondiente y luego someter la placa a altas temperaturas mediante un horno de reflujo o una estación de soldadura por aire caliente.

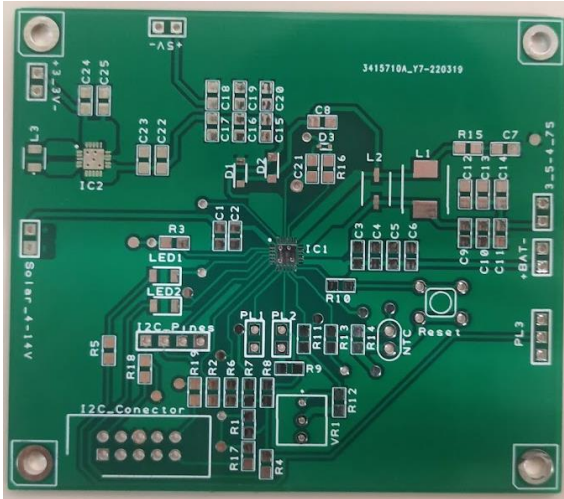


Figura 17 - Placa inicial cara superior

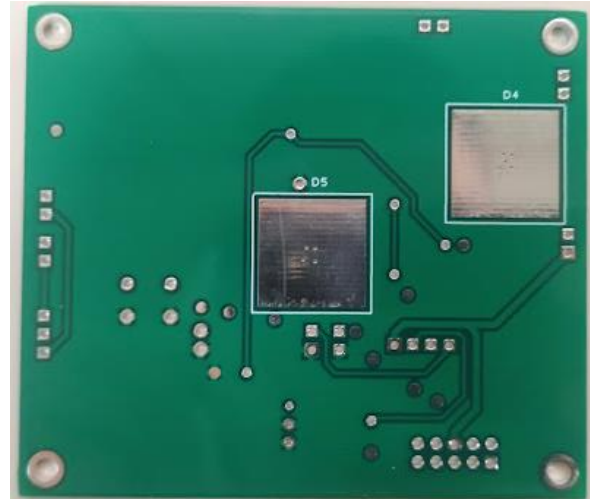


Figura 18 - Placa inicial cara inferior

4.3.4.1. Conexión Net-Tie

Para garantizar un buen funcionamiento de la PCB, es necesario tener una conexión adecuada entre las tierras analógicas (AGND) y las tierras de potencia (PGND). Esta conexión se realiza mediante una net-tie o conexión a tierra virtual. Es importante que esta conexión sea lo más corta y ancha posible para reducir la inductancia y resistencia de la conexión. **(Figura 19 y Figura 20)** [61]

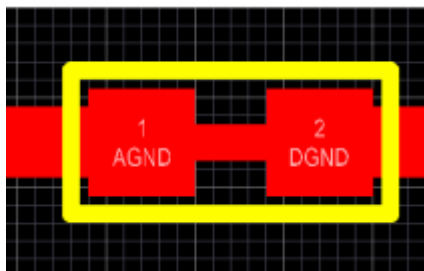


Figura 19 – Ejemplo 1 de conexión de dos tierras con una Net-Tie

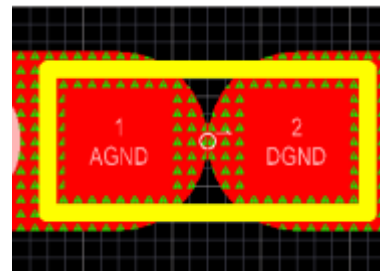


Figura 20 – Ejemplo 2 de conexión de dos tierras con una Net-Tie

En el diseño de la PCB, se ha implementado una net-tie conectando un pad a AGND y un plano de cobre a PGND. La conexión se realiza mediante una pista de cobre de 0,3 mm de grosor y una longitud de 1 mm. **(Figura 21)**.

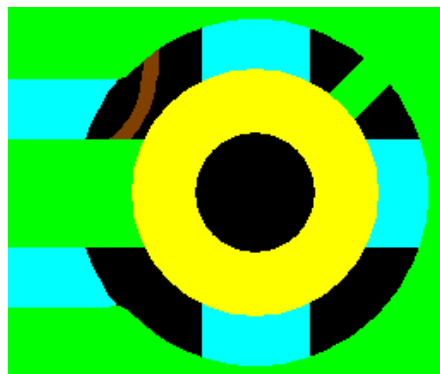


Figura 21 – Net-Tie para interconexión de los dos tipos de tierra

De esta manera, se asegura que las señales analógicas y de potencia compartan una referencia común y se minimiza el ruido y las interferencias. Además, al tener una conexión robusta entre AGND y PGND, se mejora la estabilidad y la precisión de los circuitos analógicos y digitales.

4.3.4.2. Disipación del calor

Se ha implementado un sistema de disipación de calor para reducir la temperatura de los componentes, en el que se han utilizado los pads de la parte inferior de los circuitos integrados. Estos pads están conectados a los planos de cobre de la placa para disipar el calor. Además, se han añadido unos planos de cobre justo debajo de los circuitos integrados, los cuales se conectan a los pads mediante vías para ayudar a evacuar el calor. Estos planos tienen un tamaño de 15x15 mm y se han diseñado para poder colocarles disipadores y mejorar aún más la disipación del calor. (**Figura 22 y Figura 23**)

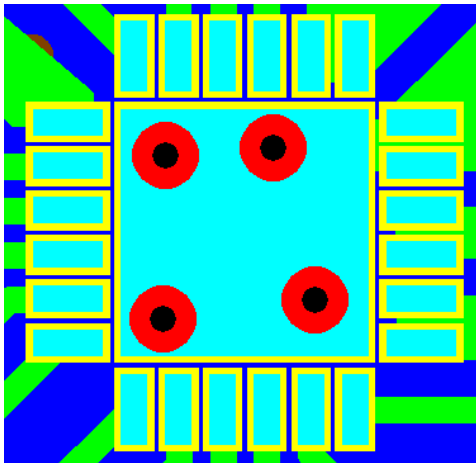


Figura 22 – Pad y vías de disipación de un circuito integrado



Figura 23 - Disipador de 15x15

4.3.5. Montaje de la tarjeta

Cuando se utilizan componentes SMD de tamaño 1206, se requiere de una técnica de soldadura diferente a la tradicional con soldador eléctrico, ya que estos componentes son muy pequeños y están diseñados para ser soldados directamente en la superficie de la PCB. Una de las técnicas más utilizadas para soldar componentes SMD es la soldadura por aire caliente. Este proceso se lleva a cabo mediante un horno de soldadura o una pistola de aire caliente, que emite una corriente de aire caliente para fundir el estaño de la soldadura y fijar los componentes en su lugar.

Un horno de soldadura (**Figura 24**) es una máquina que se utiliza para soldar componentes electrónicos a una PCB. Estas soldaduras se llevan a cabo mediante la aplicación de calor y flujo de aire caliente a la placa de circuito impreso, lo que permite que los componentes se adhieran a la placa. El horno de soldadura consta de una cámara de calor que se calienta a temperaturas entre 150-300 °C, dependiendo del tipo de soldadura. La placa se coloca en la cámara de calor y se somete a un proceso de precalentamiento, que permite que los componentes se ajusten y se calienten gradualmente. Una vez que se alcanza la temperatura de soldadura adecuada, el flujo de aire caliente se activa para soldar los componentes a la placa.

Existen diferentes tipos de hornos de soldadura, algunos de los cuales utilizan técnicas de soldadura por infrarrojos para calentar la placa de circuito impreso en lugar de aire caliente. Además, algunos hornos de soldadura utilizan gases inertes, como el nitrógeno, para evitar la oxidación de las soldaduras.



Figura 24 - Horno de soldadura

Las pistolas de aire caliente (**Figura 25**) son una alternativa popular al horno de soldadura para la soldadura por aire caliente de componentes SMD. Estas herramientas se utilizan para aplicar aire caliente directamente sobre los componentes, lo que hace que la soldadura se funda y se adhiera a la superficie de la PCB. Se pueden utilizar para aplicar calor de forma selectiva a áreas específicas de la PCB. A diferencia del horno de soldadura, las pistolas de aire caliente son portátiles y más fáciles de usar en proyectos de menor escala.

Para utilizar una pistola de aire caliente, se ajusta la temperatura y el flujo de aire según las especificaciones del componente y se aplica el calor directamente sobre el área de la PCB donde se encuentra el componente. Es importante tener en cuenta que requieren una mayor habilidad y control para evitar dañar los componentes o la PCB.



Figura 25 - Pistola de aire caliente

Es importante tener en cuenta que, aunque la soldadura por aire caliente es una técnica eficaz para soldar componentes SMD, es necesario tener cuidado al utilizarla, ya que un exceso de calor puede dañar los componentes o la PCB.

4.3.5.1. Pasta de soldar

Las pastas de soldadura, también conocidas como pasta de soldadura o pasta para soldar, son un compuesto viscoso que se utiliza en la fabricación de placas de circuito impreso para aplicar la soldadura a través de la técnica de soldadura por reflujo. Están compuestas principalmente por una aleación de estaño y plomo, aunque en la actualidad se han desarrollado pastas de soldadura sin plomo para reducir los riesgos para la salud y el medio ambiente. La pasta de soldadura se aplica a través de una plantilla de serigrafía llamada stencil, que permite depositar una cantidad precisa y uniforme en los pads de la PCB.

Existen diferentes tipos de pastas de soldadura, cada una diseñada para una aplicación específica. Por ejemplo, la pasta de soldadura sin plomo es más dura y tiene un punto de fusión más alto que la pasta de soldadura tradicional, lo que la hace adecuada para aplicaciones de alta temperatura. También hay pastas de soldadura con diferentes grados de viscosidad y contenido de flujo, que pueden adaptarse a diferentes tamaños y formas de componentes y PCBs.



Figura 26 - Pasta de soldadura Chipquik SMD291SNL50T3

En este proyecto se ha utilizado la pasta de soldadura sin plomo SMD291SNL50T3 del fabricante Chipquik (**Figura 26**). Esta pasta de soldadura es una opción respetuosa con el medio ambiente y cumple con las normativas RoHS. Para utilizar esta pasta de soldadura, se ha utilizado una curva de temperatura específica, que incluye un precalentamiento de 180°C durante 180 segundos y una temperatura final de 240°C durante 60 segundos (**Figura 27**). Es importante seguir correctamente esta curva de temperatura para asegurar una soldadura de calidad y evitar dañar los componentes. [62]



Figura 27 - Curva de temperatura [62]

4.3.5.2. Stencil

Un stencil (**Figura 28**), también conocido como máscara de soldadura, es una plantilla de metal o plástico con orificios cortados con láser en una disposición que coincide con los pines del componente a soldar. Se utiliza para aplicar la pasta de soldadura en las áreas específicas de la placa de circuito impreso donde se requiere la conexión de los componentes SMD.



Figura 28 - Stencil de la placa inicial

El stencil se coloca encima de la placa de circuito impreso, y se aplica la pasta de soldadura sobre el stencil utilizando una espátula o una rasqueta. La pasta de soldadura se presiona a través de los orificios del stencil y queda depositada en los puntos exactos de la placa donde se necesitan las soldaduras. Una vez aplicada la pasta de soldadura, se retira el stencil con cuidado y se procede a la colocación de los componentes SMD sobre la pasta de soldadura. Luego, se procede a la soldadura de los componentes utilizando un horno de reflujo o una pistola de aire caliente. El uso de un stencil para la aplicación de pasta de soldadura permite una mayor precisión y consistencia en la aplicación de la pasta, lo que resulta en soldaduras de mayor calidad y fiabilidad en la placa de circuito impreso.

Para mantener la PCB en su lugar mientras se aplica la pasta de soldadura con el stencil, se utilizan otras PCBs como soporte (**Figura 29**). De esta manera, si se deben realizar varias PCBs, se facilita el trabajo, ya que la posición de la PCB es la misma en cada una de ellas. Esto es especialmente importante para las PCBs de tamaño pequeño o para las que contienen componentes SMD que deben soldarse con precisión.



Figura 29 - Sujeción de PCB

4.3.5.3. Máquina de colocación de componentes SMD

Las máquinas de colocación de componentes SMD (**Figura 30**) permiten colocar los componentes con mayor precisión, rapidez y eficiencia que si se realiza manualmente. Existen dos tipos principales de máquinas de colocación de componentes SMD: manuales y automáticas. Las máquinas manuales son más adecuadas para pequeñas producciones o prototipos, ya que requieren que el operador coloque manualmente cada componente en la posición correcta en la PCB. En cambio, las máquinas automáticas son más adecuadas para producciones en masa, ya que pueden colocar automáticamente los componentes en la PCB con alta precisión y velocidad.

Las máquinas automáticas de colocación de componentes SMD utilizan sistemas de visión por ordenador para identificar y colocar los componentes en la posición correcta en la PCB. Estas máquinas pueden colocar varios componentes en paralelo y pueden procesar miles de componentes por hora, lo que las hace ideales para la producción en masa de PCB. Además, algunas máquinas automáticas también pueden realizar inspecciones de calidad en los componentes y en la PCB después de la colocación.



Figura 30 - Máquina de colocación de componentes SMD

Es importante destacar que la inversión en una máquina de colocación de componentes SMD puede ser significativa, especialmente si se trata de una máquina automática de alta velocidad y precisión. Sin embargo, en la producción en masa de PCB, el costo de la máquina se puede amortizar rápidamente en términos de ahorro de tiempo y reducción de errores.

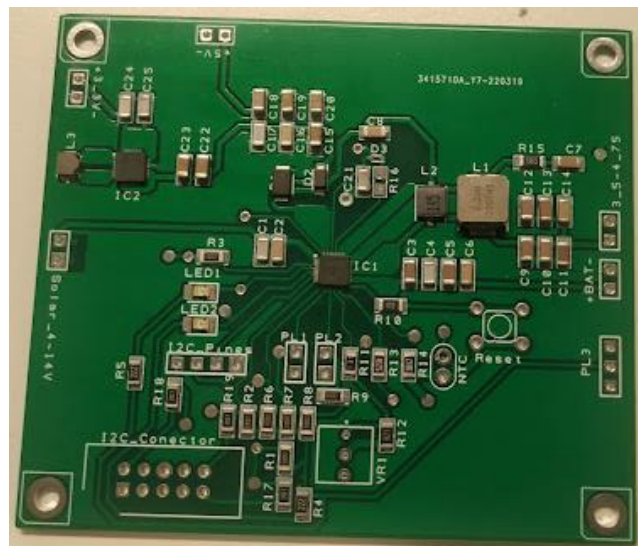


Figura 31 - Placa inicial con los componentes SMD

4.3.6. Pines de test

Se han incorporado pines en la placa para facilitar las pruebas de funcionamiento y comprobar el correcto desempeño del circuito integrado. PL1 se encarga de conectar el pin 8 (OTG) a tierra, desactivando el Boost Mode. PL2 conecta el pin 9 (CE) a tierra, manteniendo encendido el sistema de carga constantemente. Por último, PL3 permite variar la referencia del PULL-UP entre la batería y la salida regulada de 3,5 a 4,75 V, lo cual permite ajustar la referencia según las necesidades del sistema y realizar pruebas de funcionamiento bajo diferentes condiciones de voltaje. Estos pines son una herramienta útil para el diagnóstico y prueba del regulador, asegurando su correcto funcionamiento antes de su implementación en el sistema final.

4.4. Problemas encontrados

Después de finalizar el montaje de la PCB, se han realizado una serie de pruebas para comprobar el funcionamiento de los diferentes componentes del circuito. Durante estas pruebas se han detectado varios errores que requieren ser corregidos antes de poder dar por concluido el proyecto.

Entre los errores detectados se encontraban problemas con la carga de la batería y con las salidas reguladas a 5 V y 3,3 V. En el caso de la carga de la batería, se observó que esta no se estaba realizando, lo que indicaba que el controlador de carga no estaba funcionando correctamente. En cuanto a las salidas reguladas, se encontró que la salida a 5 V no estaba proporcionando tensión necesaria y la salida a 3,3 V no presentaba ninguna tensión. Para corregir estos problemas se ha procedido a revisar detalladamente el circuito y se ha realizar una serie de ajustes y modificaciones en los componentes necesarios.

4.4.1. Salida regulada PMID

En la **Figura 32** se muestra el esquemático del controlador de carga extraído de su hoja de características. Como se puede ver, la tensión de entrada V_{bus} , que se refiere a la energía eléctrica suministrada al sistema, puede variar en un rango desde 3,9 V hasta 14 V. Por otro lado, el sistema cuenta con una salida regulada V_{sys} , que permite generar una tensión constante en el rango de 3,5 V a 4,5 V. Esta salida está diseñada para ajustarse a la tensión de entrada, lo que significa que, si la tensión de entrada varía dentro del rango de 3,9 V a 14V, la salida V_{sys} también se ajustará dentro del rango mencionado. De esta manera, se asegura que el sistema pueda funcionar de manera estable incluso si hay fluctuaciones en la tensión de entrada. Por último, la salida PMID, también regulada, está aparentemente diseñada para suministrar una tensión constante de 5V.

Simplified Schematic

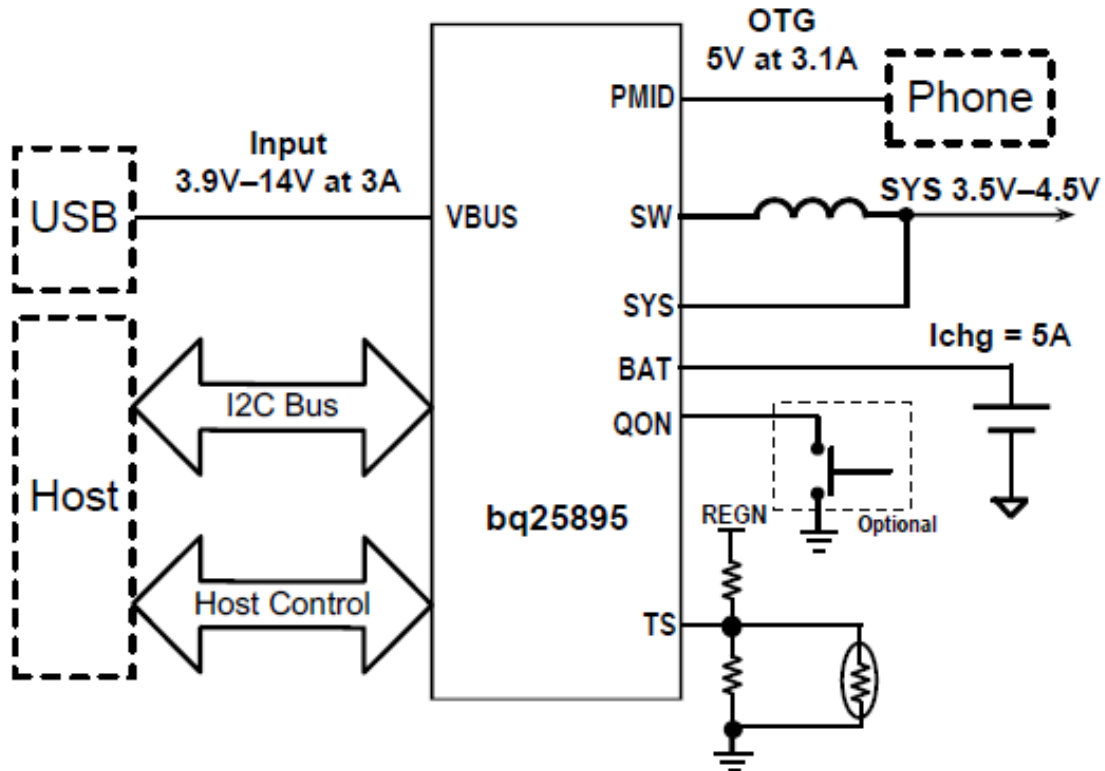


Figura 32 - Esquema simplificado del BQ25895

Sin embargo, al analizar la estructura interna del chip, como se puede apreciar en la **Figura 33**, se observa una conexión entre la entrada de voltaje Vbus y la salida PMID. Además, se ha implementado un mecanismo para desactivar la conexión mediante el uso de un RBFET (Field-Effect Transistor de bloqueo resistivo) llamado Q1. Esto implica que la salida PMID no esté regulada y que el funcionamiento real del sistema es que, cuando Vbus supera los 5V, la salida PMID proporcionará un voltaje similar a Vbus, por lo que no estará regulada y podrá variar entre 5V y 14V. Únicamente cuando Vbus no supera los 5V, se activa el modo boost que aumenta la tensión de salida de la batería, proporcionando una regulación de salida estable de 5 V en PMID.

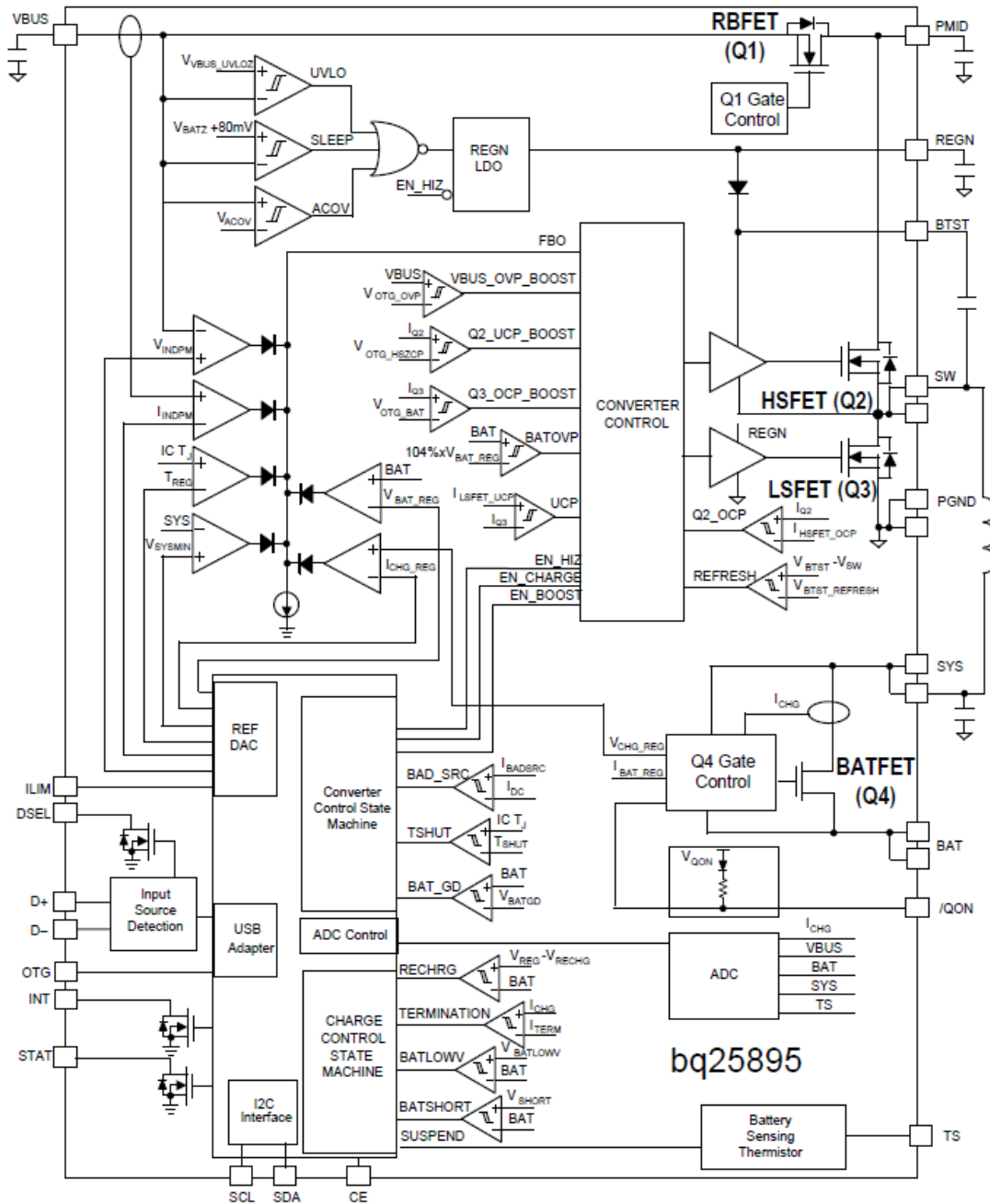


Figura 33 - Funcionamiento interno del BQ25895

4.4.2. Convertidor DC/DC

En relación con la salida regulada a 3,3 V, es importante señalar que no se está logrando generar la tensión esperada. La causa de este problema se debe a que la tensión del regulador PMID no se encuentra estable a 5 V, lo cual es una condición necesaria para el correcto funcionamiento del regulador. Se ha identificado que el regulador ISL91110IRNZ-T7A tiene una entrada máxima de 5,5 V. Debido a que la salida PMID no está regulada y las pruebas que se llevaron a cabo con una tensión Vbus de 12 V, el regulador dejó de operar.

