



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATAL
BARCELONATECH
Escola Superior d'Enginyeries Industrial
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Diseño e Implementación de un sistema de potencia eléctrica para prototipo de CubeSat

Documento:

Memoria

Autora:

Alba Muñoz Carrión

Director - Codirector:

Javier Gago - Manel Lamich

Titulación:

Grado en Ingeniería Electrónica Industrial y Automática

Convocatoria:

Primavera

TRABAJO FIN DE ESTUDIOS



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Agradecimientos

A mis tutores, Javier Gago y Manel Lamich, por ayudarme en todo lo posible.

A Manel Vilella, estudiante de doctorado, por enseñarme y ayudarme en el soldado de la PCB.

A mi pareja, familia y amigos por apoyarme cuando más lo necesitaba.

Y, sin duda alguna, gracias a mi padre, sin tu ayuda no lo hubiese logrado.



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Resumen

En este proyecto se podrá encontrar el proceso llevado a cabo para diseñar e implementar una placa EPS en un prototipo de nanosatélite CubeSat, con la cual se alimentarán todos los subsistemas de este.

Para ello, se implementará un software de gestión de la potencia controlado por la placa “*STM32 BluePill*”, que monitoreará los voltajes de entrada y salidas y se asegurará de que siempre se aprovechará el máximo de potencia solar gracias a un algoritmo MPPT.

También se utilizará un convertidor DC/DC ya probado anteriormente mediante un Trabajo de Fin de Máster sobre el estudio de EMI, por Adrián Ulloa de Souza.

El prototipo de CubeSat ya diseñado dispone de placas solares y baterías que serán la base de la alimentación de todo el sistema.

Los resultados pueden considerarse exitosos, ya que las pruebas individuales realizadas han resultado satisfactorias, por lo tanto, se supone que al integrar todos los componentes el efecto será exitoso, aunque, por falta de tiempo no se ha podido llevar a cabo.

Cabe destacar el enorme problema que ha sido la crisis de la falta de componentes, puesto que, debido a ello, se tuvo que modificar el objetivo y alcance del proyecto desde un primer momento. En todo caso, después de la modificación, no se ha tenido ningún tipo de problema.



Abstract

In this project you will find the process carried out to design and implement an EPS board for a CubeSat nanosatellite prototype, which will power all of its subsystems.

For this purpose, a power management software controlled by the “*STM32 BluePill*” board will be implemented, which will monitor the input and output voltages and will make sure that the maximum solar power will always be used thanks to an MPPT algorithm.

A DC/DC converted, already tested previously through a Master's Thesis on EMI study by Adrian Ulloa de Souza, will also be used.

The CubeSat prototype already designed has solar panels and batteries that will be the basis for the power supply of the whole system.

The results can be considered successful, since the individual tests carried out have been satisfactory, therefore, it is assumed that by integrating all the components the effect will be successful, although, due to lack of time it has not been possible to carry it out.

It is worth mentioning the enormous problem of the crisis of the lack of components, since, due to this, the objective and scope of the project had to be modified from the very beginning. In any case, after the modification, there have been no problems whatsoever.

Sumario

AGRADECIMIENTOS	II
RESUMEN	IV
ABSTRACT	V
SUMARIO	VI
ÍNDICE DE TABLAS	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
LISTA DE ABREVIATURAS.....	IX
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 OBJETO.....	2
1.2 ALCANCE.....	2
1.3 REQUISITOS	4
1.4 JUSTIFICACIÓN.....	4
2 ANTECEDENTES Y/O REVISIÓN DEL ESTADO DE LA CUESTIÓN	5
3 METODOLOGÍA	6
4 PLANTEAMIENTO Y DECISIÓN SOBRE SOLUCIONES ALTERNATIVAS.....	7
5 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN ESCOGIDA	8
5.1 HARDWARE	8
5.1.1 Paneles solares	8
5.1.2 Batería	9
5.1.3 Convertidor DC/DC.....	9
5.1.4 Sensores	11
5.1.5 Reguladores	12
5.1.6 Microcontrolador.....	14
5.1.7 Diseño final.....	16
5.2 SOFTWARE	17
5.2.1 Bloques de programación	19
5.3 PRUEBAS	24
5.3.1 Pruebas de software.....	24
5.3.2 Pruebas de hardware	27
5.3.3 Pruebas finales.....	29
6 PRESUPUESTO	32
7 CONCLUSIONES.....	33
8 REFERENCIAS.....	34



Índice de tablas

TABLA 1 TAREAS POR REALIZAR	3
TABLA 2 LISTADO DE ENTREGABLES	3
TABLA 3 VALORES NOMINALES DEL PANEL SOLAR SLMD121H10L.....	8
TABLA 4 VALORES NOMINALES DE LAS BATERÍAS LIFePO4.....	9
TABLA 5 PRESUPUESTO	32

Índice de figuras

FIG. 1 ESQUEMA DE ESTRUCTURA DE UN CUBESAT (FUENTE: [3]. ELABORACIÓN PROPIA)	1
FIG. 2 PROTOTIPO DE CUBESAT DESARROLLADO POR UPC ESEIAAT	5
FIG. 3 ESTRUCTURA DE LA NUEVA PLACA EPS (FUENTE: [6]. ELABORACIÓN PROPIA).....	7
FIG. 4 CURVA CARACTERÍSTICA DEL PANEL SOLAR.....	8
FIG. 5 SOPORTE DE LAS BATERÍAS	9
FIG. 6 ESQUEMA CONVERTIDOR BOOST	10
FIG. 7 PLACA DE CONVERTIDOR DC/DC	11
FIG. 8 NOTA DE APLICACIÓN DEL ZXCT1009	11
FIG. 9 SENSOR DE TENSIÓN - DIVISOR DE TENSIÓN	12
FIG. 10 ESQUEMA REGULADOR 3.3V.....	13
FIG. 11 ESQUEMA REGULADOR 5V	13
FIG. 12 ESQUEMA REGULADOR 15V.....	14
FIG. 13 DISPOSICIÓN DE LOS PERIFÉRICOS EN BLUEPILL.	15
FIG. 14 INTERFAZ ST-LINK V2	15
FIG. 15 ADAPTADOR USB - TTL SERIE	16
FIG. 16 RUTEADO PCB.....	17
FIG. 17 IMAGEN 3D PLACA EPS.....	17
FIG. 18 CONFIGURACIÓN LECTOR DE TARJETAS EN IDE ARDUINO	18
FIG. 19 DIAGRAMA DE FLUJO GENERAL.....	19
FIG. 20 TABLA DE LA VERDAD DEL SI8274. (FUENTE: HOJA DE DATOS SI8274)	20
FIG. 21 DIAGRAMA DE BLOQUES DE LA FUNCIÓN ADQUISICIÓN DE DATOS	21
FIG. 22 MÉTODO P&O. (FUENTE: ARTÍCULO [11]. ELABORACIÓN PROPIA.)	23
FIG. 23 MÉTODO CONDUCTANCIA INCREMENTAL (FUENTE: ARTÍCULO [11]. ELABORACIÓN PROPIA)	23
FIG. 24 DUTY CYCLE = 15.1%	24
FIG. 25 DUTY CYCLE 40.1%	24
FIG. 26 ESQUEMA DEL MONTAJE	25
FIG. 27 IMAGEN DEL MONTAJE	25
FIG. 28 CAPTURA DEL MONITOR SERIE CON DUTY CYCLE DE 30%	26
FIG. 29 LECTURA DE VIN	26
FIG. 30 LECTURA DE VOUT.....	26
FIG. 31 ESQUEMA DE MONTAJE PRUEBA HARDWARE.....	27
FIG. 32 SALIDA REGULADOR 3.3V	27
FIG. 33 SALIDA REGULADOR 5V	27
FIG. 34 SALIDA REGULADOR 15V	27
FIG. 35 OSCILOSCOPIO	28
FIG. 36 OSCILOSCOPIO VARIANDO VBAT ¹	28
FIG. 37 IMAGEN CÁMARA TÉRMICA	29
FIG. 38 ESQUEMA PRUEBA CONVERTIDOR DC/DC	30
FIG. 39 CAPTURA DEL MONITOR SERIE	30
FIG. 40 SALIDA VOUT	30
FIG. 41 SALIDA REGULADOR 5V	30
FIG. 42 SALIDA REGULADOR 15V	30
FIG. 43 VISUALIZACIÓN OSCILOSCOPIO DE VIN Y VOUT.....	31
FIG. 44 OSCILOSCOPIO REGULADOR 3.3V.....	31
FIG. 45 OSCILOSCOPIO REGULADOR 5V.....	31
FIG. 46 OSCILOSCOPIO REGULADOR 15V.....	31



Lista de abreviaturas

EPS	<i>Electronic Power System</i> Sistema Electrónico de Potencia
PCB	<i>Printed Circuit Boards</i> Placas de Circuito Impreso
CubeSat	Nanosatélite de dimensiones estandarizadas
PLATHON	PLATaforma de simulación Hardware in the loop para comunicaciones Ópticas de Nanosatélites
OBC	<i>On-Borad Computer</i> Ordenador de A Bordo
ADCS	<i>Attitude Determination & Control System</i> Sistema de Determinación y Control de Actitud
EMI	<i>ElectroMagnetic Interference</i> Interferencia Electromagnética
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> Entorno de Desarrollo Integrado
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i> Seguidor del punto de máxima potencia

1. Introducció

Un CubeSat es una classe de satèl·lite que adopta un tamany i factor de forma estàndar, cuya unitat es definida com "U". Un CubeSat 1U es un cubo de 10 cm de arista com una massa de hasta 2 kg. Com el transcurs de los años, se han desarrollado varios tamaños de CubeSat, los cuales son 1U, 1.5U, 2U, 3U, 6U y 12U. [1]

En un primer momento, estos satèl·lites fueron desarrollados por dos profesores de la Universidad Politècnica del Estado de California com el objetivo de permitir a estudiantes diseñar, construir, probar y operar un satèl·lite com capacidades similares a las del satèl·lite Sputnik [2]. Com el paso del tiempo, se convirtiò en un estàndar debido a las ventajas que ofrecen por su pequeño tamaño y reducción de precio y tiempo de desarrollo.

En cuanto a la estructura de los CubeSat, se divide en 4 subsistemas principales [3]:

1. Cargas Útiles ("Pay Load"): Objetos necesarios para que el satèl·lite cumpla com las funciones y aplicaciones determinadas, como por ejemplo radares, cámaras, antenas, etc. Para poder realizar su misión [3].
2. Sistema de Comunicaciones ("COMS"): Sistema responsable de la comunicación del CubeSat com otros satèl·lites y com el planeta Tierra. Será capaz de actuar com emisor y receptor de comunicaciones [3].
3. Sistema de Control de Actitud ("ADCS"): Este proceso hace referencia al cálculo y control de la posición del satèl·lite com respecto al planeta Tierra u otra entidad, ya sea otro satèl·lite u objetos [3].
4. Sistema Eléctrico de Potencia ("EPS"): Su función principal es encargarse de convertir la energía solar recibida por los paneles solares a energía eléctrica para alimentar a todos los subsistemas y cargar las baterías para garantizar el funcionamiento del CubeSat [3].

Todos estos subsistemas requieren de energía eléctrica para funcionar y llevar a cabo sus misiones [3].

En la siguiente imagen se puede observar un esquema general de la composición de un CubeSat.

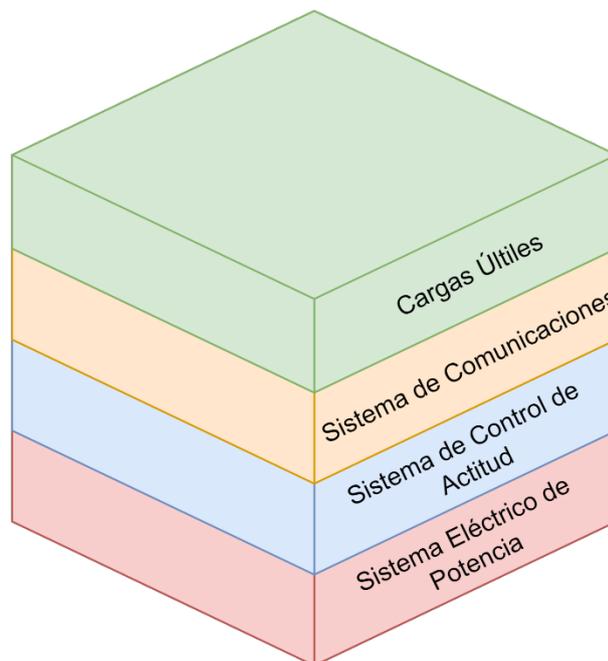


Fig. 1 Esquema de estructura de un CubeSat (Fuente: [3]. Elaboración propia)

1.1 Objeto

Actualmente, en la UPC ESEIAAT se están realizando una serie de proyectos relacionados con la creación de un prototipo de CubeSat.

