



Universidad de Granada



ugr

Universidad
de Granada

Proyecto Fin de Carrera

Ingeniería Electrónica

2016-2017

Plataforma de Test para Paneles Fotovoltaicos Aeroespaciales



Luis M. Nieto Nieto Plataforma de Test para Paneles Fotovoltaicos Aeroespaciales - 2017

Luis Miguel Nieto Nieto



**UNIVERSIDAD
DE GRANADA**

ESTUDIOS DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

PROYECTO FIN DE CARRERA

**Plataforma de Test para Paneles
Fotovoltaicos Aeroespaciales**

REALIZADO POR:

Luis Miguel Nieto Nieto

DIRIGIDO POR:

Andrés María Roldán Aranda

DEPARTAMENTO:

Electrónica y Tecnología de Computadores

Granada, septiembre de 2017



D. Andrés María Roldán Aranda, profesor del Departamento de Electrónica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada, como director del Proyecto Fin de Carrera de D. Luis Miguel Nieto Nieto

Informa:

que el presente trabajo, titulado:

Plataforma de Test para Paneles Fotovoltaicos Aeroespaciales

ha sido realizado y redactado por el mencionado alumno bajo mi tutela, y con esta fecha autorizo a su presentación.

Granada, a 15 de septiembre de 2017

Fdo. Andrés María Roldán Aranda

El tribunal constituido para la evaluación del PFC titulado:

Plataforma de Test para Paneles Fotovoltaicos Aeroespaciales

Realizado por el alumno: **Luis Miguel Nieto Nieto**

Y dirigido por el tutor: **Andrés María Roldán Aranda**

Ha resuelto asignarle la calificación de:

- SOBRESALIENTE (9 - 10 puntos)
- NOTABLE (7 - 8.9 puntos)
- APROBADO (5 - 6.9 puntos)
- SUSPENSO

Con la nota: puntos.

El Presidente:

El Secretario:

El Vocal:

Granada, a ____ de _____ de 2017

Los abajo firmantes autorizan a que la presente copia de Proyecto Fin de Carrera se ubique en la Biblioteca del Centro y/o departamento para ser libremente consultada por las personas que lo deseen.

Granada, a 15 de septiembre de 2017

Fdo. Andrés María Roldán Aranda

Fdo. Luis Miguel Nieto Nieto

Plataforma de Test para Paneles Fotovoltaicos Aeroespaciales

Luis Miguel Nieto Nieto

PALABRAS CLAVE: GranaSAT, CubeSat, satélite, Sistema de Potencia Eléctrica, panel fotovoltaico, cargador de baterías, PCB, I2C, Arduino Mega.

RESUMEN:

Este trabajo describe el diseño de un sistema de potencia eléctrica (EPS) para realizar test de laboratorio que permitirán mejorar el diseño de una EPS para un satélite CubeSat operando en órbitas LEO.

El proyecto comprende el diseño de la PCB y del software para una placa Arduino Mega, que actúa de interfaz entre la EPS y un computador o un microcontrolador externo. El software incluye funciones de acceso a bajo nivel para obtención de medidas y control de la EPS durante las pruebas de laboratorio que simulen distintas condiciones de captación y consumo de energía eléctrica.

KEYWORDS: GranaSAT, CubeSat, satellite, Electrical Power System, photovoltaic panel, battery charger controller, PCB, I2C, Arduino Mega.

ABSTRACT:

This work describes the design of an electrical power system (EPS) to perform laboratory tests that will improve the design of an EPS for a CubeSat satellite operating in LEO orbits.

The project includes the design of the PCB and the software for an Arduino Mega board, which acts as interface between the EPS and a computer or an external microcontroller. The software includes low-level access functions to get measurements and EPS control during laboratory tests that simulate different conditions of production and consumption of electrical energy.

Agradecimientos

Este trabajo se basa en otros previos y se ha realizado con la intención de ser útil para mejorar los sistemas que integrarán el futuro satélite GranaSAT, actualmente en desarrollo. El autor desea agradecer las ideas y la asistencia ofrecida por Andrés Roldán, director de este proyecto fin de carrera y de la interesante iniciativa GranaSAT, al que deseo un prolongado y fructífero recorrido.

Igualmente quiero hacer mención de José Vicente Muñoz, Ángel González y José Ángel Serrano, por su ayuda técnica e interés en este proyecto. Y para terminar, de mi familia, Ana y Sergio, por ese apoyo que aunque no haya sido técnico, ha resultado tan necesario para mí.

Índice general

Autorización Lectura	1
Hoja de Firmas.....	3
Autorización Depósito Biblioteca.....	5
Resumen.....	7
Agradecimientos.....	9
Índice general.....	11
Índice de figuras.....	15
Índice de tablas.....	17
Acrónimos y abreviaturas	19
1. Introducción	21
1.1. Planteamiento del problema	21
1.2. Motivación.....	21
1.3. Antecedentes.....	22
1.3.1. Introducción a los satélites CubeSat.....	22
1.3.2. Sistema de Potencia Eléctrica.....	24
1.4. Objetivos del proyecto	24
1.5. Descripción de capítulos	25
2. Análisis del sistema	27
2.1. Introducción	27
2.2. Topología de buses de potencia	28

2.3.	Riesgos propios del entorno espacial.....	29
2.4.	Componentes COTS.....	30
3.	Diseño del hardware	33
3.1.	Características generales.....	33
3.2.	Organización del hardware	33
3.2.1.	Diagrama de bloques	34
3.2.2.	Buses de datos.....	35
3.3.	Paneles fotovoltaicos.....	35
3.4.	Baterías	37
3.4.1.	Ciclos de carga-descarga	38
3.4.2.	Efectos de la temperatura.....	40
3.4.3.	Calefactor.....	40
3.4.4.	Balanceado de corriente de carga en baterías multicélula	40
3.5.	Cargador de baterías	40
3.5.1.	Punto de máxima potencia (MPP).....	41
3.5.2.	BQ24650	42
3.5.3.	Diseño	44
3.6.	Convertidores de salida de potencia	47
3.6.1.	LTC3440.....	47
3.6.2.	Diseño	47
3.7.	Sensores de voltaje y corriente INA3221	51
3.7.1.	Modos de operación.....	53
3.7.2.	Función de promediado	53
3.7.3.	Tiempos de conversión y efecto del promediado.....	54
3.7.4.	Funciones de alerta en valores de corriente.....	55
3.8.	Interruptores electrónicos de potencia NCP361	56
3.9.	Calefactor de la batería.....	58
3.9.1.	Sensor LM75	58
3.10.	Interruptores mecánicos	59
3.11.	Alimentación de la placa Arduino Mega.....	60

4.	Diseño del software.....	61
4.1.	Peticiones de servicio	62
4.1.1.	Peticiones de servicio mediante consola	62
4.1.2.	Peticiones de servicio desde el puerto serial 1	63
4.1.3.	Comunicaciones por el puerto serie 1.....	63
4.2.	Estructura de la aplicación.....	64
4.2.1.	Inicialización de puertos y dispositivos	64
4.2.2.	Rutinas de servicio de interrupción.....	65
4.2.3.	Máquina de estados	65
4.2.4.	Funciones de control, configuración y medida.....	67
4.3.	Arduino Mega.....	67
4.4.	Acceso a los sensores de voltaje y corriente	67
4.4.1.	Descripción de registros	67
4.4.2.	Lectura y escritura de valores medidos	68
4.5.	Acceso al sensor de temperatura.....	68
4.5.1.	Registros internos	69
4.5.2.	Formato de valores de temperatura.....	70
4.5.3.	Registro de Configuración.....	70
4.5.4.	Lectura y escritura de los registros.....	71
4.6.	Activación/desactivación de carga	71
4.7.	Control de interruptores electrónicos.....	71
5.	Conclusiones.....	73
	Referencias.....	75
	Anexo A – Esquemas	79
	Anexo B - Diseño de la PCB	89
B.1	Líneas de conexión de datos con Arduino Mega.....	89
B.2	Conectores.....	90
	Anexo C - Guía de referencia del software.....	93
C.1	Archivos de código fuente	93
C.2	Petición de servicios de bajo nivel	94

C.2.1	Peticiones desde consola	94
C.2.2	Peticiones desde el puerto serial 1	94
C.2.3	Ejemplos	95
C.3	Funciones de servicio.....	96
C.3.1	Funciones de servicio de los sensores INA3221	97
C.3.2	Funciones de servicio del sensor LM75.....	99
C.3.3	Funciones de servicio para el control de carga de la batería.....	100
C.3.4	Funciones de servicio para control de los switches NCP361-D.....	100
Anexo D - Listado de componentes y precios.....		101

Índice de figuras

Figura 1.1 Cubesat 1U.....	22
Figura 1.2 CubeSat 1U modular. Fuente: CubeSat Kit (TM).....	23
Figura 1.3 CubeSat 3U. Fuente: Deep Space Industries.....	23
Figura 2.1 Topología de buses de potencia.....	29
Figura 2.2 Recomendaciones de sobredimensionado de componentes.....	30
Figura 3.1 Diagramas de bloques del sistema EPS de test.....	34
Figura 3.2 Figura Panel solar 3U. Fuente: Endurosat.....	35
Figura 3.3 CubeSat 3U. Diseño del West Virginia Team.	36
Figura 3.4 Eficiencia cuántica externa (EQE) vs. longitud de onda	36
Figura 3.5 Vida útil (en ciclos de descarga) vs. profundidad de descarga (DoD)	39
Figura 3.6 Voltaje de carga y vida útil de la batería (en ciclos de descarga) vs. energía disponible	39
Figura 3.7 Curva I-V y P-V de un panel fotovoltaico.....	42
Figura 3.8 Sistema de bloqueo de carga (detalle).....	43
Figura 3.9 Circuito de medida de temperatura.....	45
Figura 3.10 Ejemplo de aplicación.....	49
Figura 3.11 Etapa de salida del bus de potencia de 3.3 V	50

Figura 3.12 Etapa de salida del bus de potencia de 5 V	51
Figura 3.13 Sensor INA3221, unidad A (detalle)	52
Figura 3.14 Sensor INA3221, unidad B (detalle)	53
Figura 3.15 Efecto de la función de promediado de las muestras	54
Figura 3.16 Efecto del tiempo de conversión sobre el ruido	55
Figura 3.17 Interruptores de buses de potencia NCP361	57
Figura 3.18 Sistema calefactor de la batería.....	58
Figura 3.19 Jumper de selección batería/carga de protección	60
Figura 4.1 Conectividad de datos con la placa Arduino Mega	61
Figura 4.2 Acceso a la consola en el entorno Arduino IDE 1.8.3	62
Figura 4.3 Conexiones del puerto serie 1 en Arduino Mega.....	63
Figura 4.4 Protocolo de transmisión. Casos 1 al 3.....	64
Figura 4.5 Función de servicio de interrupción para el puerto USB.....	65
Figura 4.6 Diagrama de la máquina de estados.....	66
Figura 4.7 Respuesta de la salida OS en modo comparador (gráfica central)	69
Figura 4.8 Registros internos del sensor LM75.....	70
Figura 4.9 Formato de los registros Temperature, THYST y TOS.....	70
Figura 4.10 Registro Configuration	70
Figura 1 Conexiones de datos con Arduino Mega.....	91

Índice de tablas

Tabla 3.1 Parámetros del panel fotovoltaico de referencia @ 28 °C.....	37
Tabla 3.2 Batería Shaft MP17605	38
Tabla 3.3 Comparativa de los cargadores BQ24650 y LTM8062	41
Tabla 3.4 Características principales del BQ24650.....	42
Tabla 3.5 Características principales del LTC3440	47
Tabla 3.6 Características principales del INA3221.....	51
Tabla 3.7 Características principales del NCO361.....	57
Tabla 3.8 Características principales del LM75	59
Tabla 4.1 Descripción de los estados.....	66
Tabla B.1 Conexiones de los dispositivos con la placa Arduino Mega.....	89
Tabla 2 Conectores de la PCB	90
Tabla 3 Terminales de conectores cable-placa	90
Tabla 4 Terminales del zócalo de conexión con Arduino Mega	91
Tabla C.1 Descripción de los datos en peticiones desde consola.....	94
Tabla C.2 Descripción de los bytes en peticiones desde el puerto serie 1	95
Tabla C.3 Argumentos empleados en las funciones de acceso a INA3221	97
Tabla C.4 Funciones de acceso a INA3221	98

Tabla C.5 Argumentos utilizados en las funciones de acceso a LM75.....	99
Tabla C.6 Funciones de acceso a LM75	99
Tabla C.7 Argumentos de las funciones de control de carga de la batería	100
Tabla C.8 Funciones de control de carga de la batería	100
Tabla C.9 Argumentos de las funciones de acceso a NCP361-D	100
Tabla C.10 Funciones de acceso a NCP361-D.....	100
Tabla 11 Lista de componentes y precios.....	101

Acrónimos y abreviaturas

ADC	Analog-Digital Converter
BGA	Ball Grid Array
COTS	Commercial Off The Shelf
DS	Deployment Switch
EPS	Electrical Power System
I2C	I2C Inter-Integrated Circuit
LEO	Low Earth Orbit
LSB	Least Significant Byte
LSbit	Least Significant Bit
MSB	Most Significant Byte
MSbit	Most Significant Bit
MCU	Microcontroller Unit

MPB	Main Power Bus
MPP	Maximum Power Point
MPPT	Maximum Power Point Tracking
MPPTC	Maximum Power Point Tracking Converter
NTC	Negative Temperature Coefficient
OBC	On Board Computer
OC	Over Current
OV	Over Voltage
PCB	Printed Circuit Board
RBF	Remove Before Flight
SCL	Serial Clock Line
SDA	Serial Data Line

1. Introducción

Un CubeSat es un estándar de los denominados nanosatélites, que ha dado lugar a numerosos proyectos académicos a nivel mundial. Uno de ellos es el proyecto GranaSAT [1], coordinado por el profesor Andrés María Roldán Aranda, de la Universidad de Granada, abierto a la participación de estudiantes de ingeniería en el desarrollo de sistemas para este tipo de satélites. Dentro de este ámbito se ha realizado el presente trabajo, que expone el diseño del hardware y del software de un sistema de alimentación de potencia para tests de laboratorio.

1.1. Planteamiento del problema

Un satélite como un CubeSat, debe operar en condiciones extremas de vacío, radiación cósmica y temperatura durante meses o años, y sin ningún tipo de mantenimiento físico. A diferencia de otros sistemas de a bordo, el sistema de alimentación eléctrica debe funcionar de manera fiable e ininterrumpida durante toda la misión. Esto exige un diseño cuidadoso, que implica realizar ensayos en laboratorio para optimizar su diseño.

1.2. Motivación

Este proyecto nace de la necesidad de disponer de una herramienta de test para estudiar el comportamiento del sistema de alimentación a nivel eléctrico. Las pruebas incluyen el test de los paneles solares, de las baterías bajo ciclos sucesivos de carga y descarga, y de la propia fuente de alimentación bajo diferentes perfiles de consumo.

1.3. Antecedentes

1.3.1. Introducción a los satélites CubeSat

El concepto CubeSat [2] surgió en 1999 en la California Polytechnic State University conjuntamente con la Universidad de Standford. Describe las especificaciones de un satélite en miniatura para iniciar a los estudiantes universitarios en proyectos de ingeniería espacial de bajo costo. Desde el primer lanzamiento de un CubeSat en 2003, el proyecto se ha difundido en el ámbito académico y en el comercial, como lo demuestran numerosas publicaciones en revistas internacionales [3] [4] [5] y productos comercializados por empresas como Clyde Space, CubeSat Kit y Boeing [6] [7] [8], así como los programas CubeSat iniciado por agencias de lanzamiento como NASA y ESA [9] [10].

Un CubeSat, en su versión 1U, es un satélite con forma de cubo de dimensiones 100 x 100 x 100 mm y un peso inferior a 1.33 kg. Su principal propósito es facilitar el acceso a la experimentación científica en entorno espacial con pequeñas cargas de pago y misiones de varios meses de duración. Además, sus sistemas electrónicos suelen construirse con componentes comerciales no específicos para misiones espaciales (COTS), lo que reduce los costos tanto del satélite como del lanzador.

El satélite tiene una constitución modular en torno a un chasis con forma cúbica o prismática. En general incluye paneles fotovoltaicos instalados en cada una de sus caras y antenas desplegadas tipo dipolo. Su diseño compacto permite que un mismo lanzador ponga en órbita varios de estos sistemas instalados en una bandeja para puesta en órbita



Figura 1.1 Cubesat 1U. Fuente: <https://www.nasa.gov>

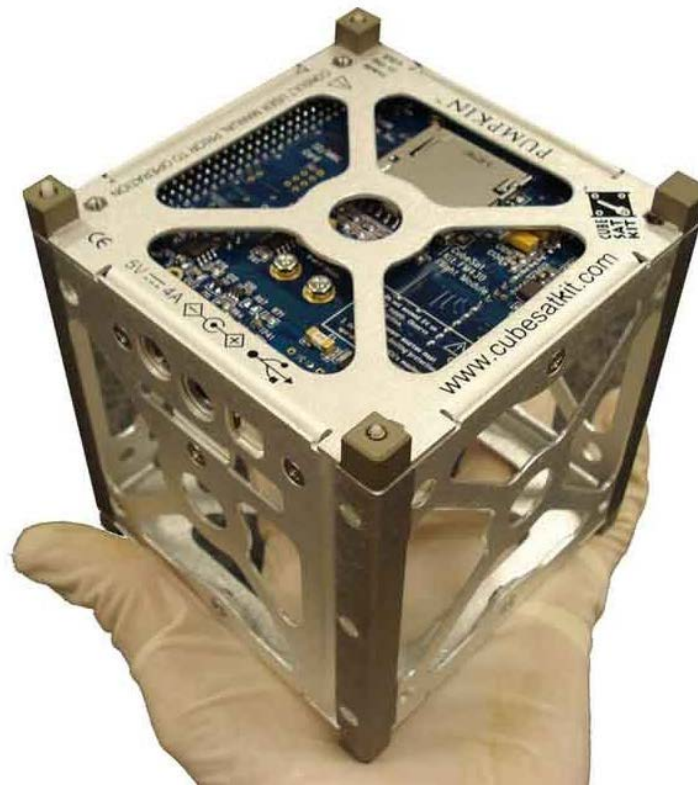


Figura 1.2 CubeSat 1U modular. Fuente: CubeSat Kit (TM)

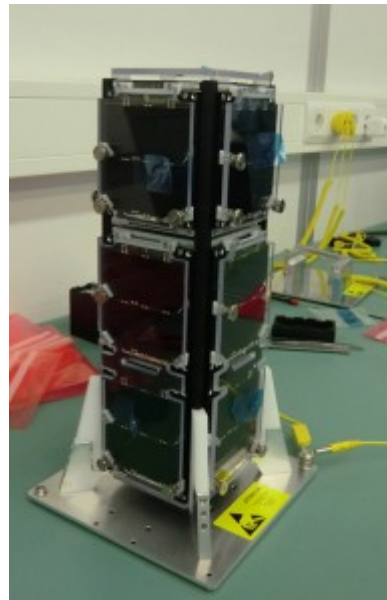


Figura 1.3 CubeSat 3U. Fuente: Deep Space Industries

1.3.2. Sistema de Potencia Eléctrica

El Sistema de Potencia Eléctrica (EPS) es el módulo encargado de la captación, almacenamiento y distribución de energía eléctrica al resto de sistemas a bordo. Una vez en órbita, capta energía solar con un conjunto de paneles fotovoltaicos para alimentar a los sistemas de comunicaciones, orientación y control de actitud, cargas de pago, etc. Además se encarga de cargar las baterías, que son la única fuente de alimentación eléctrica disponible durante las fases orbitales de eclipse. Con objeto de optimizar el consumo energético y proteger al resto de sistemas ante posibles sobrecargas, un EPS incluye sensores de corriente, voltaje y temperatura conectados a un computador de a bordo (OBC).

Un EPS es un sistema crítico que debe operar ininterrumpidamente durante toda la misión, por lo que es necesario realizar ensayos en laboratorio simulando distintas condiciones de disponibilidad y de consumo de energía.

1.4. Objetivos del proyecto

En este trabajo se presenta el desarrollo de una EPS para realizar tests en laboratorio dentro del proyecto GranaSAT, del dpto. de Electrónica y Tecnología de Computadores de la Universidad de Granada. Uno de los objetivos del proyecto GranaSAT consiste en el desarrollo de la EPS de un CubeSat de tipo 3U, para lo que se ha desarrollado un sistema hardware y software que permitirá realizar tests en laboratorio. El conjunto lo componen un circuito electrónico diseñado con componentes COTS y una placa Arduino Mega, conectada a la PCB a modo de shield para funcionar como interfaz.

La PCB integra un cargador de baterías a partir de la energía captada por un panel fotovoltaico, convertidores de potencia para suministrar energía a través de buses de 5 V y 3.3 V, y sensores y switches electrónicos para gestionar el funcionamiento del hardware desde la placa Arduino Mega. Para este sistema se ha diseñado un conjunto de funciones de servicio para acceder a los sensores de voltaje, corriente y temperatura, transmitir las medidas a un computador o a un MCU, y configurar y controlar los sistemas de la PCB. Las funciones se activan a demanda mediante un código, enviado a través de USB o desde un puerto serie conectado a otro microcontrolador, y por el mismo puerto se devuelven los datos solicitados.

El sistema servirá para realizar distintos análisis bajo distintos perfiles de captación de energía y consumo, que son un factor importante de degradación de la vida de las baterías, así como evaluar la gestión de la energía consumida por el resto de los sistemas del satélite. Las variaciones en producción y consumo dependerán de las particularidades de la misión, como por ejemplo:

- Las características de la órbita, en particular la frecuencia y duración de las fases de exposición solar y eclipse, con la alternancia de ciclos de carga y de descarga de las la batería.
- El régimen de consumo y de carga de la batería, determinantes para dimensionar tanto las baterías como el panel, y obtener estimaciones de la potencia que la EPS puede suministrar a los sistemas del resto del satélite, así como de los límites de demanda.
- La duración de la misión, que afectará la capacidad de las baterías, en tanto que se degradan por los sucesivos ciclos de carga y descarga.

