



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Sistema autónomo solar de control y sensorización

Autonomous solar control and sensor system

Autor

Jorge Vizárraga Turmo

Director

Roberto Casas Nebra

ESCUELA DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
Grado en Ingeniería Electrónica y Automática
Departamento de Ingeniería Electrónica y Comunicaciones
2018



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. JORGE VIZARRAGA TURMO

con nº de DNI 77216564K en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) GRADO ELECTRONICA Y AUTOMATICA, (Título del Trabajo)

Sistema autónomo solar de control y sensorización
(Autonomous solar control and sensor system)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 16 de junio de 2018

Fdo: _____

RESUMEN

El presente TFG busca crear un sistema de sensado inalámbrico que permita tomar datos del entorno y que este alimentándose de manera energéticamente autónoma, a su vez dotarle de una serie de salidas que permitan abastecer el consumo de otros dispositivos como actuadores. Como solución al problema de alimentación se busca la extracción de energía a través del entorno para almacenarla y ponerla a disposición cuando el sistema lo necesite y para el sensor utilizar comunicación *Bluetooth* para enviar las tramas a una unidad externa.

El perfil de estudio serán zonas de escasa luminosidad como túneles o almacenes, tras un estudio de las posibles alternativas, se plantea el uso de un panel solar para captar la luz indirecta del entorno y almacenarla en una batería de manera que poco a poco recupere la energía consumida por el sistema.

Para ello será necesario realizar un análisis de los tipos de baterías, paneles solares y cargadores en busca de la combinación óptima para poder sacar el máximo rendimiento dentro del marco que ofrece el proyecto. El prototipo constará de dos partes, la primera una placa de circuito impreso que incorporara los sistemas de carga solar, los pines para el testeo de esta con posibilidad de llevar a un *datalogger* y una etapa adicional para carga por red eléctrica para ser usada cuando no esté disponible la anterior. La segunda parte será otra placa de circuito impreso en la que se ubicará un sensor que tomará datos de temperatura, humedad, presión y nivel de gas, el cual estará conectado al módulo *Bluetooth* que además dispondrá de un led RGB y un zumbador para emitir avisos al entorno de la zona de sensado, así como un botón para funciones de Reset, todo esto alimentado por el sistema de alimentación desarrollado.

Se diseñará también dos cajas 3D para contener por una parte el sistema de alimentación y por otra el sensor inalámbrico, consiguiendo tener un producto final montado y funcional.

Índice

Capítulo 1. Introducción	7
1.1 Objetivos y alcance.....	7
1.2 División trabajo	9
1.3 Estado del arte	10
Capítulo 2. Diseño del sistema de alimentación	14
2.1 Diagrama de bloques	14
2.1.1 Almacenamiento de energía (Batería)	15
2.1.2 Sistemas de carga.....	16
2.1.3 Panel fotovoltaico	18
2.1.4 Alimentación de red 230VAC	21
2.1.5 Alimentación de bus de continua.....	22
2.1.6 Salidas.....	22
2.2 Esquemático	23
2.2.1 Entradas de alimentación.....	23
2.2.2 Batería	24
2.2.3 Carga <i>harvester</i>	25
2.2.4 Carga red/bus continua.....	27
2.2.5 Salidas y puntos de test.....	28
2.3 Diseño y fabricación de la PCB	29
Capítulo 3. Diseño de sensor inalámbrico	30
3.1 Diagrama de bloques	30
3.1.1 Batería	30
3.1.2 Regulador LDO.....	30
3.1.3 Controlador	31
3.1.4 Sensor de temperatura y humedad	32
3.1.5 Salidas.....	32
3.2 Esquemático	33
3.3 Diseño y fabricación de la PCB	35
Capítulo 4. Caja 3D	36
4.1. Caja 3D para cargador de red.....	36
4.2. Caja 3D para carga solar.....	37
4.3. Caja 3D para el sensor	38
Capítulo 5. Pruebas.....	39
5.1. Sistema de alimentación ADP5063	39
5.2. Sistema de alimentación BQ25505	40
5.3. Sensor BME680	43
Capítulo 6. Conclusiones y Mejoras	44