Principalmente, el objeto de este proyecto era implementar una placa electrónica EPS (por sus siglas en inglés: *Electronic Power System*), la cual ya fue diseñada en un estudio anterior [4], con el fin de alimentar a todos los subsistemas de un prototipo de CubeSat.

Por problemas con el suministro de los componentes necesarios para la implementación en la placa, se debió cambiar el objeto del proyecto.

Así que, el nuevo objeto del proyecto se basa en diseñar e implementar un EPS con componentes que ya estén disponibles en el laboratorio.

Estos componentes son:

- La placa de convertidor DC/DC que se utilizó en el estudio de EMI (Interferencias Electromagnéticas, en inglés) [3].
- *BluePill* como microcontrolador.
- Placas solares.
- Baterías de almacenamiento.
- Reguladores conmutados de tensión.

Se deberá diseñar, construir y probar una PCB que incluya la conexión con el microcontrolador y los demás componentes.

1.2 Alcance

Con el fin de llegar a la solución deseada, es decir, diseñar e implementar la nueva EPS, primeramente, se deberá estudiar las especificaciones que deberá seguir este proyecto.

A continuación, se deberá estudiar el diseño de la nueva placa, así como la disposición de los componentes como del ruteado de las pistas.

Finalmente, se deberá validar su diseño y se solicitará su producción.

Después, se procederá a la integración de los componentes en dicha placa.

Por otro lado, se deberá estudiar la solución del software que se implementará, es decir, realizar un diagrama de bloques inicial con el procedimiento que deberá seguir el programa.

Finalmente, se deberá desarrollar el programa cumpliendo con las especificaciones necesarias.

Cuando el programa esté efectuado se deberá validar la solución.

Aunque este proyecto trate de controlar la alimentación de un CubeSat (gracias a las cuatro caras de paneles solares que tiene) y debido a que se necesitan componentes y placas existentes en el laboratorio, en el objeto de este proyecto queda excluido el diseño e implementación de cuatro placas de convertidores, ya que no disponemos de suficientes unidades, sino que, se implementará únicamente UNA placa de convertidor.

Para mayor información sobre las tareas por realizar, se puede consultar la siguiente tabla.

Tabla 1 Tareas por realizar

Tarea	Descripción	Duración
Realización Project Charter	Redacción del documento entregable Project Charter.	1 semana
Recoger información sobre anteriores proyectos	Lectura y búsqueda de información de los anteriores proyectos relacionados.	2 semanas
Diseño PCB	Diseño de la placa PCB en entorno KiCad.	1 semana
Solicitud producción PCB	Solicitud de impresión de la placa realizada a la empresa JCBPCB.	1 día
Primer seguimiento TFG	Realización del Primer seguimiento de TFG mediante Atenea.	1 día
Configuración software	Realización del software que se implementará en la <i>BluePill</i> .	1 mes
Segundo seguimiento TFG	Realización del Segundo seguimiento de TFG mediante Atenea.	1 día
Tercer seguimiento TFG	Realización del Tercer seguimiento de TFG mediante Atenea.	1 día
Recepción PCB	Recepción de la PCB.	1 día
Implementación	Implementación y soldadura de la PCB con los componentes necesarios.	1 semana
Redacción documento Memoria	Redacción del entregable Memoria.	3 semanas
Pruebas de validación (HW y SW)	Comprobación de que los desarrollos de Hardware y Software son correctos.	2 semanas
Entrega documento Memoria	Entrega del documento de Memoria.	1 día

En cuanto al listado de entregables, se muestran a continuación.

Tabla 2 Listado de entregables

Entregable	Título
Entregable 1	Project Charter
Entregable 2	Primer Seguimiento TFG
Entregable 3	Segundo Seguimiento TFG
Entregable 4	Tercer Seguimiento TFG
Entregable 5	Memoria
Entregable 6	Esquemáticos PCB
Entregable 7	Ruteados PCB
Entregable 8	Algoritmo SW

1.3 Requisitos

Los requisitos que deberá cumplir este trabajo de fin de grado son:

- Desarrollar el programa en entorno Arduino
- Utilizar el microcontrolador “*BluePill*”
- Disponer de una placa que cumpla con las funciones de un EPS (como, por ejemplo, controlar diferentes voltajes de alimentación)
- Desarrollar un programa que cumpla con las necesidades (cargar una batería, disponer de alimentación gracias a los paneles solares...)
- Utilizar el programa KiCad para diseñar la PCB
- Disponer del diseño definitivo de una placa PCB que cumpla con las funciones de un EPS

1.4 Justificación

La necesidad del trabajo nace debido a que el satélite CubeSat requiere de un sistema de gestión de la potencia con tal de alimentar a todos los subsistemas y componentes que lo forman.

Este sistema de gestión de potencia consta de unas placas solares, las cuales captarán la energía solar, unas baterías que almacenarán dicha energía para alimentar a los componentes necesarios y una placa controladora.

Dicha placa controladora, la cual es la que se ha diseñado e implementado en este proyecto, se debe ocupar de recibir la energía proveniente del sol, monitorearla y distribuirla a los componentes necesarios. Además, el excedente no utilizado lo transporta a las baterías.

Por otra parte, como ya se ha mencionado anteriormente, la placa también se ocupa del algoritmo que busca la máxima potencia, MPPT (Seguidor del Punto de Máxima Potencia en inglés), para así aprovechar al máximo la energía solar.

2 Antecedentes y/o revisión del estado de la cuestión

Primeramente, es necesario destacar que este Trabajo de Fin de Grado parte de uno anterior, titulado “*Desing and Integration of Electronic Subsystems of a CubeSat*”, llevado a cabo por Nicolas Tran [4].

Actualmente, en la Universidad Politécnica de Cataluña, concretamente en el centro ESEIAAT, se están realizando varios proyectos relacionados con la creación de un prototipo de CubeSat. Este conjunto de varios proyectos se concentra en PLATHON (Plataforma de simulación Hardware in the loop para comunicaciones Ópticas de Nanosatélites) y hay muchos estudiantes involucrados. Los informes ya ejecutados por dichos estudiantes pueden consultarse en el sitio web UPC Commons [5].



Fig. 2 Prototipo de CubeSat desarrollado por UPC ESEIAAT

En estos momentos, la placa del subsistema ADCS ya ha sido realizada exitosamente por otros estudiantes.

En cuanto a la placa de potencia EPS se han llevado a cabo varios estudios de desarrollo, como por ejemplo Implementación de un EPS para CubeSat, por Adrián Gonzalo Ulloa de Souza [3]; *CubeSat Educational Kit*, por Antoine Laspeyres [6] y *Desing and Integration of Electronic Subsystems of a CubeSat*, por Nicolas Tran [4].

Como ya se ha comentado anteriormente, la función de la placa de potencia EPS, la cual se pretende desarrollar en este Proyecto de Fin de Grado, es encargarse de convertir la energía solar recibida por los paneles solares a energía eléctrica para alimentar a todos los subsistemas y cargar las baterías para garantizar el funcionamiento del CubeSat [3], por lo que es muy importante su correcto desarrollo.

3 Metodología

A continuación, se resumirán los pasos seguidos para conseguir los objetivos del trabajo. En apartados siguientes, se desarrollará de manera extensa la selección de soluciones implementadas.

Primeramente, se trataron de adquirir los máximos conocimientos mediante los proyectos ya redactados, como pueden ser los de los compañeros N. Tran [4], A. Ulloa [3] y A. Laspeyres [6], ya que este Trabajo de Fin de Grado compartía la mayoría de los objetivos con los trabajos e incluían información muy necesaria para la realización de este.

Seguidamente, se realizó una búsqueda de componentes, los cuales se implementarían en el desarrollo de la placa EPS. Esta búsqueda resultó no muy exitosa debido a la crisis de componentes que estamos sufriendo, aunque, con esfuerzo, se pudieron encontrar todos los componentes necesarios para este proyecto.

A continuación, se inició una búsqueda de información sobre la tarjeta de desarrollo *BluePill*, ya que era un campo novedoso debido a que los microcontroladores que se habían estudiado durante el grado eran de diferente arquitectura. Existen varios sitios web donde encontrar abundante información sobre la *BluePill*, aunque en este proyecto, se tomaron como páginas de referencia los sitios web *Luis Llamas* [7] para obtener un primer contacto y *Github* [8] para profundizar en la programación.

Posteriormente, se indagó en los documentos sobre la placa del convertidor DC/DC ya diseñada para conocer con profundidad su funcionamiento, ya que se interconectó con el sistema que se diseñará en este Trabajo de Fin de Grado.

Después se llevó a cabo, paralelamente, el diseño de la placa EPS mediante la aplicación KiCad y su programación mediante el entorno Arduino. El montaje y soldadura de componentes de dicha placa se llevó a cabo en el laboratorio de la Universidad ya que disponen de una muy buena estación de soldadura.

Durante el desarrollo del programa, se realizaban pequeñas pruebas para comprobar el correcto funcionamiento integrando el hardware y el software. Dichas pruebas se detallarán en siguientes apartados.

4 Planteamiento y decisión sobre soluciones alternativas

Una de las soluciones alternativas que se plantearon en un primer momento fue desarrollar e implementar el diseño que se llevó a cabo en el proyecto de N. Tran [4] pero por la crisis de componentes que estamos sufriendo actualmente, no fue posible conseguir los componentes necesarios a integrar.

Así que, finalmente, se decidió que la solución a implementar fuese desarrollar una nueva placa, basándose en un estudio realizado por el compañero A. Ulloa [3] pero adaptándola lo máximo posible al proyecto comentado anteriormente, el del compañero N. Tran [4].

La especificación técnica que tiene que cumplir esta nueva placa se define a continuación.

- Implementar una batería 9.6 V, 1500 mAh, la cual ya ha sido elegida por otros compañeros.
- Integrar una placa de convertidor DC/DC, que ya se realizó con anterioridad.
- Salidas de voltaje regulado conmutables de 3.3 V, 5 V y 15 V.
- Tensión para la alimentación del microcontrolador *BluePill* de 5 V utilizando el convertidor interno DC/DC 5 V/3.3 V.
- Un microcontrolador que monitorice la potencia de entrada y salida y que gestione el algoritmo MPPT.

En la Fig. 3 se observa el esquema que sigue la placa de potencia EPS que se desarrolló en este Trabajo de Fin de Grado.

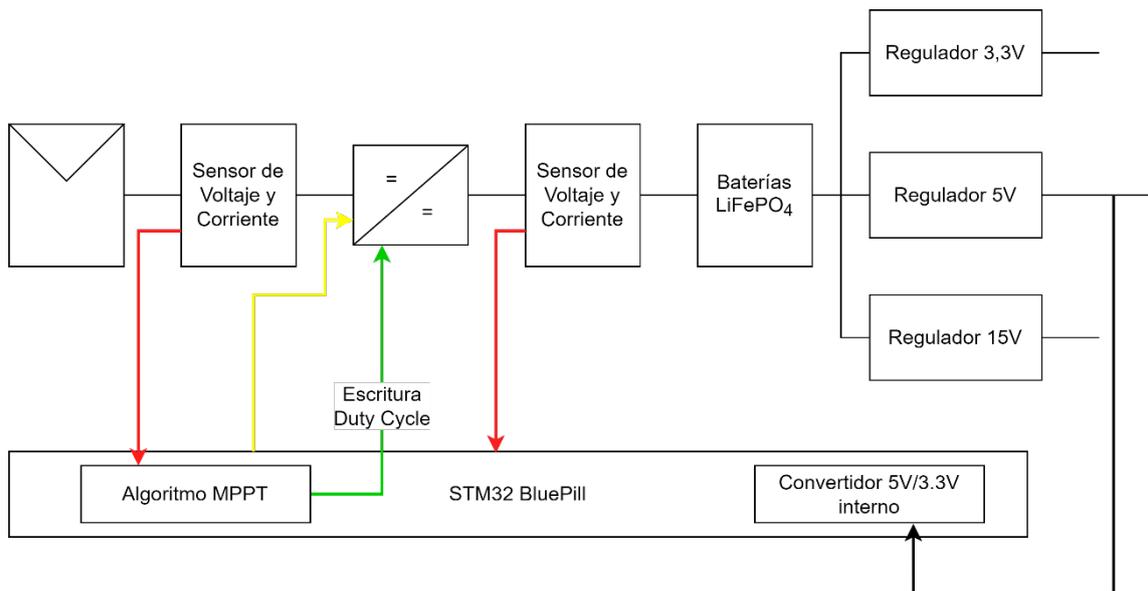


Fig. 3 Estructura de la nueva placa EPS (Fuente: [6]. Elaboración propia)

5 Desarrollo de la solución escogida

La explicación del desarrollo de la solución escogida se dividirá en tres subapartados definidos como Hardware, Software y Pruebas.