4.4.3. Pin /CE conectada a pull - up

Durante el proceso de diseño, se ha seguido el diseño de la tarjeta de referencia en la que se recomendaba la inclusión de una resistencia de 10 k Ω entre el pin /CE y el pull-up. Sin embargo, esta configuración genera una tensión de 1,85 V en el pin /CE, lo que puede provocar el bloqueo de la carga de la batería si este pin no se conecta a GND. En consecuencia, si se sigue esta configuración, nunca se podría cargar la batería.

4.4.4. Elementos DNP

En el esquemático de referencia se etiquetaron algunos componentes como DNP, lo que se interpretó como una indicación de que eran opcionales y podían ser incluidos o no según la preferencia del diseñador. En consecuencia, se incluyeron todos los componentes DNP para lograr el mejor rendimiento posible del circuito. Sin embargo, después de hablar con el soporte del fabricante, se descubrió que la terminología DNP no implicaba necesariamente que los componentes fueran opcionales.

El término "DNP" en electrónica significa "Do Not Populate" (No Poblar, en español). Un componente DNP es un componente incluido en el diseño del circuito impreso pero que no se va a instalar en la placa. Se suele utilizar para facilitar la reutilización del mismo diseño en diferentes proyectos, permitiendo la flexibilidad en la selección de componentes según las necesidades específicas de cada proyecto. También puede ser utilizado para simplificar la gestión del inventario de componentes, ya que no es necesario comprar y almacenar componentes que no se van a utilizar en un proyecto en particular. Los componentes DNP se identifican en el esquemático y/o en la lista de materiales con la etiqueta "DNP" o una nota indicando que no deben ser instalados en la placa.

4.4.5. Limitación de corriente de entrada

En el esquemático del circuito diseñado, se estableció una conexión entre el pin D+ y el pin REGN mediante una resistencia de 10 k Ω , mientras que el pin D- se conecta al bus PG. Los pines D+ y D- son esenciales para detectar el tipo de cargador y limitar la corriente de entrada según la

Tabla 3. Sin embargo, en el caso de la placa diseñada, el panel solar es detectado como un adaptador desconocido, lo que implica que la corriente de entrada estará limitada a un máximo de 500 mA.

Para solucionar este problema, se debe desconectar los pines D+ y D- del resto de los buses y conectarlos entre sí. Esto permitirá que el circuito detecte el panel solar como DCP USB y limite la corriente de entrada de acuerdo con las especificaciones del panel solar.

Tabla 3 - Corriente máxima de entrada en función del tipo de cargador

Tipo de cargador	Corriente máxima admisible
CDP USB	1,5 A
DCP USB	3,25 A
DCP de alto voltaje ajustable	1,5A
Adaptador desconocido	500 mA
Adaptador no estándar	1 A / 2 A / 2,1 A / 2,4 A

4.4.6. Datasheet

Debido a errores en el datasheet del controlador de carga, el equipo de soporte del fabricante ha tenido que crear un archivo con los ajustes correctos que se deben emplear. Este documento indica los errores más comunes, así como diferentes parámetros que no quedan del todo claros en cuanto a su implementación y sus valores [63]. Este documento no se recibió hasta después de haber fabricado el diseño inicial.

4.5. Diseño final

Después de identificar los problemas durante las pruebas de carga de la batería y las salidas reguladas, se ha llevado a cabo un rediseño completo de la PCB para abordar las deficiencias detectadas. Se han realizado las modificaciones necesarias para corregir los errores y mejorar la eficiencia y confiabilidad del sistema.

Una de las mejoras significativas en el nuevo diseño de la PCB es la compactación del tamaño, que ha sido reducido a 4x4 cm. Esta reducción de tamaño tiene ventajas importantes, ya que permite un uso más eficiente del espacio en el dispositivo final donde se instalará la PCB. Además, un tamaño más compacto puede tener beneficios en términos de costos de producción, ya que reduce la cantidad de material utilizado y el tiempo de fabricación. Además, se han incluido ajustes en la disposición de los componentes, la optimización de las pistas de conexión y la corrección de errores de diseño previos.

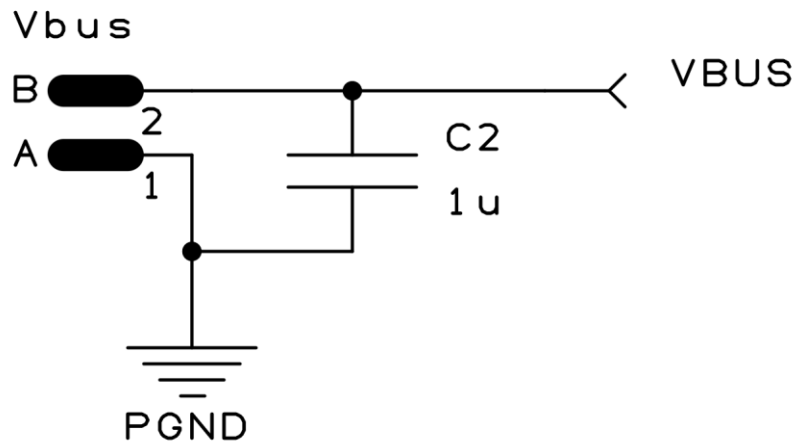
4.5.1. Esquemático

Para el rediseño del esquemático se ha mantenido el diagrama de la **Figura 15** con ligeras modificaciones. (**Anexo F – Diseño final del esquemático**)

4.5.1.1. Cambios en el diseño del esquemático

- Conexión del panel solar

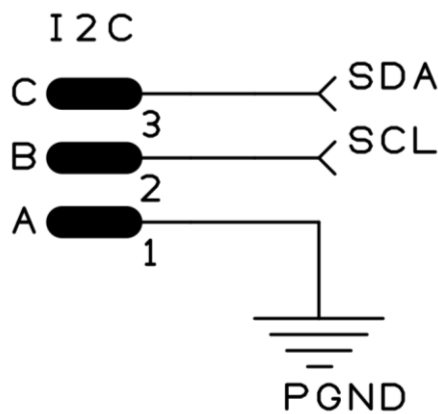
Se ha llevado a cabo una actualización en la cantidad y valor de los condensadores, siguiendo las recomendaciones del equipo de soporte del fabricante. **(Esquemático 15)**



Esquemático 15 - Conexión del panel solar final

- HOST

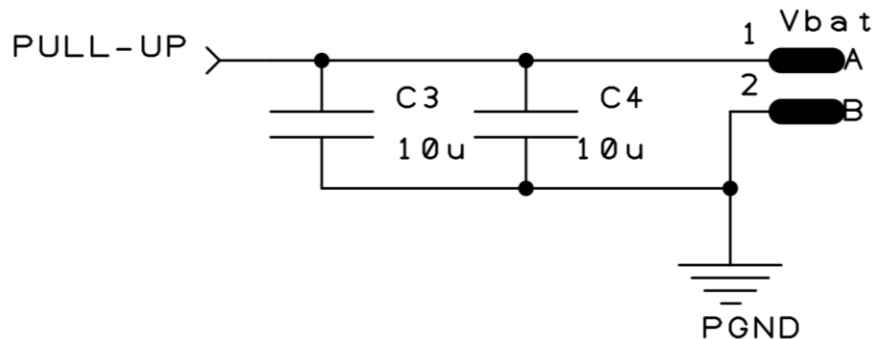
Se ha eliminado la conexión mediante molex y se ha reducido la cantidad de pines macho a 3 en la nueva versión de la PCB. Esto se debe a que la señal /CE se mantendrá siempre conectada a GND, lo cual ha permitido simplificar el diseño de la conexión. **(Esquemático 16)**



Esquemático 16 - Conexión host por pines macho final

- Conexión de la batería

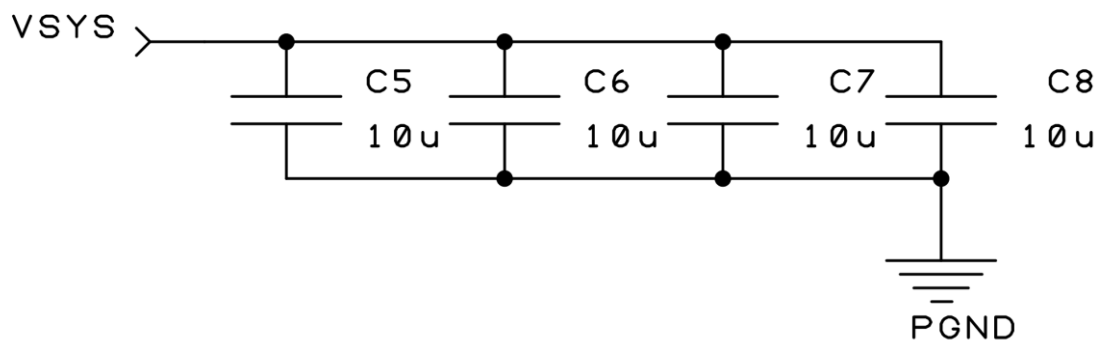
Se ha llevado a cabo una actualización en la cantidad y valor de los condensadores, siguiendo las recomendaciones del equipo de soporte del fabricante. **(Esquemático 17)**



Esquemático 17 - Conexión para la batería final

- Conexión de la salida regulada

Se ha llevado a cabo una actualización en la cantidad y valor de los condensadores, siguiendo las recomendaciones del equipo de soporte del fabricante. Además, se ha quitado a la salida directa. **(Esquemático 18)**



Esquemático 18 - Conexión de la salida regulada final

- Conexión de la salida de 5V

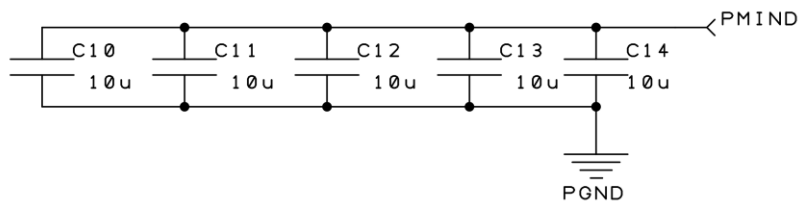
Para solucionar el problema de que la salida PMID no está regulada a 5V se ha decidido instalar un regulador DC/DC. Este regulador debe tener una entrada de voltaje entre 4 y 14 V, ser capaz de soportar una corriente de al menos 2 A, maximizar la eficiencia y minimizar el consumo en reposo. En la **Tabla 4** se presenta una comparación de varios convertidores comerciales. Los convertidores que cumplen los parámetros necesarios se indican en recuadros verdes, los que están en el límite se indican en recuadros amarillos, y los que no cumplen los parámetros necesarios se indican en recuadros rojos.

Tabla 4 - Comparativa reguladores DC/DC de 5 V

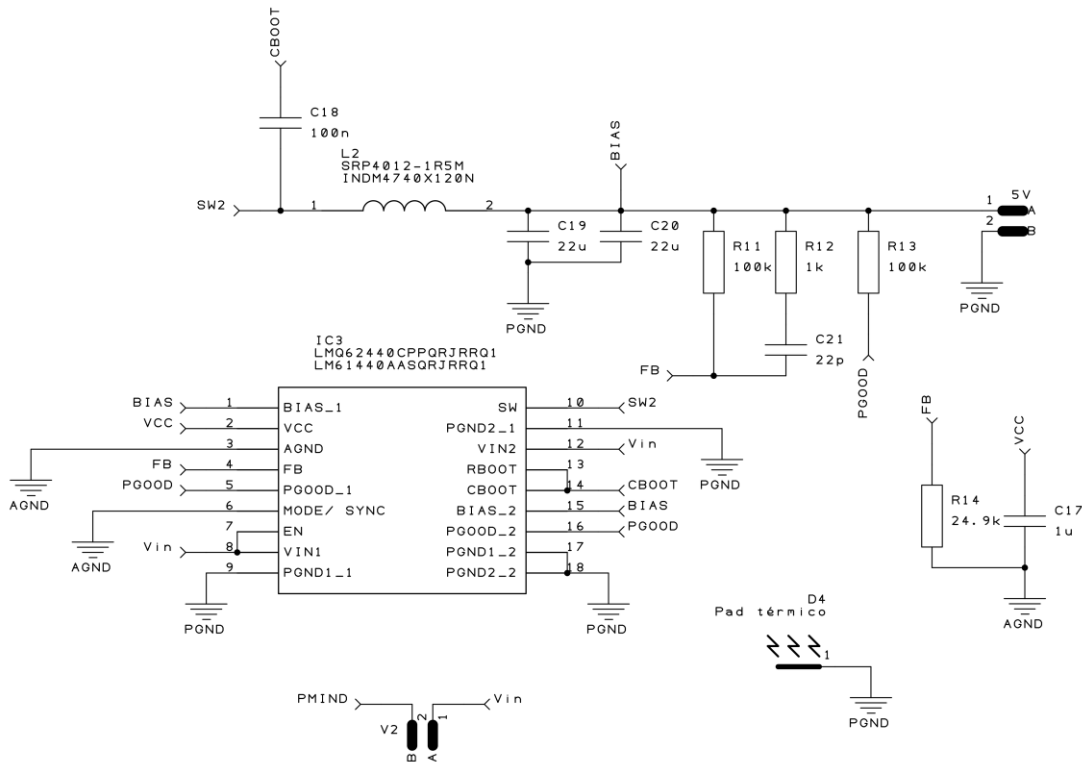
	Tensión de entrada (V)	Tensión de salida (V)	Corriente de salida (A)	Eficiencia (%)	Consumo en reposo (μ A)
LMQ62440CPPQRJRRQ1 [64]	3 – 36	5	4	> 93	0,6
MP28167GQ-P [65]	2,8 – 22	5	3	> 92	1000
MP28167GQ-Z [66]	2,8 – 22	5	3	> 92	1000
TPS630701RNMR [67]	2 – 16	5	3,6	> 90	54
TPS630701RNMT [68]	2 – 16	5	3,6	> 90	133

Se ha seleccionado el convertidor DC/DC LMQ62440CPPQRJRRQ1 del tipo Buck-boost como el regulador de voltaje. Este dispositivo es capaz de proporcionar una salida de voltaje constante de 5 V a partir de una entrada de voltaje de 3 a 3,6 V, lo que lo hace ideal para trabajar con la salida de PMID. Este convertidor es conocido por su alta eficiencia, lo que significa que convierte la energía de manera eficiente y minimiza las pérdidas de energía en forma de calor. Además, el LMQ62440CPPQRJRRQ1 consume muy poca potencia en reposo.

La parte del regulador de voltaje se divide en dos secciones principales: el filtro inicial (**Esquemático 19**) y el convertidor (**Esquemático 20**). Estas dos secciones están separadas físicamente en la PCB y se conectan a través de dos pines machos que se pueden puentear para activar la salida del regulador. El filtro inicial está diseñado para filtrar la entrada de voltaje y prepararla para ser procesada por el convertidor. Por otro lado, el convertidor es el circuito integrado que realiza la conversión de voltaje de entrada a la salida regulada de 5 V. La separación de estas dos secciones permite una mayor flexibilidad en el diseño y permite la activación o desactivación de la salida del regulador según sea necesario.



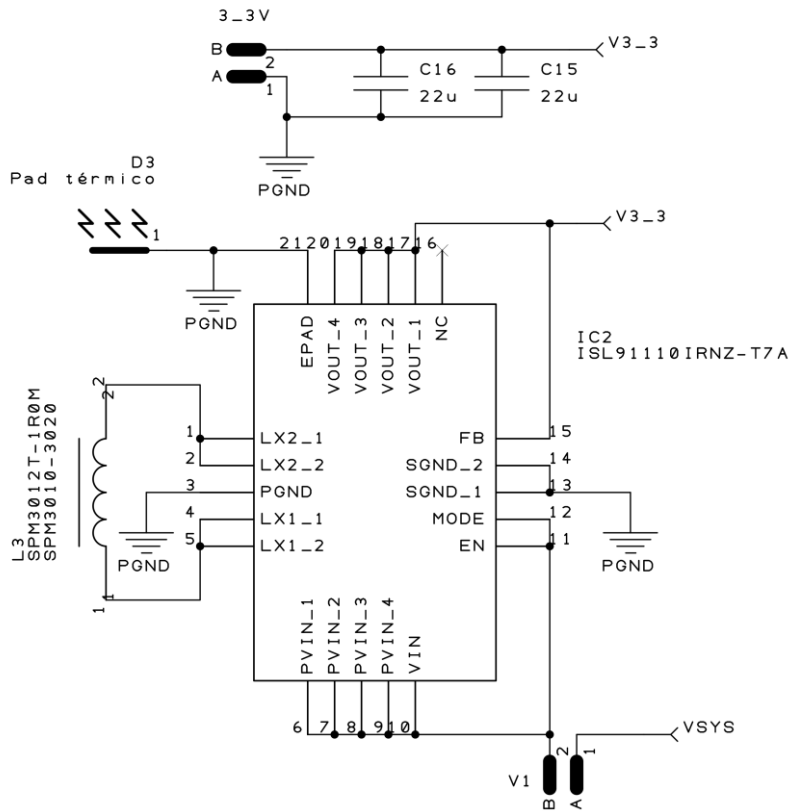
Esquemático 19 - Conexión de la salida de 5 V parte de filtrado



Esquemático 20 - Conexión de la salida de 5 V parte del convertidor DC/DC

- Conexión de la salida de 3,3V

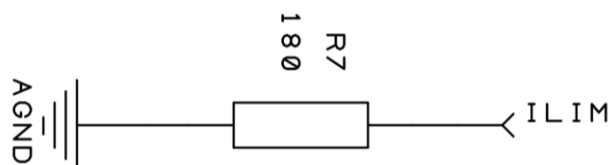
Se ha llevado a cabo una actualización en la cantidad y valor de los condensadores, siguiendo las recomendaciones del equipo de soporte del fabricante. Además, se ha quitado a la salida directa. Además, se ha cambiado la conexión al bus Vsys y se ha puesto dos pines macho para poder activar o desactivar esta salida. (Esquemático 21)



Esquemático 21 - Conexión de la salida 3,3 V final

- Limitador de corriente

Con el objetivo de reducir el tamaño de la PCB, se ha tomado la decisión de eliminar el potenciómetro y reemplazarlo por una resistencia de 180 Ω (Esquemático 22). Esta resistencia se ha utilizado para limitar la corriente a 2,1 A, con el fin de prevenir posibles fallos en el sistema. Esta modificación permite simplificar el diseño y optimizar el espacio en la PCB, al mismo tiempo que se asegura una corriente controlada y segura para el funcionamiento del regulador.



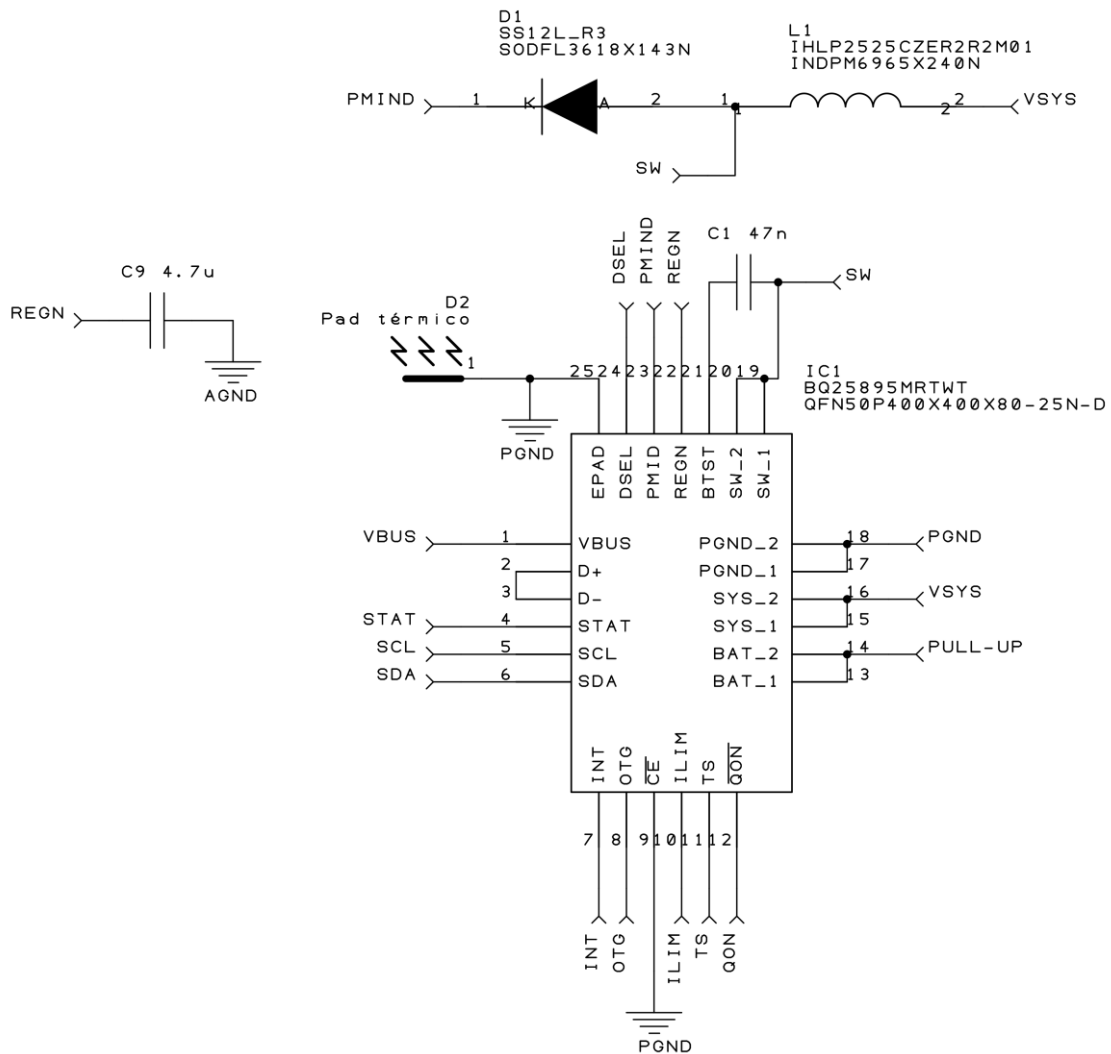
Esquemático 22 - Limitación de corriente final

- Pull – up

Se ha realizado una modificación en la conexión del pull-up en el diseño anterior, donde se tenía la opción de conectarlo a Vbus o Vbat mediante 3 pines macho. Ahora se ha decidido conectarlo permanentemente a Vbat, ya que Vbus no tiene tensión cuando el panel solar no genera energía. Esta actualización asegura una conexión adecuada en todo momento, evitando posibles errores en el funcionamiento del sistema cuando el panel solar no está generando energía.