1.5. Descripción de capítulos

Este trabajo se ha estructurado en las siguientes secciones:

- Capítulo 2, Análisis del sistema: Describe las características generales del sistema desarrollado y las funciones de hardware. También se comentan algunos de los condicionantes del diseño de sistemas para que un CubeSat opere en el espacio.
- Capítulo 3, Diseño del hardware: Detalla el diseño del hardware de la PCB desarrollada, su estructura y los bloques que la integran.
- Capítulo 4, Diseño del software: Describe el software desarrollado para la placa Arduino Mega, que actuará como interfaz para la obtención de medidas y realizar tareas de configuración y control de los subsistemas integrados en el hardware.
- Capítulo 5, Conclusiones: Este capítulo resume el proyecto y presenta posibles trabajos futuros.

2. Análisis del sistema

2.1. Introducción

En este capítulo se describen las funciones y las características generales del diseño de la EPS para test desarrollada. En los anexos A y B se incluyen los esquemáticos y el diseño de la PCB.

Las principales funciones del sistema de test son las siguientes:

- Captar energía procedente de una fuente de alimentación programable o de un panel fotovoltaico, obteniendo el máximo rendimiento del panel.
- Almacenar energía en baterías recargables para consumo en fases de eclipse.
- Suministrar ininterrumpidamente energía eléctrica al resto de los sistemas del CubeSat mediante buses de potencia a 5 V y 3.3 V.
- Medir voltaje y corriente de los buses de potencia, y medir la temperatura de la batería.
- Integrar funciones de protección y control:
 - Configuración de niveles de alerta de voltaje y corriente.
 - Control de los interruptores electrónicos de los buses de salida de potencia.
 - Activación/desactivación del cargador de la batería.
 - Control del sistema termostático de calefacción de la batería (configuración de umbrales de temperatura y desactivación del calefactor).
- Transmitir por bus serie las medidas y alertas a un computador o a un MCU externo.
- Facilitar una interfaz para gestión y control del hardware desde un computador externo mediante una aplicación para el sistema Arduino Mega.

La interfaz permitirá enviar comandos de configuración y gestión para obtener medidas, estado de las alertas de sobrecorriente y sobrevoltaje, y controlar subsistemas de la EPS de test, con objeto de:

- Proteger la batería y el resto de sistemas ante sobrecorrientes o sobrevoltajes.
- Gestionar la carga de la batería para alargar su vida útil y controlar su sistema de calefacción.
- Gestionar la distribución de energía como medida de protección y de ahorro energético mediante desconexión temporal de los sistemas menos críticos.

Estos comandos y las funciones correspondientes se describen en el capítulo 4 y en el anexo C.3 Funciones de servicio

La PCB diseñada incluye conectores a los buses de potencia para los sistemas auxiliares, el panel fotovoltaico y otras cargas externas. Además incluye un zócalo para instalar la PCB sobre la placa Arduino Mega a modo de shield. Estas conexiones comprenden:

- Comunicaciones por bus I2C con los sensores de corriente, voltaje y temperatura.
- Entradas de alertas por valores de corriente y voltaje fuera de rango.
- Salida de control para habilitar o bloquear la carga de la batería.
- Salidas de control de los interruptores electrónicos de los buses de potencia de salida.

2.2. Topología de buses de potencia

En la EPS de un CubeSat se interconectan paneles fotovoltaicos, baterías recargables y convertidores de potencia que optimizan la producción de energía, y adaptan la potencia disponible a las necesidades del resto de sistemas del satélite. Además se incluyen sistemas para supervisar el consumo, detectar sobrevoltajes o desconectar sistemas no críticos.

Los convertidores conmutados ofrecen soluciones compactas y de alto rendimiento, para la carga de baterías y la conversión de potencia. Las posibles conexiones de estos sistemas junto con los paneles y las baterías dan lugar a varias topologías. Un estudio comparativo puede verse en [11].

En este proyecto se ha optado por una configuración con convertidores intercalados entre los paneles fotovoltaicos y las baterías. Esta topología es habitual en otros proyectos CubeSat, y es la indicada en la figura:

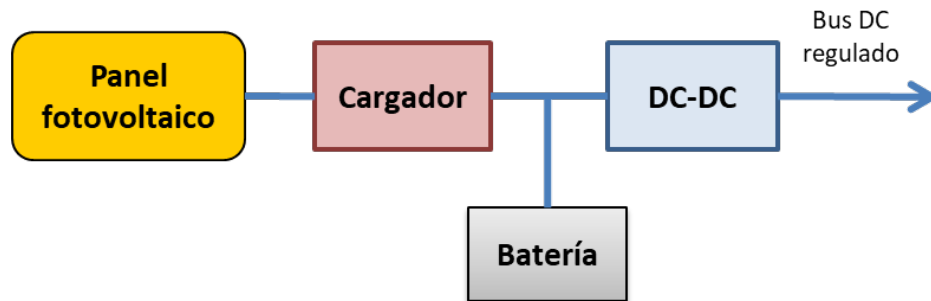


Figura 2.1 Topología de buses de potencia

2.3. Riesgos propios del entorno espacial

El diseño de un sistema electrónico para satélites debe considerar tanto las exigencias del entorno espacial como aspectos previos a la misión.

Las condiciones son exigentes desde el lanzamiento principalmente a causa de las vibraciones y las aceleraciones implicadas. En una PCB puede quedar comprometida la integridad de las soldaduras de los dispositivos, por lo que es recomendable su inspección exhaustiva en el proceso de fabricación. En el caso de ciertos encapsulados, como los BGA, se necesitan instrumentos de soldadura e inspección complejos que limita su aplicación en proyectos de bajo costo.

Otro aspecto a considerar son los efectos térmicos. Durante el lanzamiento y en órbita el satélite debe soportar fluctuaciones térmicas de entre $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $80\text{ }^{\circ}\text{C}$, capaces de degradar las soldaduras [12]. Además en el vacío espacial la transferencia de calor solo es viable por conducción entre los componentes del satélite. La solución consiste en cuidar el contacto térmico de cada dispositivo con la PCB, y entre esta y el resto del satélite [13]. La experiencia de misiones previas CubeSat y estudios como [14] y [15] indican que el rango de temperatura propio en un CubeSat en órbita LEO es $[5, 50]\text{ }^{\circ}\text{C}$, lo que permite emplear componentes electrónicos COTS. Sin embargo, para los elementos más sensibles a las bajas temperaturas, como el caso de las baterías, es necesario incluir sistemas de calefacción.

La exposición a partículas de alta energía procedentes del Sol es otra causa de fallos en la electrónica del satélite, en particular en misiones prolongadas y de órbitas medias y altas. El efecto de la ionización que causa en los materiales puede corromper los datos almacenados en soportes digitales y causar latch-up en dispositivos CMOS [16]. Ciertas medidas que pueden adoptarse consisten en blindajes, protecciones anti latch-up, sistemas redundantes, etc. [17]. Algunas de las más costosas, como es

emplear dispositivos resistentes a la radiación, no son imprescindibles en misiones de corta duración y órbitas LEO, donde la intensidad del campo magnético terrestre proporciona una protección suficiente para sistemas con componentes COTS.

2.4. Componentes COTS

La viabilidad de diseñar satélites con componentes COTS está demostrada en numerosas misiones CubeSat [18]. Los componentes electrónicos empleados en el diseño son componentes de montaje superficial con rangos de temperatura que cubren el intervalo [-25, 85] °C. En algunos casos, como son los conectores cable-placa, no se ha considerado elegir otros más adecuados para una misión en órbita dado que únicamente dan servicio para tests en laboratorio.

Como prevención de fallos se recomienda elegir componentes con rangos operativos sobredimensionados. En [19] se incluyen las siguientes recomendaciones:

Component type	Recommended operating level of the maximum
Capacitors (ceramic / tantalum)	Voltage 60%
Feedthrough capacitor	Voltage 50%
Inductors	Voltage 50%
Resistors	Power 50% Voltage 80%
Diodes	Current 75% Reverse voltage 75% Power dissipation 50%
Field-effect transistors (FET)	Drain-source voltage 80% Gate-source voltage 75% Drain current 75% Power dissipation 65%
Power related integrated devices	Supply voltage 90% Applied voltage 90% Output current 80%

Figura 2.2 Recomendaciones de sobredimensionado de componentes [18]

En general se han escogido un factor de seguridad mínimo del 50 % en potencia, voltajes y corrientes máximas, condensadores de desacoplo con baja ESR e inductores con baja resistencia en DC, corriente de saturación un 100 % mayores que las

corriente máximas de carga en operación y frecuencia de autoresonancia elevada, superior a 2 MHz.

3. Diseño del hardware

En este capítulo se describe la estructura del EPS de test, las funciones de cada bloque de hardware y su diseño. En el anexo A y B se incluyen los esquemáticos del circuito y su diseño PCB.

3.1. Características generales

Los parámetros característicos de la PCB diseñada son los siguientes:

- Conexión a un panel fotovoltaico con voltaje de circuito abierto de hasta 20 V, y corriente de cortocircuito inferior a 600 mA.
- Carga de batería de Li-ion a 4.1 V.
- Salidas de potencia a 5 V y 3.3V, con corriente máxima de 600 mA cada una y variaciones de voltaje inferiores al 1%.
- Rango de temperaturas de operación de los componentes semiconductores en la PCB: [-25, 85] °C.
- Conectores para cargas, puerto serie y el sistema calefactor de la batería.
- Zócalos de conexión para una placa Arduino Mega.
- Alimentación desde el panel fotovoltaico o la batería.

3.2. Organización del hardware

Los dispositivos electrónicos de la EPS de test son COTS con encapsulado SMD y cubren el rango de temperaturas de -25°C a 85 °C, aptos para el diseño en condiciones orbitales. Los conectores cable-placa y los zócalos de conexión con la placa Arduino Mega dan servicio para pruebas de laboratorio.

El hardware se compone de convertidores de potencia, cargador y sensores, interconectados mediante buses de potencia y de comunicaciones de datos. El resto del capítulo ofrece detalles de cada bloque y de sus interconexiones.

3.2.1. Diagrama de bloques

El sistema EPS de test lo componen los bloques siguientes:

- Paneles fotovoltaicos. Sección 3.3.
- Batería de Li-ion. Sección 3.4.
- Circuito cargador de baterías con seguimiento del MPP del panel (MPPTC) y bloqueo de carga. Sección 3.5
- Convertidores de voltaje con salida regulada, que proporcionan la alimentación al resto del satélite a través de buses de potencia de 3.3 V y 5 V. Sección 3.6.
- Sensores de voltaje y corriente. Sección 3.7.
- Interruptores electrónicos de buses de potencia de salida. Sección 3.8.
- Sistema de calefacción termostático programable. Sección 3.9.
- Conexión para interruptores mecánicos RBF y DS1 y DS2, indicados por el estándar CubeSat. Sección 3.10.

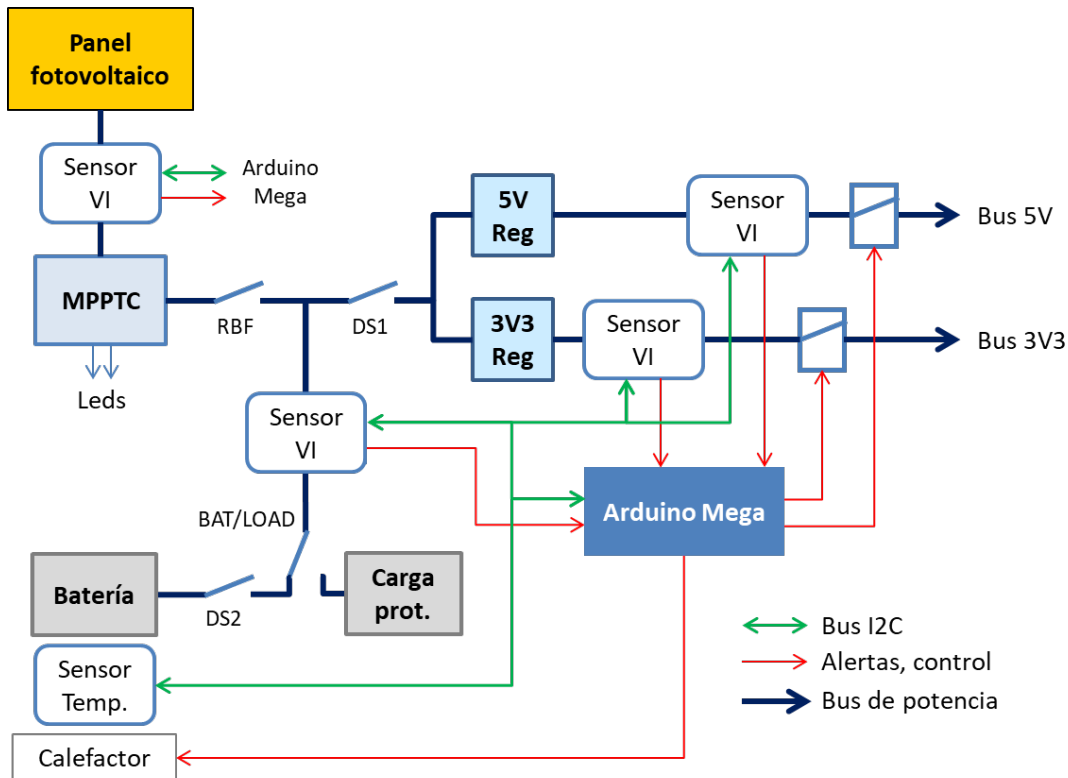


Figura 3.1 Diagramas de bloques del sistema EPS de test

3.2.2. Buses de datos

La placa Arduino Mega se conecta a la PCB mediante un zócalo hembra a modo de shield. Estos conectores incluyen:

- Terminales de comunicaciones I2C para configurar y controlar los sensores de la PCB y recibir medidas. El sistema Arduino Mega actúa como maestro único en el bus, que opera a 100 kHz con direcciones de 7 bits.
- Salidas de control de los switches electrónicos de los buses de potencia y de control de la carga de batería
- Entradas de estado de alerta de los sensores de voltaje y corriente.

Adicionalmente se dispone de acceso al puerto serie 1 de Arduino Mega a través del conector cable-placa J4 (ver sección 3.2.2) para comunicaciones serie TTL con otro MCU.

3.3. Paneles fotovoltaicos

Los paneles solares son el elemento primario de este bloque. Son los componentes responsables de la captación de energía en forma de radiación solar, que en el espacio alcanza los 1375 W/m² [20].

En un CubeSat los paneles se suelen colocar sobre cada una de sus caras, por lo que solamente habrá tres como máximo expuestos a la radiación solar. Los correspondientes a las caras opuestas se conectan en paralelo y a un mismo cargador de baterías, dado que solamente uno de los dos podrá captar energía. El cargador de baterías usualmente es un convertidor conmutado con seguimiento del punto de máxima potencia del panel (MPPTC), por lo que un sistema EPS completo integraría tres de estas unidades.



Figura 3.2 Figura Panel solar 3U. Fuente: Endurosat

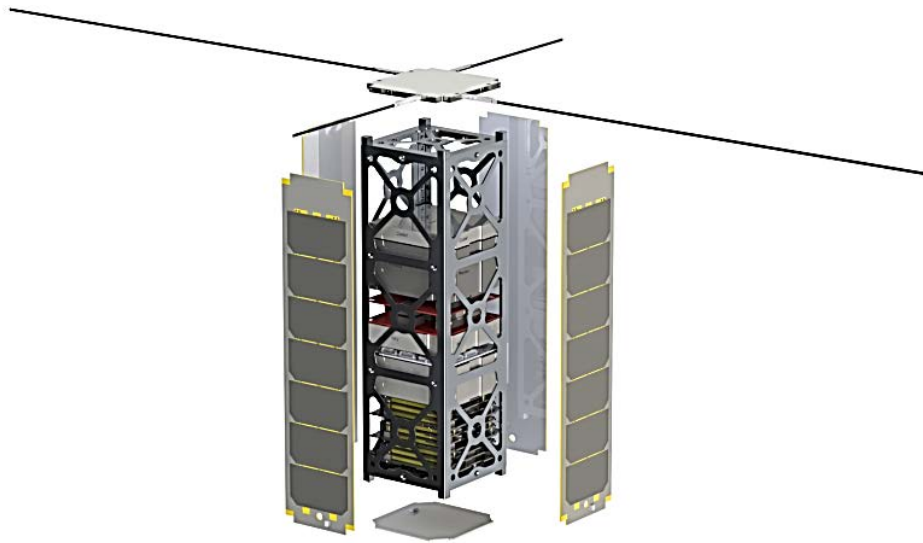


Figura 3.3 CubeSat 3U. Diseño del West Virginia Team. Fuente: <http://www.wvspacegrant.org>

Los paneles fotovoltaicos empleados en misiones CubeSat son componentes certificados para aplicaciones espaciales. Habitualmente se fabrican con células solares de triple unión, como InGaP/GaAs/Ge. Este tipo de dispositivos proporcionan un rendimiento mucho mayor que las células convencionales monocapa, ya que cada capa aprovecha una banda espectral diferente del espectro de radiación incidente. Esto optimiza la eficiencia cuántica (EQE), definida como el ratio de portadores producidos en la célula frente a los fotones incidentes sobre la célula. El rendimiento resultante en términos de potencia, es cercano al 30%, frente a los 10% a 17% de las células convencionales monocapa. Como ejemplo, los paneles 3U de EnduroSat [21] alcanzan un rendimiento del 29.5 %, y hasta 8.43 W por panel en órbita LEO.

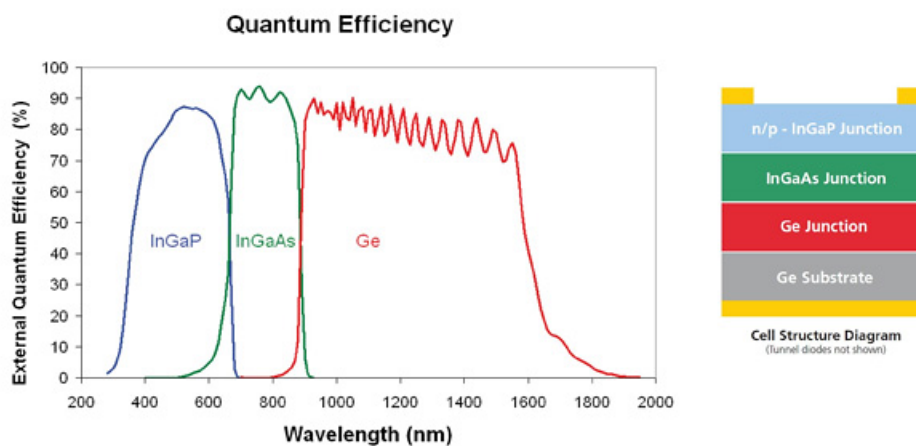


Figura 3.4 Eficiencia cuántica externa (EQE) vs. longitud de onda. Fuente: Emcore

Para el diseño del EPS presentado en este trabajo se ha tomado como referencia un panel solar con las características indicadas en la tabla siguiente:

Tabla 3.1 Parámetros del panel fotovoltaico de referencia @ 28 °C

Magnitud	Valor	Unidades
I_{sc}	510	mA
V_{oc}	18.63	V
I_{MPP}	490	mA
V_{MPP}	16.52	V
P_{MPP}	8.10	W

Ha de tenerse en cuenta que la potencia generada varía durante cada periodo orbital y la temperatura. En general los fabricantes suelen indicar los parámetros de respuesta del panel a una temperatura de solo 28 °C, en comparación con la temperatura de un panel en órbita LEO, que puede oscilar en el rango [-40, 80] °C [11]. Estas variaciones afectan a la respuesta del panel, y reduce la potencia máxima que puede generar en un 0.03 %/°C. Para el rango de temperaturas considerado esto se traduce en una variación total del 1.8 % de su rendimiento en todo ese rango de temperaturas [22].

Al conectar los paneles en paralelo se deben incluir diodos de bloqueo para evitar que el panel en sombra no sea una carga. Para reducir pérdidas en conducción se recomienda un diodo de tipo Schottky por presentar baja tensión umbral en directo.

El EPS de test desarrollado se probará inicialmente con una fuente de alimentación programable que permitirá simular este panel operando en diferentes condiciones de temperatura e irradiación solar. Por este motivo el circuito solamente contiene un único MPPTC.

3.4. Baterías

Las baterías almacenan la energía para alimentar los sistemas electrónicos de a bordo durante las fases de eclipse, y se recargan en los periodos de exposición a la radiación solar. En una órbita LEO, estas fases se suceden en un periodo inferior a las dos horas.

La duración típica de una misión CubeSat es de varios meses, lo que implica cientos de ciclos sucesivos de carga y descarga. Esto es uno de los factores que degradan la vida útil de la batería, y que limitan la vida operativa del satélite.

Las baterías basadas en iones de Litio carecen de efecto memoria y además presentan una densidad de carga mucho mayor que las tecnologías NiCd y NiMH, motivo por el que se utilizan y recomiendan en proyectos CubeSat [23].

En este proyecto se ha utilizado como referencia una unidad de Li-ion modelo MP176065, con voltaje nominal de 3.65 V, voltaje de carga de 4.2 V y una capacidad de 5.6 Ah.