5.1 Hardware

5.1.1 Paneles solares

Para la elección de los paneles solares que se incluyeron en el prototipo de CubeSat se tuvo en cuenta la eficiencia de las placas, disponer de un elemento compacto y que tenga una fácil integración, que proporcione la mayor potencia por superficie posible y, por último, la cantidad de vida útil, robustez y tecnología del panel, en este caso: Silicio monocristalino [3].

El panel finalmente escogido es el modelo IXOLAR – SLMD121H10L [3]. En la siguiente tabla se muestran los valores nominales del componente.

Tabla 3 Valores nominales del panel solar SLMD121H10L

Tensión de circuito abierto (V)	Corriente de cortocircuito (mA)	Tensión típica (V)	Corriente típica (mA)	Dimensiones (LxAxH) (mm)	Tensión en el punto de máxima potencia (V)	Corriente en el punto de máxima potencia (mA)
6.3	50	5.01	44.6	42x35x2	5.01	44.6

En el prototipo de CubeSat, para el cual estamos realizando la placa EPS, dispone de 4 paneles solares en paralelo por cada cara, como se ha podido observar en Fig. 2.

Dicha disposición de paneles hace que tengamos los siguientes valores de trabajo:

$$I_{\text{paneles}} = 4 * I_{\text{tipica}} = 4 * 44.6 = 178.4 \text{ mA} \quad (1)$$

$$V_{\text{paneles}} = V_{\text{tipica}} = 5.01 \text{ V} \quad (2)$$

$$P_{\text{paneles}} = I_{\text{paneles}} * V_{\text{paneles}} = 178.4 * 10^{-3} * 5.01 = 0.89 \text{ W} \quad (3)$$

En la siguiente figura se puede observar la curva característica de los módulos fotovoltaicos con modelo SLMD121H10L.

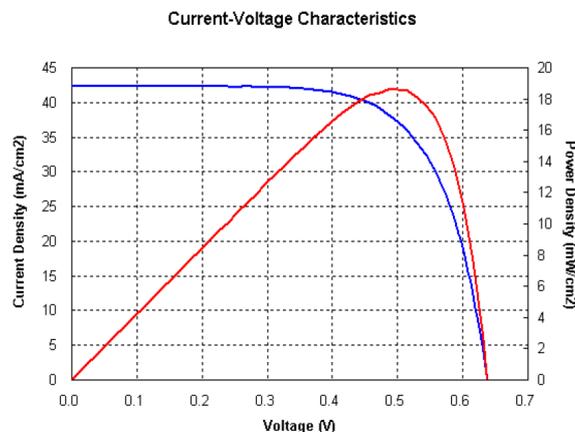


Fig. 4 Curva característica del panel solar

5.1.2 Bateria

Por lo que respecta a las baterías, se dispone de 3 baterías en serie, del tipo LiFePO₄, en concreto, el modelo NX-ACL9011. A continuación, se muestra una tabla donde aparecen los valores nominales de este tipo de baterías.

Tabla 4 Valores nominales de las baterías LiFePO₄

Tensión (V)	Dimensión (DxH) (mm)	Capacidad (mAh)	Tensión máxima de carga (V)	Tensión nominal	Tensión máxima de descarga (V)	Tensión de corte (V)
3.2	18.2x64.8	1500	4.2	3.2	2.5	3.65

Se debe destacar que esta tabla muestra los valores nominales de UNA batería, en nuestro caso, al tener 3, los valores de voltaje deben multiplicarse por 3.

En el caso de que el voltaje pase de 10.95 (valor resultante de multiplicar la tensión de corte por tres, $3.65 \cdot 3 = 10.95$) se debe cortar o bajar la tensión de entrada a la batería.

El soporte de baterías ya fue realizado anteriormente por otros compañeros y, a continuación, puede observarse.

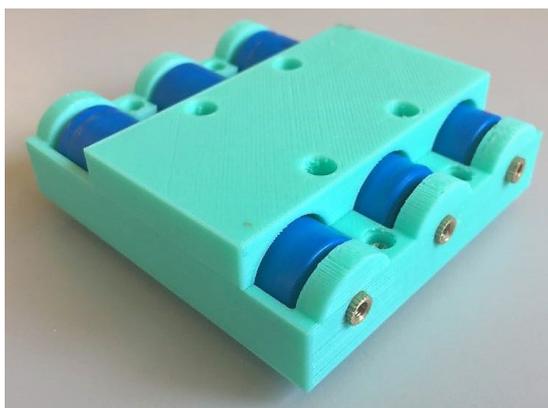


Fig. 5 Soporte de las baterías

5.1.3 Convertidor DC/DC

El convertidor es el encargado de adaptar la tensión de salida de este. Existen varios tipos y pueden clasificarse de la siguiente manera [3]:

- Buck: Es un convertidor reductor, por lo tanto, su función es ofrecer a la salida un valor de voltaje menor al que hay en la entrada.
- Boost: Este componente, también conocido como elevador y, al igual que el convertidor reductor, la función coincide con su denominación, la cual es proporcionar un valor de tensión mayor en la salida del que había en la entrada.
- Buck-Boost: También conocido como reductor-elevador, su característica es que a la salida puede haber un menor o mayor voltaje que a la entrada, dependiendo de la cómo se configure el convertidor.

Estos convertidores son de tipo conmutado. Su operación depende de una señal de control conocida como *duty cycle* (D). Esta señal, lo que hace es conmutar el tiempo en el que estado de los transistores entre ON u OFF. El *duty cycle* relaciona las tensiones de entrada y salida y su valor normalmente se expresa en tanto por ciento [3].

Este apartado se centrará únicamente en la explicación de los convertidores Boost, ya que es el que se ha utilizado en la placa.

La ecuación que relaciona el *duty cycle* con los valores de voltaje es la siguiente:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{1 - D} \quad (4)$$

Donde, aislando el *duty cycle*, la fórmula quedaría de la siguiente manera:

$$D = 1 - \frac{V_i}{V_o} \quad (5)$$

A continuación, se observa el esquema de este tipo de convertidores.

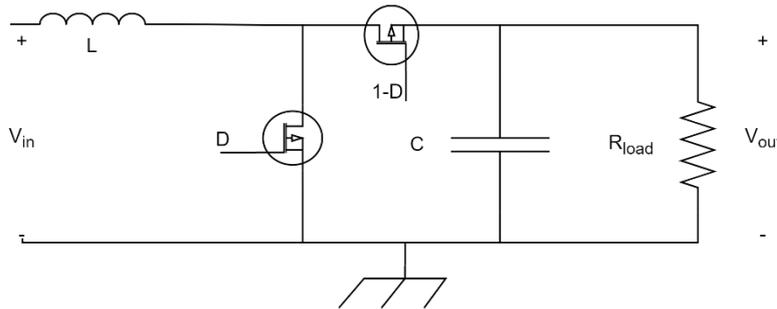


Fig. 6 Esquema convertidor Boost

Como se ha mencionado, la placa de convertidor DC/DC que se emplea en este Trabajo de Fin de Grado ya fue realizada anteriormente. Por lo tanto, los cálculos de elección de componentes no se justificarán.

Ahora, se debe estudiar el valor que puede tomar el *duty cycle*, usando la fórmula (5). Se deben tener en cuenta varios valores de V_o y V_i para así cubrir todos los casos posibles.

$$V_o \text{ máx} = V_{\text{corte}} * 3 = 3.65 * 3 = 10.95V \quad (6)$$

$$V_o \text{ mín} = V_{\text{nominal}} * 3 = 3.2 * 3 = 9.6V \quad (7)$$

$$V_i \text{ máx} = 6V \quad (8)$$

$$V_i \text{ mín} = 4V \quad (9)$$

Para calcular el rango de valores que tendrá el *duty cycle* se usan los siguientes valores:

- $\text{Duty cycle}_{\text{mín}}$: $V_i \text{ máx}$ y $V_o \text{ mín}$, ya que es el caso en el que el valor del *duty cycle* es menor.

$$D_{\text{mín}} = 1 - \frac{V_i \text{ máx}}{V_o \text{ mín}} = 1 - \frac{6}{9.6} = 0.375 \quad (10)$$

El valor en tanto por ciento sería de 37.5%.

- $\text{Duty cycle}_{\text{máx}}$: $V_i \text{ mín}$ y $V_o \text{ máx}$, ya que es el caso en el que el *duty cycle* es mayor.

$$D_{\text{máx}} = 1 - \frac{V_i \text{ mín}}{V_o \text{ máx}} = 1 - \frac{4}{10.95} = 0.635 \quad (11)$$

El valor en tanto por ciento sería de 63.5%.

El rango de *duty cycle* estaría entre 37.5% y 63.5%.

Finalmente, en la siguiente imagen se puede encontrar la placa de convertidor DC/DC que fue creada. En el documento *Anexos – 1 Esquemático Placa DC/DC* se puede encontrar su esquemático.



Fig. 7 Placa de convertidor DC/DC

5.1.4 Sensores

Los sensores, que están incluidos en la placa de convertidor DC/DC, también fueron calculados anteriormente. En este apartado se mostrarán las funciones de transferencia de los sensores, así como los valores máximos que pueden medir para no dañar el microcontrolador.

Se debe destacar que en la placa tanto los sensores de tensión e intensidad de entrada y salida son los mismos.

5.1.4.1 Sensor de corriente

Para llevar a cabo el cálculo de corriente se utilizó el chip ZXCT1009 por su bajo consumo en comparación con otros, el cual se puede consultar a continuación.

La configuración del sensor, según su hoja de datos, es la mostrada en la Fig. 8.

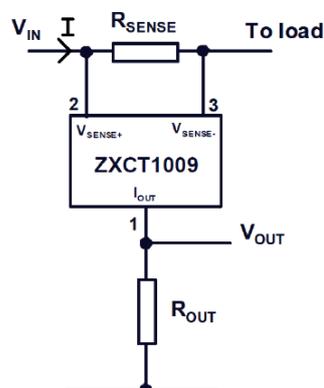


Fig. 8 Nota de aplicación del ZXCT1009

La función de transferencia del sensor de corriente es la siguiente.

$$V_{out} = 0.01 * R_{sense} * I * R_{out} \quad (12)$$

$$I = \frac{V_{out}}{0.01 * R_{sense} * R_{out}} \quad (13)$$

Con los valores de resistencia de R_{sense} y R_{out} de la placa y teniendo que la $V_{out \text{ máx}}$ admitida por un puerto analógico del microcontrolador es 3.3 V, la intensidad máxima que se puede medir es de 1096.35 mA, tal y como se muestra en el cálculo siguiente.

$$I = \frac{V_{out}}{0.01 * 1 * 301} = \frac{3.3}{3.01} = 1096.35 \text{mA} \quad (14)$$

5.1.4.2 Sensor de voltaje

Para llevar a cabo una monitorización del valor de voltaje, se utilizó un divisor de tensión.

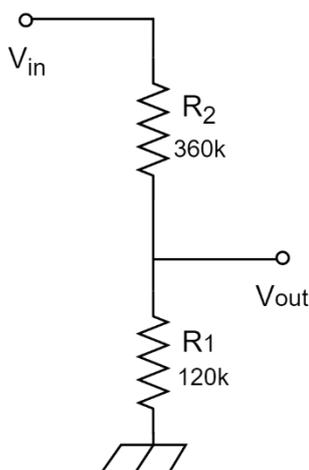


Fig. 9 Sensor de tensión - Divisor de tensión

El cálculo de este se muestra a continuación.

$$V_{out} = \frac{R_1}{R_2 + R_1} * V_{in} \quad (15)$$

Teniendo los valores de $R_1 = 120 \text{ k}\Omega$ y $R_2 = 360 \text{ k}\Omega$ que ya existen en la placa, tendremos que para una $V_{out \text{ máx}} = 3.3 \text{ V}$ admitidos por el microcontrolador, la $V_{in \text{ máx}}$ que se puede medir es de 13.2 V. Tal y como se muestra en el siguiente cálculo.

$$V_{in \text{ máx}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} * V_{out \text{ máx}} = 4 * 3.3 = 13.2 \text{ V} \quad (16)$$

5.1.5 Reguladores

Para alimentar las diferentes placas del sistema del nanosatélite, se necesitan diferentes tensiones que conseguiremos con reguladores de voltaje conmutados a partir de la tensión de batería. En este caso, se tienen reguladores de tensión con salidas de 3.3 V, 5 V y 15 V.