- BQ25895

Se ha realizado una actualización en la cantidad y valor de los condensadores, siguiendo las recomendaciones del equipo de soporte del fabricante para mejorar el rendimiento del regulador. Además, se ha conectado el pin /CE a GND para mantenerlo siempre activo y se han cortocircuitado los pines D+ y D- para que el panel solar sea detectado como un cargador DCP USB. **(Esquemático 23)**



Esquemático 23 - Esquemático de la conexión del controlador de carga final

Todos los componentes utilizados están ordenados en el **Anexo G – Lista de componentes de la PCB final**.

4.5.2. PCB

Al igual que en el diseño inicial de la PCB, esta nueva versión se compone de 6 partes principales, tal como se puede observar en el **Anexo H – Diseño de PCB final**.

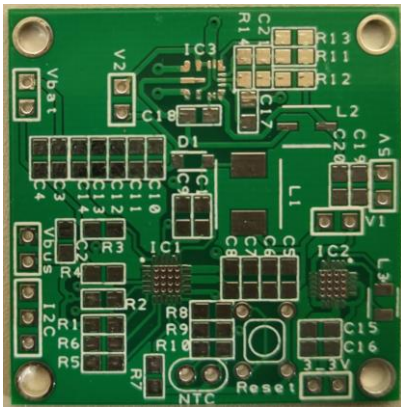


Figura 34 - PCB final por la parte de arriba

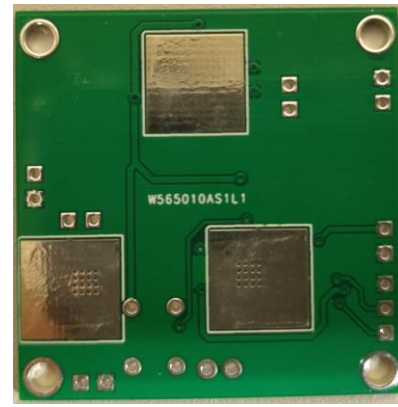


Figura 35 - PCB final por la parte de abajo

En la **Figura 34** y **Figura 35** se puede apreciar las distintas pistas que conforman la capa copper, las cuales se encargan de llevar la señal eléctrica a través de la placa. También se observan los pads metalizados de la capa solder mask, los cuales protegen la superficie de la placa durante el proceso de soldadura de los componentes electrónicos. Además, en estas figuras se puede apreciar la capa top silkscreen, la cual está formada por diferentes marcas y dibujos que se imprimen en la superficie de la placa. Estas marcas y dibujos sirven para indicar información relevante como la posición de los componentes, el valor de los resistores, la polaridad de los diodos, entre otros detalles importantes para el correcto funcionamiento de la placa.

Además, se ha mejorado el intercambio térmico entre los chips y los diferentes disipadores mediante un aumento del número de vías en el diseño de la PCB. Esto asegura una mejor disipación del calor generado durante la operación del regulador, lo cual contribuye a mantener una temperatura adecuada en el circuito y garantiza un funcionamiento óptimo en diferentes condiciones de carga y temperatura ambiente. (**Figura 36**)

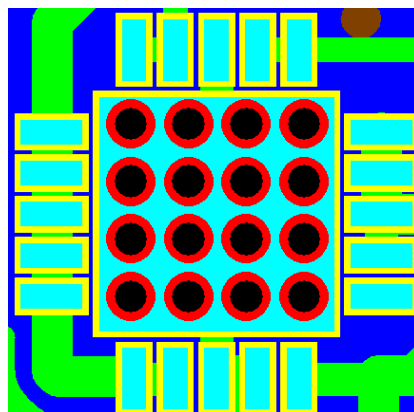


Figura 36 – Pads y vías de disipación de un circuito integrado final

5. Implementación del MPPT

5.1. Introducción

Es posible incorporar un seguimiento del punto de máxima potencia a este diseño. Para ello se requiere la adición de un controlador que se comuniquen con el controlador de carga a través del protocolo I2C y gestione el punto de operación del panel solar.

Para este proyecto, se ha optado por mostrar una implementación de dicho algoritmo usando un Arduino UNO como controlador. El Arduino UNO actuará como el controlador principal del MPPT, encargándose de leer la tensión y corriente del panel solar, calcular el punto de máxima potencia y controlar el funcionamiento del controlador de carga. Sin embargo, el firmware desarrollado es fácilmente portable a otros microcontroladores.

La adición de un MPPT en el sistema mejorará significativamente la eficiencia de carga del sistema, permitiendo aprovechar al máximo la energía generada por el panel solar y optimizando la carga de la batería.

5.2. Microcontrolador

Si se busca una implementación optimizada en términos de consumo de energía, será necesario realizar una reducción de componentes en el Arduino UNO para la incorporación en el sistema. Se puede considerar el uso de un diseño basado en el ATmega328p [31], circuito integrado del Arduino UNO (**Figura 37**). Este diseño utiliza un ATmega328P, un condensador electrolítico de 10 μ F, un cristal de cuarzo de 16 MHz, 2 condensadores cerámicos de 22 pF y una resistencia de 10 k Ω . [69]

Comparado con el Arduino UNO, que consume aproximadamente 46 mA, el ATmega328p por sí solo consume solo 2,7 mA, lo que representa una reducción significativa en el consumo de energía. Además, este circuito utiliza menos componentes, lo que simplifica el diseño y reduce el espacio en la PCB. Aunque, es posible reducir todavía más el consumo si se reduce la alimentación a 3,3V con una frecuencia de operación a 8MHz, se ha optado por no realizarlo ya que el entorno de desarrollo de Arduino está basado en una frecuencia de reloj de 16MHz, lo que podría provocar problemas con la programación.

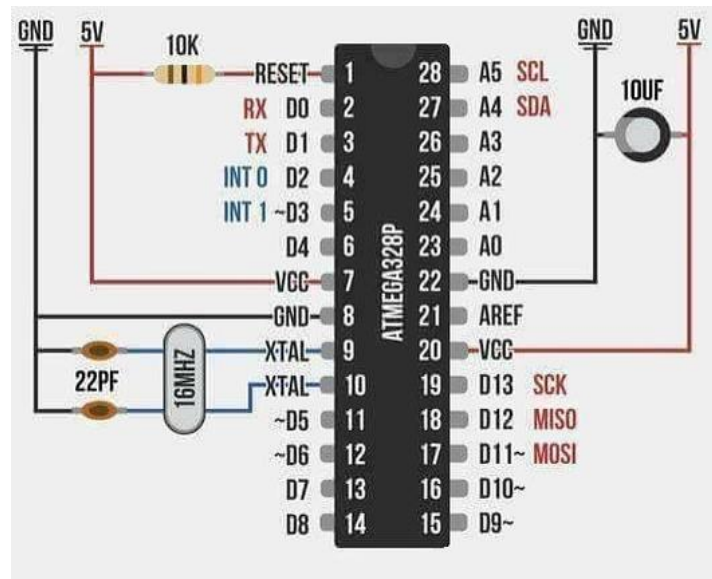


Figura 37 - Montaje del circuito para un ATmega328p

5.2.1. Componentes para el ATmega328p

En el diseño del circuito utiliza varios componentes:

- El condensador electrolítico de 10 μF cumple la función de filtro de la tensión de alimentación, ayudando a suavizar y estabilizar la tensión suministrada al microcontrolador.
- La resistencia de 10 $\text{k}\Omega$ actúa como una resistencia limitadora de corriente en el circuito, controlando la corriente que fluye a través de ciertos componentes y asegurando un funcionamiento seguro y estable.
- El cristal de cuarzo de 16 MHz se utiliza como un oscilador de frecuencia para generar señales de tiempo precisas y estables. La frecuencia de 16 MHz es una frecuencia estándar utilizada en muchos sistemas electrónicos y permite una sincronización precisa en la operación del microcontrolador.
- Los condensadores cerámicos de 22 pF se utilizan en la configuración del cristal de cuarzo para ajustar la frecuencia de resonancia del cristal y estabilizar su oscilación. Estos condensadores forman parte del circuito resonante del oscilador y ayudan a mantener la frecuencia de resonancia del cristal dentro de los límites especificados, asegurando una operación precisa y estable del oscilador.

5.2.2. Programación de un ATmega328p

Para programar el microcontrolador ATmega328P se puede utilizar un Arduino UNO como programador. Esto se logra utilizando el Arduino UNO como un programador ISP (In-System Programmer), que permite cargar códigos y grabar el bootloader en cualquier Arduino u otras tarjetas basadas en AVR. El proceso de programación con Arduino ISP implica cargar el sketch "ArduinoISP" en el Arduino UNO y luego conectarlo a la PCB utilizando cables jumper. Una vez conectados los cables, se puede usar el IDE de Arduino para cargar el programa en el microcontrolador de la PCB.

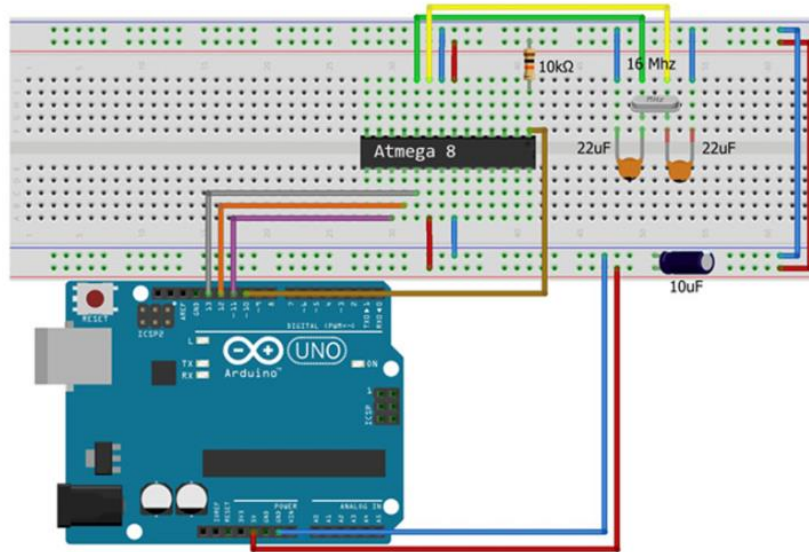


Figura 38 - Montaje del Arduino ISP para programar un ATmega328p

Para programar un microcontrolador utilizando el Arduino ISP, es necesario conectar el Arduino ISP al microcontrolador objetivo mediante los pines MISO, MOSI, SCK, RST y VCC/GND (**Figura 38**). Una vez conectado, se debe configurar el Arduino ISP como programador en el software de Arduino IDE y seleccionar el tipo de microcontrolador que se va a programar. Luego, se carga el código en el Arduino ISP utilizando la opción "Cargar el código de ejemplo" en el menú "Archivo". Una vez cargado el código, se selecciona la opción "Herramientas > Programador > Arduino ISP" en el menú del software de Arduino IDE y se carga el código en el microcontrolador objetivo utilizando la opción "Subir utilizando programador" en el menú "Sketch". [70] [71]

5.3. Configuración de registros por I2C

Para implementar el algoritmo de MPPT se va a seguir el procedimiento descrito en TIDA-01556 de Texas Instruments [72], realizando la adaptación de la carga a la curva de la **Gráfica 2** para optimizar el punto de máxima potencia (MPP) del panel solar. El MPP varía en función de la intensidad de la luz solar y la temperatura, y el objetivo es ajustar VINDPM para que se adapte a estas variables y maximice la potencia transmitida del panel a la carga. Al hacerlo, se garantiza una carga más eficiente y un aprovechamiento máximo de la energía solar disponible. Para ello, el microcontrolador ATmega328P se encargará de leer y escribir en los registros del BQ25895. Todos los registros del BQ25895 y su función se encuentran detallados en el **Anexo I – Listado de registros del BQ25895**.

En el **Anexo J – Código de Arduino para la implementación del MPPT** se puede encontrar el código de programación para el microprocesador ATmega328p.

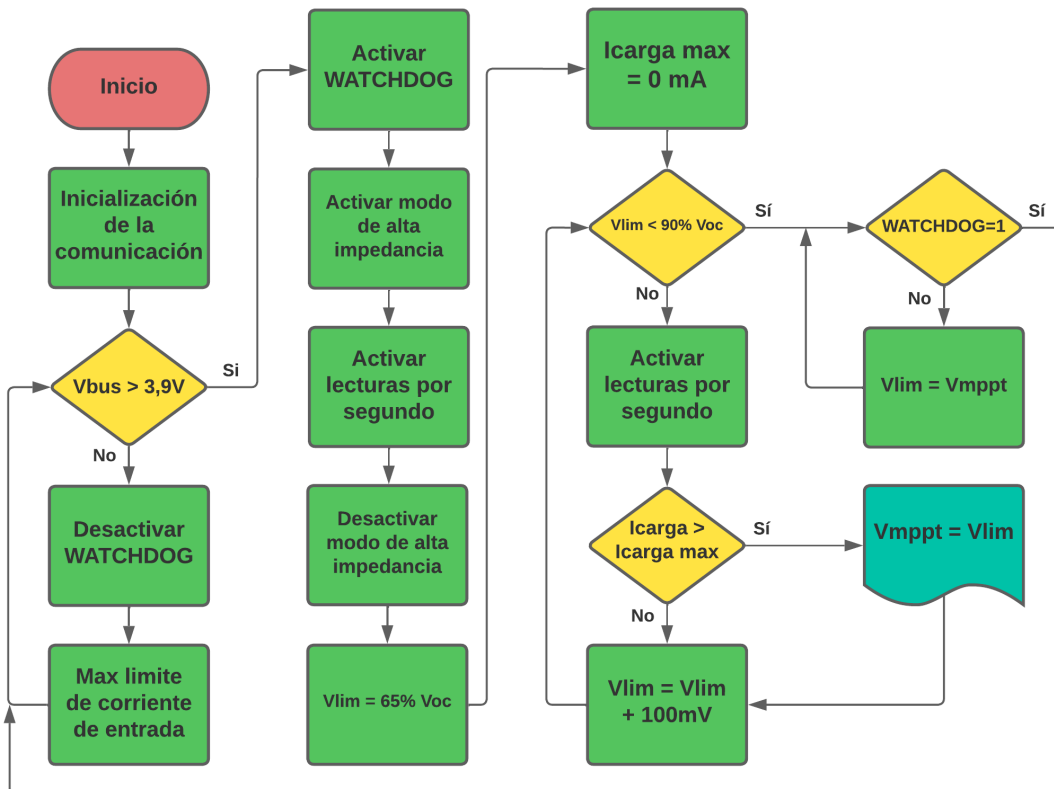


Diagrama de flujo 2 – Código para implementar el MPPT

Como se puede ver en el Diagrama de flujo 2, el firmware de Arduino establecerá una comunicación con un dispositivo BQ25895 mediante el protocolo de comunicación I2C empleando la librería "Wire.h". Tras esto se comprueba si la tensión en Vbus es suficiente para alimentar al sistema y, si no es así, se desactiva el watchdog y se deslimita la corriente de entrada. A continuación, una vez la tensión en Vbus es superior a 3,9 V se activa el watchdog, el modo de alta impedancia de entrada y la medición de lecturas cada segundo. Tras esto se desactiva el modo de alta impedancia de entrada y se limitan la tensión de entrada (V_{lim}) al 65 % de la tensión de circuito abierto (V_{oc}) del panel solar y la corriente de carga de la batería a 0 mA. A continuación se entra en un bucle en el que se va aumentando el valor V_{lim} hasta alcanzar el 90 % de la V_{oc} , ya que la tensión de MPPT siempre se encuentra entre el 65% y 90% de la V_{oc} . Se suman 100 mV cada vez que se ejecuta el bucle, a la vez se almacena como valor V_{mppt} el valor de V_{lim} max alto que haya conseguido proporcionar mas corriente (I_{carga}) que la corriente de carga máxima ($I_{carga\ max}$). Por último, se entra en un bucle en el que se configura la V_{lim} con el valor de V_{mppt} hasta que salte el watchdog y se reinicie el sistema.

6. Resultados obtenidos

6.1. Introducción

Tras el montaje de la PCB final, se detectaron algunos problemas que se tuvieron que solucionar para garantizar el correcto funcionamiento del sistema. Además, debido a una limitación de tiempo, se decidió reemplazar el panel solar por una fuente de alimentación en las pruebas. Para asegurar que los resultados obtenidos eran precisos, se realizaron pruebas simultáneas tanto con la PCB desarrollada como con la placa Solar Power Manager 9-12-18 V de DFRobot. Este enfoque permitió comparar el rendimiento de ambas placas en diferentes situaciones y verificar que la placa desarrollada era capaz de cumplir con los requisitos del proyecto.

6.2. Problemas encontrados en la placa final

- Convertidor DC/DC 5 V

Durante el proceso de diseño de la placa final, se decidió incluir el regulador LMQ62440CPPQRJRRQ1. Posteriormente, se mandó a fabricar la placa y se esperó su llegada. Una vez que la PCB fue fabricada, se procedió a comprar los componentes necesarios para su ensamblaje. Sin embargo, se descubrió que el stock de este convertidor estaba agotado en los proveedores disponibles en ese momento, lo que generó un inconveniente en el proceso de ensamblaje. Se ha optado por llevar a cabo el montaje sin este componente, no disponiendo por tanto de salida regulada de 5V en la placa final.

- Convertidor DC/DC 3,3 V

El diseño del regulador ISL91110IRNZ-T7A se mantuvo igual en comparación con el diseño de la placa original. Sin embargo, en la placa original no se pudo probar el funcionamiento debido a los errores mencionados en el apartado **4.4 Problemas encontrados**. Durante la revisión del diseño, se descubrió que había un error en la conexión del pin mode que estaba conectado a Vsys en lugar de a PGND (**Figura 39**). Desafortunadamente, este error no se pudo corregir en la placa porque la pista estaba ubicada debajo del regulador mismo.

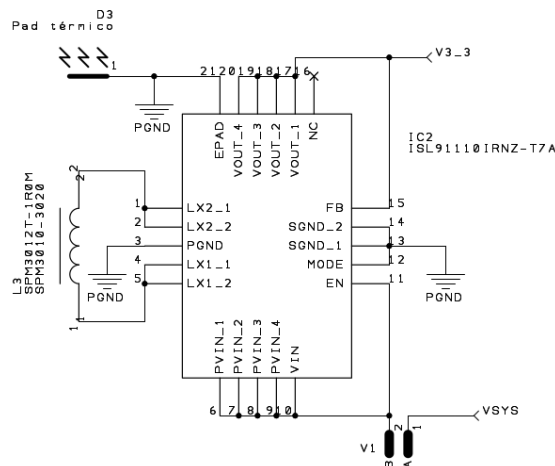
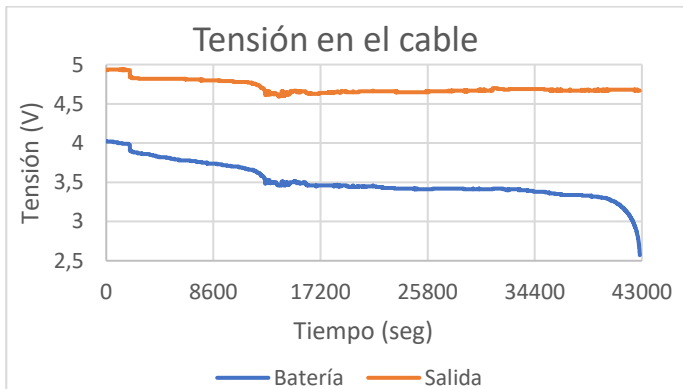


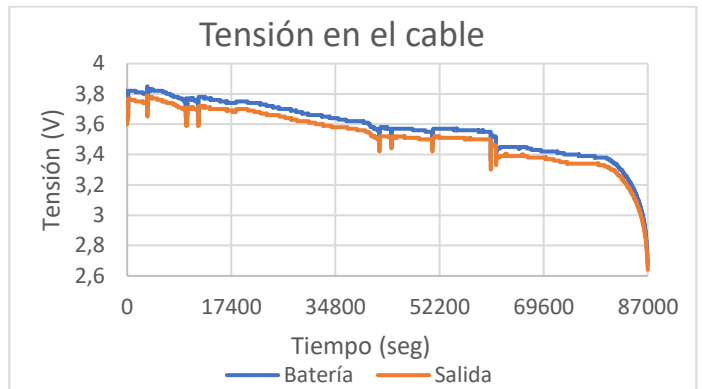
Figura 39 - Corrección del esquemático del convertidor DC/DC 3,3 V

6.3. Prueba de descarga

Se llevaron a cabo varias pruebas para evaluar el desempeño de la PCB final. Una de ellas fue la prueba de descarga, en la cual se utilizó una batería completamente cargada de 2000 mAh y 3,7 V, a la que se le agregó una resistencia de 47 Ω de 1 W para imitar la descarga. Durante la prueba, se midieron la tensión y la corriente de la batería mediante el INA3221 y el Arduino UNO. Tras completar la prueba de descarga, se generaron tres gráficos para cada placa que permiten analizar el comportamiento de la batería durante la descarga. Estos gráficos ilustran cómo la tensión y la corriente de la batería varían con el tiempo y son de gran utilidad para evaluar el desempeño del controlador MPPT.

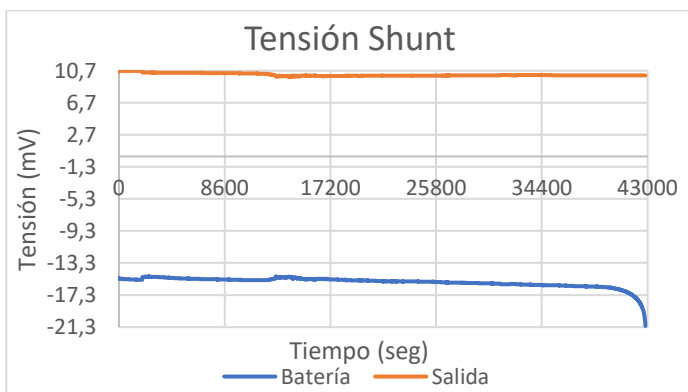


Gráfica 15- Tensión en el cable en la prueba de descarga de la placa DFRobot



Gráfica 16 - Tensión en el cable en la prueba de descarga de la placa desarrollada

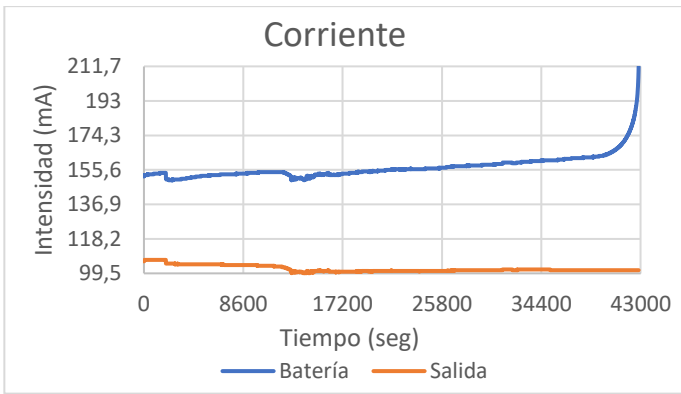
Para esta prueba en la placa desarrollada, se usó la salida regulada, V_{sys} , en función de la tensión de entrada, lo que significa que la tensión en la salida disminuyó a medida que disminuía la tensión en la entrada. Esto se debió a la imposibilidad de utilizar los convertidores DC/DC.