Tabla 3.2 Batería Shaft MP17605. Fuente: <https://www.saftbatteries.com>

Tipo	Polímeros de Li-Ion
Voltaje nominal	3.65 V
Rango de voltaje	3.0 a 4.2 V
Capacidad	5600 mAh
Corriente máxima de carga (descarga)	11 A @1C (2C)
Temperatura de carga	[-30, 85] °C
Temperatura de descarga	[-40, 85] °C
Peso	136 g
Temperatura de transporte (máx.)	[-40, 85] °C
Dimensiones	18.6 x 60.5 x 68.7 mm

El número de cargas y descargas sucesivas de este tipo de baterías supera los 400 ciclos, siempre que se optimicen estos procesos en corriente, voltaje y temperatura. Además las cargas y las descargas completas reducen su vida útil. En general los fabricantes aportan rangos de parámetros operativos máximos, sin detallar las condiciones más óptimas de operación. En los siguientes apartados se comentan algunas generalidades sobre la tecnología de Li-ion de interés para el diseño.

3.4.1. Ciclos de carga-descarga

- Efecto de descargas parciales: La tabla siguiente muestra el efecto de la profundidad de descarga (DoD) sobre la vida útil medida en ciclos de descarga. Se observa que la longevidad de la batería es mayor con descargas porcentualmente menores

Depth of discharge	Discharge cycles (NMC / LiPO4)
100% DoD	~300 / 600
80% DoD	~400 / 900
60% DoD	~600 / 1,500
40% DoD	~1,500 / 3,000
20% DoD	~1,500 / 9,000
10% DoD	~10,000 / 15,000

Figura 3.5 Vida útil (en ciclos de descarga) vs. profundidad de descarga (DoD).
Fuente: <http://batteryuniversity.com>

- Efectos del voltaje de carga: La tabla siguiente indica que reduciendo el voltaje de carga nominal en 100 mV se duplica su vida operativa, y su capacidad se reduce un 10 % por cada 70 mV, de manera no permanente. Elegir el voltaje de carga es un balance entre la longevidad objetivo y las necesidades de almacenamiento de carga.

Charge level (V/cell)	Discharge cycles	Available stored energy
[4.30]	[150–250]	[110–115%]
4.25	200–350	105–110%
4.20	300–500	100%
4.15	400–700	90–95%
4.10	600–1,000	85–90%
4.05	850–1,500	80–85%
4.00	1,200–2,000	70–75%
3.90	2,400–4,000	60–65%

Figura 3.6 Voltaje de carga y vida útil de la batería (en ciclos de descarga) vs. energía disponible. Fuente: <http://batteryuniversity.com>

3.4.2. Efectos de la temperatura

La vida útil también depende de la temperatura de operación. Fabricantes como Clyde recomiendan mantener un rango de temperatura de 0 °C a 5 °C [24], por lo que se incluye un sistema calefactor.

3.4.3. Calefactor

El sistema de calefacción se incluye para mantener la temperatura de la batería en rangos operativos óptimos y alargar su vida útil. En este diseño se ha incluido un sistema termostático digital basado en el sensor LM75, de Maxim. El dispositivo permite programar rangos de temperatura durante la misión y desactivar el calefactor desde el computador de a bordo para ahorrar energía. Para ver más detalles véase la sección 3.9.1.

Una de las ventajas del LM75 es que su funcionamiento como termostato es autónomo, de modo que puede mantener la batería dentro de un rango de temperaturas mientras el OBC está en modo de bajo consumo. En otros sistemas CubeSat los sistemas son analógicos, con rangos de temperatura no configurables durante la misión [24].

3.4.4. Balanceado de corriente de carga en baterías multicélula

Las baterías pueden presentar dispersiones en sus características y diferentes ritmos de degradación en los sucesivos ciclos de carga y descarga. Para alargar la vida útil de sistemas con baterías conectadas en paralelo es conveniente incluir un sistema de equilibrado de carga, que puede necesitar distintos voltajes de referencia. En este diseño de EPS se ha empleado un único pack, por lo que este sistema de equilibrado no se incluirá, lo que simplificará el diseño del circuito.

3.5. Cargador de baterías

Uno de los componentes más importantes de un EPS es el circuito de carga de baterías. Este sistema es un convertidor CC-CV conmutado de los que el mercado ofrece soluciones muy compactas diseñadas para obtener energía de paneles fotovoltaicos.

En un CubeSat cada cargador se conectaría a dos paneles solares en paralelo, correspondientes a las caras opuestas del satélite. Para obtener el mayor rendimiento del panel, se han considerado convertidores conmutados que incluyan funciones de seguimiento del MPP (MPPTC).

En la EPS tratada en este proyecto se ha utilizado un único dispositivo MPPTC. Para su elección se han considerado diversas alternativas que han quedado reducidas

a dos dispositivos de interés: el LTM8062, fabricado por Linear Technology, y el BQ24650, de Texas Instruments. Estos dispositivos están indicados por los propios fabricantes para alimentar equipos y cargar baterías empleando paneles fotovoltaicos, e integran la función MPPT. En la tabla siguiente se resumen sus parámetros principales:

Tabla 3.3 Comparativa de los cargadores BQ24650 y LTM8062

Parámetro	BQ24650 (TI)	LTM8062 (Linear Tech.)
Temperatura de operación	[-40, 155] °C	[-40, 125] °C
Regulación	MPPT	MPPT
Voltaje de entrada (máx)	28 V	32 V
Voltaje de salida (ajustable)	De 2.1 a 26 V	14.4 V máx.
Oscilador interno	600 kHz	1 MHz
Corriente de salida (máx.)	(MOSFET externos)	2 A
Encapsulado	VQFN	LGA
Otros	Inductancia y MOSFET externos	MOSFET internos

Ambos dispositivos permiten realizar un diseño flexible dentro de las restricciones del proyecto. Sin embargo se ha desestimado el LTM8062 debido a que su encapsulado no facilita detectar posibles soldaduras defectuosas, que comprometerían su integridad ante las exigencias mecánicas propias de un lanzamiento.

3.5.1. Punto de máxima potencia (MPP)

La curva de respuesta de un panel fotovoltaico se describe con su curva I-V, dependiente de la temperatura. El punto de interés para esta aplicación es su punto de máxima potencia (MPP) en la que se obtiene el máximo rendimiento del panel a una temperatura e irradiancia dadas.

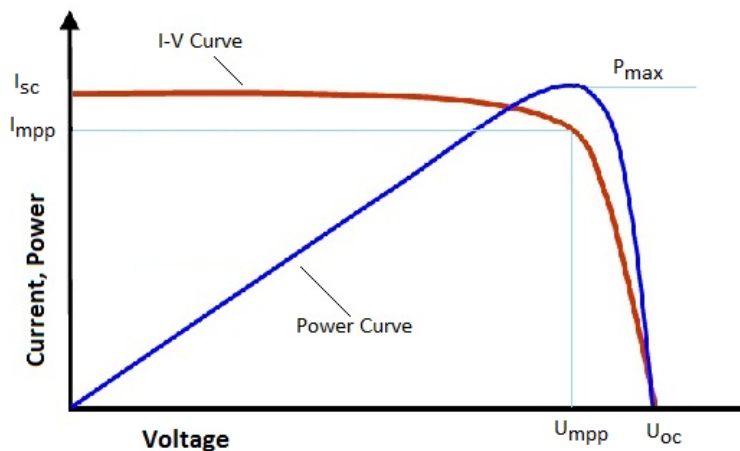


Figura 3.7 Curva I-V y P-V de un panel fotovoltaico

Los fabricantes suelen especificar los parámetros del panel a una temperatura de test 25 °C, muy alejadas de las condiciones operativas en órbita, con oscilaciones ya indicadas de entre -40 y 85 °C. Para tener en cuenta esta desviación es necesario hacer un diseño para la temperatura de trabajo considerando el coeficiente de deriva. Un MPPTC obtiene el máximo rendimiento del panel utilizando un voltaje de referencia proporcional al valor del voltaje en el MPP. Sin embargo, un análisis para un panel con un rendimiento nominal del 23 % sometido a este rango de temperaturas indica desviaciones de un máximo de 0.41%, utilizando un coeficiente de temperatura de 0.3 %/°C. Por este motivo se prescinde de un sistema de compensación que ajuste de esta referencia de voltaje con la temperatura.

3.5.2. BQ24650

El dispositivo BQ24650, fabricado por Texas Instruments, es un controlador de carga indicado por el fabricante para cargar baterías de Li-ion a partir de la energía captada por paneles fotovoltaicos. En la tabla siguiente se resumen sus características principales.

Tabla 3.4 Características principales del BQ24650

Parámetro	Valores	Unidades
Voltaje de entrada	[5, 28]	V
Voltaje de salida (batería)	[2.1, 26]	V
Oscilador interno	600	kHz
Regulación de corriente de carga	3%	
Regulación del voltaje de carga	0.5 %	
Temperatura de operación	[0, 125]	°C

El dispositivo implementa un método de seguimiento del MPP denominado *algoritmo de voltaje constante*, muestreando el voltaje de salida del panel a través de su entrada analógica MPPSET. Al extraer corriente del panel hacia la batería, disminuye el voltaje del panel, de modo que si este cae por debajo de un voltaje de referencia igual a 1.2 V el dispositivo reduce la corriente de cara para mantener al panel en su MPP.

Para ello emplea dos redes resistivas para ajustar las referencias de voltaje de carga y del MPP del panel. Una de ellas aplica un voltaje sobre la entrada MPPSET, de modo que si su voltaje es inferior a 75 mV se anula la corriente de carga. Esto se aprovecha para añadir una función de bloqueo de carga mediante un MOSFET que cortocircuita con masa la entrada MPPSET. Este MOSFET lo controla el OBC por la línea de control CE.

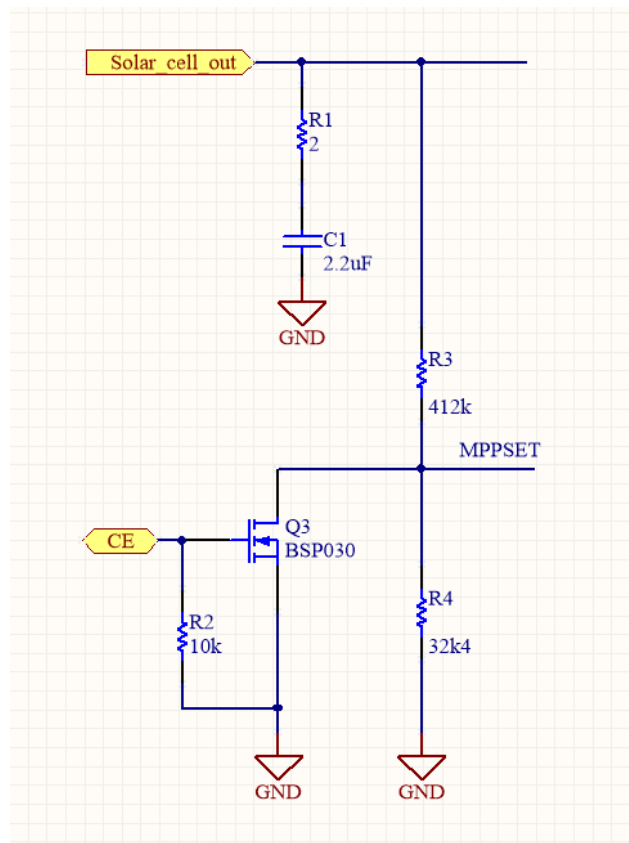


Figura 3.8 Sistema de bloqueo de carga (detalle)

El cargador además notifica si la carga está bloqueada mediante las líneas de drenador abierto STAT1 y STAT2, poniéndolas a estado bajo y alto, respectivamente. Si hay carga sus salidas toman los valores opuestos.

3.5.3. Diseño

3.5.3.1. Ajustes para el panel fotovoltaico

El voltaje de salida del panel se muestrea por la entrada MPPSET mediante la red de resistencias R10 y R11 (Figura 3.8). Estas deben ajustarse para mantener un valor de voltaje en el terminal MPPSET de 1.2 V, utilizando esta ecuación de diseño:

$$V_{MPPSET} = 1.2 \left(1 + \frac{R3}{R4} \right)$$

El valor VMPPSET es el de MPP del panel (16.52 V). El valor escogido para las resistencias es $R3 = 412 \text{ k}\Omega$, $R4 = 32.4 \text{ k}\Omega$.

3.5.3.2. Ajustes para la batería

Para regular el voltaje de salida emplea una técnica similar, con dos resistencias que muestrean el voltaje de salida VBAT por el terminal FB y lo comparan con otra referencia de 2.1 V. Para ajustar este voltaje se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{BAT} = 2.1 \left(1 + \frac{R8}{R9} \right)$$

Con los valores estándar $R8 = 95.3 \text{ k}\Omega$, $R9 = 100 \text{ k}\Omega$. se obtiene un ajuste $V_{BAT} = 4.05 \text{ V}$.

Para regular la corriente de salida el dispositivo mide la caída de voltaje en la resistencia RSR conectada a los terminales SRP y SRN. El fondo de escala de esta medida es de 40 mV, por lo que se aplica esta ecuación que relaciona la corriente de carga con la resistencia RSR:

$$I_{CHARGE} = 0.040/R_{SR}$$

Además se tiene:

$$I_{CHARGE} = \frac{P_{MPP}}{V_{CHARGE}} = 1976 \text{ mA}$$

Para un voltaje de carga de 4.10 V se tiene una $R_{SR} = 20 \text{ m}\Omega$.

3.5.3.3. Protección de la batería

El dispositivo incorpora un sistema de protección de la batería (Temperature Qualification) basado en la temperatura que mide un sistema analógico basado en un termistor NTC. Su finalidad es evitar detener la carga si la temperatura sale de un rango prefijado. El voltaje se ajusta con divisor de voltaje dimensionado teniendo en cuenta las características del termistor.

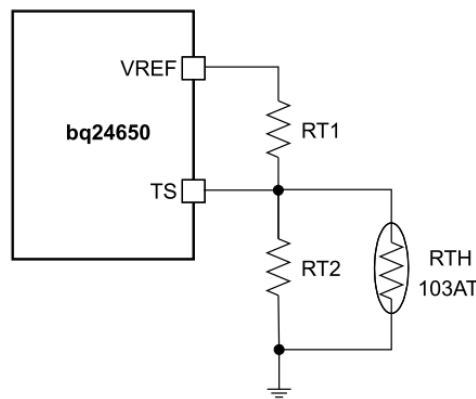


Figura 3.9 Circuito de medida de temperatura. Fuente: Texas Instruments

Un voltaje de referencia que se obtiene por la salida VREF se aplica al divisor de voltaje compuesto por resistencias de ajuste RT1 y RT2 y la NTC. El voltaje se aplica al terminal TS, que varía según la temperatura de la batería. Este valor se compara con distintos valores de umbral, dependiendo del estado de carga:

Se ha omitido el uso de este sistema debido a que se dispone de un sistema calefactor controlado por un termostato digital programable en órbita.

Para cancelar este sistema se ha utilizado un divisor de voltaje sin termistor, que aplica un voltaje fijo a TS en mitad del rango del intervalo de habilitación de la carga. Esto implica cumplir:

$$V_{HTF} < V_{TS} < V_{LTF}$$

En la que $V_{HTF} = 0.483 V_{REF}$, $V_{LTF} = 0.725 V_{REF}$, $V_{REF} = 3.3 V$. Para fijar el valor del terminal al 60 % del rango, y teniendo en cuenta que la corriente máxima en la salida VREF es inferior a 35 μA , resultan los siguientes valores comerciales (RT1, RT2 en el circuito se han denominado R5, R6):

$$R5 = 3.1 k\Omega, \quad R6 = 4.7 k\Omega$$

Y un consumo de $I_{REF} = 0.4 mA$.

3.5.3.4. Inductor

El inductor debe elegirse tal que su corriente de saturación sea superior al valor pico de la corriente de carga, $I_{CHARGE} = 1976 \text{ mA}$:

$$I_{SAT} \geq I_{CHARGE} + \frac{I_{RIPPLE}}{2}$$

Donde la corriente de rizado I_{RIPPLE} está relacionada con las elecciones del factor de trabajo y el valor del inductor según la ecuación siguiente:

$$I_{RIPPLE} = \frac{V_{IN} D (1 - D)}{f_S L}$$

Siendo:

$$D = \frac{V_{OUT}}{V_{IN}} = \frac{4.1}{16.52} = 0.25$$

El fabricante recomienda que el valor de rizado esté comprendido entre el 20 % y el 40 % de la corriente de carga. Con una inductancia de 10 uH se obtiene un valor $I_{RIPPLE} = 514 \text{ mA}$, lo que supone un 26 % de la corriente de carga.

El inductor escogido es de 10 uH, de la serie IHLP-2525CZ de Vishay, con una corriente de saturación de 3.5 A.

3.5.3.5. Condensador de entrada

Las recomendaciones del fabricante es un condensador cerámico de baja ERS, de 25 V y 20 uF, con un ripple current rating suficiente, para absorber una corriente dada por

$$I_{CIN} = I_{CHARGE} \sqrt{D(1 - D)} = 853 \text{ mA}$$

En la que D = 25 % y la corriente de carga es

Se ha escogido un condensador C2= 22 uF, 25 V, con baja ESR (< 0.4 Ω).

3.5.3.6. Condensador de salida

El condensador de salida está relacionado con el rizado del voltaje de carga según la ecuación siguiente:

$$\Delta V_{CHARGE} = \frac{V_{CHARGE}}{8 L C_6 f_S^2} \left(1 - \frac{V_{CHARGE}}{V_{IN}} \right)$$

Se ha escogido un condensador de tipo cerámico C6= 15 uF y 25 V, que ofrece un rizado de voltaje de carga de 7 mV (0.17 %).

3.5.3.7. *MOSFETS*

La conmutación de la corriente de carga la realizan dos MOSFET externos Q1, Q2. El fabricante recomienda para aplicaciones como esta emplear MOSFET de 30 V con baja resistencia en conducción para minimizar pérdidas.

3.5.3.8. *Otros componentes*

El diseño lo completan otros componentes que forman parte de las recomendaciones de fabricante y se detallan en la correspondiente hoja de características.

3.6. Conversores de salida de potencia

La potencia entregada por la EPS al resto de los sistemas se transfiere mediante dos buses de potencia con voltajes regulados a 5 V y 3.3 V. En ambos casos se ha empleado el convertidor DC-DC Buck-Boost LTC3440, de Linear Technology, que permite ajustar el voltaje de salida con un rendimiento de hasta el 96 %.

3.6.1. LTC3440

El dispositivo LTC3440 de Linear Technology es un convertidor Buck-Boosk DC-DC para regular la salida de los buses de potencia. En la tabla siguiente se resumen sus características principales.

Tabla 3.5 Características principales del LTC3440

Parámetro	Valores	Unidades
Voltaje de entrada	[2.5, 5.5]	V
Voltaje de salida	[2.5, 5.5]	V
Corriente de salida (máx.)	600	mA
Oscilador interno ajustable	300-2000	kHz
Temperatura de operación	[-40, 85]	°C

3.6.2. Diseño

3.6.2.1. *Frecuencia de operación*

En el circuito se han utilizado los diseños de referencia del fabricante para salidas de 3.3 V y 5V. El oscilador se ha ajustado en ambas unidades a 1 MHz utilizando la siguiente ecuación de diseño:

$$f_{osc} = 6e10/R_T [Hz]$$

De la que resulta

$$R_T = 60.4 \text{ k}\Omega.$$

En el circuito este valor se utiliza en las resistencias R10 y R14.

3.6.2.2. Ajuste del voltaje de salida

El voltaje de salida se regula por muestreo de la salida mediante un divisor resistivo que se compara con un voltaje de referencia de 1.22 V. De este modo puede ajustarse el voltaje de salida del convertidor utilizando las ecuaciones siguientes:

- Para el convertidor del bus de potencia con $V_{out} = 5 \text{ V}$ (operación en modo boost):

$$V_{out}^{5V} = 1.22 \left(1 + \frac{R16}{R17} \right)$$

Resultando:

$$R16 = 619 \text{ k}\Omega, \quad R17 = 200 \text{ k}\Omega$$

- Para el convertidor del bus de potencia con $V_{out} = 3.3 \text{ V}$ (operación en modo buck):

$$V_{out}^{3V3} = 1.22 \left(1 + \frac{R12}{R13} \right)$$

Resultando:

$$R12 = 340 \text{ k}\Omega, \quad R13 = 200 \text{ k}\Omega$$

Para el convertidor del bus de 5 V es necesario incluir un diodo Schottky.

3.6.2.3. Inductor

El valor del inductor condiciona el rizado de la corriente. Las ecuaciones de diseño indicadas por el fabricante son:

$$L > \frac{V_{out}(V_{in}^{max} - V_{out})}{f I_{out}^{max} r_i V_{in}^{max}} [\text{uH}]$$

$$L > \frac{V_{in}^{min}(V_{out} - V_{in}^{min})}{f I_{out}^{max} r_i V_{out}} [\text{uH}]$$

En las que $f = 1 \text{ MHz}$ es la frecuencia de conmutación del convertidor en MHz, V_{in}^{min} , V_{in}^{max} , V_{out} son los valores extremos del voltaje de entrada y el valor del voltaje

de salida, $I_{out}^{max} = 0.600 A$ es la corriente de salida máxima, y se ha fijado $r_i = 0.2$ como valor para el rizado de la corriente.

De acuerdo con los diseños de referencia del fabricante para aplicaciones con baterías de Li-ion y salidas a 5 V y a 3.3 V, se ha escogido el mismo valor para ambos convertidores, $L_2 = L_3 = 10 \mu H$. En estas condiciones, el rizado de entrada máximo permisible es de 1.1 V, muy alejados de los valores calculados para el rizado del voltaje de salida del cargador, del orden de los mV.