Bibliografía	45
--------------------	----

FIGURA 1.CONCEPTO SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	8
FIGURA 2.TIPOS DE FUENTES DE ENERGÍA.....	10
FIGURA 3.NANOANTENA	12
FIGURA 4.MERCADO 2012(IDTECHEX)	12
FIGURA 5.MERCADO 2017(IDTECHEX)	13
FIGURA 6.DIAGRAMA DE BLOQUES.....	14
FIGURA 7.BATERÍA LIFEPO ₄	16
FIGURA 8.BQ25505.....	17
FIGURA 9.ADP5063	18
FIGURA 10.CONVERTIDOR CA/CC.....	21
FIGURA 11.VARISTOR 250VAC FIGURA 12.FUSIBLE PTTC	21
FIGURA 13.ESQUEMÁTICO ENTRADA SOLAR	23
FIGURA 14.ESQUEMÁTICO BUS CONTINUA	23
FIGURA 15.ESQUEMÁTICO RED230VAC	24
FIGURA 16.ESQUEMÁTICO BATERÍA.....	24
FIGURA 17.ESQUEMÁTICO CARGADOR BQ25505	25
FIGURA 18.ESQUEMÁTICO CARGADOR DE RED	27
FIGURA 19.PUNTOS DE TEST	28
FIGURA 20.SALIDA CARGA LOW	28
FIGURA 21.SALIDA CARGA HIGH	28
FIGURA 22.ANCHO DE PISTAS PCB	29
FIGURA 23.CARA TOP PCB	29
FIGURA 24.DIAGRAMA DE BLOQUES.....	30
FIGURA 25.CYBLE 202007	31
FIGURA 26.BME680	32
FIGURA 27.ALIMENTACIÓN CYBLE_KIT	33
FIGURA 28.CONEXIÓN MODULO PCB.....	33
FIGURA 29.ENTRADAS Y SALIDAS CYBLE_KIT	34
FIGURA 30.3D PCB BOTTOM	35
FIGURA 31.CAJA PARA CARGADOR DE RED.....	36
FIGURA 32.PASAMUROS.....	37
FIGURA 33.CAJA PANEL+BATERIA	37
FIGURA 34.CAJA SENSOR.....	38
FIGURA 35SENSOR Y SISTEMA DE ALIMENTACIÓN	38
FIGURA 36.PLACA ALIMENTACIÓN	39
FIGURA 37.AM1816CA Y AM1815CA.....	41
FIGURA 38. V, I A VARIACIÓN DE LX	42
FIGURA 39.CARGA BATERÍA SENSOR.....	43
FIGURA 40.PCB SENSOR	43
FIGURA 41. PROTOTIPOS.....	44

Capítulo 1. Introducción

Este trabajo de fin de Grado de Ingeniería Electrónica y Automática impartido por la universidad de Zaragoza en el curso 2017-2018 ha sido desarrollado dentro del grupo HOWLab¹ (Human Openware Research Lab) siendo este un grupo de investigación universitario, cuyo objetivo principal es la investigación y el desarrollo de tecnologías centradas en las personas y sus entornos.

1.1 Objetivos y alcance

El primer objetivo de este trabajo fin de grado es diseñar, construir y evaluar un dispositivo capaz de poder abastecer a otros haciéndolos energéticamente autosuficientes. Para lograrlo el sistema convertirá en electricidad la energía que se encuentra en el ambiente, este concepto se conoce como cosecha de energía o *harvesting*.

La ubicación del sistema será entornos de escasa iluminación como túneles, para ello convertiremos la energía, que en nuestro caso y siendo estudiadas varias opciones en el apartado 1.3 de este capítulo será la captada por un panel solar. Para guardar la energía extraída y poderla poner a disposición del sistema cuando quiera la almacenaremos en una batería mediante un sistema de cargadores, adicionalmente se añadirán otras dos entradas de alimentación alternativas un bus de continua de 5 VDC y una conexión a 230VAC.