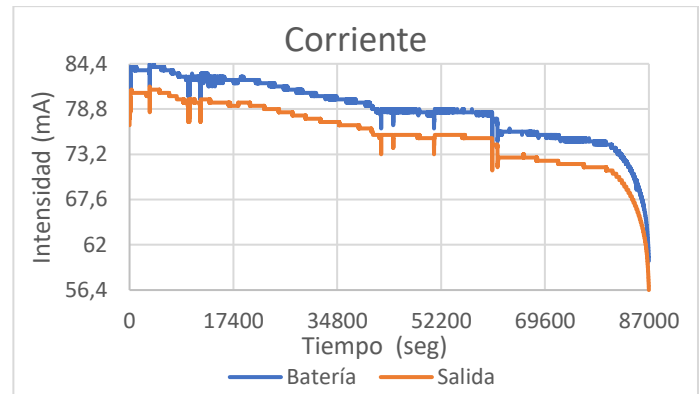
Gráfica 17 - Tensión Shunt en la prueba de descarga de la placa DFRobot



Gráfica 18 - Tensión Shunt en la prueba de descarga de la placa desarrollada



Gráfica 19- Corriente en la prueba de descarga de la placa DFRobot



Gráfica 20- Corriente en la prueba de descarga de la placa desarrollada

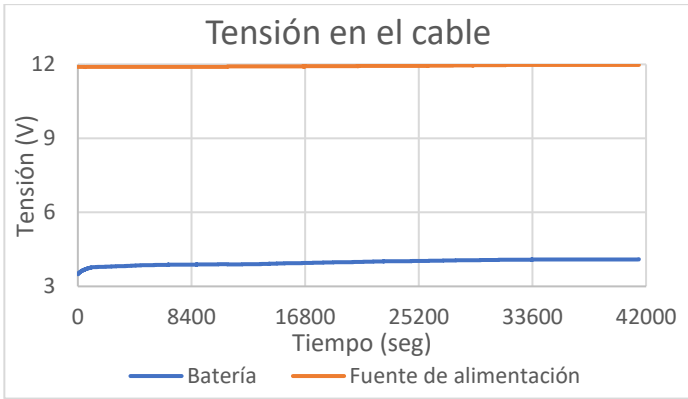
Durante la prueba realizada en la placa de DFRobot, se pudo observar que mantuvo una tensión de salida estable en el rango de 5 a 4,5V durante las 11 horas y 54 minutos que duró la prueba, con una medición realizada cada 8 segundos. En promedio, la potencia proporcionada por la batería fue de 551,33 mW, mientras que la consumida en la salida fue de 480,42 mW, lo que resultó en una eficiencia del 87,14 %. Sin embargo, para lograr esta estabilidad en la tensión de salida, la batería tuvo que proporcionar una mayor corriente, lo que redujo su eficiencia y el tiempo que pudo alimentar la carga.

Por otro lado, en la placa desarrollada, la prueba duró 24 horas y 10 minutos con una medición realizada cada 8 segundos. En promedio, la potencia proporcionada por la batería fue de 281,99 mW, mientras que la consumida en la salida fue de 266,94 mW, lo que resultó en una eficiencia del 94,66 %. Es importante destacar que, a diferencia de la placa de DFRobot, la placa desarrollada logró mantener una alta eficiencia mientras regulaba la tensión de salida en función de la tensión de entrada, ya que no se disponía de los convertidores DC/DC.

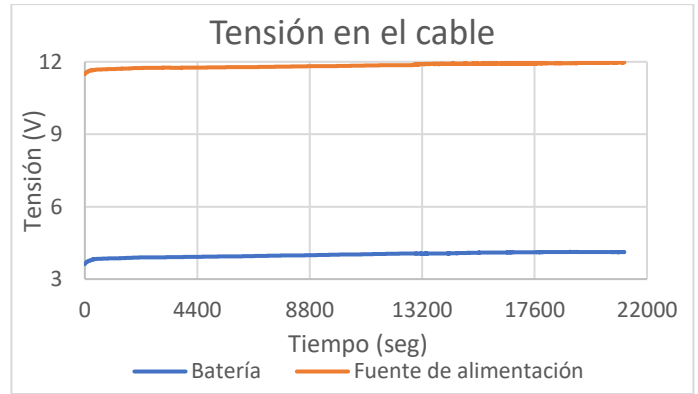
6.4. Prueba de carga

Se llevó a cabo la prueba de carga en la placa desarrollada para comprobar su capacidad para cargar la batería de manera eficiente. La fuente de alimentación suministrada tenía una capacidad de 12V y 2000mA, lo que permitió cargar la batería descargada de 2000mAh y 3,7V. Antes de iniciar la prueba, se aseguró de que la salida estuviera sin carga para evitar el consumo de la batería. Este tipo de pruebas son esenciales para evaluar la eficiencia de la placa de carga y determinar el tiempo necesario para una carga completa.

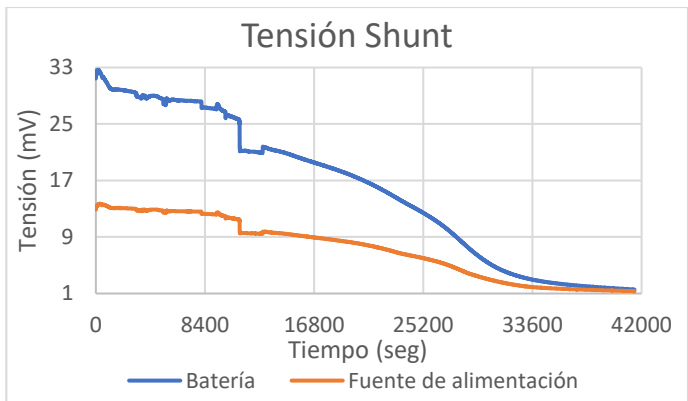
Durante la prueba, se midieron la tensión y la corriente de la batería en cada momento con el INA3221 y el Arduino UNO, lo que permitió obtener una medición precisa de la carga. Al finalizar la prueba, se generaron tres gráficas por cada placa que mostraron la evolución de la tensión y la corriente de la batería en el tiempo, lo que permitió analizar el comportamiento de la batería durante la carga.



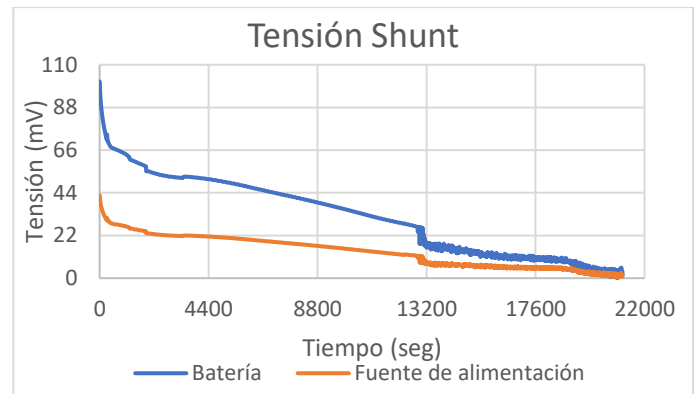
Gráfica 21 - Tensión en el cable en la prueba de carga de la placa de DFRobot



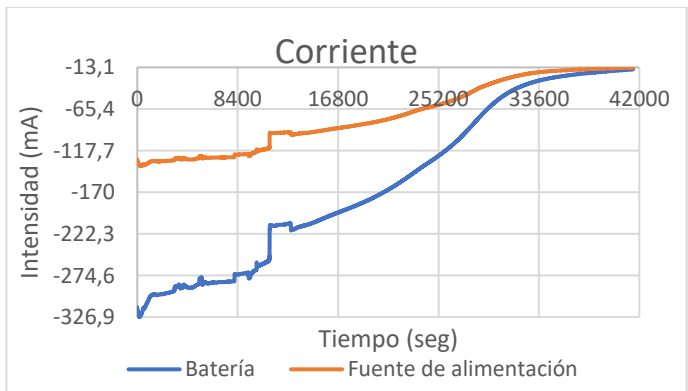
Gráfica 22 - Tensión en el cable en la prueba de carga de la placa de desarrollada



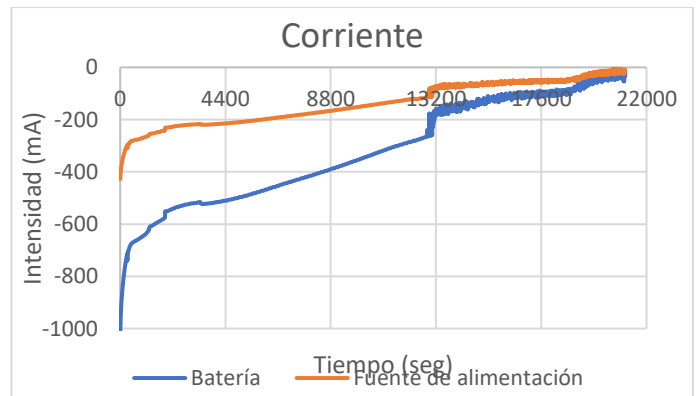
Gráfica 23 - Tensión Shunt en la prueba de carga de la placa de DFRobot



Gráfica 24 - Tensión Shunt en la prueba de carga de la placa de desarrollada



Gráfica 25 - Corriente en la prueba de carga de la placa de DFRobot



Gráfica 26 - Corriente en la prueba de carga de la placa de desarrollada

Durante la prueba de carga en la placa de DFRobot, se obtuvieron resultados donde la duración total fue de 11 horas y 31 minutos, con mediciones realizadas cada 8 segundos. La potencia promedio suministrada por la fuente de alimentación fue de 868,08 mW, mientras que la potencia promedio consumida por la batería fue de 621,07 mW, lo que resultó en una eficiencia del 71,54 %.

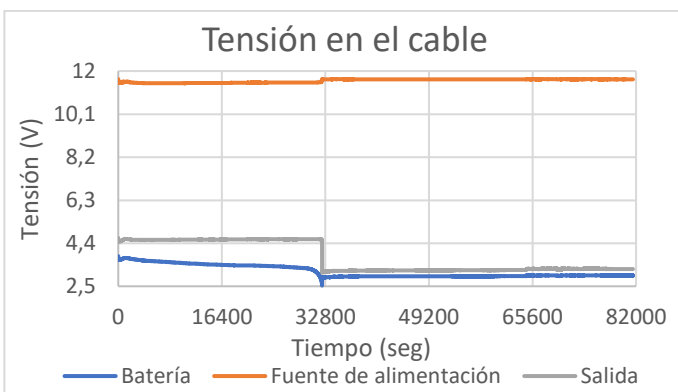
Por otro lado, en la placa desarrollada, la duración total de la prueba fue de 5 horas y 52 minutos, con mediciones realizadas cada 8 segundos. La potencia promedio suministrada por la fuente de alimentación fue de 1638,85 mW, mientras que la potencia promedio consumida por la batería fue de 1283,49 mW, lo que resultó en una eficiencia del 78,32 %.

Estos resultados demuestran que la placa desarrollada, que incorpora la función de carga rápida de baterías, ofrece un mejor desempeño en términos de eficiencia y tiempo de carga en comparación con la placa de DFRobot. La capacidad de entrada de corriente mayor de la placa desarrollada permite una carga más rápida y eficiente de la batería, lo cual es beneficioso en aplicaciones que requieren una recarga rápida y un suministro de energía constante. Además, la estabilidad de la corriente garantiza un funcionamiento más eficiente y confiable del sistema en su conjunto.

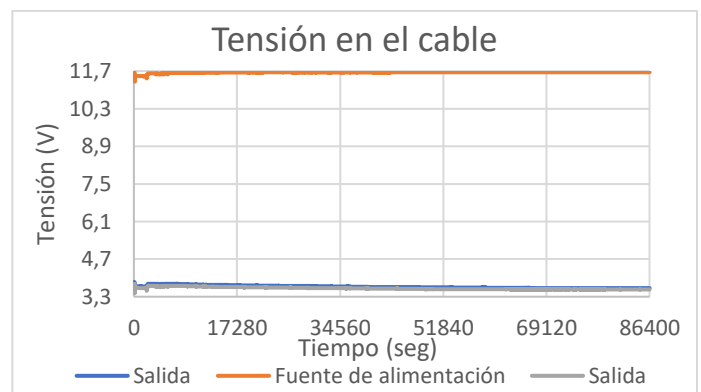
6.5. Prueba de carga – descarga subalimentada

Durante la prueba de carga-descarga subalimentada, se utilizó una configuración específica con una fuente de alimentación de 12 V y 100 mA y una batería de 2000 mAh y 3,7 V completamente cargada. Además, se colocó una resistencia de 15 Ω de 5 W en la salida para garantizar un consumo constante de energía, lo que significa que el consumo de la carga es superior al aportado por la fuente de alimentación y la batería tuvo que aportar energía para alimentar la carga. En cuanto a la placa desarrollada, se utilizó la salida regulada, V_{sys} , en función de la tensión de entrada, ya que no se pudieron utilizar los convertidores DC/DC. Como resultado, la tensión en la salida disminuyó según disminuía la tensión en la entrada.

En este ensayo, se midieron la tensión y la corriente de la batería con el INA3221 y el Arduino UNO para hacer un seguimiento preciso del proceso de carga. La limitación de la fuente de alimentación a 100 mA permitió observar cómo la batería suministraba energía para la carga de forma simultánea.



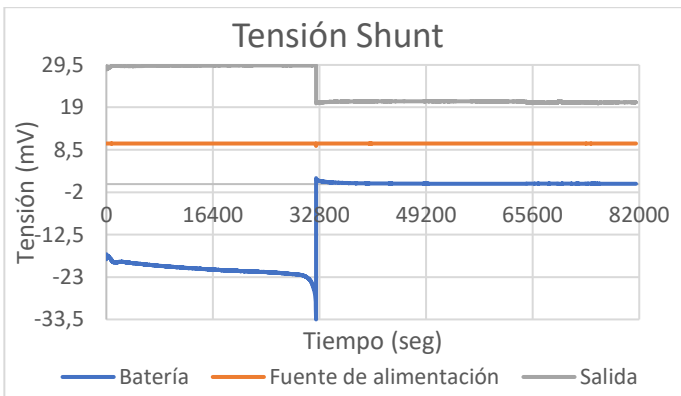
Gráfica 27 - Tensión en el cable en la prueba de carga-descarga subalimentada de la placa de DFRobot



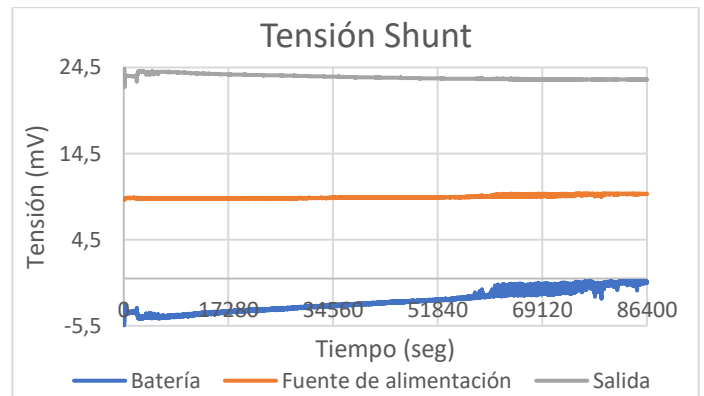
Gráfica 28 - Tensión en el cable en la prueba de carga-descarga subalimentada de la placa de desarrollo

La diferencia en el comportamiento de la tensión de salida entre ambas placas se debe a la presencia de los convertidores DC/DC en la placa de DFRobot, que permiten mantener una tensión de salida estable independientemente de la tensión de entrada o la carga conectada. En cambio, la placa diseñada utiliza la regulación de la tensión de salida en función de la tensión de entrada, lo que hace que la tensión de salida disminuya progresivamente a medida que disminuye la tensión de la batería.

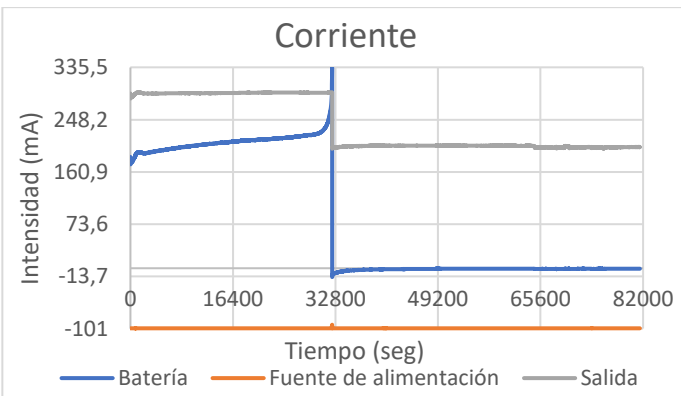
Es importante tener en cuenta que esta diferencia en el comportamiento de la tensión de salida puede tener un impacto en el funcionamiento de algunos dispositivos conectados a la salida de la placa, especialmente aquellos que requieren una tensión de alimentación estable y constante.



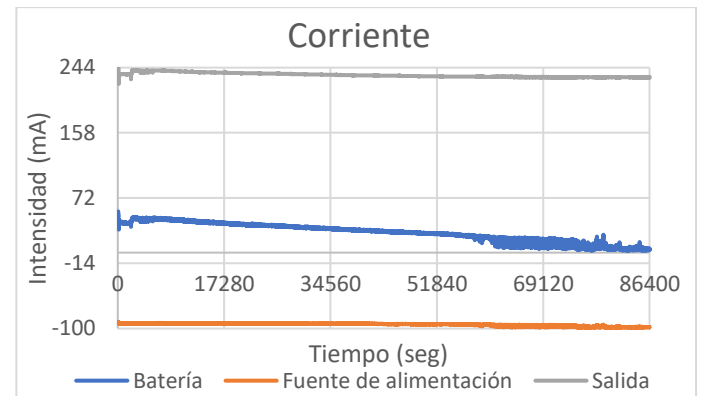
Gráfica 29 - Tensión Shunt en la prueba de carga-descarga subalimentada de la placa de DFRobot



Gráfica 30 - Tensión Shunt en la prueba de carga-descarga subalimentada de la placa de desarrollada



Gráfica 31 - Corriente en la prueba de carga-descarga subalimentada de la placa de DFRobot



Gráfica 32 - Corriente en la prueba de carga-descarga subalimentada de la placa de desarrollada

Durante las pruebas de carga realizadas en ambas placas electrónicas, se observaron algunas diferencias significativas en cuanto al rendimiento y eficiencia energética. En la placa de DFRobot, la prueba de carga duró 22 horas y 39 minutos, durante los cuales se hicieron mediciones cada 8 segundos. Durante la prueba, se midió la potencia proporcionada por la fuente de alimentación, que en promedio fue de 1162,74 mW, mientras que la potencia media consumida por la carga fue de 897,26 mW. La batería, por otro lado, proporcionó una potencia media de 260,34 mW, lo que resultó en una eficiencia energética de aproximadamente 63,05 %.

Por otro lado, en la placa desarrollada, la prueba de carga duró 24 horas y se hicieron mediciones cada 8 segundos. Durante la prueba, se midió la potencia proporcionada por la fuente de alimentación, que en promedio fue de 1103,9 mW, mientras que la potencia media consumida por la carga fue de 845,08 mW. La batería proporcionó una potencia media de 90,61 mW, lo que resultó en una eficiencia energética de aproximadamente 70,39 %.

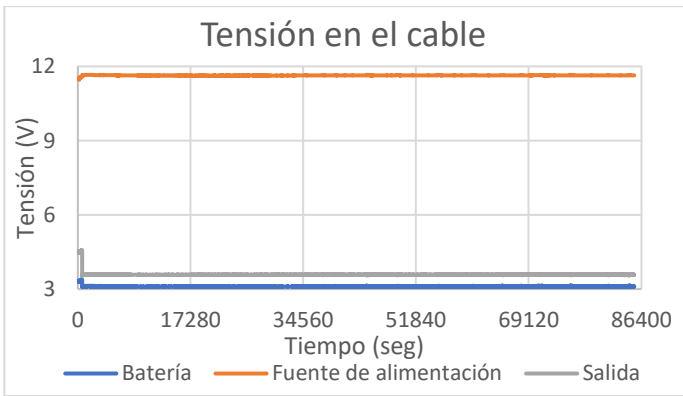
La placa de DFRobot consumió la batería en aproximadamente 9 horas y media, mientras que en la placa desarrollada la batería duró aproximadamente 24 horas. Además, al desconectar la batería en la placa de DFRobot, se apreció una caída abrupta en la tensión de salida, mientras que, en la placa desarrollada, la disminución de la tensión de salida fue más progresiva y con una menor variación.

6.6. Prueba de carga – descarga sobrealimentada

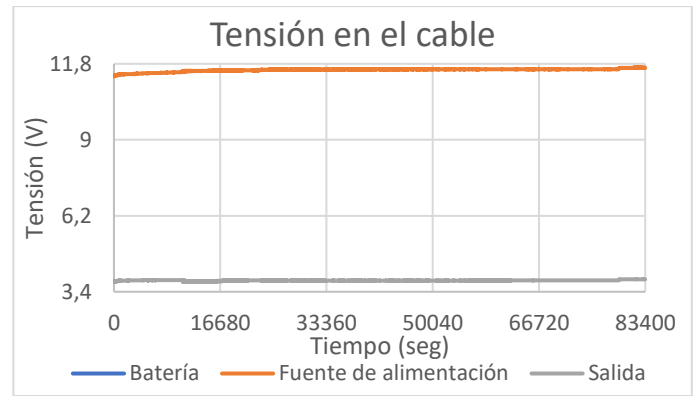
Durante la prueba de carga-descarga sobrealimentada, se buscó simular un escenario en el que se cuenta con una fuente de alimentación más potente que la capacidad de la batería. Para ello, se utilizó una fuente de alimentación de 12 V y 2000 mA, lo que permitió suministrar energía a la carga mientras se cargaba la batería. En esta prueba se empleó una batería completamente descargada de 2000 mAh y 3,7 V, y se colocó una resistencia de 15 Ω de 5 W en la salida para garantizar un consumo constante de energía. Además, se utilizó el INA3221 y el Arduino UNO para medir la tensión y la corriente de la batería, lo que permitió hacer un seguimiento preciso del proceso de carga.

En el caso de la placa desarrollada, se utilizó la salida regulada, V_{sys} , en función de la tensión de entrada en la placa desarrollada. Esto significa que la tensión en la salida disminuirá según disminuya la tensión en la entrada. Esta fue una solución encontrada debido a la imposibilidad de utilizar los convertidores DC/DC.

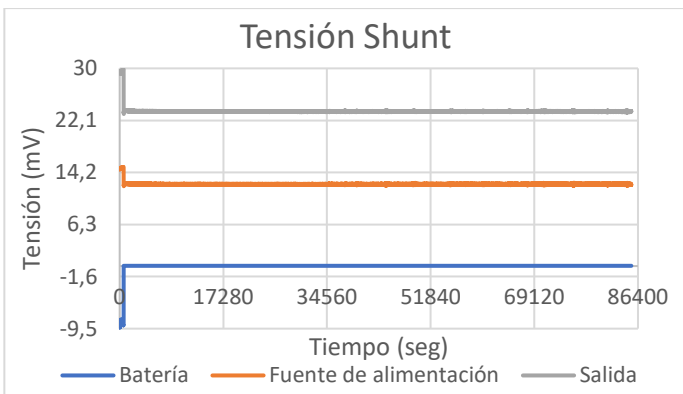
Durante la prueba de carga-descarga en la placa de DFRobot, se observaron resultados inesperados y se decidió repetir la prueba para confirmar los datos obtenidos. En ambas ocasiones, se registraron los mismos resultados, lo que indica que los resultados obtenidos son consistentes.