5.1.5.1 Regulador 3.3V

En este caso se utiliza el LM2675M-3.3 el cual es un convertidor buck (reductor). Este componente ya está autorregulado por diseño y, por lo tanto, necesita muy pocos componentes para ofrecer una tensión de salida de 3.3 V.

Para el diseño de este regulador nos basamos en el estudio realizado por Nicolas Tran [4]. El esquema resultante es el siguiente.

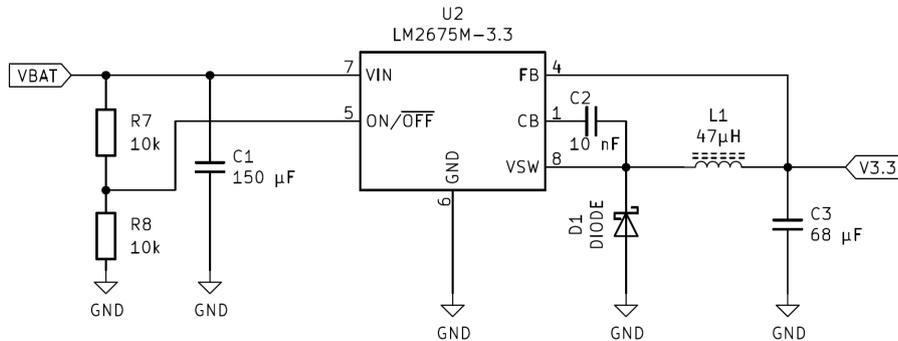


Fig. 10 Esquema regulador 3.3V

5.1.5.2 Regulador 5V

En un principio se iba a emplear el mismo circuito integrado, el LM2675M-5 el cual es igual que el regulador de 3.3 V pero autorregulado a 5 V. Pero, por la falta de componentes, se tuvo que utilizar un regulador LM2698.

Este componente es un convertidor boost (elevador) con la característica de que, si se configura con modo SEPIC, puede trabajar como buck o boost.

Según las instrucciones de la hoja de datos, el circuito resultante es el siguiente.

La frecuencia interna de trabajo de este circuito integrado puede ser de 600 kHz o 1.25 MHz configurable a través del pin FSLCT (7). Se elige la frecuencia de 1.25 MHz ya que las bobinas y condensadores a seleccionar son de menor valor.

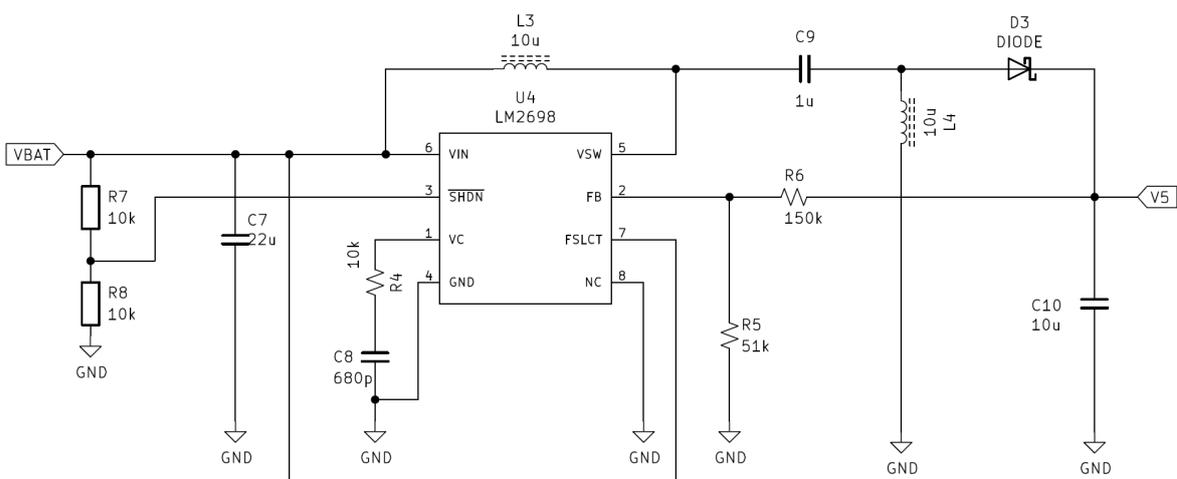


Fig. 11 Esquema regulador 5V

5.1.5.3 Regulador 15V

Se usará el mismo circuito integrado que en el regulador de 5 V, el LM2698, pero esta vez como convertidor boost (elevador).

Para decidir el valor de los componentes a implementar, se utilizó la herramienta de diseño de la página web Texas Instrument [9].

La frecuencia interna de trabajo se selecciona de igual manera que el anterior regulador, a 1.25 MHz, por la misma razón.

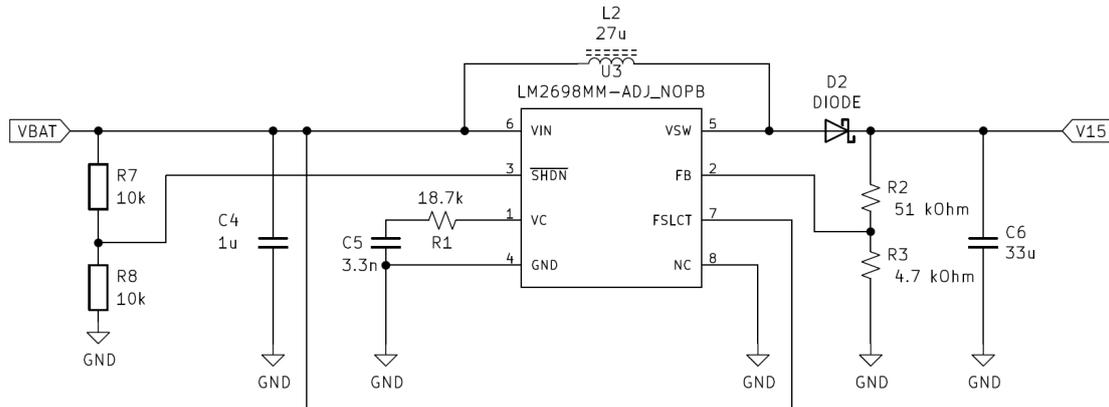


Fig. 12 Esquema regulador 15V

5.1.6 Microcontrolador

Se utiliza la placa de desarrollo *BluePill* para procesar y monitorear datos y valores de voltaje y corriente. Esta tarjeta de desarrollo es económica, fácil de programar en entorno Arduino y dispone de un fácil acceso a los periféricos.

El microcontrolador que lleva incorporado es un *STM32f103C8T6* el cual cuenta con un procesador ARM Cortex-M3 de 32 bits y con frecuencia máxima de trabajo de 72 MHz, además, incluye una memoria RAM de 20 KB y 128 KB de memoria Flash. En el documento *Anexos – 2 Tabla periféricos STM32* se puede encontrar la tabla en la cual se describen los periféricos de cada modelo.

Además, el diagrama de bloques de este microcontrolador también se puede encontrar en el documento *Anexos – 3 Diagrama de bloques STM32F103*.

La disposición de los periféricos de la tarjeta de desarrollo se puede consultar en la siguiente figura.

THE GENERIC
STM32F103
 PINOUT DIAGRAM

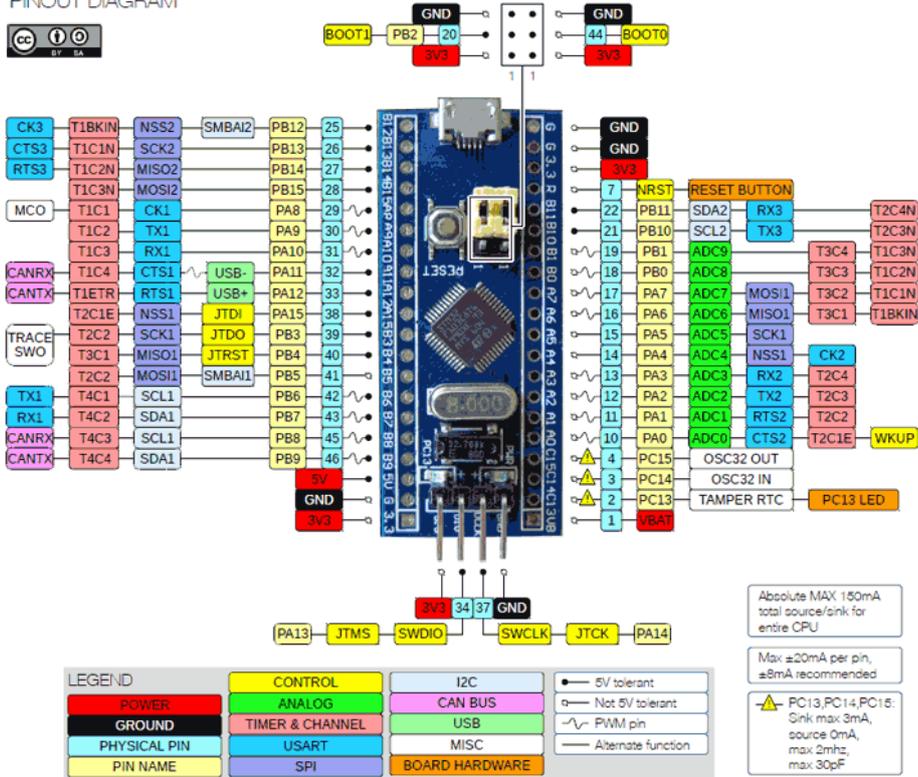


Fig. 13 Disposición de los periféricos en BluePill.

Como se puede observar, se tiene acceso a todos los puertos y funciones. Además, cuenta con un regulador interno 5 V/3.3 V así que, se puede alimentar directamente desde el puerto USB a 5 V o con 3.3 V.

También dispone de pines específicos para llevar a cabo la programación a través de una interfaz conocida como ST-LINK V2.



Fig. 14 Interfaz ST-LINK V2

Por último, se necesita un adaptador de nivel USB a TTL Serie para mostrar los resultados de la programación y pruebas en un programa monitor serie.

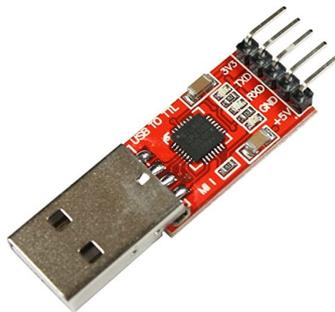


Fig. 15 Adaptador USB - TTL Serie

Por lo que respecta a este Trabajo de Fin de Grado, se utilizan los periféricos ADC, Timers, USARTs e I2C.

Las funciones que tiene que realizar la *BluePill* son las siguientes:

- Lectura del voltaje y de la corriente que ofrecen los paneles solares y gestionarlos mediante un algoritmo MPPT y regular el *duty cycle* del convertidor DC/DC para asegurar que aprovechamos al máximo la potencia solar.
- Lectura de los valores de voltaje e intensidad de salida del convertidor DC/DC.
- Comunicar la información de la batería y la corriente consumida al OBC mediante el monitor serie.
- Se alimenta desde la salida del regulador de 5 V.
- Habilitación del convertidor.

5.1.7 Diseño final

A continuación, se detallan los procedimientos seguidos para llevar a cabo el diseño final de la placa EPS.

Primeramente, se tomaron medidas de la placa del convertidor DC/DC para situar los conectores correctamente para ensamblarla a la placa principal.

Se cargaron las librerías de la *BluePill* para incluirlas en el diseño.

Se repartieron los tres diferentes reguladores de tensión y se conectaron con sus respectivos componentes y se añadieron sus conectores de salida.

La placa está diseñada para poder alimentarse desde 5 V por el conector USB de la *BluePill* o a través de la salida de 5 V del regulador U4. Se podrá seleccionar el tipo de alimentación a través del jumper J11.

En un principio, la placa se diseñó teniendo en cuenta que la *BluePill* podría alimentarse gracias a las placas solares por el conector J6, pero finalmente, se descartó esta opción. Aunque, con una pequeña modificación, se podría realizar.