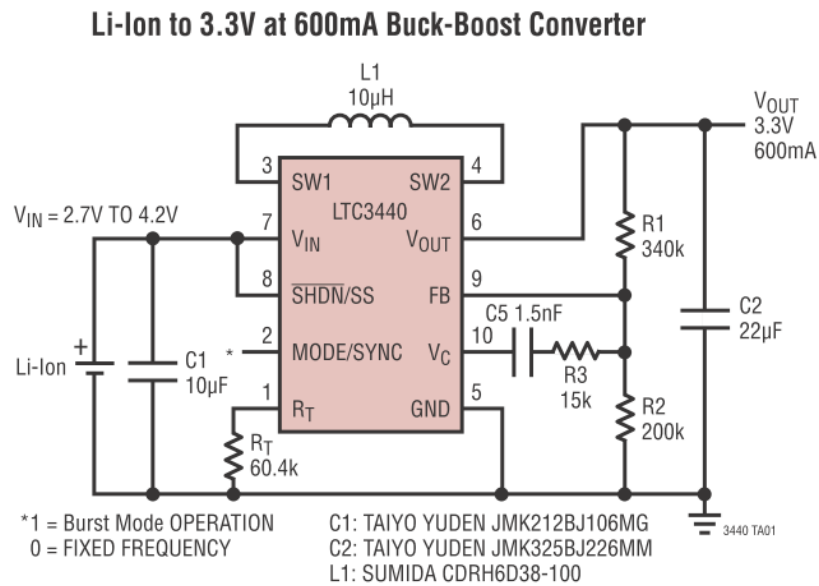


Figura 3.10 Ejemplo de aplicación. Fuente: Linear Technology

3.6.2.4. Condensadores de salida

Cada unidad se ajusta automáticamente a un modo buck o boost, dependiendo de la relación entre los voltajes de entrada y salida. En cada caso se aplica una ecuación de diseño particular que relaciona el rizado de voltaje de salida con el condensador de salida y las variaciones del voltaje de entrada, además de otros parámetros fijos. Las ecuaciones de diseño son [25] [26]:

- Para el convertidor del bus de potencia con $V_{out} = 5 V$ (operación en modo boost):

$$C_{out}^{5V} > \frac{I_{out}^{max} D}{f \Delta V_{out}^{5V}}$$

- Para el convertidor del bus de potencia con $V_{out} = 3.3 V$ (operación en modo buck):

$$C_{out}^{3V3} > \frac{\Delta I_{out}}{8 f \Delta V_{out}^{3V3}}$$

En las que $f = 10^6 \text{ Hz}$ es la frecuencia de conmutación del convertidor y $I_{out}^{max} = 0.600 \text{ A}$ es la corriente máxima de la salida que admite el convertidor, $\Delta I_{out} = 120 \text{ mA}$ es la variación de la corriente de salida con un rizado del 20 %, $D = 0.5$ es el valor de peor caso del factor de trabajo, y ΔV_{out}^{5V} , ΔV_{out}^{3V3} son las variaciones del voltaje de salida para los buses de potencia a 5 V y a 3.3 V, respectivamente.

Se ha escogido un valor de 22 μF para cada condensador de salida C13 y C16, siguiendo los diseños de referencia del fabricante para aplicaciones con baterías de Li-ion y salidas a 5 V y a 3.3 V. En estas condiciones los valores obtenidos son $\Delta V_{out}^{5V} < 14 \text{ mV}$, $\Delta V_{out}^{3V3} < 1 \text{ mV}$, en ambos casos valores inferiores al 1 %.

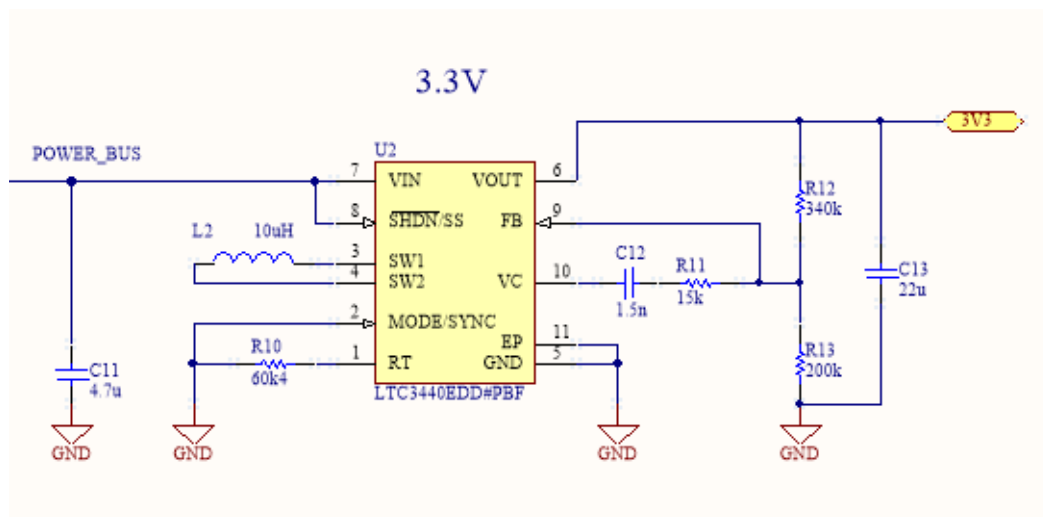


Figura 3.11 Etapa de salida del bus de potencia de 3.3 V

El diseño del convertidor a 5 V lo completa un diodo Schottky como indica la figura:

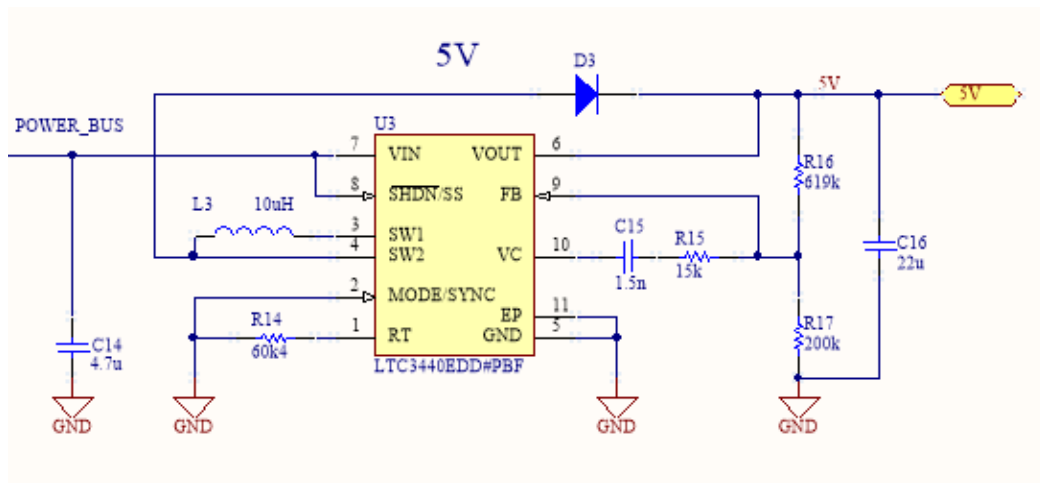


Figura 3.12 Etapa de salida del bus de potencia de 5 V

3.7. Sensores de voltaje y corriente INA3221

Los sensores de voltaje y corriente monitorizan los buses de potencia para detectar condiciones de sobrevoltaje y sobrecorriente, y obtener medidas de consumo.

El dispositivo INA3221, de Texas Instruments, es un sensor de voltaje y corriente multicanal, con conexión I2C y salidas de alerta. Incluye funciones de promediado y tiempos de conversión ajustables. Sus características principales son:

Tabla 3.6 Características principales del INA3221

Parámetro	Valores	Unidades
Voltaje de alimentación	[2.7, 5.5]	V
Rango de medida de voltaje de bus	0-26	V
Resolución de medida de voltaje de bus	8	mV/LSbit
Rango de medida de voltaje shunt	[-163.8, 163.8]	mV
Resolución de medida de voltaje shunt	40	uV/LSbit
Temperatura de operación	[-40, 125]	°C
Canales de medida de voltaje y corriente	3	
Direcciones I2C	0b10000xx (1)	

(1): Direcciones utilizadas: 0b1000000 (unidad A), 0b1000001 (unidad B).

La medida de corriente es indirecta, mediante una resistencia shunt externa. En los canales utilizados en ambas unidades el valor de la resistencia es de 100 m Ω , resultando un fondo de escala de 1.64 A. En el circuito se identifican como Rshunt#.

El INA3221 es un sensor de voltaje y corriente de tres canales y comunicaciones I2C. En el diseño se han utilizado dos unidades, denominadas A y B. La unidad A monitoriza los buses del panel fotovoltaico y la carga de la batería. La unidad B se dedica a los buses de potencia de salida de 5 V y 3.3 V. Las direcciones I2C utilizadas son 0b1000000 para la unidad A y 0b1000001 para la unidad B.

Cada dispositivo incluye salidas de alerta críticas y no críticas para detectar valores de voltaje y corriente fuera de rango, comparándolos con umbrales programables mediante I2C. También se pueden programar varios modos de operación, opciones de tiempos de conversión y de promediado de medidas para eliminar ruido. En la aplicación se han utilizado el modo de muestreo continuo sobre el voltaje de bus y el voltaje shunt (Continuous Mode), y el modo de bajo consumo (Power-down Mode), que reduce la corriente absorbida a menos de 2 μ A. Este modo es interesante en fases de eclipse para desactivar la unidad INA3221-A, y estimar la corriente de descarga de la batería con las medidas del consumo por los buses de potencia de salida.

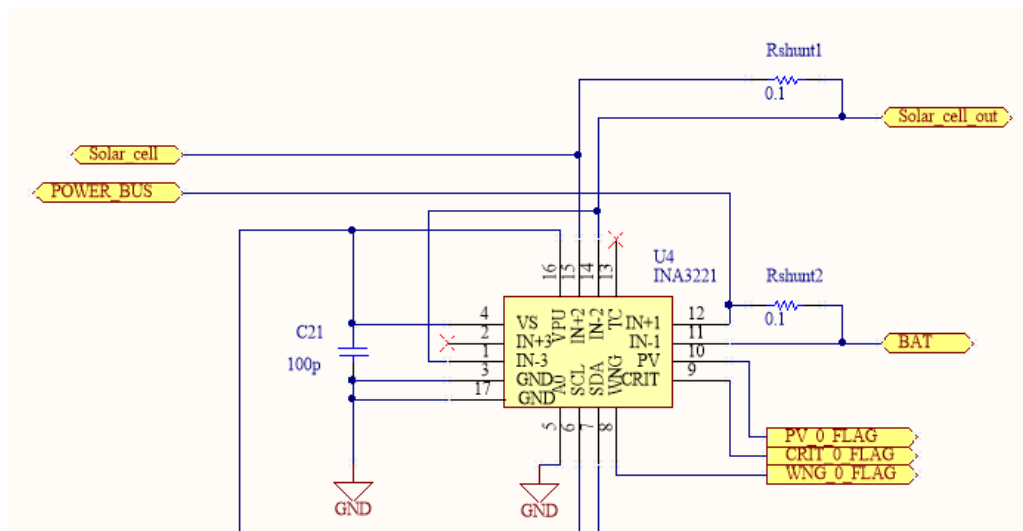


Figura 3.13 Sensor INA3221, unidad A (detalle)

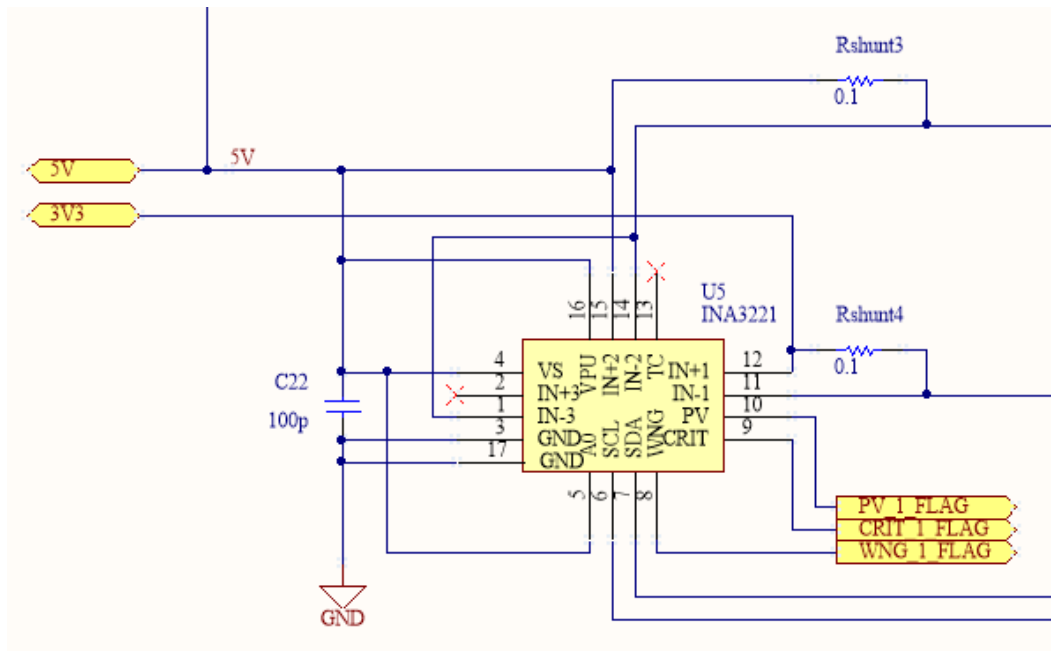


Figura 3.14 Sensor INA3221, unidad B (detalle)

3.7.1. Modos de operación

El dispositivo INA3221 dispone de varios modos de operación: de bajo consumo, muestreo continuo periódico y muestreo por disparo. En esta aplicación se han utilizado los siguientes:

- Modo continuo: Muestreo continuo y periódico del voltaje y la corriente en todos los canales habilitados. El tiempo de conversión es configurable de manera independiente para las muestras de voltaje y de corriente.
- Modo Power-down: Modo con un consumo inferior a 2 uA.

3.7.2. Función de promediado

Se trata de una función que implementa un filtro de promediado sobre una ventana deslizante de longitud ajustable. Se puede elegir entre 8 valores diferentes desde 1 a 1024 muestras. Su finalidad es reducir el ruido en las medidas.

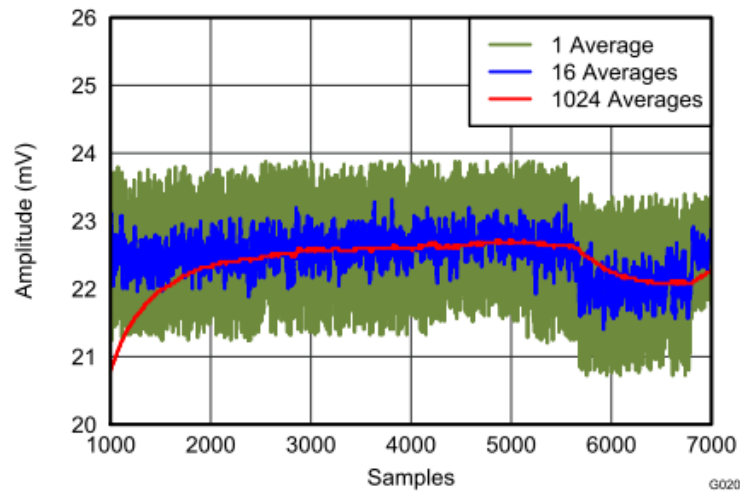


Figura 3.15 Efecto de la función de promediado de las muestras. Fuente: Texas Instruments

3.7.3. Tiempos de conversión y efecto del promediado

Los tiempos de conversión son seleccionables entre 140 μ s y 8.244 ms, e independientes para medidas de corriente y voltaje, aunque común a todos los canales de la unidad.

El periodo de muestreo es la suma de los tiempos de conversión para corriente y voltaje de todos los canales habilitados. En el caso de haber dos habilitados se tienen cuatro muestreos en total, y por lo tanto se suman cuatro tiempos de conversión hasta proceder con un nuevo muestreo. Como ejemplo, para tres canales habilitados se están realizando un total de seis conversiones. Por lo tanto, si se configura el tiempo de muestreo a 332 μ s resulta un periodo de muestreo de 2 ms.

El fabricante recomienda emplear tiempos de conversión grandes y ajustar la función de promediado con un alto número de muestras para reducir el ruido en las medidas.

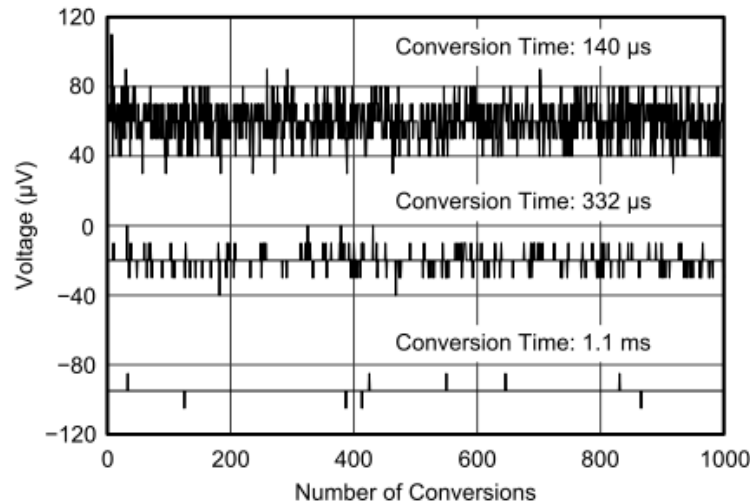


Figura 3.16 Efecto del tiempo de conversión sobre el ruido. Fuente: Texas Instruments

Sin embargo, un promediado sobre muchas muestras implica mayor retardo en el cambio de una señal. Esto afecta también a la función Warning Alert, que utiliza el valor promediado de las muestras, pero no a la función Critical Alert, que se activa comparando los valores instantáneos con un valor umbral configurable.

3.7.4. Funciones de alerta en valores de corriente

Las funciones utilizadas de alerta Critical y Warning monitorizan la corriente, y pueden activar a nivel bajo las correspondientes salidas de drenador abierto conectadas al OBC, dependiendo de ciertas condiciones. Estas salidas son compartidas por todos los canales, por lo que es necesaria una consulta por software para identificar el canal que produjo a alerta.

- **Critical Alert:** Activa la salida Critical a nivel bajo si uno de los canales de medida de corriente habilitados supera su valor umbral programado en el registro Critical Alert Limit correspondiente. Se puede desactivar la función para un canal en particular asignando al valor umbral el valor positivo de fondo de escala. La salida Critical es compartida, por lo que es necesario identificar el canal que generó la alerta leyendo el registro Mask/Enable, bits CF1-3 a valor 1.
- **Warning Alert:** Activa la salida Warning a nivel bajo si uno de los canales de medida de corriente habilitados supera, en valor promedio, su valor umbral programado en el registro Warning Alert Limit correspondiente. Se puede desactivar la función para un canal en particular asignando al valor umbral el valor positivo de fondo de escala. La salida Warning es compartida, por lo que

es necesario identificar el canal que generó la alerta leyendo el registro Mask/Enable, bits WF1-3, a valor 1. El valor promedio se calcula a partir del número de muestras programado en los bits AVG1-3 del registro de configuración. El valor se actualiza al finalizar cada conversión en el correspondiente canal.

- **Función Summation Control:** Esta función permite seleccionar un conjunto de canales para esta función, y compara la suma de sus corrientes con un umbral programado en el Shunt-Voltage Sum Limit register. Si la corriente total es superior, el terminal de alerta Critical se activa a nivel bajo. Se puede determinar la causa de la alerta crítica leyendo el flag indicador SF del registro Mask/Enable, o los bits de alerta crítica CF1-3. Para usar esta función de alerta de suma de corrientes se recomienda que todos los valores de las resistencias shunt sean iguales en todos los canales.
- **Función Power Valid:** Esta función es una alerta de voltaje que activa a nivel bajo la salida de drenador abierto PV en las siguientes condiciones:
 - El modo de operación debe ser continuo para detectar cambios del voltaje.
 - La salida PV se activa con un valor alto si todos los voltajes de los canales habilitados superan un valor umbral superior programado en el registro Power-Valid Upper-Limit.
 - La salida solamente cambiará a un valor bajo si alguno de los canales presenta un voltaje inferior a un umbral inferior programado en el registro Power-Valid Lower-Limit register. En el diseño no se emplea uno de los canales, por lo que debe conectarse su terminal IN- a uno de los otros en uso. El correspondiente terminal IN+ no utilizado se deja sin conectar.

La colocación del sensor respecto de la batería en el bus de potencia, implica que en condiciones de carga se obtenga un valor de corriente positivo, mientras que en condiciones de consumo, durante las fases de eclipse, la corriente tiene valor negativo. El sensor de corriente es capaz de ofrecer la polaridad de la corriente y queda contemplado en el software.

3.8. Interruptores electrónicos de potencia NCP361

Los interruptores electrónicos NCP361 de On Semiconductor se incluyen para cortar la alimentación desde los buses de potencia regulada de 3.3 V y 5 V con fines de protección y de ahorro de energía. Integran un FET, por lo que no necesitan componentes externos. Están controlados desde el OBC y disponen de funciones de autobloqueo que no son configurables ni pueden deshabilitarse. La condición de

autobloqueo sucede si el voltaje de salida es inferior a 3 V o si es superior a 5.675 V. Además, en este caso, se activa a nivel bajo la salida FLAG, no usada en este diseño.