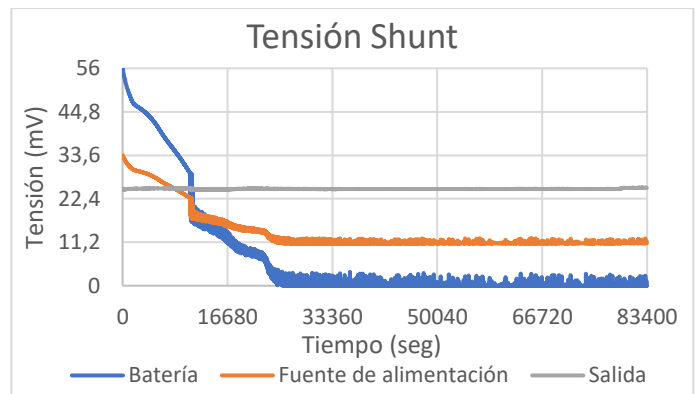
Gráfica 33 - Tensión en el cable en la prueba de carga-descarga sobrealimentada de la placa de DFRobot



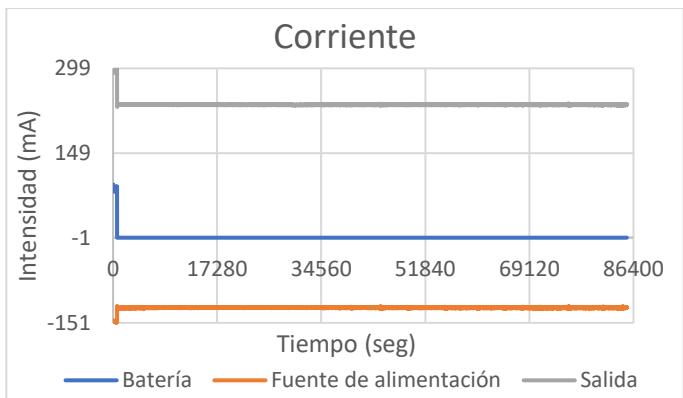
Gráfica 34 - Tensión en el cable en la prueba de carga-descarga sobrealimentada de la placa de desarrollada



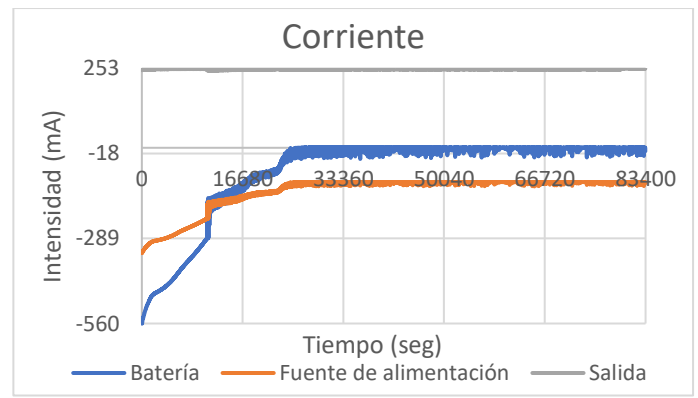
Gráfica 35 - Tensión Shunt en la prueba de carga-descarga sobrealimentada de la placa de DFRobot



Gráfica 36- Tensión Shunt en la prueba de carga-descarga sobrealimentada de la placa de desarrollada



Gráfica 37 - Corriente en la prueba de carga-descarga sobrealimentada de la placa de DFRobot



Gráfica 38 - Corriente en la prueba de carga-descarga sobrealimentada de la placa de Desarrollada

Durante la prueba de carga-descarga en la placa de DFRobot, se observó un comportamiento inesperado en relación a la carga de la batería. A pesar de que la batería estaba casi descargada al inicio de la prueba, en lugar de cargarla, la placa de DFRobot utilizó la corriente residual almacenada en la batería hasta que se agotó por completo. Este fenómeno resultó en una disminución brusca en la tensión de salida de la placa.

La prueba en la placa de DFRobot tuvo una duración de 22 horas y 59 minutos, con mediciones realizadas cada 8 segundos. Durante esta prueba, se encontró que la potencia proporcionada por la fuente de alimentación tuvo un promedio de 1481,42 mW, mientras que la batería consumió en promedio 11,11 mW y la carga utilizó 854,38 mW. Esto dio como resultado una eficiencia del 58,42 %. Estos datos difieren de lo esperado y generaron dudas sobre el comportamiento de la placa de DFRobot.

Por otro lado, en la placa desarrollada, la prueba duró 23 horas y 10 minutos, también con mediciones cada 8 segundos. Durante esta prueba, se registró una potencia promedio suministrada por la fuente de alimentación de 1604,29 mW, mientras que la batería consumió en promedio 291,88 mW y la carga utilizó 951,72 mW. Esto resultó en una eficiencia del 77,58 %. Estos resultados son más favorables en comparación con la placa de DFRobot.

La placa de DFRobot mostró una limitación en su capacidad para cargar la batería durante la prueba de carga-descarga, dependiendo en su lugar de la energía residual almacenada en la batería. Por otro lado, la placa desarrollada demostró una capacidad efectiva para cargar la batería y mantener una tensión de salida más estable durante la descarga. Estos hallazgos respaldan la ventaja y superioridad de la placa desarrollada en términos de funcionalidad y rendimiento.

6.7. Comparación de resultados

Tras haber completado las pruebas mencionadas anteriormente, se ha generado una tabla comparativa (**Tabla 5**) para poder analizar y comparar el desempeño de ambas placas en todas las pruebas realizadas. Esta tabla ha permitido hacer una evaluación más precisa del rendimiento de cada placa en diferentes situaciones y determinar cuál es la más adecuada para el proyecto en cuestión.

Tabla 5 - Comparación de los resultados de las dos placas

	DFRobot		Desarrollada	
	Batería (horas)	Eficiencia (%)	Batería (horas)	Eficiencia (%)
Descarga	11,9	87,14	24,17	94,66
Carga	11,52	71,54	5,87	78,32
Carga - descarga subalimentada	9,5	63,05	24	70,39
Carga - descarga sobrealimentada	-	58,42	7,22	77,58

En la **Tabla 5** se muestran que la placa desarrollada es más eficiente y tiene una mejor duración de batería en todas las pruebas realizadas, lo que la convierte en una opción más adecuada para el proyecto en cuestión.

La placa desarrollada se sometió a pruebas en la salida de Vsys, en lugar de en la salida PMID, debido a la falta de los 2 convertidores DC/DC. La salida Vsys está regulada internamente en el BQ25895, lo que la hace similar a la salida de la placa de DFRobot, aunque su voltaje está limitado a un rango de 3,5-4,5 V. La incorporación de los convertidores DC/DC tendría un impacto en todas las pruebas, excepto en la prueba de carga. Los convertidores para las salidas de 5 V y 3,3 V tienen una eficiencia superior al 93% y 95%, respectivamente. En el peor de los casos, asumiendo una eficiencia del 95%, se puede estimar que los resultados de las pruebas realizadas con los convertidores serían similares a los mostrados en la **Tabla 6**.

Tabla 6 - Comparación de los resultados estimados de las dos placas

	DFRobot	Desarrollada
	Eficiencia (%)	Eficiencia (%)
Descarga	87,14	89,93
Carga	71,54	78,32
Carga - descarga subalimentada	63,05	66,87
Carga - descarga sobrealimentada	58,42	73,70

A pesar de que se estime que la implementación de los convertidores DC/DC tendría un impacto en la eficiencia de las pruebas, se espera que la placa desarrollada siga siendo más eficiente en comparación con la placa de DFRobot. Esto se debe a que la placa desarrollada cuenta con una mejor gestión de energía y una mayor eficiencia en la carga y descarga de la batería, lo que se refleja en una mayor duración de la batería en todas las pruebas.

7. Conclusiones y líneas futuras

7.1. Conclusiones

En resumen, el proyecto ha cumplido con éxito los objetivos establecidos desde el principio. Para lograr esto, se ha llevado a cabo un estudio completo de los sistemas comerciales de Energy Harvesting mediante energía solar, lo que ha permitido conocer las tecnologías disponibles y las mejores prácticas en el campo.

Además, se ha desarrollado un sistema para la monitorización y estudio de dichos sistemas. Esta herramienta permite recopilar datos relevantes sobre el funcionamiento de los sistemas y analizar su rendimiento. Con esto, se puede identificar y corregir los problemas de manera temprana, así como mejorar el diseño y la eficiencia de los sistemas.

También se ha diseñado y fabricado un total de tres PCBs para el proyecto, se llevaron a cabo varios prototipos antes de llegar al diseño final. Se realizaron pruebas y mejoras en cada uno de ellos hasta conseguir el resultado deseado. La última versión cumple con los requisitos especificados con la entrada de energía y la carga de la batería por lo que se considera un éxito.

Por último, se ha utilizado un microprocesador para calcular el MPPT de los paneles solares. Este microprocesador, mediante un algoritmo implementado en su código, mide continuamente el voltaje y la corriente del panel solar y ajusta la carga para obtener la máxima potencia

7.2. Líneas futuras

Se tiene planificado llevar a cabo nuevas líneas de trabajo en este proyecto con el fin de alcanzar los objetivos planteados. En primer lugar, se realizará la fabricación de una nueva PCB que incluirá el convertidor DC/DC de 5V para cumplir con todos los requisitos establecidos en el proyecto. Asimismo, se corregirá el error mencionado en el apartado 6.1 para conseguir cumplir todos los requisitos especificados en el proyecto. Además, se tendrían que repetir las pruebas a la placa final para comprobar el efecto del convertidor implementado. Para garantizar el correcto funcionamiento del convertidor, se llevarán a cabo pruebas adicionales a la placa final, con el fin de comprobar su efecto en el rendimiento del sistema. De esta manera, se podrá determinar si se ha alcanzado la eficiencia energética y la duración de la batería esperada.

Además, se explorará la posibilidad de integrar nuevas funcionalidades al sistema, como la conexión a una red inalámbrica para la monitorización remota. También se podría explorar la implementación de una interfaz de usuario para la visualización de los datos de monitoreo y control remoto del sistema.

Por otro lado, se podría investigar el uso de diferentes tecnologías de Energy Harvesting, como la generación de energía a partir de vibraciones o la recolección de energía térmica, para ampliar la capacidad del sistema y hacerlo más versátil. En general, hay muchas posibilidades para continuar con el desarrollo y mejora de sistemas de Energy Harvesting mediante energía solar, y el proyecto actual proporciona una sólida base para futuros trabajos en este campo.

8. Bibliografía

- [1] X. G. W. L. y. C. L. Larga Liu, «Researchgate,» noviembre 2021. [En línea]. Available: https://www.researchgate.net/publication/355991802_Recent_Progress_in_the_Energy_Harvesting_Technology-From_Self-Powered_Sensors_to_Self-Sustained_IoT_and_New_Applications. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [2] Twenergy, «Twenergy,» Twenergy, 3 diciembre 2019. [En línea]. Available: <https://twenergy.com/eficiencia-energetica/almacenamiento-de-energia/supercondensadores-que-son-aplicaciones/>. [Último acceso: 15 Abril 2022].
- [3] Phi4tech, «Phi4tech,» Phi4tech, 25 abril 2022. [En línea]. Available: https://www.phi4tech.com/es/blog_es/baterias-y-supercondensadores-cual-es-la-diferencia/. [Último acceso: 19 abril 2023].
- [4] J. C. Rodriguez, «Ingenieromarino,» Ingenieromarino, 2018. [En línea]. Available: https://ingenieromarino.com/baterias-li-s-y-supercondensadores/#3-Baterias_de_litio. [Último acceso: 19 abril 2023].
- [5] Iberdrola, «Iberdrola,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovacion/baterias-ion-litio#:~:text=Cuando%20se%20conecta%20la%20bater%C3%ADa,de%20litio%20vuelven%20al%20%C3%A1nodo..>
- [6] 330ohms, «Blog 330ohms,» 22 julio 2020. [En línea]. Available: <https://blog.330ohms.com/2020/06/22/que-diferencias-hay-entre-una-li-po-y-una-li-ion/>.
- [7] L. Day, «HACKADAY,» 11 julio 2020. [En línea]. Available: <https://hackaday.com/2020/06/11/a-beginners-guide-to-lithium-rechargeable-batteries/>.
- [8] J. Sikken, «HACKADAY,» 22 septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://hackaday.io/project/167731-testing-cheap-linear-li-ion-chargers-for-solar>.
- [9] Altium, «Altium,» Altium, 1 enero 2021. [En línea]. Available: <https://resources.altium.com/es/p/switching-vs-linear-voltage-regulator-what-s-the-best-choice-for-your-power-management-circuit>. [Último acceso: 19 abril 2023].
- [10] T. Bjorklund, «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/en/technical-articles/buck-boost-lead-acid-and-lithium-battery-charging-controller-activelyfinds-true-maximum-power-point.html>.

- [11] T. Bjorklund, «Devices, Analog,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/product-selector-card/dcdccontroller-web.pdf>.
- [12] arrow, «arrow,» arrow, 12 julio 2012. [En línea]. Available: <https://www.arrow.com/es-mx/research-and-events/articles/types-of-switching-dc-dc-converters>. [Último acceso: 15 mayo 2023].
- [13] F. Hoffart, «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/reference-design-documentation/design-notes/dn491.pdf>.
- [14] J. Celani, «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/en/technical-articles/battery-chargers-unique-input-regulation-loop-simplifies-solar-panelmaximum-power-point-tracking.html>.
- [15] «Adafruit,» Adafruit Industries, [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/about>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [16] «DFRobot,» DFRobot Electronics, [En línea]. Available: <https://www.dfrobot.com/about-us>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [17] «Adafruit,» Adafruit Industries, [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/390>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [18] Texas Instruments, «TI,» Texas Instruments, octubre 2021. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq24074.pdf?ts=1683373582168&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252Fes-mx%252FBQ24074. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [19] L. Ada, «Adafruit Industries,» 29 julio 2012. [En línea]. Available: <https://learn.adafruit.com/usb-dc-and-solar-lipoly-charger/using-the-charger?view=all#downloads>.
- [20] Adafruit Industries, «Adafruit,» Adafruit Industries, [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/4755>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [21] B. Siepert, «Adafruit Industries,» 15 noviembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.adafruit.com/product/4755>.
- [22] DFRobot Electronics, «DFRobot,» DFRobot Electronics, [En línea]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1712.html>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [23] datasheetpdf, «datasheetpdf,» datasheetpdf, [En línea]. Available: <https://datasheetpdf.com/pdf-file/1257615/CONSONANCE/CN3065/1>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [24] DFRobot, «DFRobot wiki - Cargador 5 V,» 31 julio 2019. [En línea]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Solar_Power_Manager_5V_SKU__DFR0559.
- [25] DFRobot Electronics, «DFRobot,» DFRobot Electronics, [En línea]. Available: <https://www.dfrobot.com/product-1714.html>. [Último acceso: 6 mayo 2023].

- [26] Analog Devices, «Analog,» Analog Devices, [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3652fe.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [27] DFRobot, «DFRobot wiki - Cargador 9 - 12 - 18 V,» 3 enero 2018. [En línea]. Available: https://wiki.dfrobot.com/Solar_Power_Manager_SKU__DFR0535.
- [28] Texas Instruments, «TI,» Texas Instruments, marzo 2016. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina3221.pdf?ts=1683352559279&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [29] Semaf, «Github,» Github, 21 abril 2020. [En línea]. Available: <https://github.com/semaf/INA3221-Arduino-Library>. [Último acceso: 19 abril 2023].
- [30] Arduino, «Arduino,» Arduino, 15 septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/about>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [31] Atmel, «Microchip,» Atmel, 2015. [En línea]. Available: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [32] Arduino, «Arduino,» Arduino, [En línea]. Available: <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [33] ARDUINO.cl, «ARDUINO.cl,» ARDUINO.cl, [En línea]. Available: <https://arduino.cl/que-es-arduino/>. [Último acceso: 17 Abril 2022].
- [34] N. mechatronics, «Naylamp mechatronics,» Naylamp mechatronics, [En línea]. Available: https://naylampmechatronics.com/blog/38_tutorial-arduino-y-memoria-sd-y-micro-sd.html. [Último acceso: 19 abril 2023].
- [35] Arduino, «Arduino,» Arduino, [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/reference/en/language/functions/communication/spi/>. [Último acceso: 19 abril 2023].
- [36] Texas Instruments, «Texas Instruments,» Texas Instruments, octubre 2022. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25895.pdf?ts=1681849110864&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [37] Alldatasheet, «Alldatasheet,» Alldatasheet, [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1133212/CONSONANCE/CN3065.html>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [38] Shotech, «Shotech,» Shotech, [En línea]. Available: <https://www.shotech.de/Datasheet/consonance/DSE-CN3165.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].

- [39] Alldatasheet, «Alldatasheet,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1133236/CONSONANCE/CN3767.html>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [40] Analog Devices, «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3652fe.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [41] Analog Devices, «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/8490fa.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [42] Analog Devices, «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC4162-L.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [43] Analog Devices, «Analog Devices,» [En línea]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX77827.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [44] Microchip, «Microchip,» [En línea]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP73831-Family-Data-Sheet-DS20001984H.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [45] Microchip Technology Inc., «Microchip,» [En línea]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/OTH/ProductDocuments/DataSheets/22005b.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [46] Microchip Technology Inc., «Microchip,» [En línea]. Available: <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MCP73871-Data-Sheet-20002090E.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [47] STMicroelectronics, «ST,» [En línea]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1050.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [48] ASM, «ASM,» [En línea]. Available: <https://pdf1.alldatasheet.es/datasheet-pdf/view/1132360/ADMOS/TC4056A.html>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [49] Texas Instruments, «Texas Instruments,» septiembre 2023. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63060.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [50] Texas Instruments, «Texas Instruments,» septiembre 2023. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63061.pdf?ts=1681924586959&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS63061. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [51] Infineon, «Infineon,» 8 noviembre 2020. [En línea]. Available: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-S6BP201A_ASSP_42V_1A_Synchronous_Buck-boost_DC_DC_Converter_IC-DataSheet-v06_00-EN.pdf?fileId=8ac78c8c7d0d8da4017d0ed6f67f57d5. [Último acceso: 6 mayo 2023].

- [52] Texas Instruments, «Texas Instruments,» abril 2015. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm3668.pdf?ts=1681925272762&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [53] Semiconductor Components Industries, «Mouser,» abril 2021. [En línea]. Available: https://www.mouser.es/datasheet/2/308/FAN48610_D-1805915.pdf. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [54] Analog Devices, «Analog Devices,» 2015. [En línea]. Available: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adp2503_2504.pdf. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [55] Texas Instruments, «Texas Instruments,» octubre 2015. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63001.pdf?ts=1681883747647&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FTPS63001. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [56] Renesa, «Mouser,» 17 abril 2015. [En línea]. Available: https://www.mouser.es/datasheet/2/698/REN_isl91110ir_DST_20140709-2930802.pdf. [Último acceso: 6 mayo 2023].
- [57] T. Instruments, «Texas Instruments,» 1 marzo 2015. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25895.pdf?HQS=dis-mous-null-mouser-mode-dsf-pf-null-wwe&ts=1647022400933>.
- [58] Renesas, «Mouser,» Renesas, 17 Abril 2015. [En línea]. Available: https://www.mouser.es/datasheet/2/698/REN_isl91110ir_DST_20140709-2930802.pdf. [Último acceso: 18 Abril 2022].
- [59] T. Instruments, «Texas Instruments,» 1 marzo 2015. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ug/sluuba2b/sluuba2b.pdf?ts=1647022615452&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Ftool%252FBQ25895EVM-664.
- [60] C. Proyect, «Cool Proyect,» Cool Proyect, [En línea]. Available: <https://coolproyect.es/website/wp-content/uploads/2016/08/Calibraci%C3%B3n-de-sonda-NTC.pdf>. [Último acceso: 20 abril 2023].
- [61] Altium, «Smtnet,» [En línea]. Available: <https://smtnet.com/library/files/upload/NetTies-and-How-to-Use-Them.pdf>.
- [62] Chipquik, «Chipquik,» 2022. [En línea]. Available: <https://www.chipquik.com/msds/EU/Spanish/SMD291SNL50T3.pdf>. [Último acceso: 4 abril 2023].
- [63] T. Instruments, «e2e.ti,» Texas Instruments, 22 enero 2020. [En línea]. Available: <https://e2e.ti.com/support/power-management-group/power-management/f/power-management-forum/874557/faq-bq25890-faq-bq2589x-schematic-review-and-pcb-layout-design-tips>. [Último acceso: 9 abril 2023].
- [64] Texas Instruments, «Texas Instruments,» septiembre 2020. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lmq62440-q1.pdf?ts=1681934695633&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252

- Fproduct%252FLMQ62440-Q1%252Fpart-details%252FLMQ62440CPPQRJRRQ1. [Último acceso: 7 mayo 2023].
- [65] MPS, «Mouer,» 29 abril 2019. [En línea]. Available: <https://www.mouser.es/datasheet/2/277/MP28167GQ-2899693.pdf>. [Último acceso: 7 mayo 2023].
- [66] MPS, «Monolithicpower,» 29 abril 2019. [En línea]. Available: https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP28167GQ/document_id/4000/. [Último acceso: 7 mayo 2023].
- [67] Texas Instruments, «Texas Instruments,» marzo 2019. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63070.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1681934798968&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.es%252F. [Último acceso: 7 mayo 2023].
- [68] Texas Instruments, «Texas Instruments,» marzo 2019. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps63070.pdf?HQS=dis-mous-null-mousermode-dsf-pf-null-ww&ts=1681934798968&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.mouser.es%252F. [Último acceso: 7 mayo 2023].
- [69] A. Hernández, «Taller electronica,» Taller electronica, 1 septiembre 2015. [En línea]. Available: <https://tallerelectronica.com/2015/09/01/esquema-de-arduino-diy-basico/>. [Último acceso: 16 abril 2023].
- [70] Eneakao, «Untitled,» Untitled, 3 septiembre 2015. [En línea]. Available: <http://untitled.es/cargar-bootloader-atmega/>. [Último acceso: 16 abril 2023].
- [71] A. Ali, «Circuits DIY,» Circuits DIY, enero 2023. [En línea]. Available: <https://www.circuits-diy.com/arduino-as-isp-to-burn-bootloader-on-avr-microcontrollers/>. [Último acceso: 18 abril 2023].
- [72] Texas Instruments, «Texas Instruments,» Texas Instruments, enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.ti.com/lit/ug/tidudj2/tidudj2.pdf>. [Último acceso: 23 mayo 2023].
- [73] STMicroelectronics, «ST,» [En línea]. Available: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/spv1050.pdf>. [Último acceso: 6 mayo 2023].