En las siguientes figuras se puede observar el ruteado e imagen 3D de la placa EPS diseñada e implementada. Para poder observar el esquemático, consultad el documento *Anexos – 4 Esquemático EPS*.

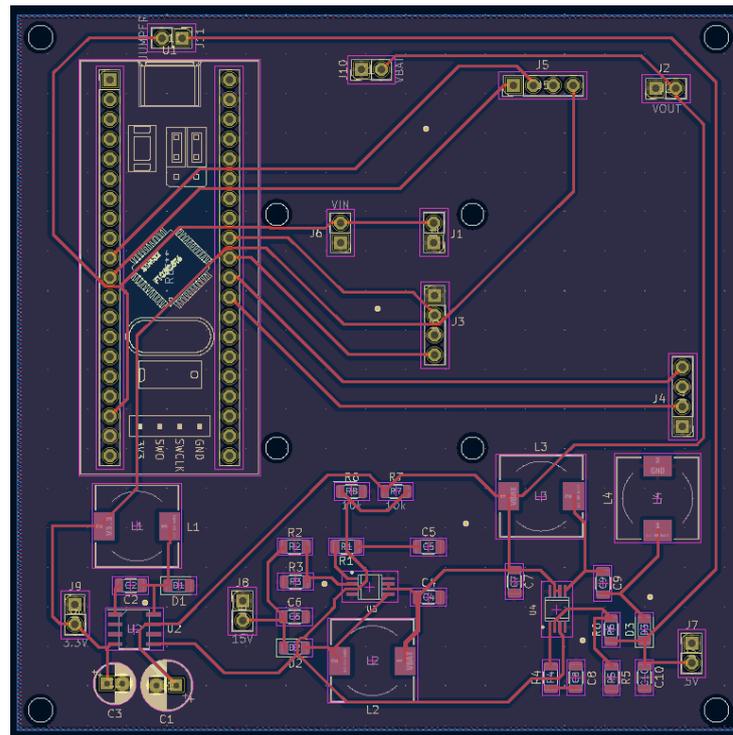


Fig. 16 Ruteado PCB

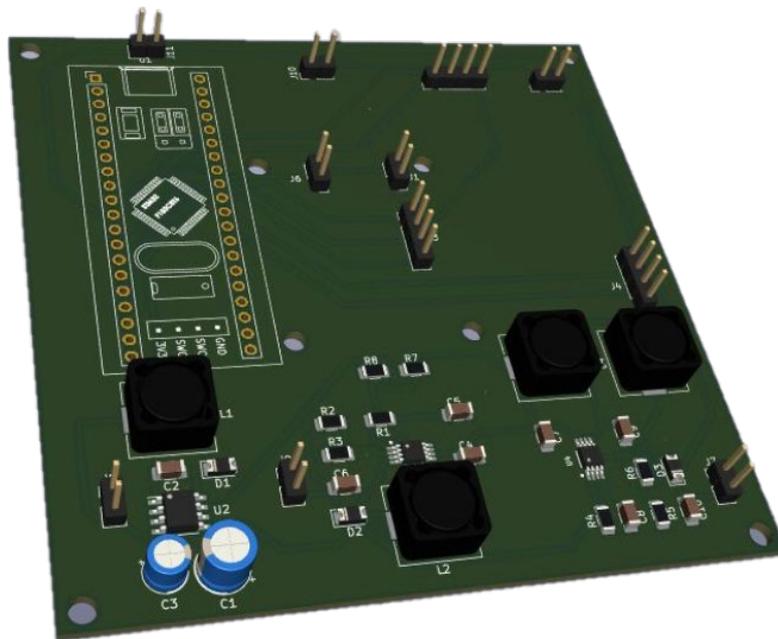


Fig. 17 Imagen 3D placa EPS

5.2 Software

El entorno de programación adecuado para este tipo de procesadores es el programa STM32CubeIDE gratuito de STMicroelectronics, pero, debido a que los demás compañeros que trabajarán en el sistema son de formación Aeronáutica, se decidió utilizar el IDE de Arduino.

Para poder emplear la placa *BluePill* se debió configurar el IDE correctamente. Existen varias opciones, en este caso, se decidió seguir las instrucciones de la siguiente página web: [stm32duino wiki \[8\]](#), que dispone un conjunto de librerías soportadas por STMicroelectronics y permiten acceder a la programación de todos los periféricos de manera sencilla. Aunque este IDE no ofrezca la posibilidad de depurado de software, se puede hacer un seguimiento sencillo del programa gracias al puerto serie.

En el gestor de tarjetas se elige la siguiente configuración para poder utilizar la interfaz de programación ST-LINK V2:

Herramientas Ayuda	
Auto Formato	Ctrl+T
Archivo de programa.	
Reparar codificación & Recargar.	
Administrar Bibliotecas...	Ctrl+Mayús+I
Monitor Serie	Ctrl+Mayús+M
Serial Plotter	Ctrl+Mayús+L
WiFi101 / Wi-FiNINA Firmware Updater	
Placa: "Generic STM32F1 series"	>
Board part number: "BluePill F103CB (or C8 with 128k)"	>
U(S)ART support: "Enabled (generic 'Serial')"	>
USB support (if available): "Ninguno"	>
USB speed (if available): "Low/Full Speed"	>
Optimize: "Smallest (-Os default)"	>
Debug symbols: "Ninguno"	>
C Runtime Library: "Newlib Nano (default)"	>
Upload method: "STM32CubeProgrammer (SWD)"	>
Puerto	>
Obtén información de la placa	
Programador	>
Quemar Bootloader	

Fig. 18 Configuración lector de tarjetas en IDE Arduino

5.2.1 Bloques de programación

Para llevar a cabo la programación se llevan a cabo pequeñas funciones que se unen formando el programa completo.

En la siguiente figura se puede encontrar el diagrama de flujo que seguirá el programa.

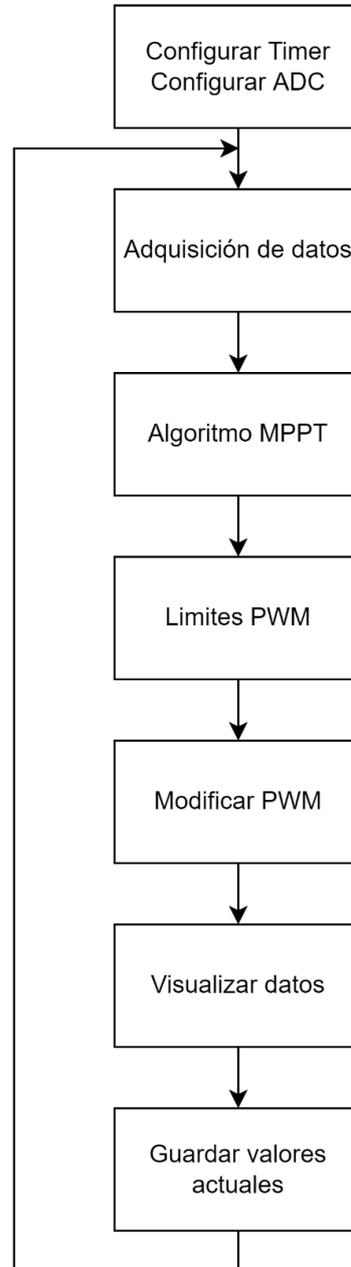


Fig. 19 Diagrama de flujo general

En este apartado se definirán cada uno de estos bloques de programación.

5.2.1.1 Timer

Para poder gestionar el *duty cycle* del PWM se ha utilizado el Timer 2 del microcontrolador. Las características de este Timer son resolución de 16 bits, contador up/down, y salida modo PWM, entre otras.

Para poder realizar una programación sencilla, se usan las librerías `HardwareTimer` [10]. Estas disponen de muchas funciones, pero en este caso, se utilizan las siguientes:

- `HardwareTimer *MiTimer = new HardwareTimer(TIM2);` Para crear el objeto `MiTimer` con el timer 2 del micro.
- `MiTimer->setPWM(1, PA15, 1000000, 50);` Se configura el PWM en el Timer2, canal 1, pin PA15, f=1 MHz y duty = 50%.
- `MiTimer -> setCaptureCompare(1, pwm, PERCENT_COMPARE_FORMAT);` Se define el PWM en formato porcentaje.

Para una mayor información sobre las librerías se puede consultar la siguiente página web: *HardwareTimer library* [10].

Además, para poder comprobar el correcto funcionamiento del programa, se ejecutaron diferentes pruebas. Una de estas pruebas consistió en variar el *duty cycle* con un potenciómetro y, durante la realización, se detectó un resultado no esperado.

En los cálculos que se llevan a cabo para encontrar la función de transferencia del convertidor, ecuación número (5), se considera que el transistor que conmuta según el valor de *duty cycle* es el Q3 (observar Esquemático Placa DC/DC disponible en el documento Anexos).

En este caso, según el integrado Si8274GB1-IS1 (componente IC1 del Esquemático Placa DC/DC, disponible en el documento Anexos) y como se observa en la Fig. 22, la salida VOA, que es la que sigue al PWM, está conectada al transistor Q4 (observar Esquemático Placa DC/DC disponible en el documento Anexos) y la complementaria del PWM (es decir, el valor 1-D) al Q3. Por lo tanto, cuando se envíe el *duty cycle* a la placa, se deberá invertir su valor.

Si8274 (PWM Input High-Side/Low-Side) Truth Table					
PWM Input	VDDI State	Enable	Output		Notes
			VOA	VOB	
H	Powered	H	H	L	
L	Powered	H	L	H	
X ²	Unpowered	X	L	L	Output returns to input state within 7 μs of VDDI power restoration.
X	Powered	L	L	L	Device is disabled.

Fig. 20 Tabla de la verdad del Si8274. (Fuente: Hoja de datos Si8274)

5.2.1.2 Convertidores ADC

Por otra banda, como ya se ha mencionado, se monitorizan los valores de voltaje y corriente (tanto de entrada como de salida) y para ello necesitaremos un conversor analógico – digital y los acondicionadores de señal explicados en el apartado 5.1.4 Sensores.

Se puede especificar la resolución del convertidor, y en este caso, se toma el valor máximo de 12 bits con los que, para una medida máxima de 3.3 V, obtendremos una sensibilidad de $\frac{3.3}{2^{12}} = 0.8056$ mV.

Se lleva a cabo una pequeña función que realiza una serie de lecturas, del canal especificado, con el fin de calcular el valor medio y así obtener un valor más estable.

En este caso, el valor de muestras es 50, pero este podría ser editado en cualquier momento para obtener un valor más adecuado.

El diagrama de bloques es el siguiente:

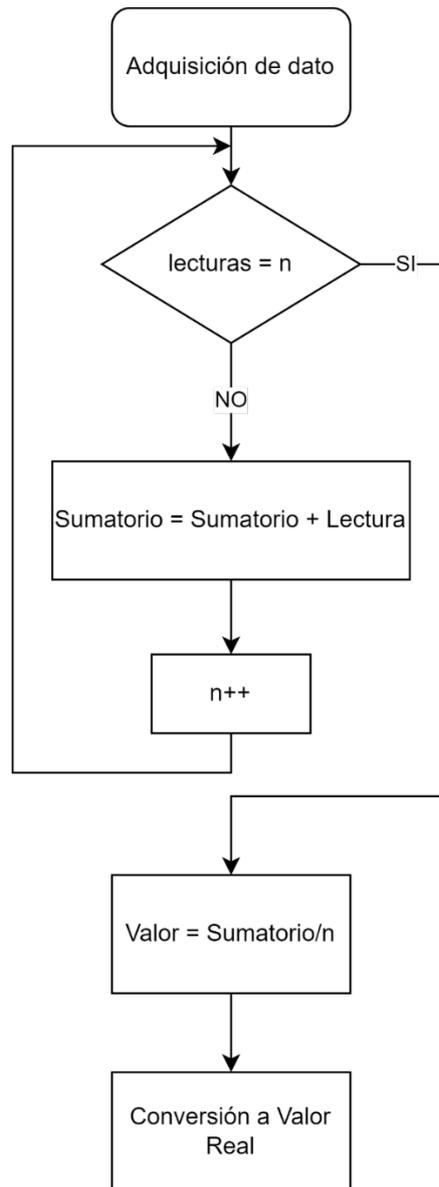


Fig. 21 Diagrama de bloques de la función adquisición de datos

El código de la función es el siguiente:

```

int read_adc (int canal) {
    int sum = 0;
    for (int i = 0; i < muestras; i++) {
        sum += analogRead(canal);
    }
    return (sum / muestras);
}
  
```

El valor que devuelve esta función es un valor entre 0 y 4095, que corresponde a los valores de lectura entre 0 V y 3.3 V. Para poder obtener el valor real de nuestra lectura, se utiliza un factor de conversión. Junto con las ecuaciones (13) y (15) obtenemos:

$$escala_v = \frac{3.3}{4096} * \frac{360k + 120k}{120k} = 0.00322265625 \quad (17)$$

$$escala_i = \frac{\frac{3.3}{4096}}{0.01 * 1 * 301} = 0.0002676624792 \quad (18)$$

Por lo tanto, el valor de una lectura de tensión e intensidad son los siguientes:

$$V(V) = read_adc (canal V) * escala_v \quad (19)$$

$$I(A) = read_adc (canal I) * escala_i \quad (20)$$

5.2.1.3 Algoritmo MPPT

El algoritmo MPPT es empleado debido a la no linealidad de los parámetros de salida del módulo solar, causada por las variaciones climáticas, y se utiliza para maximizar la producción de electricidad y aumentar la eficiencia del sistema [11].