Tabla 3.7 Características principales del NCP361

Parámetro	Valores	Unidades
Voltaje entrada (máx.)	20	V
Corriente de entrada (máx.)	600	mA
Retardo de apertura del bus	1.5	us
Temperatura de operación	[-40, 85]	°C

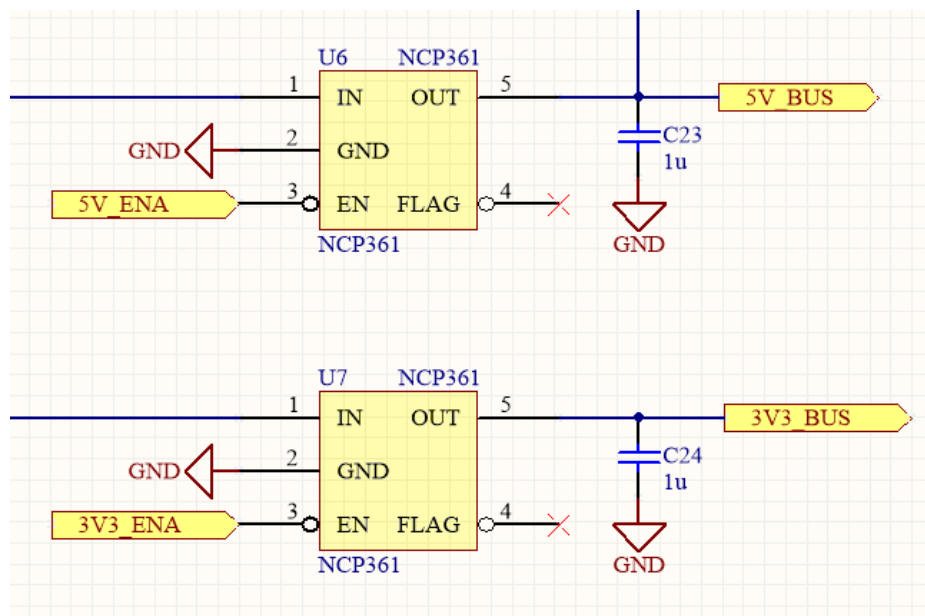


Figura 3.17 Interruptores de buses de potencia NCP361

3.9. Calefactor de la batería

El sistema consiste en un termostato digital que conecta o desconecta una resistencia calefactora mediante un MOSFET Nexperia BSP030. Se trata de un circuito externo a la PCB principal.

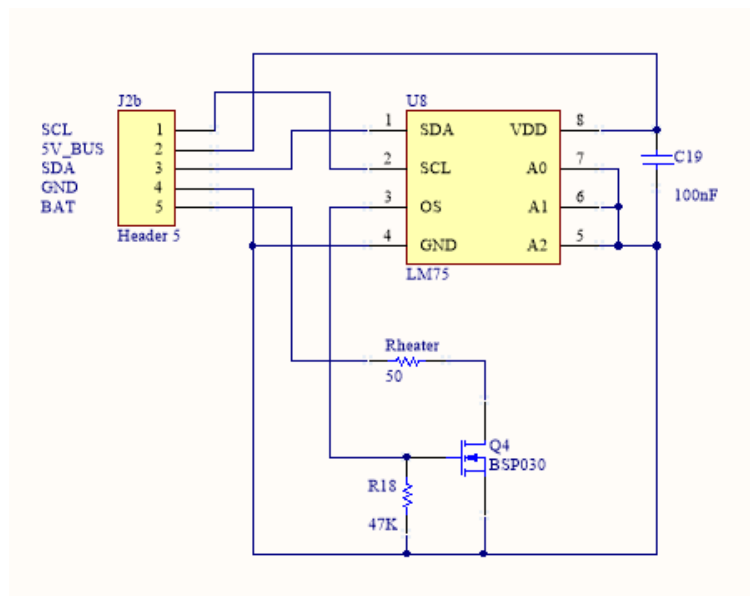


Figura 3.18 Sistema calefactor de la batería

El sensor digital de temperatura es un Maxim LM75 que obtiene medidas de la temperatura de la batería y puede operar como termostato. El sensor mide la temperatura de su encapsulado e intercambia calor principalmente a través de sus terminales de conexión con la PCB. La recomendación para instalación consiste en proporcionar una buena superficie de intercambio de calor entre su PCB y la superficie de la batería, y alejarlo de otras fuentes de calor.

3.9.1. Sensor LM75

El dispositivo Maxim LM75 es un sensor digital de temperatura que se conecta al OBC mediante el bus I2C. El sensor mide temperaturas en el rango $[-128, 127]$ °C con una precisión de 0.5 °C/LSbit. Operando como termostato aplica un control todo o nada con histéresis controlando una controla salida digital conectada al driver de la resistencia. Las temperaturas umbrales pueden programarse durante la misión mediante el bus I2C, y del mismo modo puede desactivar el calefactor para ahorrar energía y dedicarla a sistemas más prioritarios. La dirección I2C utilizada es la 0b1001000.

Tabla 3.8 Características principales del LM75

Parámetro	Valores	Unidades
Voltaje de alimentación	[3.0, 5.5]	V
Rango de medida	[-128, 127]	°C
Resolución de medida	0.5	°C/LSbit
Precisión (en [-25, 100] °C)	1.5	°C
Tiempo de conversión (máx.)	300	ms
Temperatura de operación	[-55, 125]	°C
Consumo en modo shutdown (máx)	6	uA
Direcciones I2C	0b1001xxx (1)	

(1) Dirección utilizada: 0b1001000.

En el circuito se utilizan dos modos de operación: el modo Comparator y el modo Shutdown. En el modo Comparator el dispositivo opera como termostato activando o desactivando el driver MOSFET del calefactor mediante la salida OS, programada a nivel bajo. El control es binario con histéresis programable entre la temperatura máxima configurada en registro TOS y la mínima THYST. Esto permitirá un mejor ajuste de la resistencia del calefactor y optimizar el consumo energético.

3.10. Interruptores mecánicos

Los interruptores mecánicos RBF (Remove Before Flight) y DS (Deployment Switch) se introducen como medida de seguridad contemplada por el estándar CubeSat y aseguran que los buses de potencia estén abiertos, aislando la batería y otros sistemas durante las fases previas a la misión. El interruptor RBF debe cerrarse manualmente justo antes del lanzamiento, cuando el satélite está instalado en su bandeja de transporte. Los DS se cierran automáticamente cuando el satélite sale de la bodega de carga para transferirlo a su órbita. En la EPS diseñada se han incluido como jumpers. JRBF para el interruptor RBF y JD1, JD2 para los DS.

Con el jumper de dos vías JD2 además se puede seleccionar la conexión del cargador con la batería (terminales 1 y 2) o a una resistencia de protección, en ausencia de batería (terminales 2 y 3).

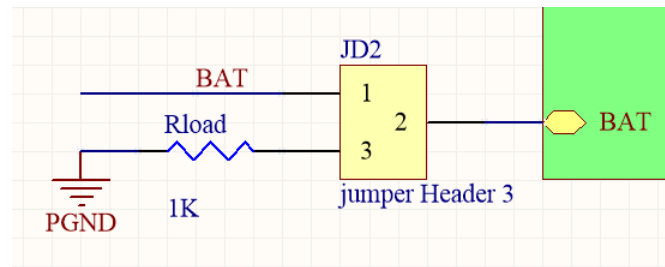


Figura 3.19 Jumper de selección batería/carga de protección

3.11. Alimentación de la placa Arduino Mega

El sistema Arduino Mega se alimenta a 5 V utilizando distintas posibilidades:

- Desde el puerto USB, conectado a un computador.
- Mediante el conector jack hembra de alimentación conectado a una fuente DC de 7 V a 12 V. La placa utiliza un regulador incorporado para obtener 5 V.
- A través del terminal *VIN*, aplicando una fuente DC de 7 V a 12 V. Esta opción se ha desestimado al estar interconectado al jack de alimentación comentado antes.
- A través del terminal *5V*, aplicando un voltaje estabilizado a 5 V. Con esta opción no se recomienda utilizar ninguna de las anteriores, ya que podría causar daños en el regulador de la placa Arduino Mega. Esta opción se ha desestimado incluir en la PCB un puerto de conexión a dicho terminal.
- Mediante el bus de potencia de 5 V de la EPS de test. Este caso presenta los mismos inconvenientes que el anterior. Sin embargo se ha provisto en la PCB una resistencia de valor nulo *R_5V_optional* que debería soldarse para utilizar este método de alimentación.

4. Diseño del software

El software desarrollado para la placa Arduino Mega permite acceder al hardware de la placa del EPS de test para tareas de configuración de dispositivos, obtención de medidas y control de los subsistemas integrados. Se conecta a la PCB mediante sus zócalos hembra integrados en la placa. Además puede conectarse a un computador mediante su puerto USB o a otro microcontrolador mediante un puerto serie.

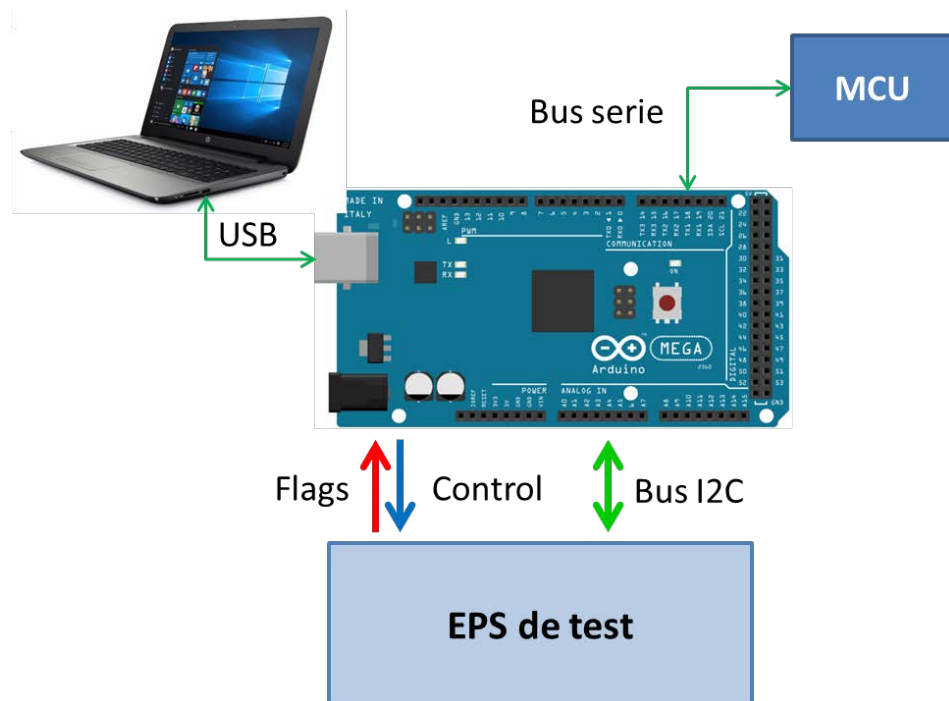


Figura 4.1 Conectividad de datos con la placa Arduino Mega

La placa Arduino Mega cuenta con un microcontrolador ATmega 2560, de 8 bits con 8kB de RAM, 256 kB de memoria de programa que opera a 16 MHz y a 5 V. La aplicación utiliza las bibliotecas Wire para las comunicaciones I2C, la nativa Arduino SDK y la estándar stdint.h. La lista detallada de archivos y dependencias se encuentra en el anexo C.1.

El software ha sido desarrollado utilizando las herramientas Visual Studio Community 2015 y Arduino IDE 1.8.3. El ejecutable ocupa un 4% de la memoria disponible de programa, aparte del bootloader de fábrica, y las variables globales ocupan el 13 % de memoria SRAM.

4.1. Peticiones de servicio

La aplicación lo componen principalmente un conjunto de funciones para acceder a los registros de los dispositivos I2C, leer los puertos de entrada de alertas y escribir en las salidas de control. El acceso se realiza ejecutando distintas funciones de servicio mediante el envío de comandos de dos maneras posibles, detalladas en las secciones siguientes:

4.1.1. Peticiones de servicio mediante consola

De este modo se pueden enviar peticiones de manera manual desde la consola de un PC conectado por el puerto USB a la placa Arduino Mega. Se puede utilizar la consola que facilita el entorno de desarrollo de Arduino ajustando la velocidad del puerto a 9600 bps.

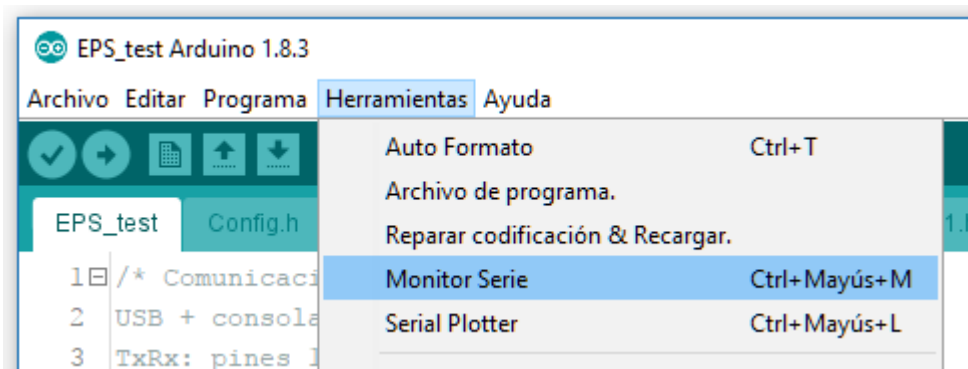


Figura 4.2 Acceso a la consola en el entorno Arduino IDE 1.8.3

Cada comando es una cadena alfanumérica, a la que sigue un número variable de argumentos numéricos separados por comas. El comando se corresponde con una función de acceso al hardware del EPS, y en caso de requerir resultados son presentados en la consola. El software realiza la conversión de formatos para que el acceso a la información de los registros sea transparente al usuario.

En el anexo C.2.1 se detalla el formato de mensajes desde la consola. En el anexo C.2.3 se adjuntan ejemplos de uso. En el anexo C.3 puede consultarse la lista de funciones de servicio.

4.1.2. Peticiones de servicio desde el puerto serial 1

El puerto serie 1 de Arduino Mega es accesible desde el conector J4 conectando las líneas Tx, Rx y GND a otro MCU. A nivel de enlace de datos el protocolo coincide con la norma RS232, configurado a 9600 8N1 (velocidad de 9600 bps, 8 bits por palabra, sin bit de paridad y un bit de parada). A nivel físico utiliza niveles TTL.

El mensaje a enviar consiste en una secuencia de cinco bytes. El primero es el código de la función de acceso y los otros cuatro bytes son los argumentos de la función. Los resultados son devueltos a través del mismo puerto.

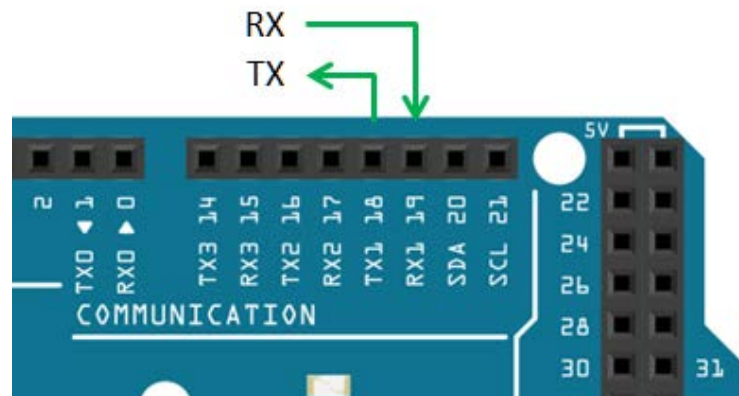


Figura 4.3 Conexiones del puerto serie 1 en Arduino Mega

4.1.3. Comunicaciones por el puerto serie 1

Se emplea un protocolo de tipo Stop-and-wait con timeout. En envío de datos desde el MCU genera un evento de recepción, pudiendo darse los casos siguientes:

1. El buffer no ha recibido cinco bytes al finalizar un tiempo de espera: Se devuelve un mensaje de error de trama no válida (BAD_FRAME) y el número de bytes recibidos.
2. Se completa la recepción de los cinco bytes, pero el primer byte no se corresponde con un código de función de servicio válido: Se devuelve un mensaje de error de código no válido (BAD_CODE).
3. Se completa la recepción de los cinco bytes y el código de función es válido: Se devuelve un byte de acuse de recibo (código ACK).
4. La función de servicio elegida devuelve un resultado: Se envían dos bytes adicionales al ACK.

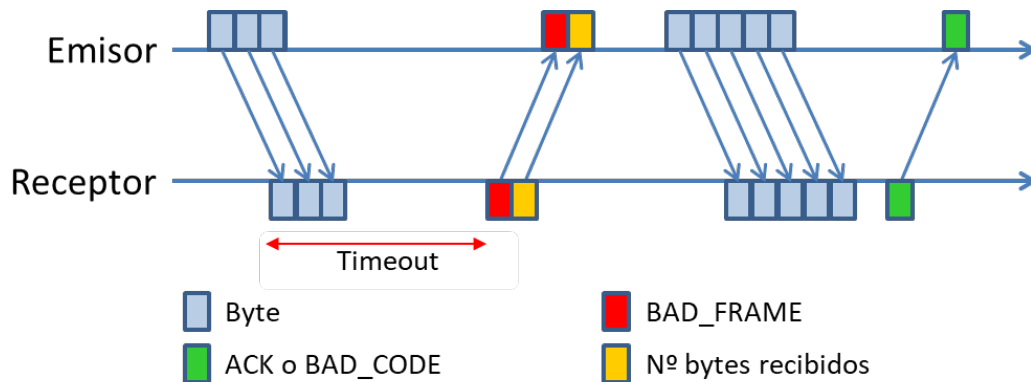


Figura 4.4 Protocolo de transmisión. Casos 1 al 3

En el anexo C.2.2 se detallan el formato de mensajes utilizado, los valores de los bytes de respuesta y el tiempo de espera. En el anexo C.2.3 se adjuntan ejemplos de uso. En el anexo C.3 puede consultarse la lista de funciones de servicio.

4.2. Estructura de la aplicación

El software contiene funciones de alto nivel para interactuar con la consola y el puerto serie, y otras funciones de bajo nivel de acceso al hardware, en la mayoría de los casos a través del bus I2C. Estas funciones totalizan 6 funciones para gestión del dispositivo LM75, 20 funciones para los INA3221 y 6 adicionales para el control del sistema de carga de baterías y de los switches de buses de potencia de salida.

La aplicación emplea interrupciones para atender las comunicaciones a través de los dos puertos. El acceso a los flags de alerta se realiza a demanda.

El código se ha organizado en las siguientes secciones:

4.2.1. Inicialización de puertos y dispositivos

Incluye la inicialización de la conexión con el PC por puerto USB a 9600 bps, la del puerto serie a 9600 8N1 y del bus I2C, configurado a una frecuencia de reloj de 100 kHz con direcciones de 7 bits. Otras inicializaciones son:

- Configuración de puertos de entrada y salida.
- Configuración de los dispositivos sensores INA3221: Habilitación de canales, umbrales de alerta, y otras opciones de tiempos de conversión, y promediado.
- Configuración del sensor de temperatura LM75: Activar el modo termostato, las temperaturas de umbral y la polaridad de su salida digital OS.
- Inicializar los switches electrónicos y la habilitación de la carga de la batería.

- Inicializa el estado de la máquina de estados (estado E_INIT).

4.2.2. Rutinas de servicio de interrupción

Existen dos rutinas de servicio a eventos de recepción (interrupciones) de datos en cada puerto, habilitadas en todo momento. Para gestionar el uso de los puertos estas rutinas consultan una variable de estado. Cuando se recibe un evento de recepción por uno de los puertos se le da servicio si el sistema está en estado de espera (E_READY). En otro caso se vacía el buffer hardware del puerto que generó la interrupción.

El código de las rutinas se ha reducido al máximo, derivando el flujo de ejecución a uno de los estados de la máquina de estados ubicada en el bucle principal.

```
void serialEvent() // Recepción en el puerto USB
{
    if (estado == E_READY)
    {
        estado = E_COM_USB; // Leer puerto USB
    }
    else
    {
        Serial.flush(); // Vaciar el buffer
    }
}
```

Figura 4.5 Función de servicio de interrupción para el puerto USB

4.2.3. Máquina de estados

Gestiona la actividad del sistema posterior a la sección de inicialización. Su principal finalidad consiste en evitar las colisiones de uso de los puertos. Además estructura el código, facilita su depuración y el mantenimiento.

A continuación se muestra el diagrama de estados y una tabla con su descripción.

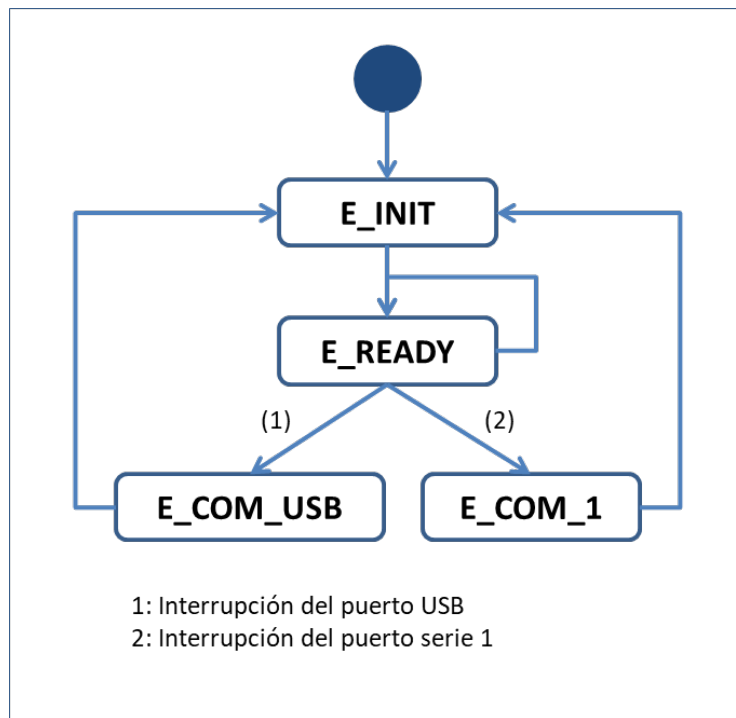


Figura 4.6 Diagrama de la máquina de estados

Tabla 4.1 Descripción de los estados

Estado	Descripción	Funciones
E_INIT	Inicialización previa a E_READY	Estado de bloqueo del acceso a los puertos. Limpieza de buffers hardware.
E_READT	Espera a recepción de datos	Estado de espera para validar el cambio de estado desde las rutinas de tratamiento de interrupción de los puertos.
E_COM_USB	Recepción desde puerto USB	Recepción e interpretación del comando de texto. Lectura del resto de argumentos de la función. Ejecución de la función y envío del resultado a consola (dependiendo de la función).
E_COM_1	Recepción desde puerto serie 1	Recepción de cinco bytes desde el puerto serie 1. Transmisión del acuse de recibo (ACK) Ejecución de la función y envío del resultado al puerto serie 1 (2 bytes).