Anexo A – Código de Arduino para la monitorización

```

////////// INA 3221 ////////////
#include <Wire.h> // Inclusión de la librería para la comunicación por I2C
#include "SDL_Arduino_INA3221.h" // Inclusión de la librería para usar el INA 3221
SDL_Arduino_INA3221 ina3221;
#define LIPO_BATTERY_CHANNEL 1 // Definición del canal 1 para la batería
#define SOLAR_CELL_CHANNEL 2 // Definición del canal 2 para el panel solar
#define OUTPUT_CHANNEL 3 // Definición del canal 3 para la carga

////////// SD ////////////
#include <SPI.h> // Inclusión de la librería para la comunicación por SPI
#include <SD.h> // Inclusión de la librería para usar la SD
#define SSpin 10 // Inclusión del pin 10 para la comunicación con el esclavo
File archivo;

////////// RTC ////////////
int seg = 0; // Definición de la variable seg
int minu = 0; // Definición de la variable minu
int hora= 0; // Definición de la variable hora
int dia = 0; // Definición de la variable dia

///// Temporización /////
int periodo_ms=8000;
unsigned long t=0;

//////////Comunicación//////////
#define DEVICE_I2C_ADDRESS 0x6A // Definición de la dirección del chip BQ25895
byte reg0E; // Deficición del regisgistro 0x0E
byte reg0F; // Deficición del regisgistro 0x0F
byte reg11; // Deficición del regisgistro 0x11
byte reg12; // Deficición del regisgistro 0x12

void setup(void) {
  Wire.begin();
  ina3221.begin(); // Inicialización del INA 3221
  int MID; // Definición de la variable MID
  MID = ina3221.getManufID();
  SD.begin(SSpin); // Inicialización de la comunicación con el módulo microSD
}

void loop(void) {
  t=millis(); // Cálculo del tiempo que tarda en ejecutarse el código

```



```

////////// INA 3221 //////////

archivo = SD.open("datosINA.txt", FILE_WRITE); // Apertura para
lectura/escritura del archivo datosINA.txt

if (seg>=60){ // Comprobación de si la variable seg es mayor o
igual a 60
    seg=seg-60; // Resteo cada 60 segundos
    minu=minu+1; // Suma 1 a minu
}
if (minu>=60){ // Comprobación de si la variable minu es mayor o
igual a 60
    minu=minu-60; // Resteo cada 60 minutos
    hora=hora+1; // Suma 1 a hora
}
if (hora>=24){ // Comprobación de si la variable hora es mayor o
igual a 24
    hora=hora-24; // Resteo cada 24 horas
    dia=dia+1; // Suma 1 a dia
}

archivo.print(dia); // Escritura en la microSD del valor de dia
archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un espacio
archivo.print(hora); // Escritura en la microSD del valor de hora
archivo.print(":"); // Escritura en la microSD de dos puntos
archivo.print(minu); // Escritura en la microSD del valor de minu
archivo.print(":"); // Escritura en la microSD de dos puntos
archivo.print(seg); // Escritura en la microSD del valor de seg
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un espacio
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma

float shuntvoltage1 = 0; // Definición de la variable para la
tensión que cae en la resistencia Shunt del canal 1
float busvoltage1 = 0; // Definición de la variable para la
tensión que circula por el cable del canal 1
float current_mA1 = 0; // Definición de la variable para la
corriente que circula por el cable del canal 1

busvoltage1 = ina3221.getBusVoltage_V(LIPO_BATTERY_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la tensión que circula por el cable del canal
1
shuntvoltage1 = ina3221.getShuntVoltage_mV(LIPO_BATTERY_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la tensión que cae en la resistencia Shunt
del canal 1
current_mA1 = -ina3221.getCurrent_mA(LIPO_BATTERY_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la corriente que circula por el cable del
canal 1

archivo.print(busvoltage1); // Escritura en la microSD del valor
de la tensión en bus de la batería [V] del canal 1
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(shuntvoltage1); // Escritura en la microSD del valor
de la tensión Shunt de la batería [mV] del canal 1
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(current_mA1); // Escritura en la microSD del valor
de la corriente de la batería [mA] del canal 1
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un
espacio

```

```

archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma

float shuntvoltage2 = 0; // Definición de la variable para la
tensión que cae en la resistencia Shunt del canal 2
float busvoltage2 = 0; // Definición de la variable para la
tensión que circula por el cable del canal 2
float current_mA2 = 0; // Definición de la variable para la
corriente que circula por el cable del canal 2

busvoltage2 = ina3221.getBusVoltage_V(SOLAR_CELL_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la tensión que circula por el cable del canal
2
shuntvoltage2 = ina3221.getShuntVoltage_mV(SOLAR_CELL_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la tensión que cae en la resistencia Shunt
del canal 2
current_mA2 = -ina3221.getCurrent_mA(SOLAR_CELL_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la corriente que circula por el cable del
canal 2

archivo.print(busvoltage2); // Escritura en la microSD del valor
de la tensión en bus del panel solar [V] del canal 2
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(shuntvoltage2); // Escritura en la microSD del valor
de la tensión Shunt del panel solar [mV] del canal 2
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(current_mA2); // Escritura en la microSD del valor
de la corriente del panel solar [mA] del canal 2
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un
espacio
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma

float shuntvoltage3 = 0; // Definición de la variable para la
tensión que cae en la resistencia Shunt del canal 3
float busvoltage3 = 0; // Definición de la variable para la
tensión que circula por el cable del canal 3
float current_mA3 = 0; // Definición de la variable para la
corriente que circula por el cable del canal 3

busvoltage3 = ina3221.getBusVoltage_V(OUTPUT_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la tensión que circula por el cable del canal
3
shuntvoltage3 = ina3221.getShuntVoltage_mV(OUTPUT_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la tensión que cae en la resistencia Shunt
del canal 3
current_mA3 = ina3221.getCurrent_mA(OUTPUT_CHANNEL); //
Adquisición del valor de la corriente que circula por el cable del
canal 3

archivo.print(busvoltage3); // Escritura en la microSD del valor
de la tensión en bus de la salida [V] del canal 3
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(shuntvoltage3); // Escritura en la microSD del valor
de la tensión Shunt de la salida [mV] del canal 3
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.println(current_mA3); // Escritura en la microSD del valor
de la corriente de la salida [mA] del canal 3 y un final de línea

archivo.close(); // Cierre de archivo

```

```

////////// BQ25895 //////////

archivo = SD.open("datosCHIP.txt", FILE_WRITE); // Apertura para
lectura/escritura de archivo datosCHIP.txt

archivo.print(dia); // Escritura en la microSD del valor de dia
archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un espacio
archivo.print(hora); // Escritura en la microSD del valor de hora
archivo.print(":"); // Escritura en la microSD de dos puntos
archivo.print(minu); // Escritura en la microSD del valor de minu
archivo.print(":"); // Escritura en la microSD de dos puntos
archivo.print(seg); // Escritura en la microSD del valor de seg
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un espacio
archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma

Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Inicialización de la
comunicación I2C
Wire.write(0x0E); // Indicación del
registro 0x0E
Wire.endTransmission(); // Finalización de la
comunicación I2C
Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Envío de pregunta por
I2C
reg0E= Wire.read(); // Lectura de la
respuesta

float Vbat=0; //
Definición de la tensión de la batería
float voltajes[] = {0.02, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28}; //
Definición de los valores de cada bit
for(int i = 0; i<7; i++){ //
Lectura bit a bit del registro 0x0E
int x=bitRead(reg0E,i); //
Lectura de un bit del registro 0x0E
if(x == 1){ //
Comprobación de bit activo
Vbat += voltajes[i]; //
Suma de voltajes
}
}

Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Inicialización de la
comunicación I2C
Wire.write(0x12); // Indicación del
registro 0x12
Wire.endTransmission(); // Finalización de la
comunicación I2C
Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Envío de pregunta por
I2C
reg12= Wire.read(); // Lectura de la
respuesta

float Ibat=0; //
Definición de la corriente de la batería
float corrientes[] = {0.02, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28}; //
Definición de los valores de cada bit
for(int i = 0; i<7; i++){ //
Lectura bit a bit del registro 0x12

```

```

        int x=bitRead(reg12,i); //
Lectura de un bit del registro 0x12
        if(x == 1){ //
Comprobación de bit activo
            Ibat += corrientes[i]; //
Suma de corriente
        }
    }

    archivo.print(Vbat); // Escritura en la microSD del valor de la
tensión en bus de la batería [V]
    archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
    archivo.print(Ibat); // Escritura en la microSD del valor de la
corriente de la batería [mA]
    archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
    archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un espacio
    archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma

    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Inicialización de la
comunicación I2C
    Wire.write(0x11); // Indicación del
registro 0x11
    Wire.endTransmission(); // Finalización de la
comunicación I2C
    Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Envío de pregunta por
I2C
    reg11= Wire.read(); // Lectura de la
respuesta

    float Vbus=0; //
Definición de la tensión del panel solar
    float voltaje[] = {0.1, 0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 6.4}; //
Definición de los valores de cada bit
    for(int i = 0; i<7; i++){ // Lectura
bit a bit del registro 0x11
        int x=bitRead(reg11,i); // Lectura
de un bit del registro 0x11
        if(x == 1){ //
Comprobación de bit activo
            Vbus += voltaje[i]; // Suma de
voltaje
        }
    }

    archivo.print(Vbus); // Escritura en la microSD del valor de la
tensión en bus del panel solar [V]
    archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma
    archivo.print(" "); // Escritura en la microSD de un espacio
    archivo.print(","); // Escritura en la microSD de una coma

    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Inicialización de la
comunicación I2C
    Wire.write(0x0F); // Indicación del
registro 0x0F
    Wire.endTransmission(); // Finalización de la
comunicación I2C
    Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Envío de pregunta por
I2C
    reg0F= Wire.read(); // Lectura de la
respuesta

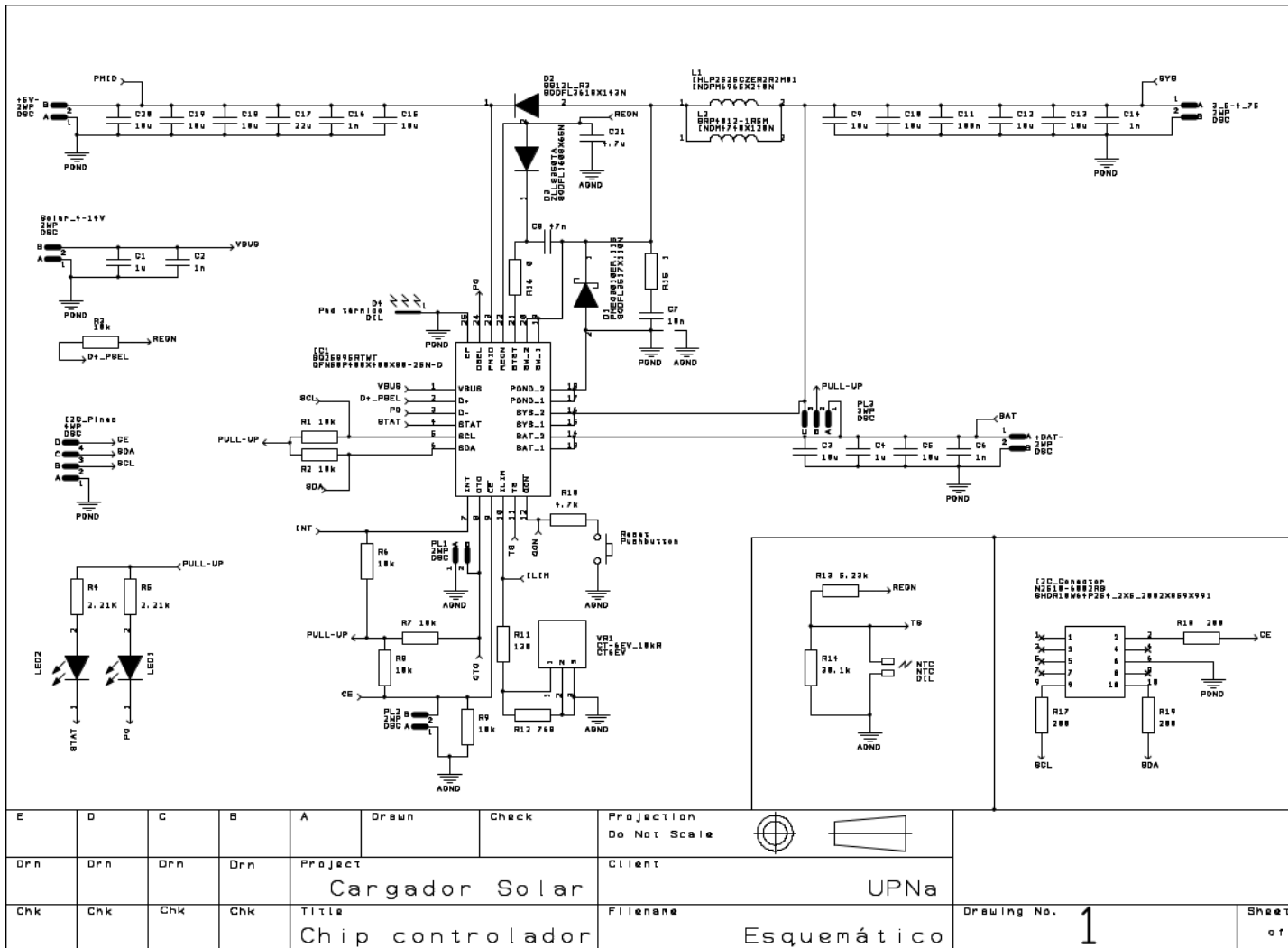
```

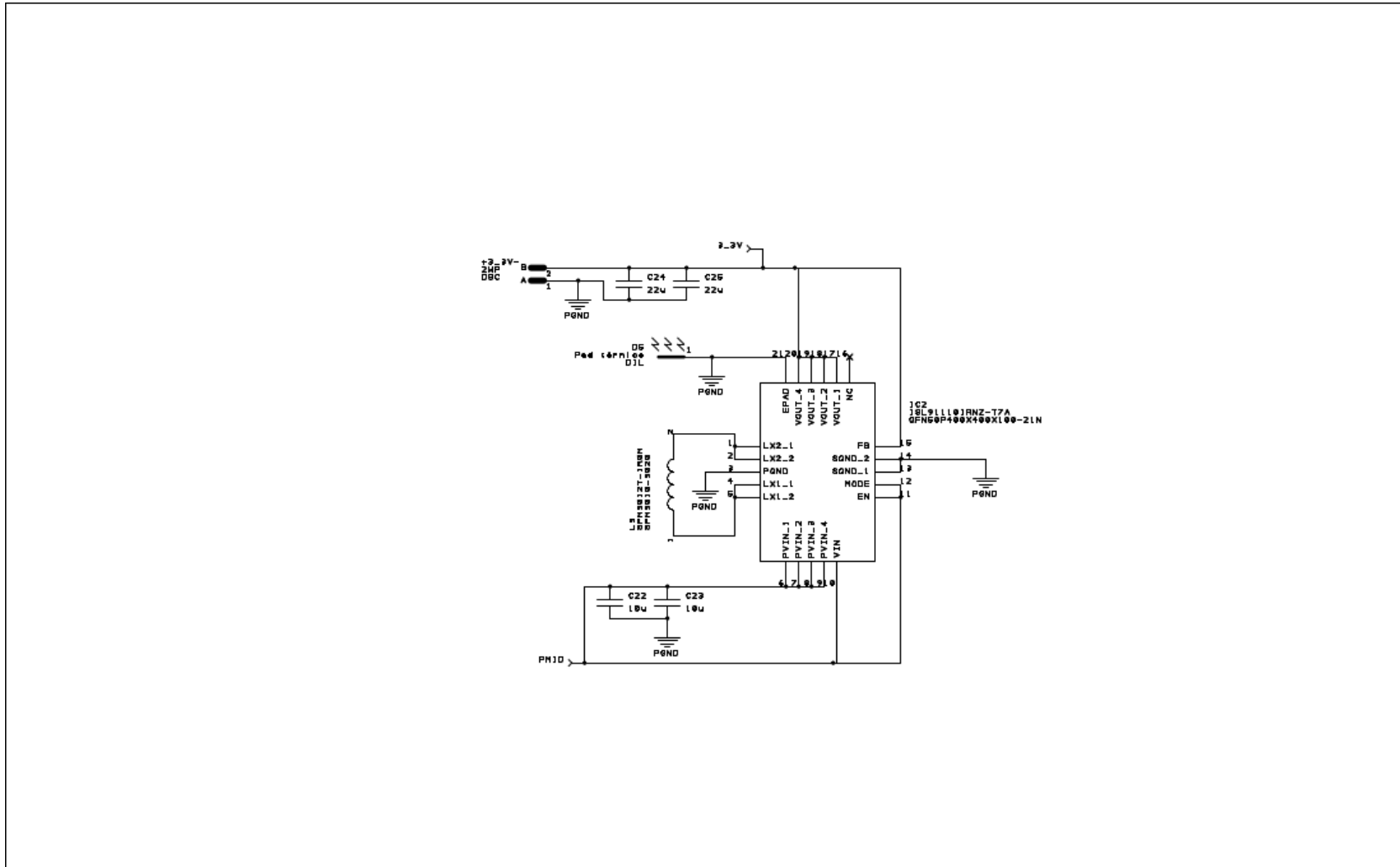
```
float Vsys=0; //
Definición de la tensión de la salida Vsys
float voltajeSYS[] = {0.02, 0.04, 0.08, 0.16, 0.32, 0.64, 1.28}; //
Definición de los valores de cada bit
for(int i = 0; i<7; i++){ //
Lectura bit a bit del registro 0x0F
int x=bitRead(reg0F,i); //
Lectura de un bit del registro 0x0F
if(x == 1){ //
Comprobación de bit activo
Vsys += voltajeSYS[i]; //
Suma de voltaje
}
}

archivo.println(Vsys); // Escritura en la microSD del valor de la
tensión en bus SYS [V]
archivo.close(); // Cierre de archivo
seg=seg+8; // Sumamos 8 a seg

while(millis() < t + periodo_ms){ // Espera para completar los 8
segundos
}
}
```

Anexo B – Diseño inicial del esquemático





E	D	C	B	A	Drawn	Check	Projection Do Not Scale			
Drn	Drn	Drn	Drn	Project Cargador Solar			Client			
Chk	Chk	Chk	Chk	Title Regulador 3.3 V			Filename	Esquemático	Drawing No. 2	Sheet of

Anexo C – Función de los pines del BQ25895

Pin 1 – Vbus: Es el terminal de alimentación a donde se le conectará el panel solar.

Pin 2 – D+ Psel: Se conecta al pin 22 para controlar el buen funcionamiento del sistema.

Pin 3 – D- PG: Se conecta al Power Good o PG para controlar el buen funcionamiento del sistema.

Pin 4 – STAT: Si le llegan 5 voltios indica que la batería esta completa y se deja de cargarla.

Pin 5 – SCL: Conexión del reloj del bus I2C.

Pin 6 – SDA: Conexión de datos del bus I2C.

Pin 7 – INT: Se envían unos pulsos al HOST para comunicar los fallos y los estados del cargador.

Pin 8 – OTG: Si llegan 5 V al pin se activa el Boost Mode.

Pin 9 – CE: Este pin funciona a nivel bajo, si se conecta a GND el chip se activa.

Pin 10 – ILIM: Limita la corriente máxima.

Pin 11 – TS: Se conecta al NTC para controlar la temperatura de la batería.

Pin 12 – QON: Este pin funciona a nivel bajo, en caso de que se conecte a GND el circuito integrado se reinicia.

Pin 13 – Bat: Es el terminal de donde se conecta la batería.

Pin 14 – Bat: Es igual que el pin 13, por lo que se interconectan.

Pin 15 – SYS: Es el terminal donde la salida está regulada entre 3,5 y 4,75 V.

Pin 16 – SYS: Es igual que el pin 15, por lo que se interconectan.

Pin 17 – PGND: Es la salida de la tierra de potencia.

Pin 18 – PGND: Es igual que el pin 17, por lo que se interconectan.

Pin 19 – SW: Es un nodo de conexión para los indicadores externos.

Pin 20 – SW: Es igual que el pin 19, por lo que se interconectan.

Pin 21 – BTST: Control de PWM high, se filtran y se conectan a SW.

Pin 22 – REGN: Control de PWM low.

Pin 23 – PMID: Salida de 5V.

Pin 24 – DSEL: Se conecta al Power Good o PG para controlar el buen funcionamiento del sistema.

Anexo D – Lista de componentes de la PCB inicial

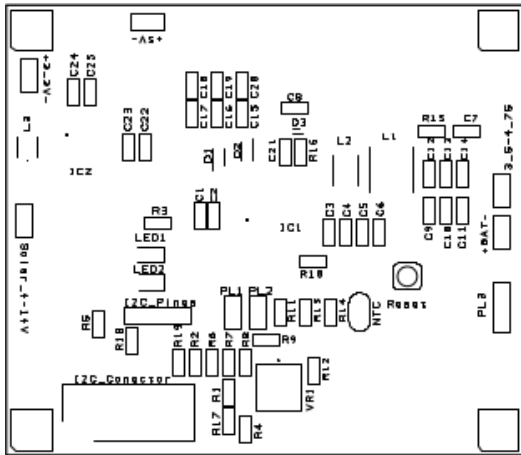
Se han utilizado un total de 69 componentes de los cuales 55 son de montaje superficial o SMD ya que las patillas de los componentes no atraviesan la placa. (Tabla 7)

Tabla 7 - Lista de componentes de la PCB

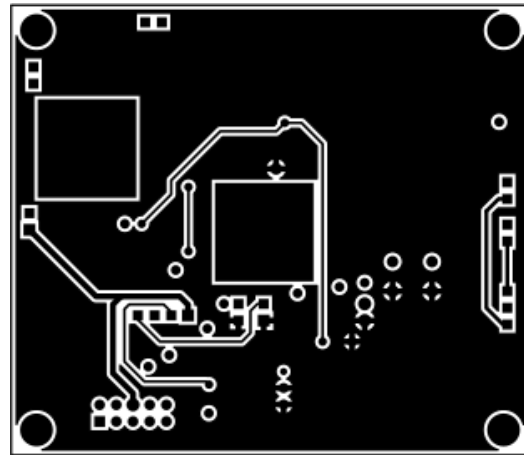
Nombre	Cantidad	Valores	Descripción	Formato	Numero RS	Numero Mouser
C1 / C4	2	1 μ F	Condensador cerámico	1206	133-5644	-
C2/C6/C14/C16	4	1nF	Condensador cerámico	1206	500-2483	-
C3/C5/C9/C10 /C12/C13/C15 /C18/C19/C20 /C22/C23	12	10 μ F	Condensador cerámico	1206	434-8097	-
C7	1	10nF	Condensador cerámico	1206	298-9220	-
C8	1	47nF	Condensador cerámico	1206	298-9242	-
C11	1	100nF	Condensador cerámico	1206	500-2326	-
C17/C24/C25	3	22 μ F	Condensador cerámico	1206	-	187-CL31A226MOCLNNC
C21	1	4,7 μ F	Condensador cerámico	1210	133-5646	-
D1	1	30V 1A	Diodo Schottky	-	-	771-PMEG3010ER115
D2	1	20V 1A	Diodo Schottky	-	7435999P	-
D3	1	40V 0,38A	Diodo Schottky	-	-	522-ZLLS350TA
D4 / D5	2	14x14 mm	Disipador	-	750-0881	-
I2C_Conector	1	-	Conector molex de 10 pines	-	542-8784	-
I2C_Pines	1	-	4 Pines macho-hembra	-	205-3202	-
IC1	1	-	BQ25895	-	-	595-BQ25895RTWR
IC2	1	-	ISL91110IRNZ-T7A	-	-	968-ISL91110IRNZ-T7A
L1	1	2,2 μ H 8A 0,018 Ω	Bobina	-	-	70-IHLP2525CZER2R2M1
L2	1	1,5 μ H 3A 0,05 Ω	Bobina	-	-	652-SRP4012-1R5M
L3	1	1 μ H 5,4A 0,065 Ω	Bobina	-	-	810-SPM3012T-1R0M
LED1 / LED2	2	2,1V	LED	1206	466-4046	-