Este comportamiento no lineal se debe a la dependencia de los valores de tensión y corriente generada a la radiación solar, por lo tanto, se necesita un algoritmo de control para conseguir el punto de máxima potencia [11].

Existen diversas técnicas para realizar tal seguimiento, las más usadas se introducen a continuación:

- Método perturbación y error (P&O): En este método se emplean los valores instantáneos de tensión y corriente del módulo y se calcula la potencia. Seguidamente, dicha potencia se compara con la calculada anteriormente (t-1) y se decide, dependiendo del resultado de esta comparación, si el valor del *duty cycle* del PWM aumenta o disminuye para así variar el valor de potencia [11].
- Método de conductancia incremental: se utiliza la pendiente de la curva de potencia en función de la tensión del panel solar para saber si el PWM aumentará o disminuirá.

En este Trabajo de Fin de Grado se ha llevado a cabo el desarrollo de ambos métodos, ya que no presentaba una gran dificultad. Además, según un estudio de la Universidad Autónoma de Occidente, Colombia [11] el método P&O obtiene mejores resultados cuando la perturbación es mayor. En cambio, el método de conductancia incremental tiene una velocidad de respuesta óptima frente a condiciones dinámicas (cambios de irradiancia, por ejemplo). Así que, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el CubeSat, se podría aplicar un algoritmo u otro.

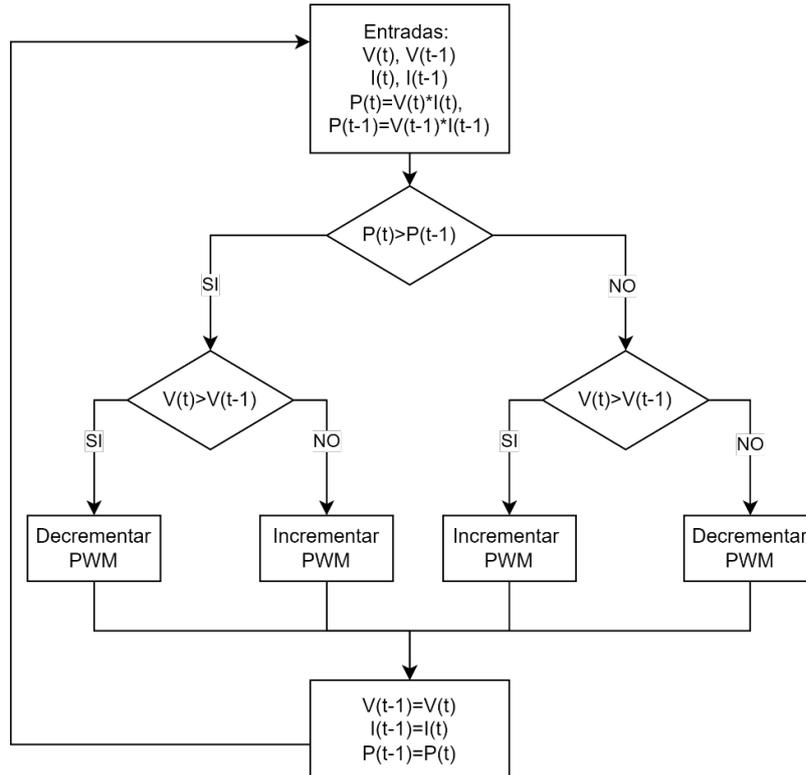


Fig. 22 Método P&O. (Fuente: Artículo [11]. Elaboración propia.)

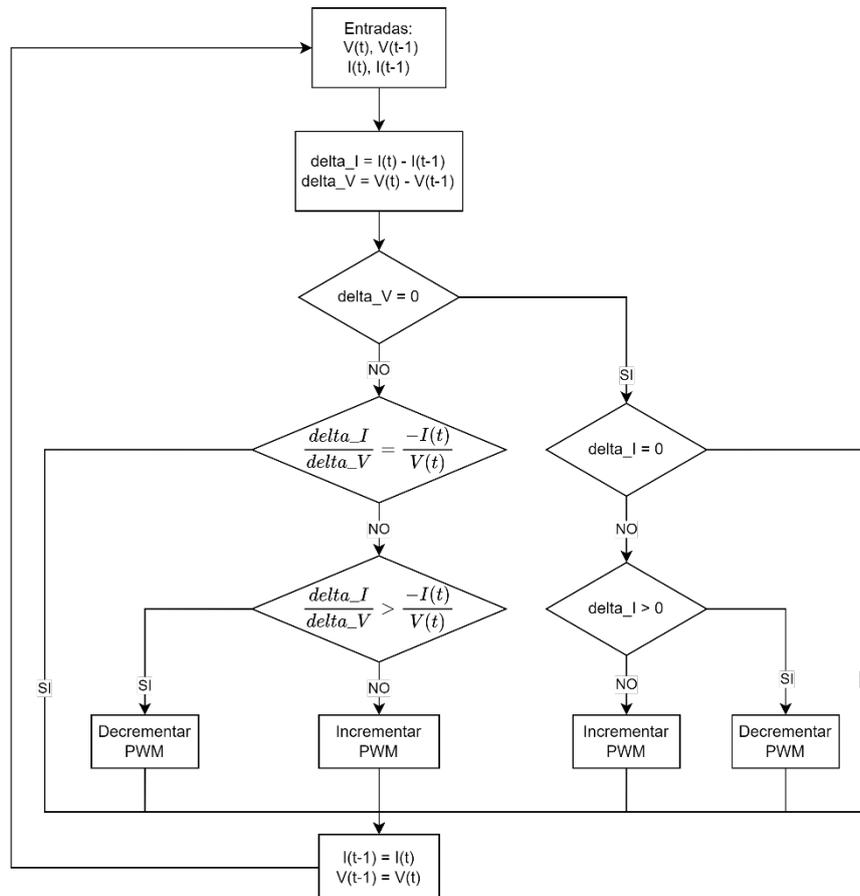


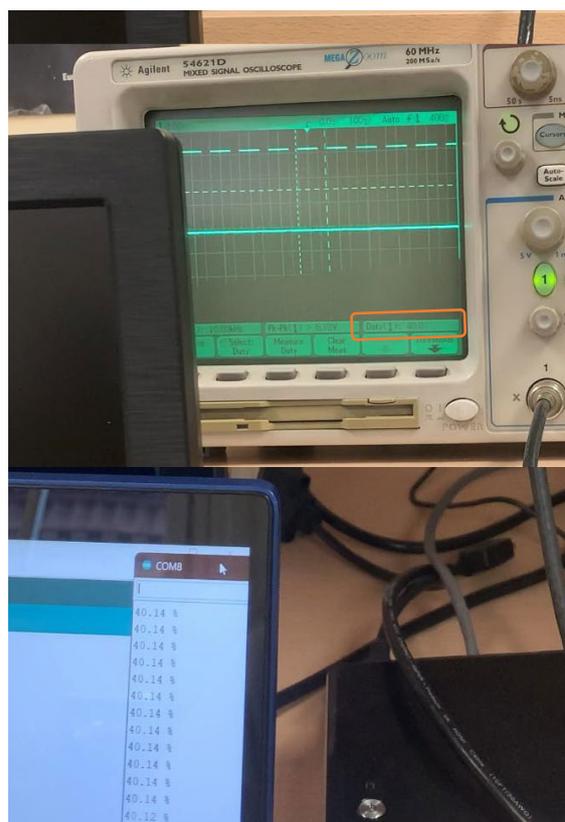
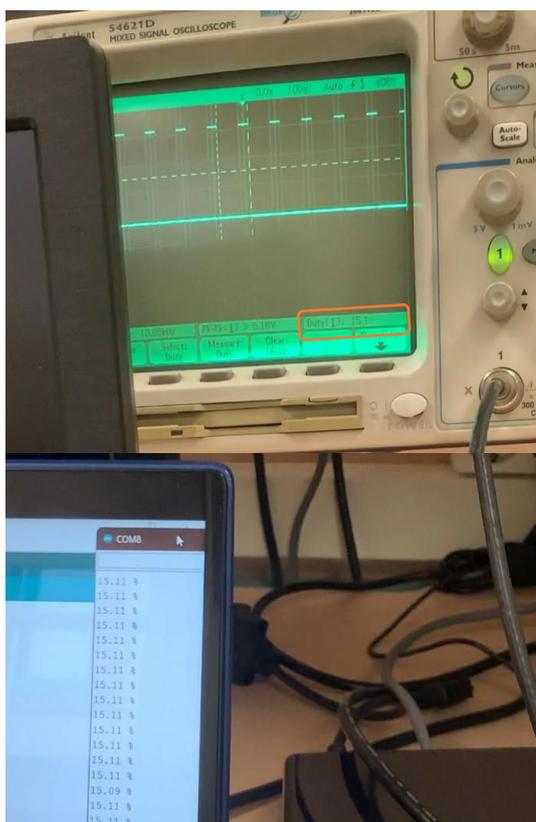
Fig. 23 Método conductancia incremental (Fuente: Artículo [11]. Elaboración propia)

5.3 Pruebas

5.3.1 Pruebas de software

Para comprobar la correcta aplicación de librerías y funciones, se llevaron a cabo una serie de pruebas, las cuales se detallarán a continuación.

- Prueba Analógica: se desarrolló un pequeño programa que consistía en realizar la lectura del valor que marcara un potenciómetro y se mostraba por pantalla. Esta prueba se ejecutó sin ningún inconveniente.
- Prueba PWM: tomando como base Prueba Analógica, se añadió la configuración del Timer en modo PWM. A la vez que se modificaba el valor del potenciómetro, el *duty cycle* del PWM incrementaba o decrementaba su valor. A continuación, se observan unas imágenes de los resultados.



Si se observa en la parte inferior derecha del osciloscopio, aparece una etiqueta que indica el valor del *duty cycle* y, en ambos casos, el valor coincide con el valor representado por el monitor serie. También pueden observarse los anchos de pulso del PWM en el osciloscopio.

Esta prueba también fue realizada sin ninguna dificultad.

- Prueba placa DC/DC: Se llevó a cabo esta prueba para comprobar el correcto funcionamiento de una función que se implementaría en el programa, la cual efectúa lecturas analógicas de entradas y salidas y las muestra en pantalla.