4.2.4. Funciones de control, configuración y medida

El conjunto de funciones de servicio del acceso al hardware incluyen el acceso a los dispositivos I2C y a todos sus registros internos. Para ampliar información sobre las direcciones locales de los registros y su contenido pueden consultarse las hojas de características correspondientes. Para la gestión del bus I2C se ha empleado la biblioteca Wire [27].

Tipos de funciones implementadas:

- Funciones de configuración y medida con los sensores de voltaje/corriente INA3221.
- Funciones de configuración y medida con el sensor de temperatura LM75.
- Función de activación/desactivación de la carga de la batería.
- Funciones de control de switches electrónicos de buses de salida de potencia.

4.3. Arduino Mega

Los sistemas del circuito del EPS se conectan a la placa Arduino Mega mediante el puerto I2C como maestro a través de los terminales 20 (SDA) y 21 (SCL). Además se utilizan otros puertos para enviar señales de control y leer los flags de alerta a demanda del usuario y un puerto serie de salida auxiliar. Ver en anexo B.1 la lista de conexiones y direcciones I2C de los dispositivos.

El computador externo se conecta a través del puerto USB para comunicaciones serie a 9600 bps. Además se han preparado conexiones a los terminales 18 (TX1) y 19 (RX1) al puerto serie 1, configurado como 9600 8N1.

4.4. Acceso a los sensores de voltaje y corriente

Los sensores INA3221 se conectan a la placa Arduino Mega por el puerto compartido I2C (terminales 20 y 21), ocupando en el bus las direcciones 0b1000000 y 0b1000001 (unidades A y B). Además utiliza puertos conectados a las líneas de alertas indicadas en la tabla del anexo B.1.

4.4.1. Descripción de registros

En el registro de configuración (dirección local 00h) se ajustan los modos de operación para las medidas de voltaje y corriente de cada canal, el tiempo de conversión y el modo de promediado. También permite inhabilitar cualquier canal y funciones para alertas, ajuste del tiempo de conversión y promediado de muestras.

El registro Mask/Enable (dirección local 0Fh) se utiliza para identificar los canales que han producido una Critical o Warning Alert. Además contiene los flags Power-valid, Sumation-alert y permite seleccionar los canales que se utilizarán en la función Summation-control.

El resto de los registros almacenan valores umbrales para las distintas funciones. Los detalles de formato pueden consultarse en la hoja de características del dispositivo.

4.4.2. Lectura y escritura de valores medidos

- Valores de voltaje de bus: Los Channel-# Bus-Voltage Registers son registros de 2 bytes, con formato en complemento a 2 de 12 bits y signo en el MSbit, quedando los tres bits menos significativos a valor nulo. La resolución del convertidor son 8 mV. La lectura es directa, en mV con valores múltiplos de 8 mV.
- Valores de corriente de shunt. Los Channel-# Shunt-Voltage Registers son registros de 2 bytes, con formato en complemento a 2 de 12 bits y signo. El valor almacenado es la caída de voltaje en la resistencia shunt instalada en el canal, por lo que el valor del LSbit dependerá de este valor. Al ser de 100 mΩ se obtiene una resolución de 0.4 mA/LSbit, y un fondo de escala de 1638 mA.
- Valores de límites Critical y Warning: Los Channel-# Critical/Warning Registers son registros de 2 bytes, con formato de 13 bits sin signo. Los valores almacenados se comparan con los voltajes de shunt, por lo que tienen la misma resolución que los anteriores: 0.4 mA/LSbit.
- Valores de la suma de corrientes en canales seleccionados: Los Shunt-Voltage Sum Register y Shunt-Voltage Sum-Limit Register son registros de 2 bytes, con formato en complemento a 2 de 14 bits y signo. El valor almacenado es la suma de los voltajes shunt en los canales seleccionados para esta función, lo que proporciona la corriente total si las resistencias shunt son iguales en todos los canales activos. La resolución resultante es de 0.4mA/LSbit.

Además se han incluido otras funciones de bajo nivel para ajustar modos de operación, elegir el tiempo de conversión, seleccionar canales para obtener la corriente suma y obtener el estado de los flags de alerta.

4.5. Acceso al sensor de temperatura

El sensor digital de temperatura LM75 se conecta a la placa Arduino Mega por el puerto compartido I2C (terminales 20 y 21), ocupando en el bus la dirección 0b1001000. Este componente se empleará para operar en los modos Shut-down y

Comparador, o modo de termostato. En este modo el terminal OS controlará el driver MOSFET de la resistencia de calefacción de la batería.

Se ha indicado, el funcionamiento en modo de termostato es autónomo e independiente del OBC. Esto permite mantener al computador en modo de bajo consumo y un rango de temperatura seguro para la batería.

Para operar como termostato es necesario especificar su modo de operación en su registro de configuración y los valores umbrales de temperatura en los registros TOS y THYST. Otro modo de operación utilizado es el modo shutdown, que desactiva el calefactor para ahorrar energía.

Ver las funciones de acceso en el anexo C.3.2.

4.5.1. Registros internos

El dispositivo tiene tres registros de 16 bits que almacenan valores de temperatura medida, umbral de activación (TOS) y de histéresis (THYST). Además incluye un registro de configuración de 8 bits para ajustar el modo Shut-down o comparador y la polaridad de la salida OS. En esta aplicación la polaridad será activa a nivel bajo. El registro de temperatura indica la medida actual.

- Los registros THYST y TOS contienen dos valores umbrales para definir la actividad de la salida de drenador abierto OS mediante un ciclo de histéresis, y así utilizar el LM75 como termostato.

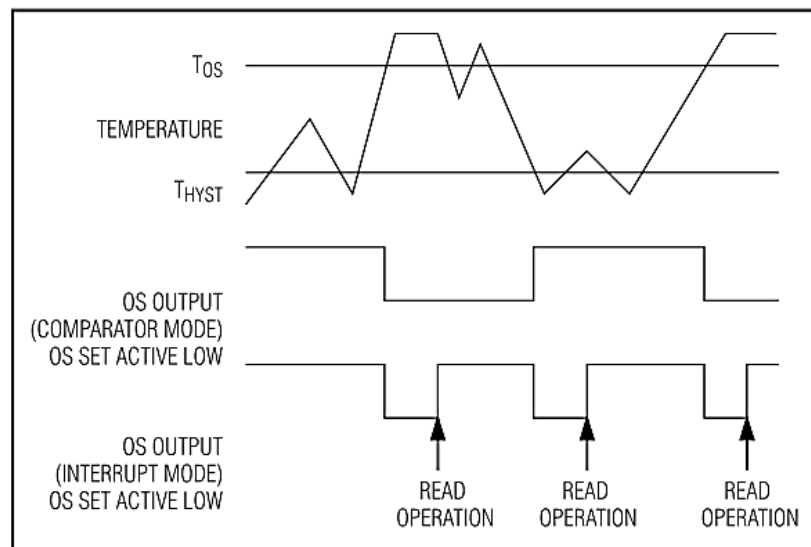


Figura 4.7 Respuesta de la salida OS en modo comparador (gráfica central).

Fuente: Maxim

REGISTER NAME	ADDRESS (hex)	POR STATE (hex)	POR STATE (binary)	POR STATE (°C)	READ/ WRITE
Temperature	00	000X	0000 0000 0XXX XXXX	—	Read only
Configuration	01	00	0000 0000	—	R/W
T _{HYST}	02	4B0X	0100 1011 0XXX XXXX	75	R/W
T _{OS}	03	500X	0101 0000 0XXX XXXX	80	R/W

X = Don't care.

Figura 4.8 Registros internos del sensor LM75. Fuente: Maxim

4.5.2. Formato de valores de temperatura

Los valores de temperatura se expresan en formato de complemento a dos con 9 bits en registros de 16 bits y resolución de 0.5 °C/LSbit. Los 7 bits menos significativos no son utilizados en esta aplicación, por lo que la resolución efectiva es de 1°C. Como es habitual en los dispositivos I2C, el MSB se transmite en primer lugar. Los pesos de cada bit en el valor de la temperatura se indican en la tabla siguiente:

UPPER BYTE								LOWER BYTE							
D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8	D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
Sign bit 1= Negative 0= Positive	MSB 64°C	32°C	16°C	8°C	4°C	2°C	1°C	LSB 0.5°C	X	X	X	X	X	X	X

X = Don't care.

Figura 4.9 Formato de los registros Temperature, THYST y TOS. Fuente: Maxim

4.5.3. Registro de Configuración

Se trata de un registro de 8 bits que se utilizará para elegir la polaridad del terminal OS y el modo de operación. Estos serán el modo Comparator, para utilizarlo como termostato, y el modo Shut-down, para entrar en un modo de bajo consumo en el que se bloquea la actividad del LM75, aunque puede accederse a sus registros. En la tabla siguiente se indica la función de cada bit:

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
0	0	0	Fault Queue	Fault Queue	OS Polarity	Comparator/ Interrupt	Shutdown

Figura 4.10 Registro Configuration. Fuente: Maxim

- Polaridad de la salida OS: Ajustar el bit D2 a 0 para que la salida OS sea activa a nivel bajo. En esta aplicación se empleará con esta configuración para desactivar el MOSFET driver de la resistencia de calefacción.
- Modo Comparator: Ajustar el bit D1 a 0 para que el sensor opere en este modo. Así el dispositivo puede utilizarse como un termostato activando o desactivando la salida OS para controlar un sistema externo. Su activación

depende de los valores escritos en los registros TOS (valor umbral) y THYST (valor del intervalo de histéresis), de modo que se activa si la temperatura supera el valor TOS, y no se desactiva hasta que descienda por debajo de THYST.

- Modo Shut-down: Se trata de un modo de bajo consumo, que reduce la corriente de alimentación a un máximo de 6 uA. Activarlo escribiendo el bit D0 a 1. En este modo no se pierde el acceso al registro de configuración.

4.5.4. Lectura y escritura de los registros

El dispositivo contiene un puntero de dirección local que mantiene la dirección del último registro leído. Inicialmente, en reset de encendido, el puntero apunta al registro de temperatura.

- Escritura del registro de configuración: Enviar el byte de dirección I2C para escritura, el byte de dirección local y a continuación el byte de datos. Los registros TOS y THYST requieren escribir el byte de dirección, el byte de puntero y dos bytes de datos.
- Lectura de la temperatura: Si el puntero local apunta al registro de temperatura, escribir el byte de dirección para lectura, y realizar la lectura. Si el puntero debe ajustarse, debe realizarse una operación de escritura enviando el byte de dirección, el byte del puntero, una condición de START y de nuevo el byte de dirección para lectura.

4.6. Activación/desactivación de carga

Para gestionar el MPPTC hay implementada una función de control, que habilita o bloquear la carga de la batería (Charge Enable), y la de consulta del estado de la línea. Ver las funciones de acceso en el anexo C.3.3.

4.7. Control de interruptores electrónicos

Los dos interruptores electrónicos NCP361 se controlan desde dos puertos dedicados de Arduino Mega conectados a las líneas 5V_ENA (terminal 13) y 3V3_ENA (terminal A3). Se han incluido funciones de acceso para abrirlos o cerrarlos, y para consultar el estado de la línea de control correspondiente. Ver las funciones de acceso en el anexo C.3.4.

5. Conclusiones

Se ha diseñado un sistema hardware y software para realizar test de un sistema de alimentación para satélites de clase CubeSat 3U, que incluye una placa Arduino Mega programada para usar los puertos USB y serie 1 a efectos de transmisión de medidas, estado y comandos de control. El sistema se puede conectar a un panel fotovoltaico o una fuente de alimentación programable para hacer pruebas, así como a una batería de Li-ion y a cargas a 5 V y a 3.3 V. El sistema se ha desarrollado con Altium Designer 16 para el diseño de la PCB, y Visual Studio Community 2015 y Arduino IDE 1.8.3 para el desarrollo del software. Su principal finalidad es facilitar medidas en ensayos encaminados a mejorar los sistemas EPS de los satélites diseñados dentro del proyecto GranaSAT, de la Universidad de Granada.

Tanto el diseño del software como del hardware no se consideran cerrados. Su actualización dependerá de las necesidades de equipamiento y de los resultados de los experimentos que se realicen. Su aplicación como EPS de un CubeSat implica añadir puertos para conectar más paneles solares y los correspondientes sistemas de carga. Un diseño de EPS además debe someterse a otras pruebas de carácter mecánico, vacío y de variaciones de temperatura.

Como líneas de trabajo futuro se proponen la actualización del software a demanda de los estudios a realizar, y los estudios sobre la vida de la batería bajos ciclos sucesivos de carga y descarga, simulando distintas condiciones operativas de consumo y de generación de energía con los paneles fotovoltaicos.

Referencias

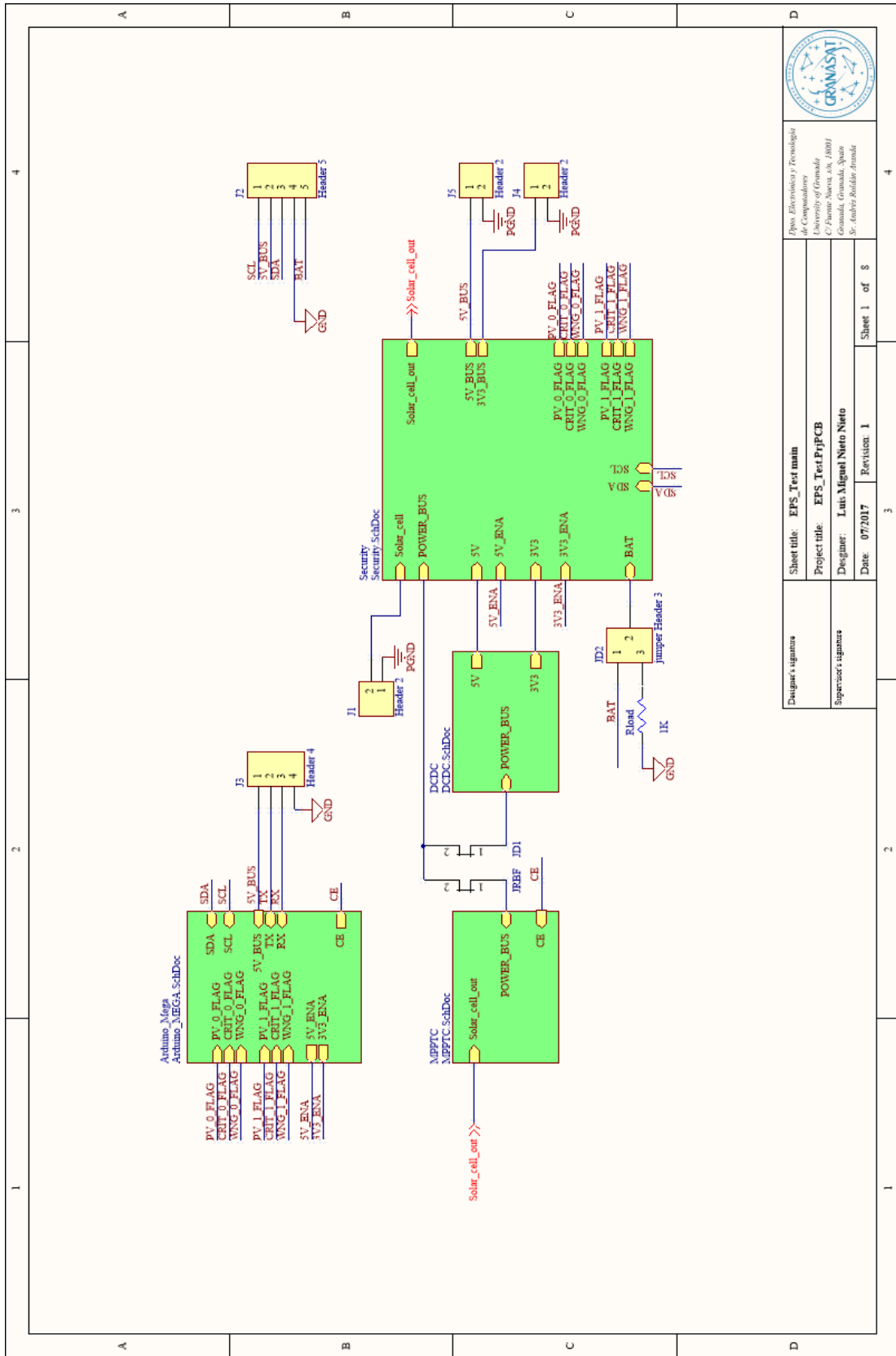
- [1] «GranaSAT,» [En línea]. Available: <http://granosat.ugr.es>. [Último acceso: Abril 2017].
- [2] CubeSat.org, «CubeSat Design Specification (CDS). Rev. 13,» [En línea]. Available: <http://www.cubesat.org>. [Último acceso: Abril 2017].
- [3] S. Gopakumar y otros, «Design of Electrical Power Subsystem for IITMSAT,» de *Proceeding of the 2015 International Conference on Space Science and Communication (IconSpace)*, Langkawi, Malaysia, 2015.
- [4] M. Pajusalu y otros, «Electrical Power System for ESTCube-1: A Fault Tolerant COTS Solution,» de *International Astronautical Congress*, Naples, Italy, 2012.
- [5] R. Rice, «Design of a High Power Cube Satellite Power System,» de *28th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Logan, Utah, 2015.
- [6] «Clyde Space,» [En línea]. Available: <https://www.clyde.space>.
- [7] «CubeSat Kit,» [En línea]. Available: <http://www.cubesatkit.com>.
- [8] «Boeing Aerospace,» [En línea]. Available: <http://boeing.mediaroom.com/2009-03-04-Boeing-CubeSat-Completes-10-000th-Orbit-Advances-NanoSat-Technologies>.
- [9] «NASA CubeSat Launch Initiative,» [En línea]. Available: https://www.nasa.gov/directorates/heo/home/CubeSats_initiative. [Último acceso: Junio 2017].
- [10] «ESA Fly Your Satellite project,» [En línea]. Available: http://www.esa.int/Education/CubeSats_-_Fly_Your_Satellite.

- [11] Institute of Electronic Systems, «Power Supply for the AAU CubeSat,» 2001. [En línea]. Available: <http://www.space.aau.dk/cubesat/dokumenter/psu.pdf>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [12] R. Connolly, «The P-POD Payload Planner's Guide,» [En línea]. Available: http://www.space.aau.dk/cubesat/documents/planners_guide.pdf. [Último acceso: Febrero 2017].
- [13] NASA, «NASA Workmanship Standards,» [En línea]. Available: <https://nepp.nasa.gov/index.cfm/5544> . [Último acceso: Abril 2017].
- [14] M. Masoero, M. Caldera, S. Corpino y N. Viola, «Analisi termica di un nanosatellite universitario,» de *Atti del XVII Congresso Nazionale AIDAA*, Volterra, PI., 2005.
- [15] L. M. Reyneri y otros, «Design Solutions for Modular Satellite Architectures,» de *Aerospace Technologies Advancements*, ISBN: 978-953-7619-96-1 , Thawar T. arif (Ed.), InTech, 2010, pp. 165-188.
- [16] A. C. Tribble, *The space environment: implications for spacecraft design*, Princeton: Princeton University Press, 2003.
- [17] R. H. Maurer y otros, «Harsh Environments: Space Radiation,» *Johns Hopkins APL technical digest*, vol. 28, n° 1, pp. 17-29, 2008.
- [18] Nanosats.eu, «Nanosatellite & CubeSat Database,» [En línea]. Available: <http://www.nanosats.eu/>. [Último acceso: Julio 2017].
- [19] E. Ilbis, «System Architecture and Component Evaluation for ESTCube-2 Electrical Power System, Master Thesis,» University of Tartu, 2016.
- [20] NOAA, «Total solar irradiance,» [En línea]. Available: <https://www.ngdc.noaa.gov/stp/space-weather/solar-data/solar-indices/total-solar-irradiance/>. [Último acceso: febrero 2017].
- [21] Endurosat, «CubeSat 3U solar panel X/Y MTQ,» [En línea]. Available: <https://www.endurosat.com/products/cubesat-3u-solar-panel-x-y-mtq/>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [22] Institute of Electronic Systems, «Power Supply for the AAU CubeSat,» [En línea]. Available: <http://www.space.aau.dk/cubesat/dokumenter/psu.pdf>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [23] C. C. y S. E., «Evaluation of Lithium Polymer Technology for Small Satellite Applications,» de *21th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Utah, 2007.
- [24] Clyde Space, «User Manual: CubeSat 1U Electronic Power System and Batteries: CS-1UEPS2-NB/-10/-20,» 07 2010. [En línea]. Available:

- <https://www.clyde.space>. [Último acceso: Marzo 2017].
- [25] Texas Instruments, «App Report SLVA477B,» 2015. [En línea]. Available: www.ti.com. [Último acceso: Marzo 2017].
- [26] Texas Instruments, «TI App Report slva372c,» 2014. [En línea]. Available: www.ti.com. [Último acceso: Marzo 2017].
- [27] Arduino, «Wire Library,» [En línea]. Available: <https://www.arduino.cc/en/Reference/Wire>. [Último acceso: Mayo 2017].