NTC	1	10kΩ 1%	Termistores NTC	-	-	954-103AT-2
PL1/PL2	2	-	2 Pines macho-macho	-	251-8086	-
PL3	1	-	3 Pines macho-macho	-	745-7068	-
R1/R2/R3/R6 /R7/R8/R9	7	10kΩ	Resistencia multicapa	1206	740-9081	-
R4/R5	2	2,21kΩ	Resistencia multicapa	1206	-	652-CR1206FX-2211ELF
R10	1	4,7kΩ	Resistencia multicapa	1206	807-1252	-
R11	1	130Ω	Resistencia multicapa	1206	187-3159	-
R12	1	820Ω	Resistencia multicapa	1206	679-2336	-
R13	1	5,23kΩ	Resistencia multicapa	1206	795-4948	-
R14	1	30,1kΩ	Resistencia multicapa	1206	812-7059	-
R15	1	1Ω	Resistencia multicapa	1206	794-4180	-
R16	1	0Ω	Resistencia multicapa	1206	740-9104	-
R17/R18/R19	3	20Ω	Resistencia multicapa	1206	197-8410	-
Reset	1	-	Pulsador	-	479-1435	-
Solar_4-14V / +3_3V- / +5V- /+Bat- /3,5-4,75	5	-	Conector de 2 bornas, 2,54 mm	-	790-1098	-
VR1	1	10kΩ	Potenciómetro	-	167-9952	-

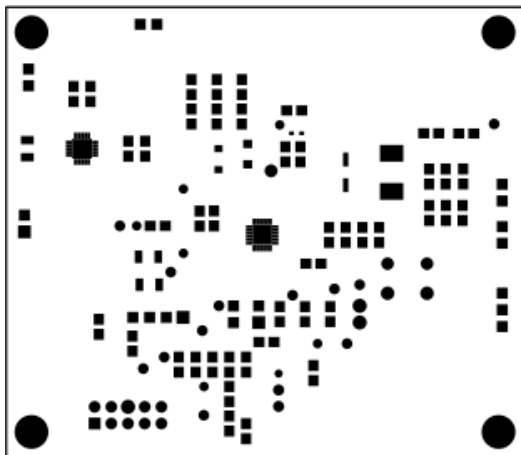
Anexo E – Diseño de PCB inicial



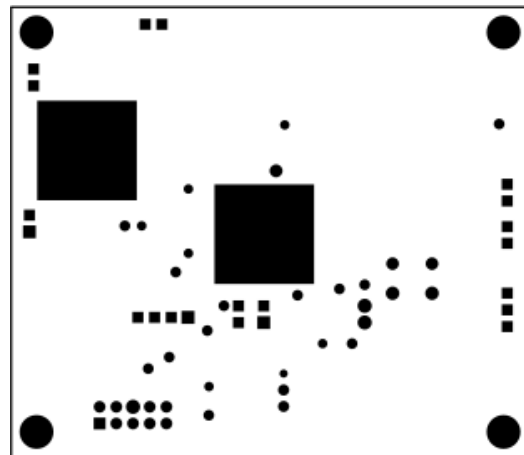
PCB 1 – Top silkscreen



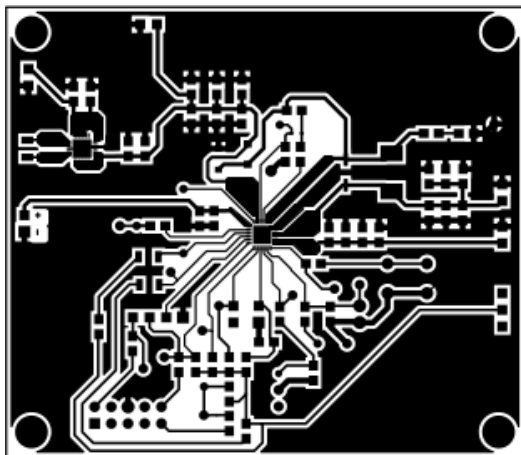
PCB 4 – Bottom copper



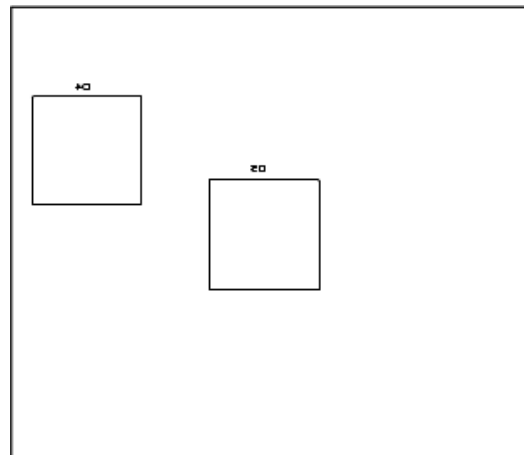
PCB 2 – Top solder mask



PCB 5 – Bottom solder mask

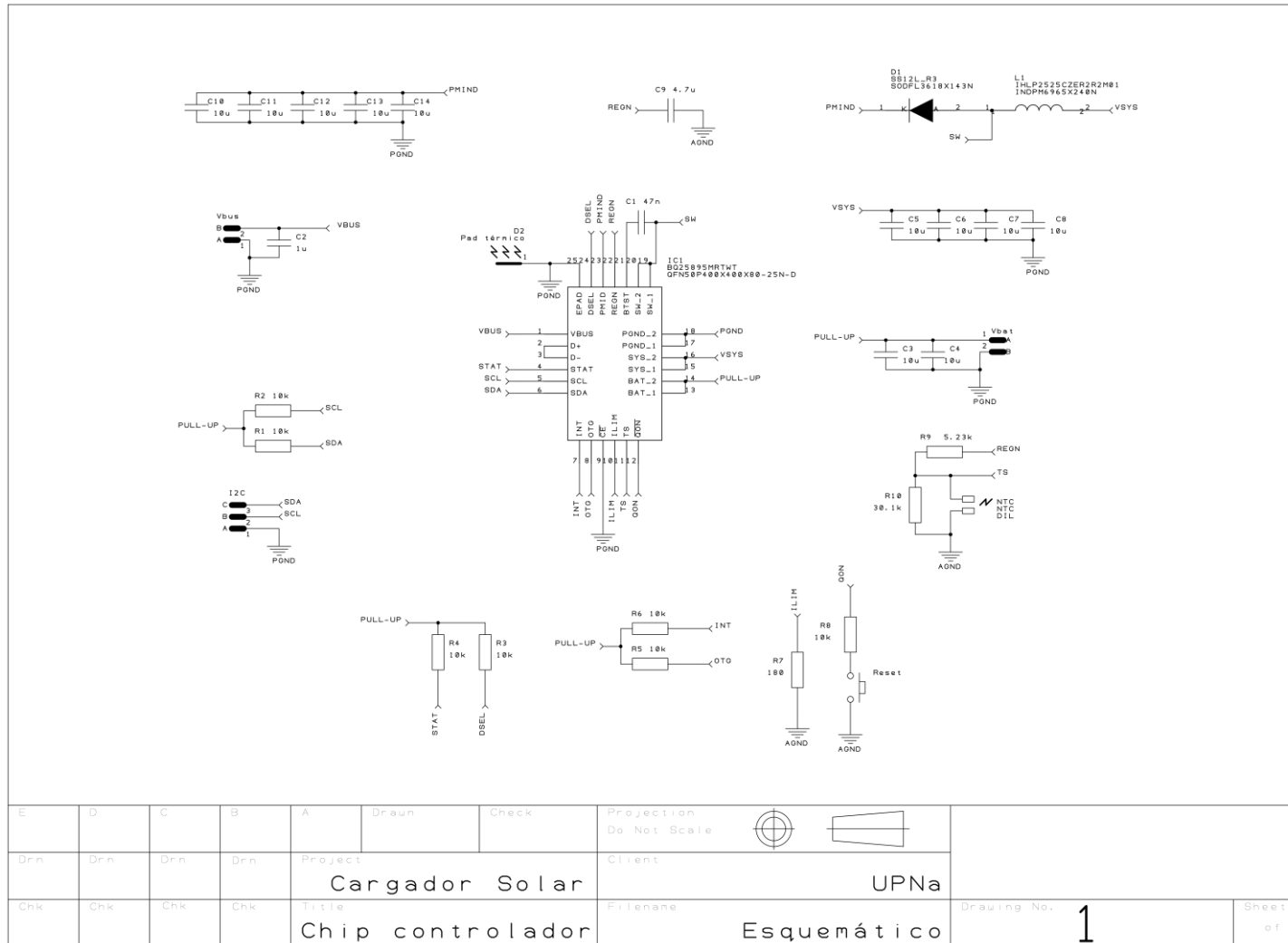


PCB 3 – Top copper

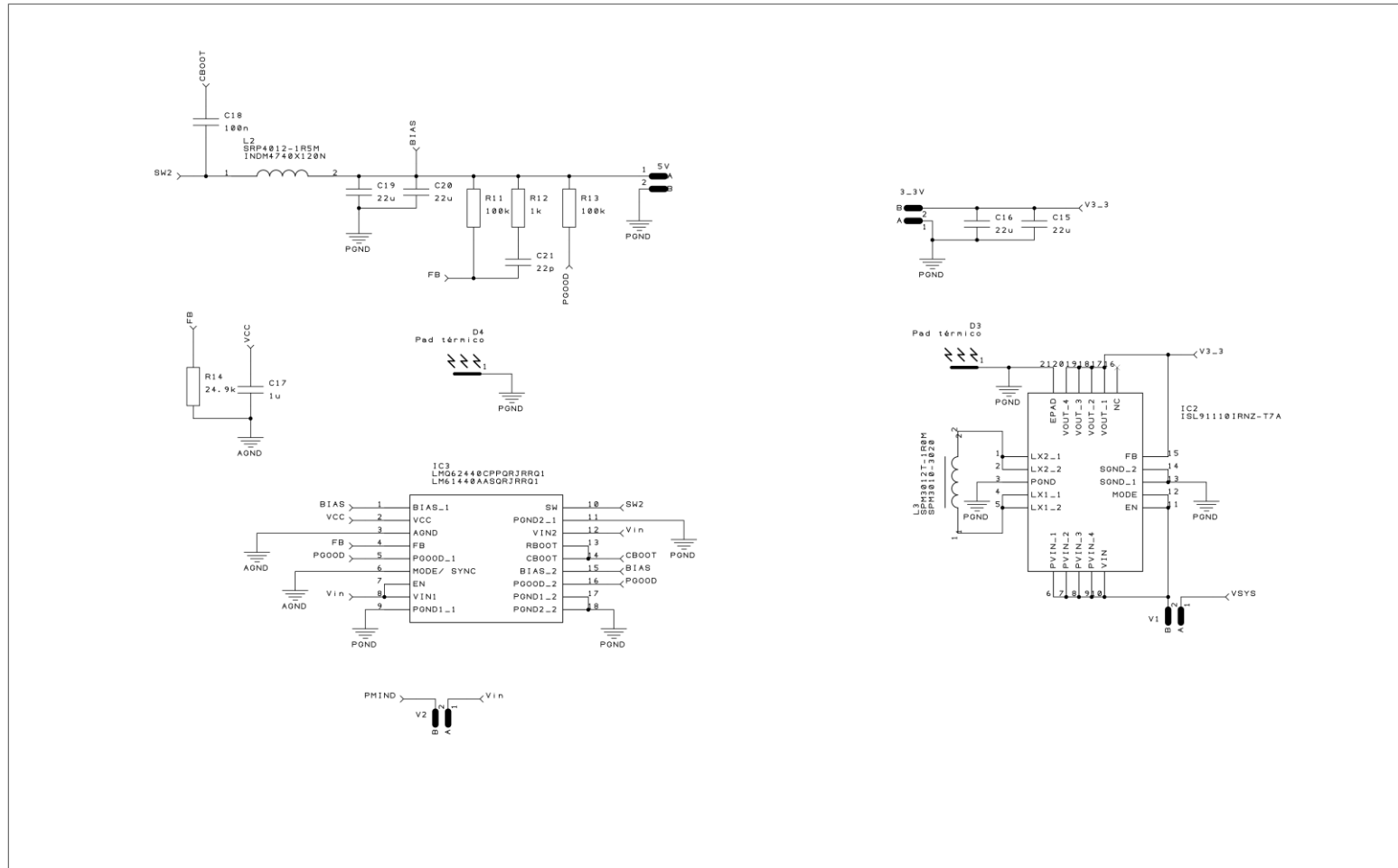


PCB 6 – Bottom silkscreen

Anexo F – Diseño final del esquemático



Diseño de un sistema de gestión y almacenamiento de energía para nodos IoT



E	D	C	B	A	Drawn	Check	Projection Do Not Scale			
Drn	Drn	Drn	Drn	Project	Cargador Solar		Client	UPNa		
Chk	Chk	Chk	Chk	Title	Reguladores		Filename	Esquemático		Drawing No. 2
								Sheet		of

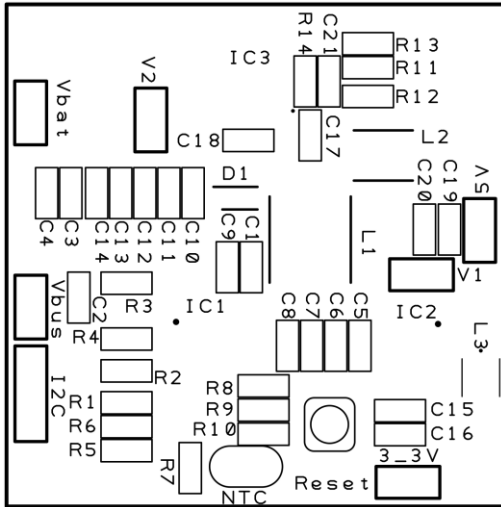
Anexo G – Lista de componentes de la PCB final

Se han utilizado un total de 26 componentes de los cuales 21 son de montaje superficial o SMD ya que las patillas de los componentes no atraviesan la placa (**Tabla 8**).

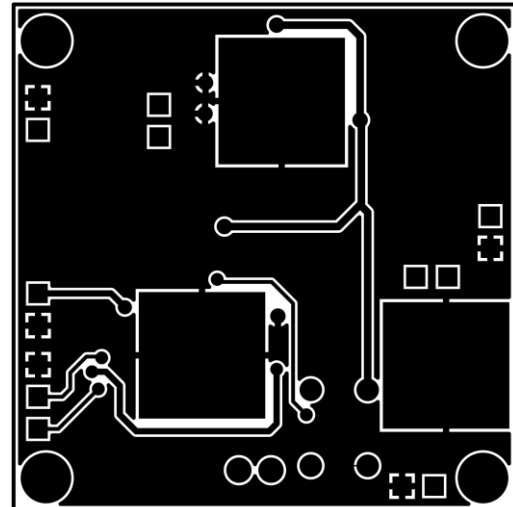
Tabla 8 - Lista de componentes de la PCB final

Nombre	Cantidad	Valores	Descripción	Formato	Código RS	Mouser REF
R1/R2/R3/R4/R5/R6/R8	7	10k	Resistencia multicapa	1206	788-3981	791-RMC1/8-1002FTP
R7	1	180		1206	721-9762	791-WR12X1800FTL
R9	1	5,23k		1206	-	652-CR1206FX-5231ELF
R10	1	30,1k		1206	243-0531	652-CR1206FX-3012ELF
R11/R13	2	100k		1206	721-9986	603-RC1206JR-07100KL
R12	1	1k		1206	721-9829	791-RMC1/8K1001FTP
R14	1	24,9k		1206	252-7591	791-RMC1/8K2492FTP
C1	1	47n		Condensador cerámico	1206	250-7701
C2/C17	2	1u	1206		242-7428	187-CL31B105KBHNFNE
C3/C4/C5/C6/C7/C8/ C10/C11/C12/C13/C14	11	10u	1206		260-8829	187-CL31A106MAHNNNE
C9	1	4,7u	1206		247-8164	187-CL31B475KAHNNNE
C15/C16/C19/C20	4	22u	1206		247-8160	187-CL31A226MOCLNNC
C18	1	100n	1206		669-8417	791-SH21B104K160CT
C21	1	22p	1206		669-8482	791-0805N220K201CT
D1	1	20V 1A	Diodo Schottky		SOD-123W	151-3223
L1	1	2,2u	Bobina	2525	-	70-IHLP2525CZER2R2M1
L2	1	1,5u		-	-	652-SRP4012TA-1R5M
L3	1	1u		-	-	810-SPM3012T-1R0M
IC1	1	-	BQ25895MRTWT	-	-	595-BQ25895RTWR
IC2	1	-	ISL91110IRNZ-T7A	-	-	968-ISL91110IRNZ-T7A
IC3	1	-	LMQ62440CPPQRJRRQ1	-	-	595-Q62440CPPQRJRRQ1
NTC	1	10k	Termistores NTC	-	179-3836	954-103AT-2
Reset	1	-	Pushbutton	-	479-1435	710-430172073816
V1/V2	2	-	2 Pines macho-macho	-	251-8086	571-5-146274-2
I2C	1	-	3 Pines macho-macho	-	745-7068	571-5-146274-2
Vbat/Vbus/3_3V/5V	4	-	Conector de 2 bornas, 2,54 mm	-	790-1098	651-1725656

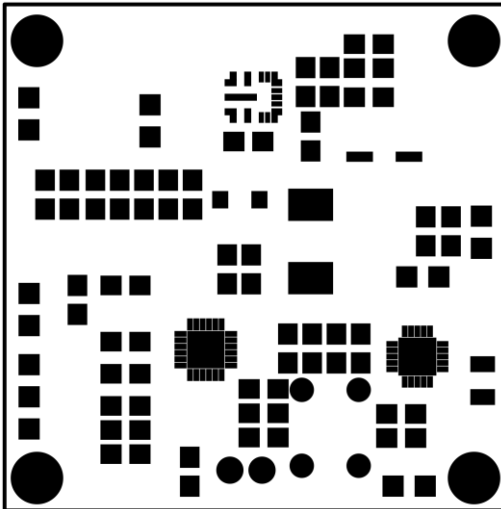
Anexo H – Diseño de PCB final



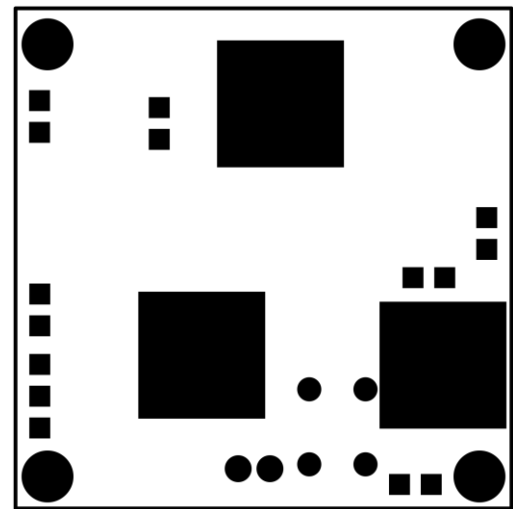
PCB 7 – Top silkscreen



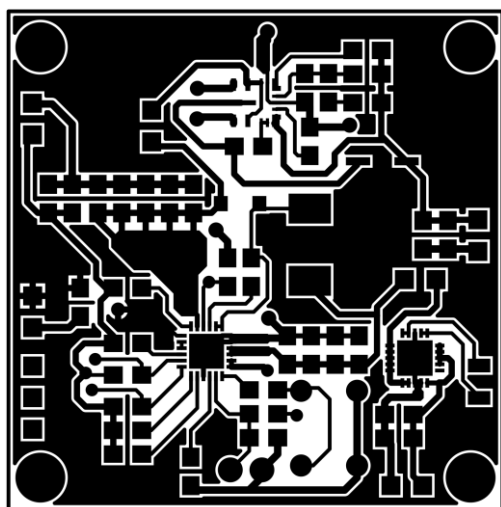
PCB 10 – Bottom copper



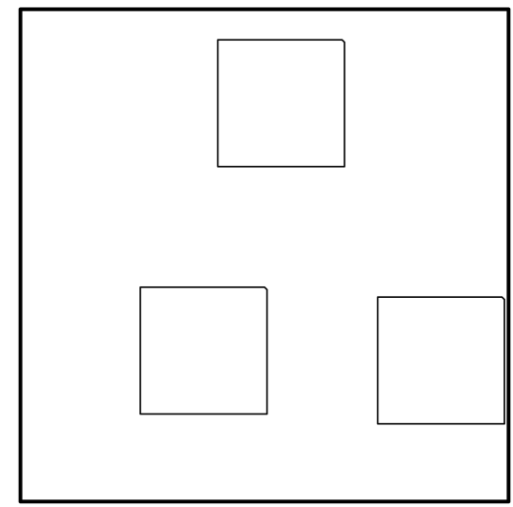
PCB 8 – Top solder mask



PCB 11 – Bottom solder mask



PCB 9 – Top copper



PCB 12 – Bottom silkscreen

Anexo I – Listado de registros del BQ25895

• Registro 00

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	1	0	0	1	0	0	0
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7

EN_HIZ (enable HIZ mode) – Activador del modo de alta impedancia

0 – Deshabilitado (por defecto)

1 – Habilitado

Bit 6

EN_ILIM (enable ILIM pin) – Activador del límite de corriente de entrada

0 – Deshabilitado

1 – Habilitado (por defecto)

Bit 5, 4, 3, 2, 1 y 0

ILIM – Limitadores de la corriente de entrada

El límite es de 100 mA a 3,25 A (tiene un offset de 100 mA). Los bits IINLIM se cambian automáticamente después de que se completa la detección del tipo de fuente de entrada. La combinación de bits 000000 equivale a 100 mA y la combinación de bits 111111 equivale a 3,25 A. Por defecto es de 500 mA (001000).

Bit 5 – ILIM de 1,6 A.

Bit 4 – ILIM de 800 mA.

Bit 3 – ILIM de 400 mA.

Bit 2 – ILIM de 200 mA.

Bit 1 – ILIM de 100 mA.

Bit 0 – ILIM de 50 mA.

• Registro 01

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	1	1	0
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7 y Bit 6

BHOT – Umbral para monitorear la temperatura alta del modo boost

00 – Límite 34,75% (por defecto)

01 – Límite 37,75%

10 – Límite 31,25%

11 – Deshabilita la protección de temperatura en el modo boost

Bit 5

BCOLD - Umbral para monitorear la temperatura baja del modo boost

0 – Límite 77% (por defecto)

1 – Límite 80%

Bit 4, 3, 2, 1 y 0

VINDPM_OS – Bits limitadores del offset de la tensión de entrada

El límite es de 100 mV a 3,2 V (tiene un offset de 100 mA). El umbral mínimo de VINDPM se fija en 3,9 V. El umbral máximo de VINDPM está fijado en 15,3 V. Cuando VBUS sin carga es ≤ 6 V, VINDPM_OS se usa para calcular el umbral de VINDPM. Cuando VBUS sin carga es > 6 V, el VINDPM_OS multiplicado por 2 se usa para calcular el umbral de VINDPM. La combinación de bits 00000 equivale a 0 mV y la combinación de bits 11111 equivale a 3,1 V. Por defecto es de 500 mV (00101).

Bit 4 – VINDPM_OS de 1,6 V.

Bit 3 – VINDPM_OS de 800 mV.

Bit 2 – VINDPM_OS de 400 mV.

Bit 1 – VINDPM_OS de 200 mV.

Bit 0 – VINDPM_OS de 100 mV.

• **Registro 02**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	1	1	1	1	0	1
Lectura o escritura	R/W – R	R/W	R/W – R	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7

CONV_START – Control de inicio del ADC (convertor analógico-digital)

0 – Deshabilitado (por defecto)

1 – Habilitado

El bit es solo de lectura si el CONV_RATE = 1. El bit permanece alto durante la conversión ADC y durante la detección de la fuente de entrada.

Bit 6

CONV_RATE – Rango de selección del ADC (convertor analógico-digital)

0 – ADC de un disparo (one shot)

1 – ADC continua de 1 segundo

Bit 5

BOOST_FREQ – Selección de la frecuencia del modo boost

0 – 1,5 MHz

1 – 500 kHz (por defecto)

El bit es solo de lectura si el OTG_CONFIG está activo.