El montaje que se realizó fue el siguiente:

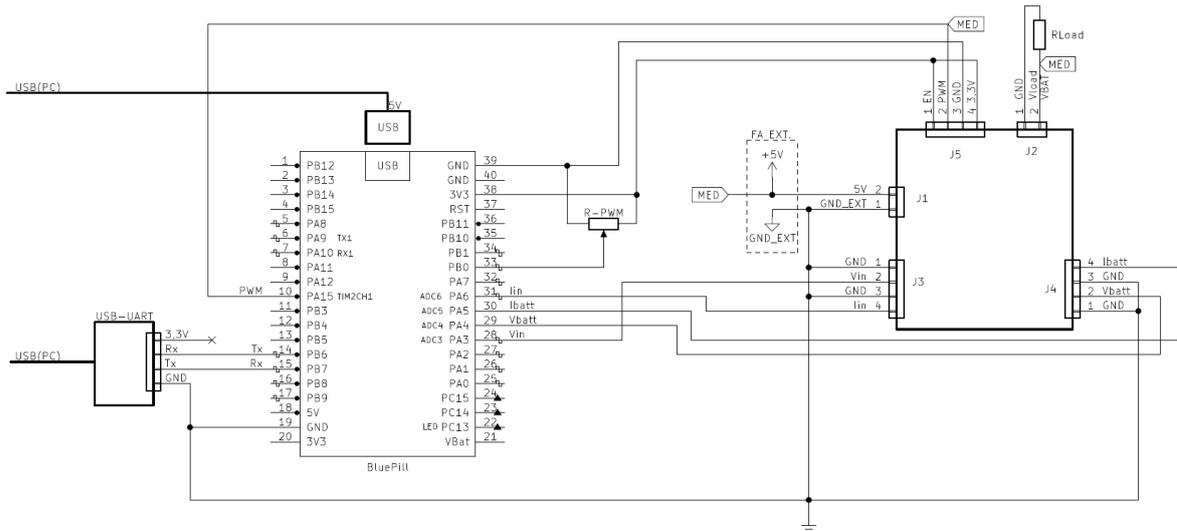


Fig. 26 Esquema del montaje

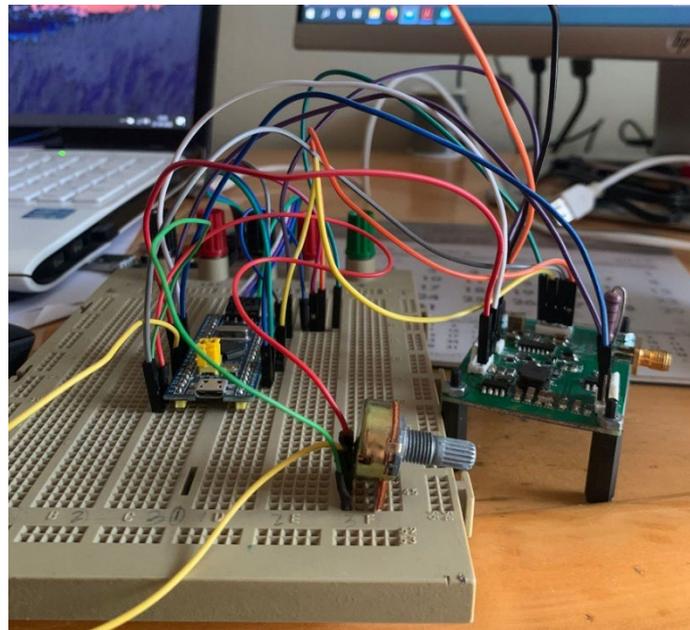


Fig. 27 Imagen del montaje

Y, como comprobación del funcionamiento, se muestra el siguiente ejemplo. En este caso, a través del potenciómetro se indicó que el *duty cycle* fuese de 30%. En la siguiente imagen se puede observar el monitor serie:

Duty cycle	Vin	Iin	Pin	Vout	Iout	Pout
30 %	4.516 V	0.319 A	1.438 W	11.906 V	0.173 A	2.059 W
30 %	4.522 V	0.319 A	1.440 W	11.887 V	0.173 A	2.055 W
30 %	4.506 V	0.318 A	1.433 W	11.916 V	0.173 A	2.057 W
30 %	4.500 V	0.315 A	1.419 W	11.909 V	0.171 A	2.034 W
30 %	4.509 V	0.317 A	1.431 W	11.878 V	0.171 A	2.035 W
30 %	4.525 V	0.319 A	1.444 W	11.913 V	0.172 A	2.050 W
30 %	4.522 V	0.319 A	1.443 W	11.872 V	0.173 A	2.059 W
30 %	4.512 V	0.319 A	1.439 W	11.903 V	0.173 A	2.058 W
30 %	4.512 V	0.319 A	1.439 W	11.891 V	0.173 A	2.056 W
30 %	4.519 V	0.316 A	1.430 W	11.884 V	0.169 A	2.004 W
30 %	4.497 V	0.316 A	1.423 W	11.891 V	0.171 A	2.027 W
30 %	4.503 V	0.318 A	1.431 W	11.916 V	0.172 A	2.048 W
30 %	4.503 V	0.317 A	1.430 W	11.922 V	0.173 A	2.058 W
30 %	4.494 V	0.315 A	1.413 W	11.906 V	0.168 A	1.998 W
30 %	4.509 V	0.318 A	1.434 W	11.928 V	0.173 A	2.059 W
30 %	4.512 V	0.315 A	1.423 W	11.903 V	0.169 A	2.010 W
30 %	4.503 V	0.317 A	1.429 W	11.923 V	0.173 A	2.061 W

Fig. 28 Captura del Monitor Serie con duty cycle de 30%

Y la comprobación con el voltímetro a continuación:

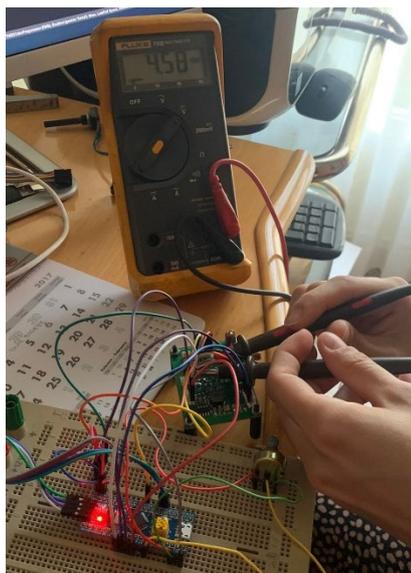


Fig. 29 Lectura de Vin

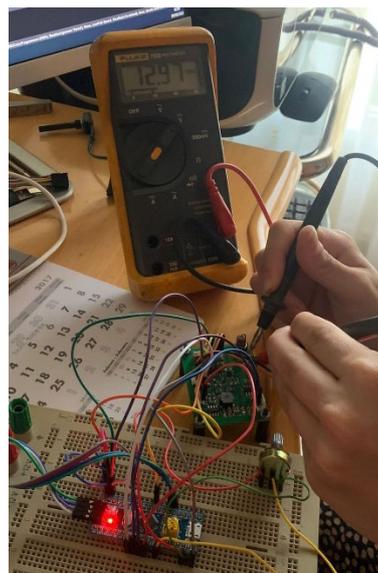


Fig. 30 Lectura de Vout

Durante la realización de estas pruebas, se detectó el resultado no esperado, explicado anteriormente en el apartado [5.2.1.1 Timer](#), relacionado con el cálculo de *duty cycle*.

- Prueba MPPT: Para comprobar el funcionamiento de ambos algoritmos MPPT desarrollados se montó la *BluePill* junto con dos potenciómetros que variaban voltaje e intensidad (simulando el funcionamiento de las placas solares). El resultado de esta prueba se considera exitoso ya que, al variar dichos valores, el algoritmo funcionaba correctamente, tomando como referencia las Fig. 23 y Fig. 24.

5.3.2 Pruebas de hardware

- Prueba reguladores de tensión: Se llevaron a cabo una serie de pruebas para corroborar el correcto funcionamiento de los reguladores de tensión en la PCB con los componentes ya soldados. Para ello, se siguió el siguiente esquema de montaje.

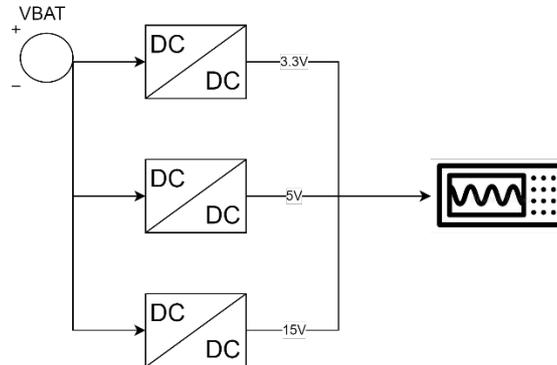


Fig. 31 Esquema de montaje prueba hardware

La entrada de tensión, en este caso V_{BAT} se simuló con una fuente de alimentación disponible en el laboratorio. El rango de tensiones de V_{BAT} soportado por la placa es de [7.5;11] V.

El resultado de esta prueba fue, en un primer momento, exitoso, tal y como se muestra en las siguientes imágenes.

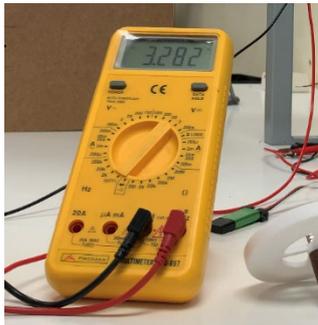


Fig. 32 Salida regulador 3.3V



Fig. 33 Salida regulador 5V

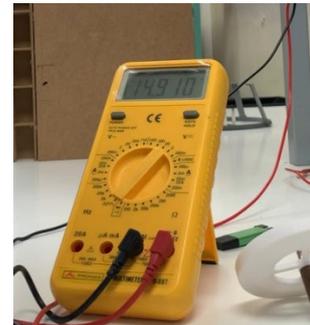


Fig. 34 Salida regulador 15V

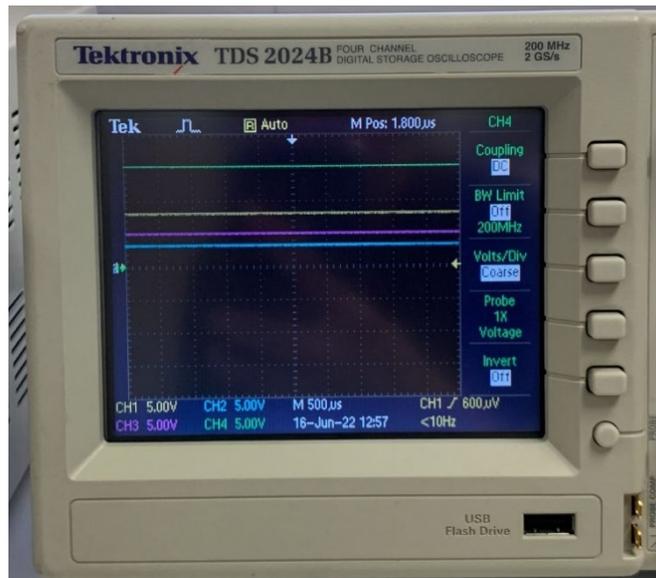


Fig. 35 Osciloscopio¹

Para una mayor comprobación, se varió el voltaje de entrada VBAT, para asegurar que los voltajes de salida de los reguladores se mantenían. En la siguiente foto se puede observar.

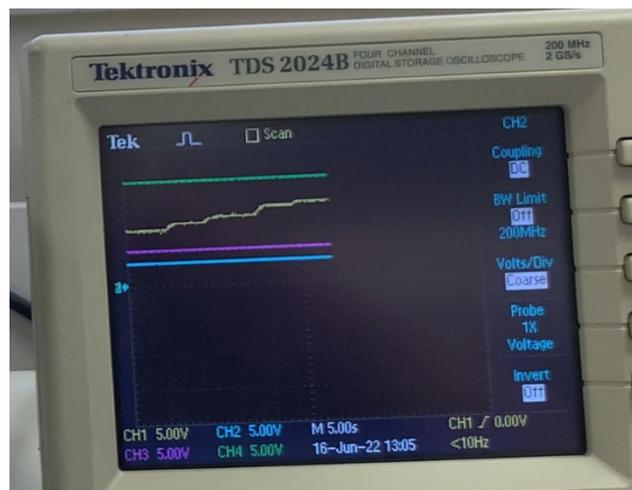


Fig. 36 Osciloscopio variando VBAT¹

A causa de un error humano, VBAT alcanzó el valor de 11.2V (superando el rango máximo) y, por consiguiente, un componente quedó dañado. Para poder descubrir cuál fue el componente perjudicado se hizo uso de una cámara térmica disponible en el laboratorio, ya que se suponía que se habría creado un cortocircuito y, por tanto, la temperatura del componente afectado sería mayor que la del resto de la placa, y tal y como se puede observar en la siguiente imagen, así fue.

¹ Donde CH1, CH2, CH3, CH4 corresponderían, respectivamente, a VBAT, Salida regulador 3.3V, Salida regulador 5 V, Salida regulador 15V.