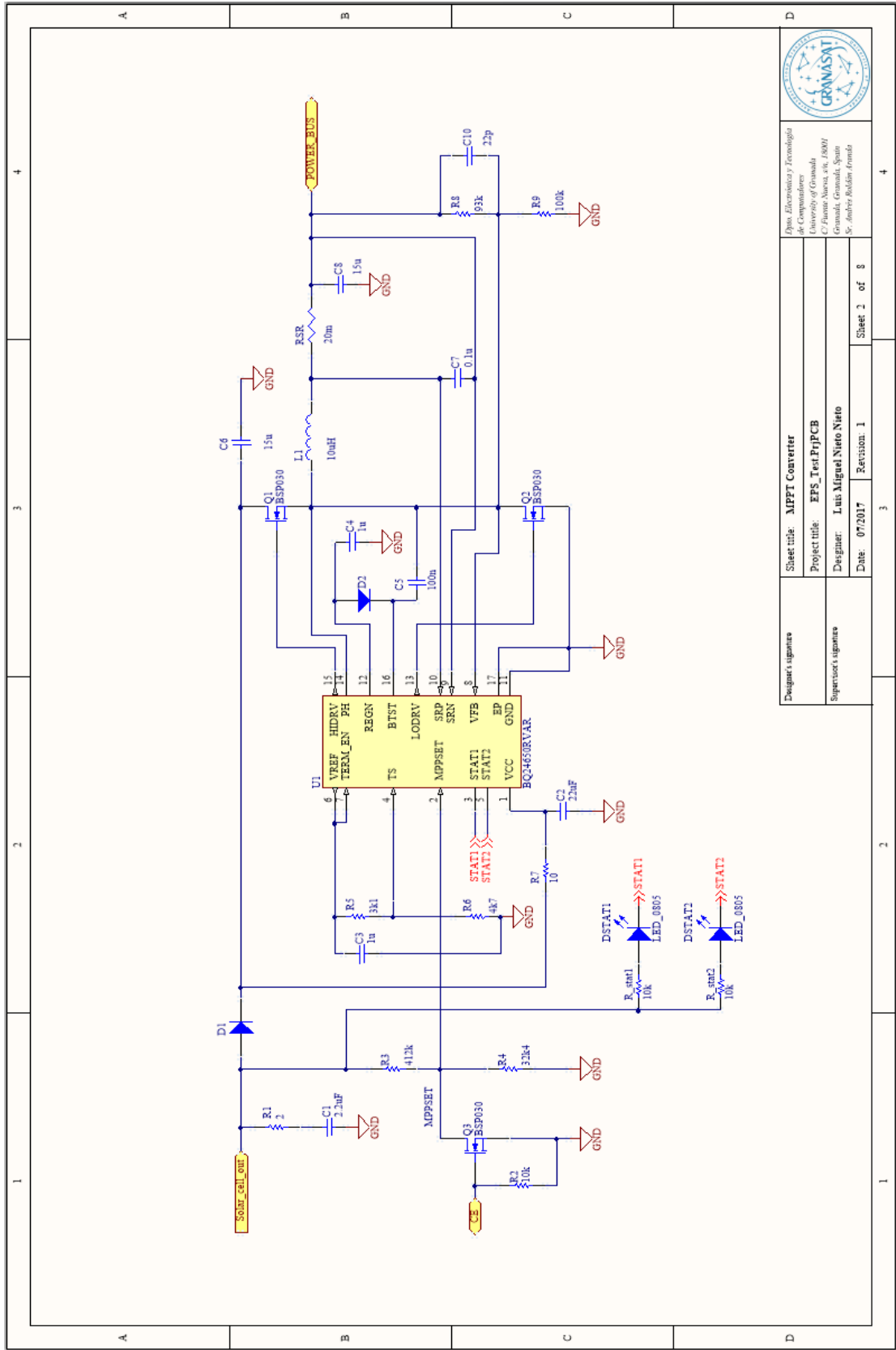
Anexo A – Esquemas

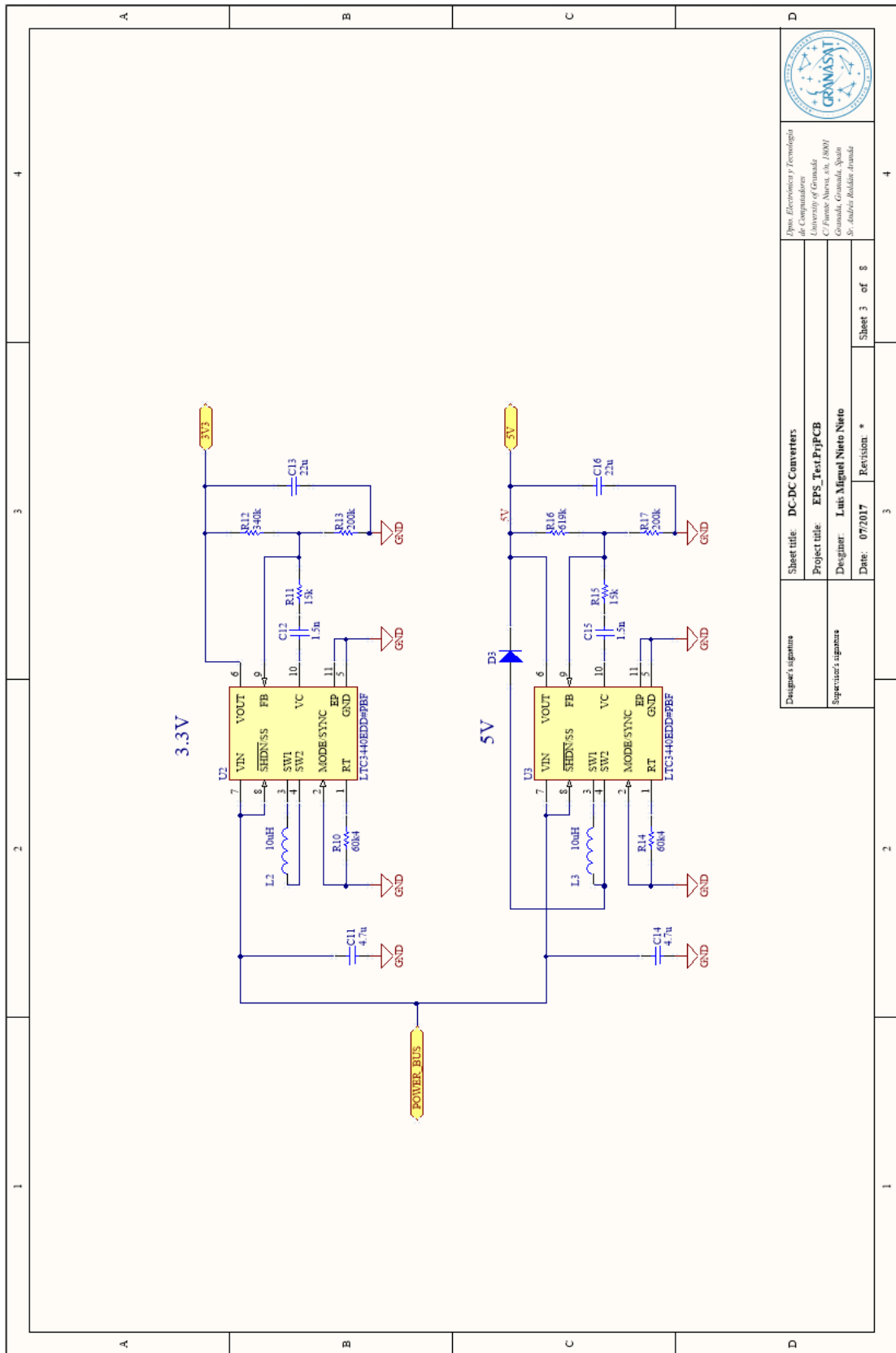
- Esquema 1: EPS_Test main
- Esquema 2: MPPT Converter
- Esquema 3: DC-DC Converters
- Esquema 4: Security system
- Esquema 5: Arduino Mega connectors
- Esquema 6: Battery circuit



Ph.D. Electrotechnology Technician
 Ph.D. Computer Science
 University of Granada
 C/Plaza Nueva s/n, 18001
 Granada, Granada, Spain
 Sr. Andrés Rodríguez Aranda

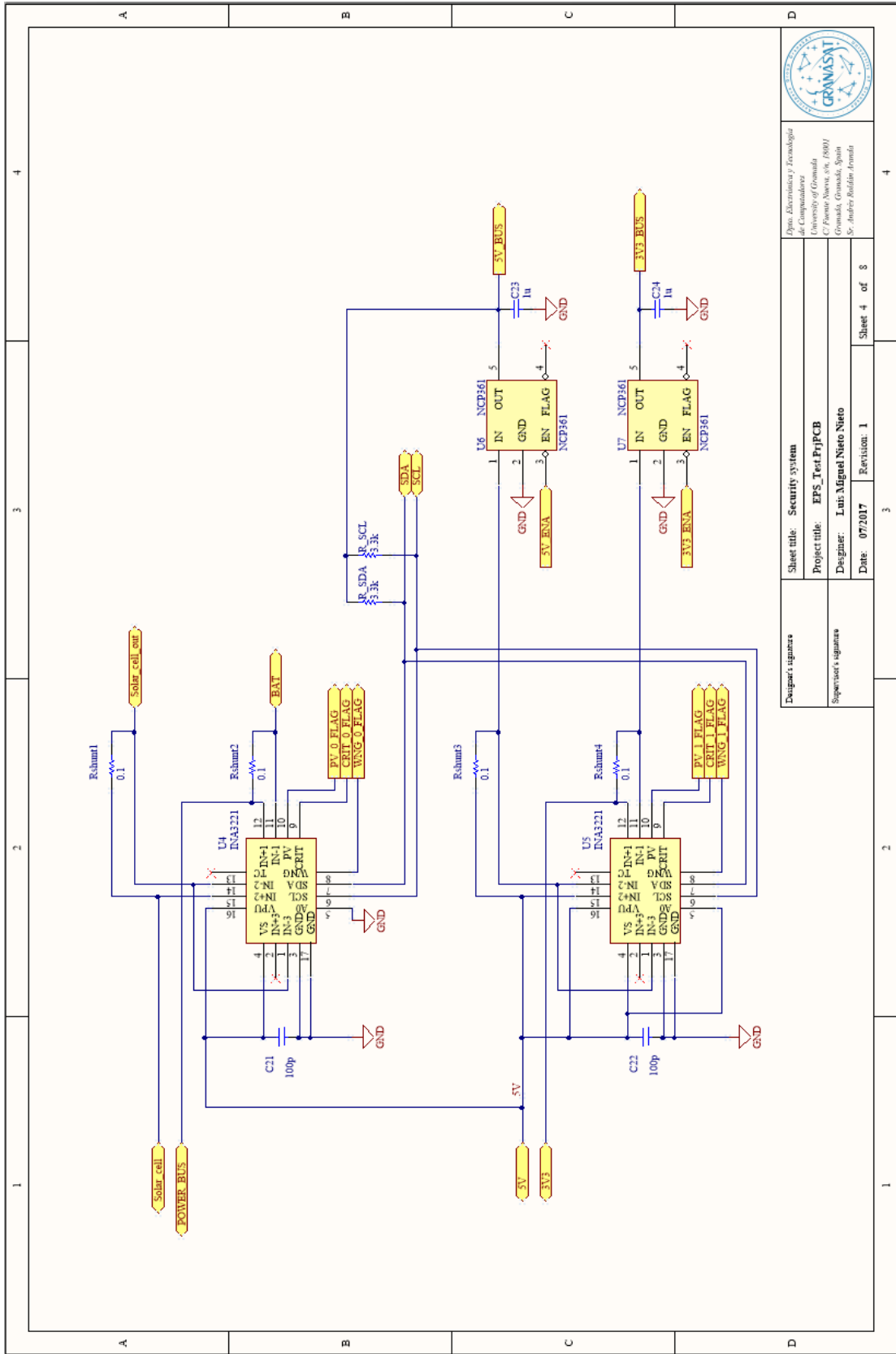
Designer's signature	Sheet title: EPS_Test main
Supervisor's signature	Project title: EPS_Test.PjtPCB
	Designer: Luis Miguel Nieto Nieto
	Date: 07/2017 Revision: 1
	Sheet 1 of 8





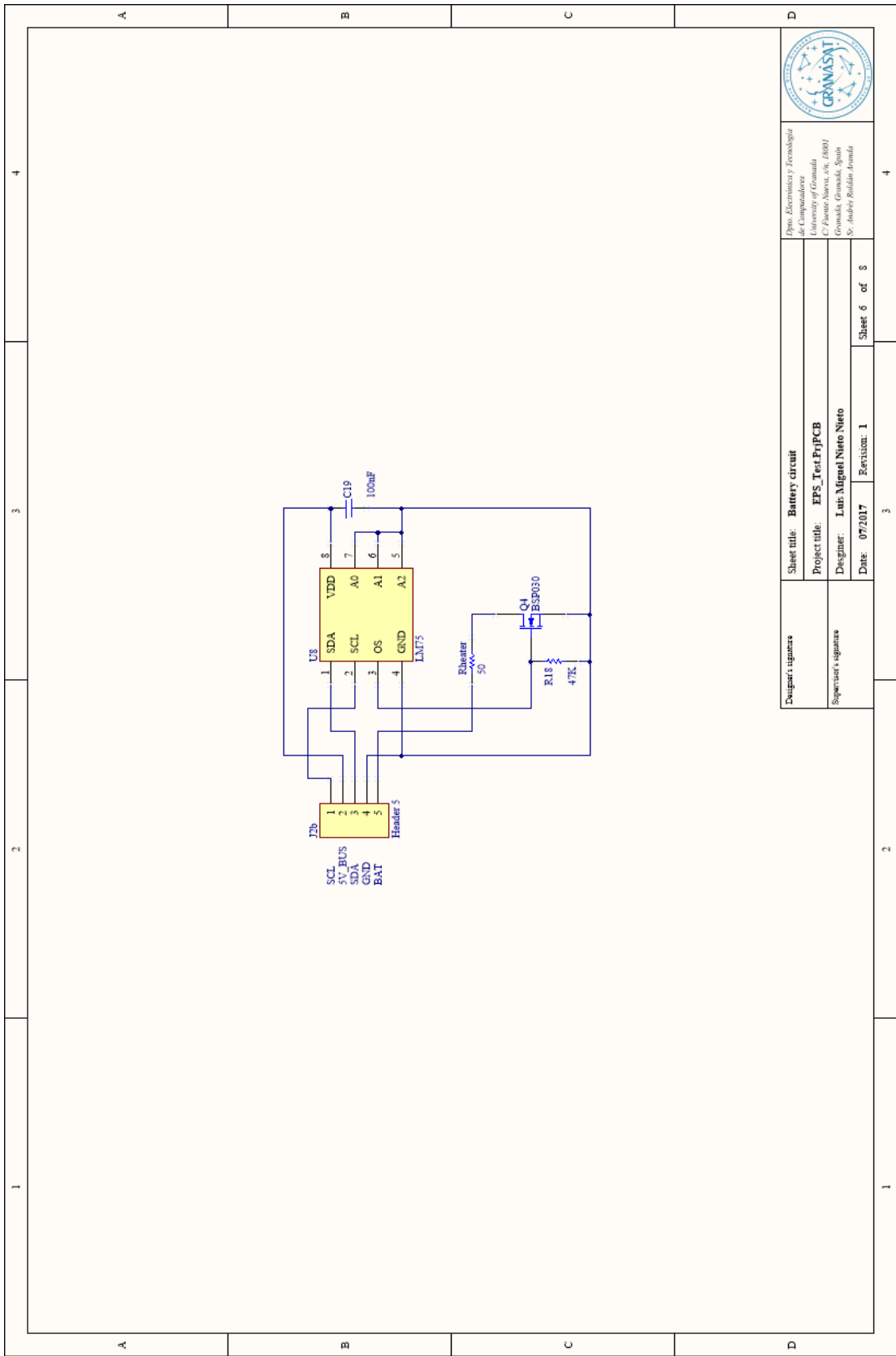
Departamento de Ingeniería de Computadores
 University of Granada
 C/ Fuente Nueva, s/n, 18007
 Granada, Granada, Spain
 Sr. Andrés Rodríguez

Designer's signature	Sheet title: DC-DC Converters
Supervisor's signature	Project title: EPS_Test_PjPCB
	Designer: Luis Miguel Nieto Nieto
	Date: 07/2017
	Revision: *
	Sheet 3 of 8



Phis. Edvices y Tecnología de Computadora
 University of Granada
 C/ Fuente Nueva, s/n. (1800)
 Granada, Granada, Spain
 Sr. Andrey Baidin-Arnold

Designer's signature	Sheet title: Security system
Signature's signature	Project title: EPS_TestProjPCB
	Designer: Luis Miguel Nieto Nieto
	Date: 07/2017 Revision: 1
	Sheet 4 of 8



Dpto. Electrónica y Tecnología de Computadores
 University of Granada
 C/ Facultad Nueva, s/n, 18001
 Granada, Granada, Spain
 Sr. Andrés Rodríguez Aranda

Sheet title: **Battery circuit**
 Project title: **EPS_Test_PjPCB**
 Designer: **Luis Miguel Nieto Nieto**
 Date: **07/2017** Revision: **1**

Sheet **6** of **8**

Designer's signature
 Supervisor's signature

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

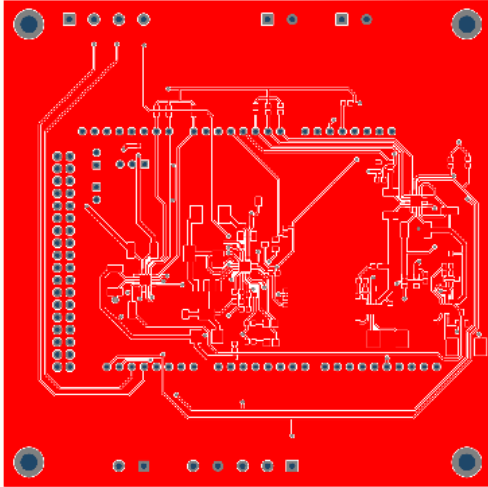
1 2 3 4

1 2 3 4

1 2 3 4

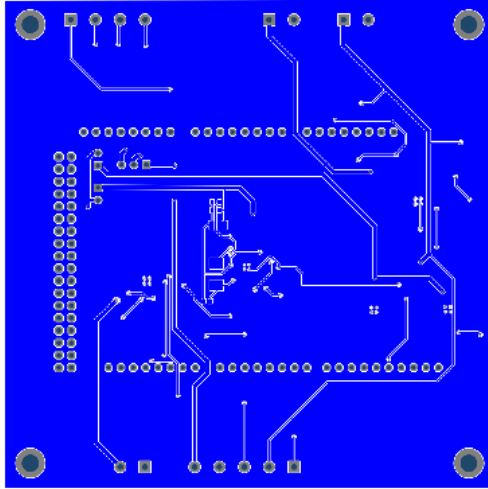
1 2 3 4


1 2 3 4

1	2	3	4												
A	B	C	D												
			4												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%; text-align: center;">Designer's signature</td> <td style="width: 40%; text-align: center;">Sheet title: PCB top layer</td> <td style="width: 30%;"></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;">Supervisor's signature</td> <td style="text-align: center;">Project title: EPS_Test.P7PCB</td> <td style="text-align: center;">Date: 08/2017</td> </tr> <tr> <td></td> <td style="text-align: center;">Designer: Luis Miguel Nieto Nieto</td> <td style="text-align: center;">Revision: 1</td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td style="text-align: center;">Sheet 7 of 8</td> </tr> </table>			Designer's signature	Sheet title: PCB top layer		Supervisor's signature	Project title: EPS_Test.P7PCB	Date: 08/2017		Designer: Luis Miguel Nieto Nieto	Revision: 1			Sheet 7 of 8	4
Designer's signature	Sheet title: PCB top layer														
Supervisor's signature	Project title: EPS_Test.P7PCB	Date: 08/2017													
	Designer: Luis Miguel Nieto Nieto	Revision: 1													
		Sheet 7 of 8													
A	B	C	D												
1	2	3	4												



Dept. Electrónica y Tecnología
 de Comunicaciones
 University of Granada
 C/ Fuente Nueva, s/n, 18007
 Granada, Granada, Spain
 Sr. Andrés Ballester Aranda

1	2	3	4
A	B	C	D
			
A	B	C	D
1	2	3	4

Designer's signature Supervisor's signature	Sheet title: PCB bottom layer Project title: EPS_Test_PjPCB Designer: Luis Miguel Nieto Nieto Date: 08/2017 Revision: 1	<div style="text-align: center;">  </div> Dept. Electronica y Tecnologia de Computadores University of Granada C/ Fuente Nueva, s/n, 18001 Granada, Granada, Spain Sr. Andres Beldarrain Aranda
Sheet 3 of 8		4

Anexo B - Diseño de la PCB

B.1 Líneas de conexión de datos con Arduino Mega

Tabla B.1 Conexiones de los dispositivos con la placa Arduino Mega

Dispositivo	Línea	Tipo	Puerto (E/S)	Dirección I2C (7 bits)
BQ24650	CE	Control	A4 (S)	-
INA3221, A	SDA	Bus	20 (E/S)	x040
	SCL	Bus	21 (S)	
	WNG_0_FLAG	Flag	A7 (E)	
	CRIT_0_FLAG	Flag	A8 (E)	
	PV_0_FLAG	Flag	A9 (E)	
INA3221, B	SDA	Bus	20 (E/S)	0x41
	SCL	Bus	21 (S)	
	WNG_1_FLAG	Flag	A0 (E)	
	CRIT_1_FLAG	Flag	A1 (E)	
	PV_1_FLAG	Flag	A2 (E)	
LM75	SDA	Bus	20 (E/S)	0x48
	SCL	Bus	21 (S)	
NCP361-D, 3V3	bus 3V3_ENA	Control	A3 (S)	-
NCP361-D, bus 5V	5V_ENA	Control	13 (S)	-
Puerto secundario	serie TX1, RX1	Bus	18 (S), 19 (E)	-