Bit 4

ICO_EN – Activador del ICO (optimizador de corriente de entrada)

0 – Algoritmo ICO deshabilitado

1 – Algoritmo ICO activado (por defecto)

Bit 3

HVDCP_EN – Activador de DCP (puerto de carga dedicado) de alto voltaje

0 – Deshabilitado

1 – Habilitado (por defecto)

Bit 2

MAXC_EN – Activador del adaptador de carga máxima

0 – Desactivado

1 – Habilitado (por defecto)

Bit 1

FORCE_DPDM – Detección de D+/D- forzado

0 – No forzado (por defecto)

1 – Forzado

Bit 0

AUTO_DPDM_EN – Activador de la detección de D+/D- automático cuando se conecta VBUS

0 – Desactivado

1 – Habilitado (por defecto)

• **Registro 03**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	1	1	0	1	0
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7

BAT_LOADEN – Activador de carga de batería (IBATLOAD)

0 – Deshabilitado (por defecto)

1 – Habilitado

Bit 6

WD_RST – Reseteo del temporizador de vigilancia I2C

0 – Normal (por defecto)

1 – Reseteo (Volver a 0 después del reseteo)

Bit 5

OTG_CONFIG – Configurador del modo boost (OTG)
 0 – Deshabilitado
 1 – Habilitado (por defecto)

Bit 4

CHG_CONFIG – Configurador de activación de carga
 0 – Carga deshabilitada
 1 – Carga habilitada (por defecto)

Bit 3, 2 y 1

SYS_MIN – Límite mínimo de voltaje del sistema
 El límite es de 3 V a 3,7 V (tiene un offset de 3 V). La combinación de bits 000 equivale a 3 V y la combinación de bits 111 equivale a 3,7 V. Por defecto es de 3,5 V (101).
 Bit 3 – SYS_MIN de 0,4 V.
 Bit 2 – SYS_MIN de 0,2 V.
 Bit 1 – SYS_MIN de 0,1 V.

Bit 0

Valor reservado a 0.

• **Registro 04**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	1	0	0	0	0	0
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7

EN_PUMPX – Activador del control de pulsos de corriente
 0 – Deshabilitado (por defecto)
 1 – Habilitado PUMPX_UP y PUMPX_DN

Bit 6, 5, 4, 3, 2, 1, 0

ICHG – Limite de corriente de carga rápida

El límite es de 0 mA a 5,056 A (tiene un offset de 0 mA). La combinación de bits 0000000 equivale a 0 mA y la combinación de bits 1001111 equivale a 5,056 A. Por defecto es de 2,048 A (0100000). 0000000 desactiva la carga. Si es superior a 5,056 A (1001111) se fija a 5,056 A.

Bit 6 – ICHG de 4,096 A.

Bit 5 – ICHG de 2,048 A.

Bit 4 – ICHG de 1,024 A.

Bit 3 – ICHG de 512 mA.

Bit 2 – ICHG de 256 mA.

Bit 1 – ICHG de 128 mA.

Bit 0 – ICHG de 64 mA.

• **Registro 05**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	1	0	0	1	1
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7, 6, 5 y 4

IPRECHG – Limite de corriente de precarga

El límite es de 64 mA a 1,024 A (tiene un offset de 64 mA). La combinación de bits 0000 equivale a 64 mA y la combinación de bits 1111 equivale a 1,024 A. Por defecto es de 128 mA (0001).

Bit 7 – IPRECHG de 512 mA.

Bit 6 – IPRECHG de 256 mA.

Bit 5 – IPRECHG de 128 mA.

Bit 4 – IPRECHG de 64 mA.

Bit 3, 2, 1 y 0

ITERM – Limite de corriente de finalización

El límite es de 64 mA a 1,024 A (tiene un offset de 64 mA). La combinación de bits 0000 equivale a 64 mA y la combinación de bits 1111 equivale a 1,024 A. Por defecto es de 256 mA (0011).

Bit 3 – ITERM de 512 mA.

Bit 2 – ITERM de 256 mA.

Bit 1 – ITERM de 128 mA.

Bit 0 – ITERM de 64 mA.

● **Registro 06**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	1	0	1	1	1	1	0
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7, 6, 5, 4, 3 y 2

VREG – Limite de voltaje de carga

El límite es de 3,840 V a 4,608 V (tiene un offset de 3,840 V). La combinación de bits 000000 equivale a 3,840 V y la combinación de bits 110000 equivale a 4,608 V. Por defecto es de 4,208 V (010111). Si es superior a 4,608 V (010111) se fija a 4,608 V.

Bit 7 – VREG de 512 mV.

Bit 6 – VREG de 256 mV.

Bit 5 – VREG de 128 mV.

Bit 4 – VREG de 64 mV.

Bit 3 – VREG de 32 mV.

Bit 2 – VREG de 16 mV.

Bit 1

BATLOWV – Umbral de carga rápida para la precarga de la batería

0 – 2,8 V

1 – 3,0 V (por defecto)

Bit 0

VRECHG – Limite del umbral de recarga de la batería (inferior al límite de voltaje de carga)

0 – 100 mV por debajo de VREG (por defecto)

1 – 200 mV por debajo de VREG

● **Registro 07**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	1	0	0	1	1	1	0	1
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7

EN_TERM – Activación de la finalización de carga

0 – Deshabilitado

1 – Habilitado (por defecto)

Bit 6

STAT_DIS – Activación del pin STAT

0 – Habilitado (por defecto)

1 – Deshabilitado

Bit 5 y 4

WATCHDOG – Configuración del temporizador watchdog de I2C

00 – Deshabilitado

01 – 40 segundos (por defectos)

10 – 80 segundos

11 – 160 segundos

Bit 3

EN_TIMER – Activador del temporizador de carga segura

0 – Deshabilitado

1 – Habilitado (por defecto)

Bit 2 y 1

CHG_TIMER – Configuración del temporizador de carga rápida

00 – 5 horas

01 – 8 horas

10 – 12 horas (por defecto)

11 – 20 horas

Bit 0

Valor reservado a 0.

• **Registro 08**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	0	1	1
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7, 6 y 5

BAT_COMP – Configuración de la resistencia de compensación de resistencia data

El límite es de 0 Ω a 140 m Ω . La combinación de bits 000 equivale a 0 Ω y la combinación de bits 111 equivale a 140 Ω . Por defecto es de 0 Ω (000).

Bit 7 – BAT_COMP de 80 m Ω .

Bit 6 – BAT_COMP de 40 m Ω .

Bit 5 – BAT_COMP de 20 m Ω .

Bit 4, 3 y 2

VCLAMP – Restricción de voltaje de compensación de resistencia

Inferior a VREG. El límite es de 0 mV a 224 mV. La combinación de bits 000 equivale a 0 mV y la combinación de bits 111 equivale a 224 mV. Por defecto es de 0 mV (000).

Bit 4 – BAT_COMP de 128 mV.

Bit 3 – BAT_COMP de 64 mV.

Bit 2 – BAT_COMP de 32 mV.

Bit 1 y 0

TREG – Umbral de regulación de la temperatura

00 – 60°C

01 – 80°C

10 – 100°C

11 – 120°C (por defecto)

• **Registro 09**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	1	0	0	0	1	0	0
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7

FORCE_ICO – Forzar inicio del optimizador de corriente de entrada (ICO)

0 – Deshabilitado (por defecto)

1 – Habilitado

Vuelve a 0 después de que se inicie el ICO.

Bit 6

TMR2X_EN – Configuración del temporizador de seguridad durante DPM o regulación térmica

0 – El configurador no se ralentiza x2

1 – El configurador se ralentiza x2 (por defecto)

Bit 5

BATFET_DIS – Forzar la desactivación de BATFET para habilitar el modo de envío

0 – Permitir que BATFET se encienda (por defecto)

1 – Forzar desactivación de BATFET

Bit 4

Valor reservado a 0.

Bit 3

BATFET_DLY – Control del retardo de apagado del BATFET

0 – Se apaga inmediatamente cuando se establece el bit BATFET_DIS (por defecto)

1 – Retardo de apagado de BATFET por tSM_DLY cuando se establece el bit BATFET_DIS

Bit 2

BATFET_RST_EN – Activador del reseteo completo del sistema BATFET

0 – Deshabilitado

1 – Habilitado (por defecto)

Bit 1

PUMPX_UP – Activador del control por pulso de corriente del aumento de voltaje

0 – Deshabilitado (por defecto)

1 – Habilitado

Este bit solo se puede configurar cuando el bit EN_PUMPX está configurado y vuelve a 0 después de que se completa la secuencia de control por pulso de corriente.

Bit 0

PUMPX_DN – Activador del control por pulso de corriente de la disminución de voltaje

0 – Deshabilitado (por defecto)

1 – Habilitado

Este bit solo se puede configurar cuando el bit EN_PUMPX está configurado y vuelve a 0 después de que se completa la secuencia de control por pulso de corriente.

• **Registro 0A**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	1	0	0	1	0	0	1	1
Lectura o escritura	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

Bit 7, 6, 5 y 4

BOOSTV – Regulación de voltaje en el modo boost

El límite es de 4,55 V a 5,51 V (tiene un offset de 4,55V). La combinación de bits 0000 equivale a 4,55 V y la combinación de bits 1111 equivale a 5,51 V. Por defecto es de 5,126 V (1001).

Bit 7 – BOOSTV de 512 mV.

Bit 6 – BOOSTV de 256 mV.

Bit 5 – BOOSTV de 128 mV.

Bit 4 – BOOSTV de 64 mV.

Bit 3

Valor reservado a 0.

Bit 2

Valor reservado a 0.

Bit 1

Valor reservado a 1.

Bit 0

Valor reservado a 1.

• **Registro 0B**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	X	X	X	X	X	X	X	X
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7, 6 y 5

VBUS_STAT – Registro de estado VBUS

000: sin entrada

001: host USB SDP

010: CDP USB (1.5A)

011: DCP USB (3.25A)

100: DCP de alto voltaje ajustable (carga máxima) (1.5A)

101: Adaptador desconocido (500mA)

110: Adaptador no estándar (1A/2A/2.1A/2.4A)

111: OTG

El límite de corriente del software se informa en el registro IINLIM

Bit 4 y 3

CHRG_STAT – Estado de carga

Estado de carga

00 – Sin carga

01 – Precarga (< VBATLOWV)

10 – Carga rápida

11 – Carga final realizada

Bit 2

PG_STAT – Estado Power Good

0 – La potencia no es buena

1 – La potencia es buena

Bit 1

SDP_STAT – Estado de entrada USB

0 – Se detecta la entrada USB100

1 – Se detecta la entrada USB500

Este bit siempre es 1 cuando VBUS_STAT no es 001

Bit 0

VSYS_STAT – Estado de la regulación VSYS

0 – No en la regulación VSYSMIN (BAT > VSYSMIN)

1 – En regulación VSYSMIN (BAT < VSYSMIN)

• **Registro 0C**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	X	X	X	X	X	X	X	X
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7

WATCHDOG_FAULT – Fallo del WATCHDOG

0 – Normal

1 – Expiración del temporizador del WATCHDOG

Bit 6

BOOST_FAULT – Fallo del modo boost

0 – Normal

1 – VBUS sobrecargado en OTG o VBUS OVP, o la batería está demasiado baja en el modo boost

Bit 5 y 4

CHRG_FAULT – Fallo en la carga

00 – Normal

01 – Fallo de entrada (VBUS > VACOV o VBAT < VBUS < VVBUSMIN (típico 3,8 V))

10 - Apagado térmico

11 – Expiración del temporizador de carga segura

Bit 3

BAT_FAULT – Fallo en la batería

0 – Normal

1 – BATOVP (VBAT > VBATOVP)

Bit 2, 1 y 0

NTC_FAULT – Fallo en NTC

Modo buck:

000 – Normal

001 – TS frío

010 – TS caliente

Modo boost:

000 – Normal

101 – TS frío

110 – TS Caliente

• **Registro 0D**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	1	0	0	1	0
Lectura o escritura	R/W	R/W - R	R/W - R	R/W - R	R/W - R	R/W - R	R/W - R	R/W - R

Bit 7

FORCE_VINDPM – Configuración del umbral VINDPM (límite de entrada de voltaje)
 0 – Umbral relativo (por defecto)
 1 – Umbral absoluto

Bit 6, 5, 4, 3, 2, 1 y 0

VINDPM – Umbral absoluto de VINDPM (límite de entrada de voltaje)
 El límite es de 3,9 V a 15,3 V (tiene un offset de 2,6 V). La combinación de bits 0001101 equivale a 3,9 V y la combinación de bits 1111111 equivale a 15,3 V. Por defecto es de 4,4 V (0010010). Si es inferior a 3,9 V (0001101) se fija a 3,9 V. El registro es de solo lectura cuando FORCE_VINDPM es 0 y el control interno puede escribirlo en función de la configuración del umbral de VINDPM relativo.

- Bit 6 – VINDPM de 6,4 V.
- Bit 5 – VINDPM de 3,2 V.
- Bit 4 – VINDPM de 1,6 V.
- Bit 3 – VINDPM de 800 mV.
- Bit 2 – VINDPM de 400 mV.
- Bit 1 – VINDPM de 200 mV.
- Bit 0 – VINDPM de 100 mV.

• **Registro 0E**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	0	0	0
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7

THERM_STAT – Estado de la regulación térmica
 0 – Normal (por defecto)
 1 – En regulación térmica

Bit 6, 5, 4, 3, 2, 1 y 0

BATV – Conversión ADC del voltaje de la batería (VBAT)

El límite es de 2,304 V a 4,848 V (tiene un offset de 2,304 V). La combinación de bits 0000000 equivale a 2,304 V y la combinación de bits 1111111 equivale a 4,848 V. Por defecto es de 2,304 V (0000000).

Bit 6 – BATV de 1,28 V.

Bit 5 – BATV de 640 mV.

Bit 4 – BATV de 320 mV.

Bit 3 – BATV de 160 mV.

Bit 2 – BATV de 80 mV.

Bit 1 – BATV de 40 mV.

Bit 0 – BATV de 20 mV.

• **Registro 0F**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	0	0	0
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7

Valor reservado a 0.

Bit 6, 5, 4, 3, 2, 1 y 0

SYSV – Conversión ADDC del voltaje del sistema (VSYSTEM)

El límite es de 2,304 V a 4,848 V (tiene un offset de 2,304 V). La combinación de bits 0000000 equivale a 2,304 V y la combinación de bits 1111111 equivale a 4,848 V. Por defecto es de 2,304 V (0000000).

Bit 6 – BATV de 1,28 V.

Bit 5 – BATV de 640 mV.

Bit 4 – BATV de 320 mV.

Bit 3 – BATV de 160 mV.

Bit 2 – BATV de 80 mV.

Bit 1 – BATV de 40 mV.

Bit 0 – BATV de 20 mV.

• **Registro 10**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	0	0	0
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7

Valor reservado a 0.

Bit 6, 5, 4, 3, 2, 1 y 0

SYSV – Conversión ADC de voltaje TS (TS) como porcentaje de REGN

El límite es de 21 % a 80 % (tiene un offset de 21%). La combinación de bits 0000000 equivale a 21 % y la combinación de bits 1111111 equivale a 80%. Por defecto es de 21 % (00000000).

Bit 6 – SYSV de 29,76 %.

Bit 5 – SYSV de 14,88 %.

Bit 4 – SYSV de 7,44 %.

Bit 3 – SYSV de 3,72 %.

Bit 2 – SYSV de 1,86 %.

Bit 1 – SYSV de 0,93 %.

Bit 0 – SYSV de 0,465 %.

• **Registro 11**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	0	0	0
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7

VBUS_GD – VBUS buen estado

0 – VBUS no conectado

1 – VBUS conectado

Bit 6, 5, 4, 3, 2, 1 y 0

VBUSV – Conversión ADC del voltaje VBUS (VBUS)

El límite es de 2,6 V a 15,3 V (tiene un offset de 2,6 V). La combinación de bits 0000000 equivale a 2,6 V y la combinación de bits 1111111 equivale a 15,3 V. Por defecto es de 2,6 V (00000000).

Bit 6 – VBUSV de 6,4 V.

Bit 5 – VBUSV de 3,2 V.

Bit 4 – VBUSV de 1,6 V.

Bit 3 – VBUSV de 800 mV.

Bit 2 – VBUSV de 400 mV.

Bit 1 – VBUSV de 200 mV.

Bit 0 – VBUSV de 100 mV.

• **Registro 12**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	0	0	0
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7

Valor reservado a 0.

Bit 6, 5, 4, 3, 2, 1 y 0

ICHGR – Conversión ADC de la corriente de carga (IBAT) cuando VBAT > VBATSHORT
 El límite es de 0 mA a 6,35 A (tiene un offset de 0 mA). La combinación de bits 0000000 equivale a 0 mA y la combinación de bits 1111111 equivale a 6,35 A. Por defecto es de 0 mA (0000000). Si VBAT < VBATSHORT el registro es 0000000.

Bit 6 – ICHGR de 3,2 V.

Bit 5 – ICHGR de 1,6 V.

Bit 4 – ICHGR de 800 mV.

Bit 3 – ICHGR de 400 mV.

Bit 2 – ICHGR de 200 mV.

Bit 1 – ICHGR de 100 mV.

Bit 0 – ICHGR de 50 mV.

• **Registro 13**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	0	0	0	0	0	0
Lectura o escritura	R	R	R	R	R	R	R	R

Bit 7

VDPM_STAT – Estado de VINDPM

0 – Deshabilitado

1 – Habilitado

Bit 6

IDPM_STAT – Estado de IINDPM

0 – Deshabilitado

1 – Habilitado

Bit 5, 4, 3, 2, 1 y 0

IDPM_LIM – Límite de corriente de entrada vigente mientras el Optimizador de corriente de entrada (ICO) está habilitado.

El límite es de 100 mA a 3,25 A (tiene un offset de 100 mA). La combinación de bits 000000 equivale a 100 mA y la combinación de bits 111111 equivale a 3,25 A.

Bit 5 – IDPM_LIM de 1,6 A.

Bit 4 – IDPM_LIM de 800 mA.

Bit 3 – IDPM_LIM de 400 mA.

Bit 2 – IDPM_LIM de 200 mA.

Bit 1 – IDPM_LIM de 100 mA.

Bit 0 – IDPM_LIM de 50 mA.

• **Registro 14**

Nº bit	7	6	5	4	3	2	1	0
Valor por defecto	0	0	1	1	1	0	0	1
Lectura o escritura	R/W	R/W	R	R	R	R	R	R

Bit 7

REG_RST – Reseteo del registro

0 – Mantener la configuración de registro actual (por defecto)

1 – Reseteo de los registros a su valor por defecto y el temporizador de seguridad

Vuelve a 0 al completarse el reseteo

Bit 6

ICO_OPTIMIZED – Estado del optimizador de corriente de entrada (ICO)

0 – Optimización activada (por defecto)

1 – Corriente de entrada máxima detectada

Bit 5, 4 y 3

PN – Configuración del dispositivo

111 – bq25895

Bit 2

TS_PROFILE – Perfil de temperatura

0 – Frio/caliente (por defecto)

Bit 1 y 0

DEV_REV – Revisión de dispositivo

01

Anexo J – Código de Arduino para la implementación del MPPT

```

//////////Comunicación//////////
#include <Wire.h> // Se incluye la librería para
comunicarnos por I2C
#define DEVICE_I2C_ADDRESS 0x6A // Se declara la dirección del
BQ25895
byte reg0C; // Se declara una variable para
almacenar un registro
byte reg11; // Se declara una variable para
almacenar un registro
byte reg12; // Se declara una variable para
almacenar un registro
int V65 = 0b00100001; // 65% de la tensión de circuito
abierto del panel solar
int V90 = 0b00110111; // 90% de la tensión de circuito
abierto del panel solar
byte Vlim; // Se declara una variable para
almacenar el valor de la tensión límite
byte Vmppt; // Se declara una variable para
almacenar el valor de la tensión MPPT

void setup() {
  Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
}

void loop() {
  Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
  Wire.write(0x11); // Se elige el registro 0x11
  Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
  Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Solicitud de un byte al
BQ25895
  reg11 = Wire.read(); // Se almacena la lectura en una variable
  delay(200); // Se espera 200 milisegundos

  if (reg11 > 0b10000000){
    Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
    Wire.write(0x07); // Se elige el registro 0x07
    Wire.write(0b10001100); // Se configura el registro 0x07 para
desactivar el WATCHDOG
    Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
    delay(200); // Se espera 200 milisegundos

    Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
    Wire.write(0x13); // Se elige el registro 0x13
    Wire.write(0b00000000); // Se configura el registro 0x13 para
deslimitar la corriente de entrada
    Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
    delay(200); // Se espera 200 milisegundos
  }
}

```



```

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x12); // Se elige el registro 0x12
Wire.write(0b01111111); // Se configura el registro 0x12 para
deslimitar la corriente de carga
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos
}

else{

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x07); // Se elige el registro 0x07
Wire.write(0b00001100); // Se configura el registro 0x07 para
activar el WATCHDOG
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x00); // Se elige el registro 0x00
Wire.write(0b11001000); // Se configura el registro 0x00 para
activar el modo de alta impedancia
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x02); // Se elige el registro 0x02
Wire.write(0b10111101); // Se configura el registro 0x02 para
hacer lecturas cada segundo
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

Vlim = V65; // Se fija el limite de Vbus al 65% del VOC del panel
fotovoltaico

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x00); // Se elige el registro 0x00
Wire.write(0b01001000); // Se configura el registro 0x00 para
desactivar el modo de alta impedancia
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x0D); // Se elige el registro 0x0D
Wire.write(Vlim); // Se configura el registro 0x0D para limitar
Vbus
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

```

```

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x12); // Se elige el registro 0x12
Wire.write(0b00000000); // Se configura el registro 0x12 para
limitar la corriente de carga a 0 mA
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

while (Vlim <= V90){

    Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
    Wire.write(0x02); // Se elige el registro 0x02
    Wire.write(0b10111101); // Se configura el registro 0x02 para
hacer lecturas cada segundo
    Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
    delay(200); // Se espera 200 milisegundos

    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
    Wire.write(0x12); // Se elige el registro 0x12
    Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
    Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Solicitud de un
byte al BQ25895
    reg12 = Wire.read(); // Se almacena la lectura en una variable
    delay(200); // Se espera 200 milisegundos

    if (reg12 > 0b00000000){ // Se compara si la corriente de carga
es mayor que 0 mA
        Vmppt = Vlim; // Se almacena el valor de tensión como tensión
MPPT
    }

    Vlim += 0b00000001; // Se suman 100 mV al limite de tensión

    Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
    Wire.write(0x0D); // Se elige el registro 0x0D
    Wire.write(Vlim); // Se configura el registro 0x0D para limitar
Vbus
    Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
    delay(200); // Se espera 200 milisegundos
}

Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x0D); // Se elige el registro 0x0D
Wire.write(Vmppt); // Se configura el registro 0x0D para limitar
Vbus
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
Wire.write(0x0C); // Se elige el registro 0x12
Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación

```

```
Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Solicitud de un byte
al BQ25895
reg0C = Wire.read(); // Se almacena la lectura en una variable
delay(200); // Se espera 200 milisegundos

while (reg0C <= 0b01111111){

    Wire.begin(); // Se inicia la librería wire
    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
    Wire.write(0x0D); // Se elige el registro 0x0D
    Wire.write(Vmppt); // Se configura el registro 0x0D para limitar
Vbus
    Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
    delay(200); // Se espera 200 milisegundos

    Wire.beginTransmission(DEVICE_I2C_ADDRESS); // Se establece la
comunicación con BQ25895
    Wire.write(0x12); // Se elige el registro 0x12
    Wire.endTransmission(); // Se finaliza la comunicación
    Wire.requestFrom(DEVICE_I2C_ADDRESS, 1); // Solicitud de un
byte al BQ25895
    reg12 = Wire.read(); // Se almacena la lectura en una variable
    delay(200); // Se espera 200 milisegundos
}
}
```