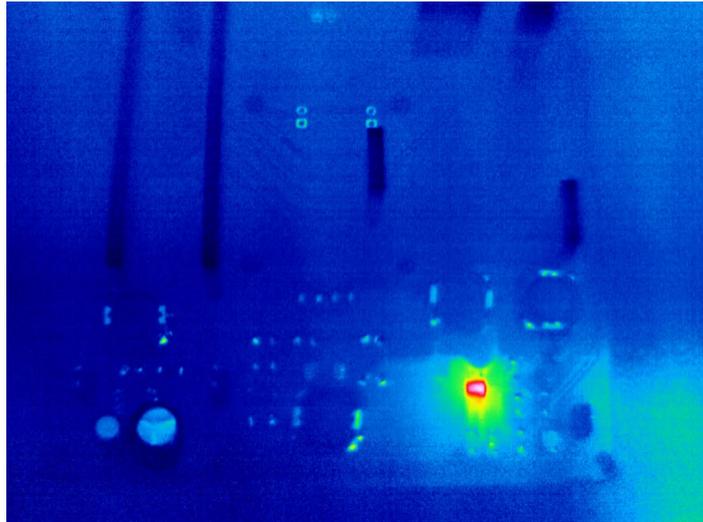


Fig. 37 Imagen cámara térmica

El componente dañado fue el regulador con salida de 5 V. Enseguida se corrigió el fallo y la placa volvió a funcionar correctamente.

- Prueba baterías: Para conocer el funcionamiento de la carga de las baterías se llevó a cabo una prueba que consistía en cargar las baterías con una fuente de alimentación regulable para comprobar a partir de qué tensión de entrada las baterías absorben potencia y, por lo tanto, se cargan.

Se observó que a partir de aproximadamente 10 V las baterías empiezan a cargar con un mínimo de amperaje. En este caso, se obtiene una velocidad de carga muy lenta.

Esto podría conllevar problemas, ya que el valor máximo del rango de tensión que alimenta las baterías es muy similar al valor mínimo que necesitan las baterías para poder cargarse.

Según la Tabla 4, se puede observar que el valor máximo de carga es de $4.2 \cdot 3 = 12.6V$ y, tal y como se ha mencionado en la prueba anterior, esta cantidad de voltaje es perjudicial para los componentes de la placa.

5.3.3 Pruebas finales

Por falta de tiempo, únicamente se realizó una prueba final, que consistía en comprobar el funcionamiento de la placa de convertidor DC/DC. En esta prueba ya se dispone de la placa montada completamente, añadiendo el microcontrolador y la placa del convertidor DC/DC.

Para ello se desarrolló e implementó un pequeño programa de observación de variables y, luego, se confirmó su valor a través del multímetro y el osciloscopio. El esquema implementado es el siguiente.

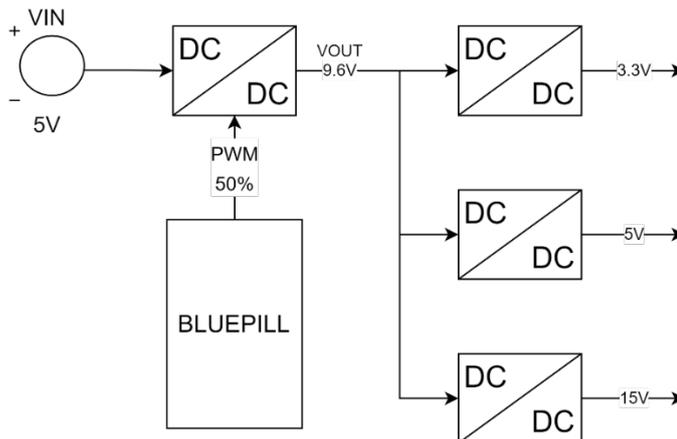


Fig. 38 Esquema prueba convertidor DC/DC

A través del monitor serie obtenemos los siguientes datos.

Duty cycle	VIN	IIN	PIN	VOUT	IOUT	POUT
50 %	4.866 V	0.039 A	0.188 W	9.587 V	0.016 A	0.151W
50 %	4.866 V	0.038 A	0.186 W	9.591 V	0.015 A	0.141W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.190 W	9.594 V	0.015 A	0.141W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.188 W	9.587 V	0.016 A	0.151W
50 %	4.866 V	0.038 A	0.186 W	9.587 V	0.016 A	0.149W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.188 W	9.591 V	0.015 A	0.141W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.188 W	9.587 V	0.016 A	0.149W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.189 W	9.591 V	0.015 A	0.141W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.188 W	9.591 V	0.016 A	0.151W
50 %	4.866 V	0.038 A	0.186 W	9.591 V	0.016 A	0.149W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.188 W	9.591 V	0.016 A	0.151W
50 %	4.866 V	0.038 A	0.186 W	9.594 V	0.015 A	0.141W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.189 W	9.591 V	0.016 A	0.149W
50 %	4.866 V	0.039 A	0.188 W	9.594 V	0.015 A	0.141W
50 %	4.866 V	0.038 A	0.186 W	9.591 V	0.016 A	0.151W

Fig. 39 Captura del monitor serie

Y como comprobación, se muestran las siguientes medidas tomadas con el multímetro y las salidas del osciloscopio.



Fig. 40 Salida VOUT



Fig. 41 Salida regulador 5V



Fig. 42 Salida regulador 15V



Fig. 43 Visualización osciloscopio de VIN y VOUT



Fig. 44 Osciloscopio regulador 3.3V



Fig. 45 Osciloscopio regulador 5V

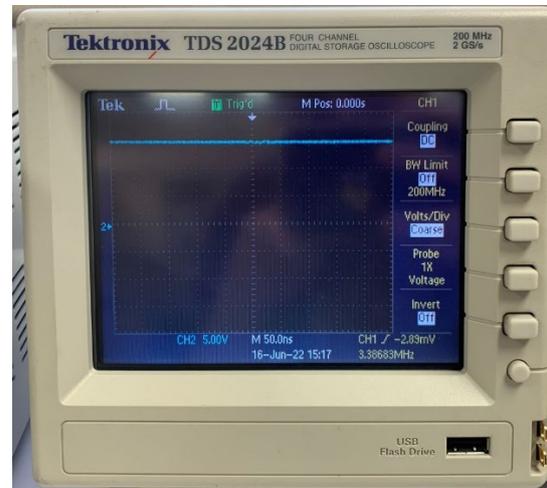


Fig. 46 Osciloscopio regulador 15V

Esta prueba se considera exitosa ya que los valores mostrados tanto en el osciloscopio, multímetro y monitor serie coinciden. Esta prueba fue realizada sin ningún inconveniente.

6 Presupuesto

A continuación, se mostrará el presupuesto del proyecto, detallando los componentes, unidades y precio de cada uno en euros.

Como ya se ha mencionado con anterioridad, estamos viviendo una crisis mundial de componentes y esto hace que adquirirlos sea una tarea muy compleja, por lo que, en este Trabajo de Fin de Grado se han utilizado diversos componentes existentes en el laboratorio.

De todas maneras, en la tabla de presupuesto aparecen todos los componentes utilizados, aunque en este proyecto no se hayan adquirido, cantidad utilizada y su precio orientativo.

Tabla 5 Presupuesto

Referencia	Valor	Nombre componente	Huella	Cantidad	Precio unitario [€]
C1	150µF	Condensador	THT_D6.3mm_P2.50mm	1	0,304
C2	10nF	Condensador	SMD1206	1	0,566
C3	68µF	Condensador	THT_D5.0mm_P2.0mm	1	0,316
C4, C9	1µF	Condensador	SMD1206	2	0,139
C5	3.3nF	Condensador	SMD1206	1	0,19
C6	33µF	Condensador	SMD1206	1	0,32
C7	22µF	Condensador	SMD1206	1	0,487
C8	680pF	Condensador	SMD1206	1	0,122
C10	10µF	Condensador	SMD1206	1	0,306
D1, D2, D3	-	Diodo_Schottky	SMD1206	3	0,081
L1	47µH	Bobina	SMD:L_10.4x10.4_H4.8	1	1,095
L2	27µH	Bobina	SMD:L_10.4x10.4_H4.8	1	1,03
L3, L4	10µH	Bobina	SMD:L_10.4x10.4_H4.8	2	1,063
R1	19.1kΩ	Resistencia	SMD1206	1	0,44
R2, R5	51kΩ	Resistencia	SMD1206	1	0,796
R3	4.7kΩ	Resistencia	SMD1206	1	1,156
R4, R7, R8	10kΩ	Resistencia	SMD1206	3	0,926
R6	150kΩ	Resistencia	SMD1206	1	0,34
U1	-	BluePill	-	1	12,99
U2	-	LM2675M-3.3	SOIC-8	1	6,62
U3, U4	-	LM2698MM	VSSOP-8	2	4,39
J1, J2, J9, J10, J11	-	Conector_01x02_Hembra	PinHeader_2.54mm_1x02	5	3,142
J3, J4, J5	-	Conector_01x04_Hembra	PinHeader_2.54mm_1x04	3	3,142
J6, J7, J8	-	Conector_01x04_Macho	PinHeader_2.54mm_1x02	3	3,994
-	-	Conector_01x20_Hembra	PinHeader_2.54mm_1x20	2	3,142
-	-	Conector_01x20_Macho	Pin_Header_2.54mm_1x20	2	3,994
-	-	Placa PCB	-	1	2
-	-	Placa convertidor DC/DC	-	1	-
-	-	TOTAL	-	-	94,673



7 Conclusiones

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado consistía en diseñar e implementar una placa EPS que, por una parte, gestione las salidas de voltaje regulado y alimente a todos los subsistemas del CubeSat y, por otra parte, que monitorice las tensiones, corrientes y potencias de entrada y salida y, finalmente, que gestione un algoritmo MPPT para buscar siempre el máximo punto de potencia de las placas solares.

Comparando los requisitos y especificaciones técnicas definidas en un primer momento con los resultados obtenidos de cada prueba, se puede considerar que los objetivos se han cumplido en gran parte.

Durante la realización de una prueba en la que se alimentaba la placa a través de la fuente de alimentación y con las baterías conectadas, el circuito integrado LM2698, el regulador con salida de 5 V, volvió a romperse por la misma razón que ya ha sido explicada anteriormente en el punto 5.3.2. Por ello y por el tiempo de entrega del componente, no se ha podido realizar una prueba final en la que se unan todos los componentes (*BluePill*, PCB, placa convertidor DC/DC, placas solares y baterías) aunque, basándonos en los resultados individuales de las pruebas llevadas a cabo, se supone que el resultado final hubiese sido exitoso igualmente.

Como trabajo futuro a desarrollar se proponen varios caminos a tomar. Uno de ellos consistiría en añadir al diseño de este proyecto algunos componentes que se consideran importantes, los cuales son un circuito integrado que haga la función de MPPT y gestión de batería BMS (Sistema de gestión de baterías, por sus siglas en inglés). Otro camino a tomar sería, en el caso de que la crisis de componentes mejorara, llevar a cabo la implementación de la PCB diseñada y estudiada por el compañero N. Tran [4] y modificar e implementar el programa desarrollado en este Trabajo de Fin de Grado.

Debido a los resultados de las pruebas realizadas, se puede concluir que el proyecto cumple con los objetivos presentados en un principio.

8 Referencias

- [1] CubeSat.org, «CubeSat Info: CubeSat,» Febrero 2022. [En línea]. Available: https://static1.squarespace.com/static/5418c831e4b0fa4ecac1bacd/t/62193b7fc9e72e0053f00910/1645820809779/CDS+REV14_1+2022-02-09.pdf. [Último acceso: 2022].
- [2] «Historia CubeSat: Wikipedia,» Noviembre 2020. [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/CubeSat>. [Último acceso: Mayo 2022].
- [3] A. G. U. d. Souza, «Implementación de un EPS (Electronic Power System) para CubeSat,» 2021.
- [4] N. Tran, «Desing and Integration of Electronic Subsystems os a CubeSat,» 2021.
- [5] Universitat Politècnica de Catalunya, «UPC Commons,» [En línea]. Available: <https://upcommons.upc.edu/>. [Último acceso: 2022].
- [6] A. Laspeyres, «CubeSat Educational Kit,» 2018.
- [7] L. Llamas, «Luis Llamas,» Marzo 2018. [En línea]. Available: <https://www.luisllamas.es/esquema-de-patillaje-pinout-del-stm32-blue-pill/>. [Último acceso: Marzo 2022].
- [8] «github - stm32duino wiki,» 2021. [En línea]. Available: <https://github.com/stm32duino/wiki/wiki>.
- [9] Texas Instrument, «Texas Instrument,» Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://webench.ti.com/power-designer/switching-regulator/customize/9?noparams=0>.
- [10] «github - HardwareTimer library,» 2022. [En línea]. Available: <https://github.com/stm32duino/wiki/wiki/HardwareTimer-library>. [Último acceso: 2022].
- [11] D. A. Mejía, I. Torres Chávez y J. L. Díaz, «Comparación de algoritmos MPPT aplicados a un conversor SEPIC en sistemas fotovoltaicos,» *El Hombre y la Máquina*, 2014.