B.2 Conectores

Tabla 2 Conectores de la PCB

Conector	Función
J1	Panel fotovoltaico
J2	Batería y sistema calefactor
J3	Puerto serie
J4	Bus de potencia a 3.3 V
J5	Bus de potencia a 5 V
J6	Zócalo macho para conexión con la placa Arduino Mega
JRBF	Jumper Remove Before Flight
JD1	Jumper Deploy switch 1
JD2	Jumper Deploy switch 2

Tabla 3 Terminales de conectores cable-placa

Conector	Terminal	Identificador	Función
J1	1	GND	Masa
	2	Solar_cell	Placa fotovoltaica terminal positivo
J2	1	SCL	Línea SCL bus I2C
	2	5V_BUS	Bus de potencia a 5 V
	3	SDA	Línea SDA bus I2C
	4	GND	Masa
	5	BAT	Batería terminal positivo
J3	1	5V_BUS	Voltaje regulado a 5V
	2	Tx	Serial1.Tx (TTL)
	3	Rx	Serial1.Rx (TTL)
	4	GND	Masa
J4	1	3V3_BUS	Bus de potencia a 3.3 V
	2	GND	Masa
J5	1	5V_BUS	Bus de potencia a 5 V
	2	GND	Masa

Tabla 4 Terminales del zócalo de conexión con Arduino Mega

Conector	Terminal	Identificador	Notas
J6-J12	A0	WNG_1_FLAG	Warning flag INA3221.B
	A1	CRIT_1_FLAG	Critical flag INA3221.B
	A2	PV_1_FLAG	Power valid flag INA3221.B
	A3	3V3_ENA	Control del switch de potencia bus 3.3 V
	A4	CE	Habilitación de carga de la batería
	A7	WNG_0_FLAG	Warning flag INA3221.A
	A8	CRIT_0_FLAG	Critical flag INA3221.A
	A9	PV_0_FLAG	Power valid flag INA3221.A
	13	5V_ENA	Control del switch de potencia bus 5 V
	18	TX	Puerto serie 1.Tx (TTL)
	19	RX	Puerto serie 1.Rx (TTL)
	20	SDA	Línea SDA puerto I2C
	21	SCL	Línea SCL puerto I2C

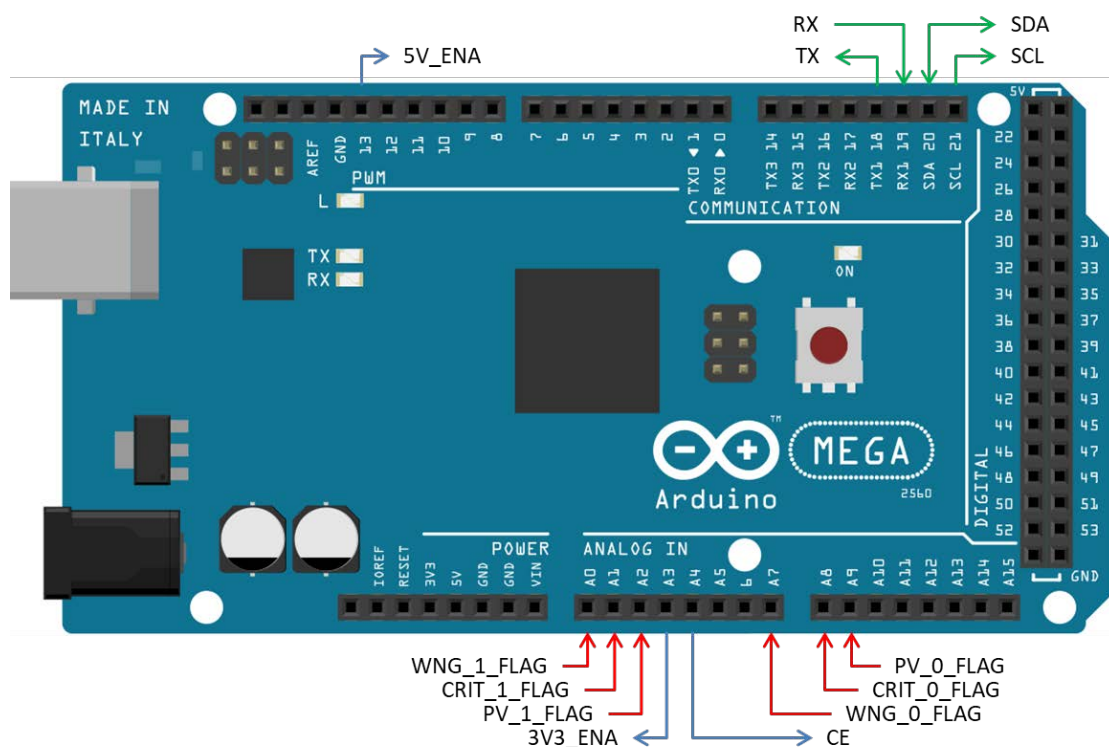


Figura 1 Conexiones de datos con Arduino Mega

Anexo C - Guía de referencia del software

C.1 Archivos de código fuente

El proyecto ha quedado organizado en los archivos siguientes:

- EPS_test.ino: Archivo principal. Contiene las secciones de inicialización y el bucle de ejecución con el intérprete de comandos de usuario.
- Config.h: Definiciones de opciones de configuración.
- Messages.h: Definición de cadenas de texto de los mensajes presentados en consola.
- Control.cpp, Control.h: Archivos de defición y declaraciones de las funciones de bajo nivel asociadas a la habilitación de la carga de la batería y el estado de los switches electrónicos de los buses de potencia.
- LM75.ccp, LM75.h: Funciones de bajo nivel para acceder a los registros del LM75.
- INA3221.cpp, INA3221.h: Funciones de bajo nivel para acceder a los registros de las unidades INA3221.

Además se han utilizado los siguientes archivos para incluir bibliotecas externas:

- Arduino.h: Incluye los recursos que proporciona Arduino SDK.
- stdint.h: Declara los tipos enteros con especificación del ancho de palabra y las macros correspondientes y sus límites, de acuerdo al estándar IEEE 1003.1, 2008-2016
- Wire.h: Incluye la biblioteca Wire para acceso a dispositivos I2C con direcciones de 7 bits.

C.2 Petición de servicios de bajo nivel

C.2.1 Peticiones desde consola

A continuación se detallan la secuencia de campos de datos a enviar a Arduino Mega desde la consola de usuario (comunicación USB) y su formato:

COMANDO[,ARG1][,ARG2][,ARG3]

Tabla C.1 Descripción de los datos en peticiones desde consola

Campo	Valor	Notas
COMANDO	Texto	Identificador de texto de la función. Obligatorio
ARG1 a ARG2	Número 0 a 255	Argumentos opcionales según la función
ARG3	Número 0 a 65535	Argumento opcionales según la función

C.2.2 Peticiones desde el puerto serial 1

Se basa en un protocolo Stop-and-wait en el que se deben recibir cinco bytes antes de completar un tiempo de espera de 50 ms. A continuación se devuelve al emisor un mensaje de confirmación o de error. Las fases del protocolo son:

- Recepción de datos desde el puerto serie 1 antes el timeout:

Byte0 Byte1 Byte2 Byte3 Byte4

- Envío de respuesta al emisor:
 - Error de trama (menos de cinco bytes al término del timeout): BAD_FRAME (0xF3) y el número de bytes recibidos.
 - Error de código de función: BAD_CODE (0xFC)
 - Sin errores: ACK (0x42).

Todos los bytes son obligatorios. Si la función no utiliza alguno de ellos debe enviarse con valor 0.

El significado de cada byte se detalla en la tabla siguiente:

Tabla C.2 Descripción de los bytes en peticiones desde el puerto serie 1

Campo	Valor	Notas
Byte0	Byte	Identificador numérico de la función. Obligatorio
Byte1 a Byte2	Byte	Argumentos de 8 bits. Obligatorios
Byte3	Byte	MSB del tercer argumento de la función. Obligatorio
Byte4	Byte	LSB del tercer argumento de la función. Obligatorio

C.2.3 Ejemplos

Ejemplo 1: Activar el modo shutdown del sensor LM75

- Envío desde la consola: LM75_SSM,1
- Envío desde el puerto serie 1: 0x09 0x00 0x00 0x00 0x01

Ejemplo 2: Ajustar el valor Warning Limit del canal 2 de la unidad B (dirección I2C 0x41) a 600 mA

- Envío desde la consola: INA_SWL,0x41,2,600
- Envío desde el puerto serie: 0x1F 0x41 0x02 0x02 0x58

C.3 Funciones de servicio

Para cada dispositivo accesible con las funciones de bajo nivel se dan dos tablas: la tabla de argumentos y la tabla de funciones.

La tabla de argumentos indica los tipos de argumentos utilizados en cada función, los valores posibles y una breve descripción.

La tabla de funciones contiene la siguiente información:

- **Código:** En texto para entradas desde consola de usuario, y el número que debe enviarse como primer byte en transmisiones mediante el puerto serie 1. El código de texto es un acrónimo del nombre de la función asociada y están ordenados alfabéticamente.
- **Argumentos:** La primera línea indica el formato de entrada desde consola, con argumentos que deben separarse por comas. La segunda línea indica la correspondiente secuencia de argumentos para transmisiones mediante el puerto serie 1. Los dos últimos se corresponden con un argumento de 16 bits descompuesto en dos bytes, según indica el sufijo “_H”, para el MSB del valor, y el “_L” para su LSB.
- **Descripción:** La función de bajo nivel asociada y una breve descripción.

C.3.1 Funciones de servicio de los sensores INA3221

Tabla C.3 Argumentos empleados en las funciones de acceso a INA3221

Argumento	Valores	Descripción	Observaciones
addr	0x40, 0x41	Dirección I2C de la unidad A, B	
avgmode	0 a 7	Opciones de promediado de muestras	Ver la tabla 5, Configuration Register Field Descriptions del datasheet
channel	1, 2	Canal	
chenabled	0 a 3	Opciones de habilitación de canales	Habilitados 0: ninguno 1, 2: canal 1, 2 3: canales 1 y 2
cflags	0b000 a 0b111	Valor de lectura de los Critical, Warning, Sumation o Power Valid Alert Flag	Bit a valor 1: canal que activó el flag (canal 1, canal 2, canal 3)
ctoption	0 a 7	Opciones de tiempos de conversión	Ver la tabla 5, Configuration Register Field Descriptions del datasheet
I_mA	Entero	Valor de lectura de la corriente shunt	mA
limit	Entero 0 a 1638	Valor de lectura o escritura de umbral de corriente	mA
pdownmode	0/1	Desactivar/activar el modo Power-down	0: Desactivar 1: Activar
reg	0x00 a 0x11, 0xFE, 0xFF	Dirección del registro	
scc	0 a 3	Selección de canales para Summation Control Function	Seleccionados: 0: ninguno 1, 2: canal 1, 2 3: canales 1 y 2
value	Entero	Valor del registro. Valor de lectura o de escritura	16 bits

Tabla C.4 Funciones de acceso a INA3221

Código	Argumentos	Descripción
INA_GC 18	addr, channel addr channel 0 0	INA3221_GetCurrent_mA Devuelve la corriente (mA) en el canal indicado
INA_GCF 12	addr addr 0 0 0	INA3221_GetCriticalFlags Devuelve los flags Critical Alert
INA_GCL 19	addr, channel addr channel 0 0	INA3221_GetCriticalLimit_mA Devuelve el valor Critical Alert (mA)
INA_GCR 16	addr addr 0 0 0	INA3221_GetConfigReg Devuelve el registro Configuration
INA_GMR 17	addr addr 0 0 0	INA3221_GetMaskReg Devuelve el registro Mask/Enable
INA_GPVF 13	addr addr 0 0 0	INA3221_GetPowerValidFlag Devuelve el flag Power-Valid Alert
INA_GSF 14	addr addr 0 0 0	INA3221_GetSumationFlag Devuelve el flag Summation Alert
INA_GV 20	addr, channel addr channel 0 0	INA3221_GetVoltage_mV Devuelve el voltaje de bus (mV) del canal indicado
INA_GWF 15	addr addr, 0, 0, 0	INA3221_GetWarningFlags Devuelve los flags Warning Alert
INA_GWL 21	addr, channel addr channel 0 0	INA3221_GetWarningLimit_mA Devuelve el valor Warning Alert (mA)
INA_SAM 22	addr, avgmode addr avgmode 0 0	INA3221_SetAveragingMode Selecciona el modo de promediado
INA_SBCTO 23	addr, ctoption addr ctoption 0 0	INA3221_SetBusConvTimeOption Selecciona la opción de tiempo de conversión para medidas de voltaje de bus
INA_SCL 30	addr, channel, limit addr channel limit_H limit_L	INA3221_SetCriticalLimit_mA Ajusta el valor Critical Alert (mA)
INA_SCR 28	addr, value addr 0 value_H value_L	INA3221_SetConfigReg Escribe el registro Configuration
INA_SEC 24	addr, chenabled	INA3221_SetEnableChannels Habilita canales de la unidad
INA_SMR 29	addr, value addr 0 value_H value_L	INA3221_SetMaskReg Escribe el registro Mask/Enable
INA_SPM 25	addr, pdownmode addr pdownmode 0 0	INA3221_SetPowerdownMode Activa el modo Powerdown o el modo Continuous

INA_SSC 26	addr, scc addr scc 0 0	INA3221_SetSumChannels Selecciona canales para la Summation Control Function
INA_SSCTO 27	addr, ctoption addr ctoption 0 0	INA3221_SetShuntConvTimeOption Selecciona la opción de tiempo de conversión para medidas de corriente en shunt
INA_SWL 31	addr, channel, limit addr channel limit_H limit_L	INA3221_SetWarningLimit_mA Escribe el valor Warning Alert (mA)

C.3.2 Funciones de servicio del sensor LM75

Tabla C.5 Argumentos utilizados en las funciones de acceso a LM75

Argumento	Valores	Descripción	Observaciones
shutdown	0/1	Desactivar/activar el modo Shutdown (activa/desactiva el modo termostato)	0: Desactivar 1: Activar
Temp	-128 a 127	Valor de lectura de la temperatura (°C)	Entero
TOS	-128 a 127	Valor de lectura o escritura del registro TOS (°C)	Entero
THY	-128 a 127	Valor de lectura o escritura del registro THYST (°C)	Entero

Tabla C.6 Funciones de acceso a LM75

Códigos	Argumentos	Función / Descripción
LM_GTR 3	- 0, 0, 0 0	LM75_GetTempReg Devuelve el valor de temperatura
LM_GTOSR 4	- 0 0 0 0	LM75_GetTOSReg Devuelve el valor de TOS
LM_GTHYSTR 5	- 0 0 0 0	LM75_GetTHYSTReg Devuelve el valor de THYST
LM_SSM 9	shutdown 0 0 0 shutdown	LM75_SetShutdownMode Activa/desactiva el modo Shutdown
LM_STOSR 10	TOS 0 0 TOS_H TOS_L	LM75_SetTOSReg Ajusta el valor de TOS
LM_STHYSTR 11	THY 0 0 THY_H THY_L	LM75_SetTHYSTReg Ajusta el valor de THYST

C.3.3 Funciones de servicio para el control de carga de la batería

Tabla C.7 Argumentos de las funciones de control de carga de la batería

Argumento	Valores	Descripción	Observaciones
enable	0/1	Desactivar/activar la carga de la batería	0: Desactivar 1: Activar

Tabla C.8 Funciones de control de carga de la batería

Código	Argumentos	Descripción
C_G 0	- 0 0 0 0	Charger_Get Devuelve el valor de la línea de control de la carga de la batería
C_E 6	enable 0 0 0 enable	Charger_Enable Activa/desactiva la carga de la batería

C.3.4 Funciones de servicio para control de los switches NCP361-D

Tabla C.9 Argumentos de las funciones de acceso a NCP361-D

Argumento	Valores	Descripción	Observaciones
close	0/1	Desactivar/activar la conexión	0: Abierto 1: Cerrado

Tabla C.10 Funciones de acceso a NCP361-D

Código	Función	Descripción
S5V_C 7	close 0 0 0 close	Switch5V_Close Abre/Cierra el switch del bus de 5V
S3V3_C 8	close 0 0 0 close	Switch3V3_Close Abre/Cierra el switch del bus de 3.3 V
S5V_G 1	- 0 0 0 0	Switch5V_Get Devuelve el estado del switch del bus de 5V
S3V3_G 2	- 0 0 0 0	Switch3V3_Get Devuelve el estado del switch del bus de 3.3 V

Anexo D - Listado de componentes y precios

Leyenda:

- Pr.: Proveedor (F: Farnell, RS: RS Amidata)
- Cód. Código del proveedor
- U.: Número de unidades
- Descripción: valores, parámetros característicos, encapsulado
- €/u: Precio unitario (€)
- €: Subtotal

Tabla 11 Lista de componentes y precios

Pr.	Cód.	Id.	U.	Descripción	€/U	€
F	1845734	C1	1	2u2 25 V 0603	0,0876	0,0876
F	2320923	C2, C8	2	22u 16 V 1206	0,285	0,285
F	2118128	C3, C4, C19, C20	4	1u 25 V 0603	0,176	0,88
F	1759122	C5, C7	2	100n 50 V 0603	0,009	0,018
F	1463368	C6	1	15u 16 V1206	0,267	0,267
F	1414715	C7, C19	2	100n 50V 1206	0,0596	0,1192
F	1414717	C10	1	22p 50 V 1206	0,118	0,118
F	2426959	C11, C15	2	4u7 25 V 0603	0,258	0,516
F	2525091	C13, C23	2	22u 10 V 0603	0,428	0,856
F	2534045	C14, C16	2	1n5 50 V 0603	0,0361	0,0722
F	1907052	C17, C18	2	100p 25 V 1812	0,0254	0,0508
F	2317558	D1, D2	2	Schottky diode	0,509	1,018

NSR20F30NXT5G 2 A 30 V 0603						
RS	154-895	D3	1	Schottky diode ZHCS750TA 1.5 A 40 V SOT23	0,3	0,3
F	3041529	J1, J2, J3, J4, J5	6	Bloque terminal cable-placa, 5.08mm 2 vías	0,65	3,9
F	3041530	J2	1	Bloque terminal cable-placa, 5.08mm 3 vías	1,59	1,59
F	5217817	J6 a J12	3	Conector placa-placa, 2.54 mm, 32 contactos macho	3,49	10,47
F	2396301	JRBF, JD1, JD2	3	Jumper hembra de dos vías con asidero, 2,54 mm	0,273	0,819
F	2467180	L1, L2, L3	3	Inductor 10 uH, Vishay IHLP- 2525CZ, Isat 3.5 A	3,7	11,1
F	1226392	Led rojo	2	Led rojo SMD 0805	0,214	0,428
F	2472723	M1, M2, M3, M4	4	Tornillo de fijación M4, 40 mm Nylon (100 u)	7,6	30,4
F	2118516	Q1, Q2, Q3, Q4	4	N-MOSFET NTF3055L108 60 V 3A, SOT223	0,585	2,34
F	2059614	R_SCL, R_SDA	2	Resistencia 3k3, 100 mW 0603	0,0183	0,0366
F	2668256	R1	1	Resistencia 2, 100 mW 0603	0,018	0,018
F	2059627	R2, R_STAT1, R_STAT2	3	Resistencia 10k, 100 mW 0603	0,0183	0,0549
F	2670831	R3	1	Resistencia 412k, 100 mW 0603	0,0154	0,0154
F	2059643	R4	1	Resistencia 32k4, 100 mW 0603	0,0164	0,0164
F	2670747	R5	1	Resistencia 3k1, 100 mW 0603	0,0141	0,0141
F	2502463	R6, RCRIT_0, RCRIT_1, RPV_0, RPV_1, RWNG_0, RWNG_1	6	Resistencia 4k7, 100 mW 0603	0,0123	0,0738
F	2302958	R7	1	Resistencia 10, 100 mW 0603	0,0217	0,0217
F	2670922	R8	1	Resistencia 95k3, 100 mW 0603	0,0139	0,0139
F	2309107	R9	1	Resistencia 100k, 100 mW	0,0513	0,0513

				0603		
F	2059478	R10, R14	2	Resistencia 60k4, 100 mW 0603	0,0217	0,0434
F	2502414	R11, R15	2	Resistencia 15k, 100 mW 0603	0,0127	0,0254
F	2303271	R12	1	Resistencia 340k, 100 mW 0603	0,0217	0,0217
F	2059662	R13, 17	2	Resistencia 200k 100 mW 0603	0,0183	0,0366
F	2303301	R16	1	Resistencia 619k, 100 mW 0603	0,0217	0,0217
F	2309108	Rload	1	Resistencia 1k, 100 mW 0603	0,0737	0,0737
F	1100060	RSR	1	20m, 2W 0603	1,03	1,03
F	2447376	R18	1	Resistencia 47k, 100 mW 0603	0,0039	0,0039
F	8067821	RShunt1, RShunt2, RShunt3, RShunt4	4	Resistencia 100m 2010	0,573	2,292
F	2125812	U1	1	BQ24650 Battery charger, VQFN-16	5,09	5,09
F	2295062	U2, U3	2	LTC3440 Buck-Boost DC/DC Converter, DFN-10	5,99	11,98
F	2144251	U4, U5	2	INA3221 Shunt and bus voltage monitor, VQFN-16	5,38	10,76
F	2382339	U6, U7	2	NCP361 Overvoltage protection controller with internal PMOS FET, TSOP-5	0,723	1,446
F	2515559	U8	1	LM75 Digital Temperature Sensor and Thermal Watchdog with 2-Wire Interface	1,69	1,69
F	2212779	U9	1	Placa Arduino Mega	34,49	34,49
F	2302054		1	PCB doble cara FR4, 160 mm x 100 mm	5,15	5,15
TOTAL						140,22