La demanda de energía de los dispositivos conectados a nuestro sistema de alimentación vendrá dada por dos patrones de consumo que se ven reflejados como dos salidas:

- *Low_Current*: Patrón típico para un sensor inalámbrico, que alterna períodos de muy bajo consumo < 0,05 mA (99 % del tiempo) con breves períodos de consumo moderado 100 a 200 mA (1 %).
- *High_current*: Típicamente inactiva, en circunstancias puntuales, debería ser capaz de soportar un consumo continuo a 10 A durante un periodo de hasta 30 minutos o hasta que se descargue la batería. En esencia se trata de “una conexión directa a la batería”, durante el periodo que dure este consumo se acepta que la batería no se recargue desde la fuente principal (230 VAC, 5 VDC, panel), no obstante, transcurrido este tiempo, la carga deberá comenzar de forma segura para la batería.

La demanda de *Low_current* vendrá dada por la salida de los cargadores tanto el de red como el de *harvester*, pero si estos estuvieran desconectados existirá camino libre desde la batería. Por otro lado, la salida *High_current* es mucho mayor a las corrientes que dan los cargadores por lo tanto tendrá que venir de la batería.

El dispositivo se tendrá que enfrentar a distintos escenarios de uso:

- Carga de la batería mediante el panel solar por el cargador de *harvester* y alimentación de la salida *low_current*.
- Carga de la batería mediante bus de continua por el cargador de red y alimentación de la salida *low_current*.
- Carga de la batería mediante modulo AC/DC² por el cargador de red y alimentación de la salida *low_current*.
- Demanda *low_current* y/o *high_current* sin ningún cargador.
- Demanda *high_current* con parada de carga de la batería.

¹ <http://howlab.unizar.es/>

² AC: corriente alterna, DC: corriente continua

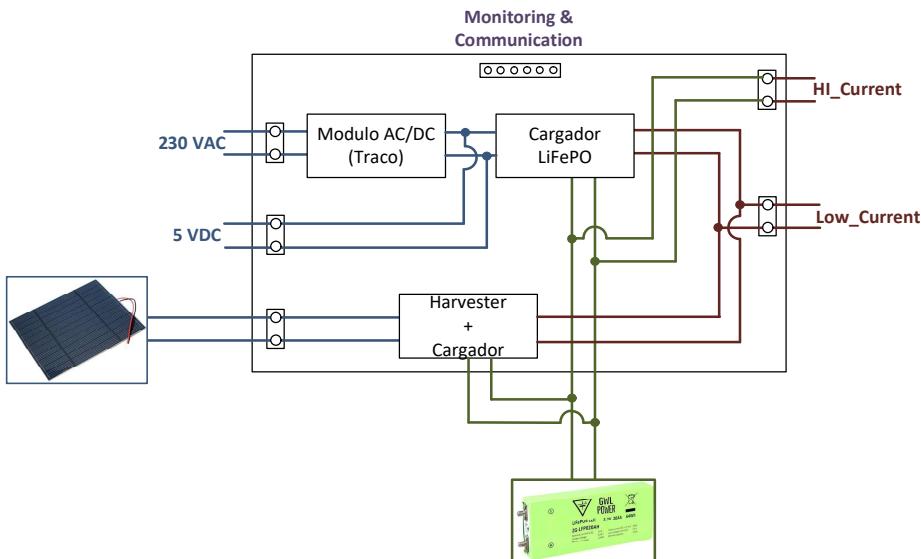


Figura 1. Concepto sistema de alimentación

Este diseño se realizará estudiando los distintos tipos de baterías, cargadores y paneles solares para hacerlo lo más genérico posible para optar por la posibilidad de usarlo como bancada de experimentación para caracterizar la cantidad de energía que puede extraerse de distintos paneles solares en entornos adversos.

Se ha evaluado la posibilidad de conectar un *datalogger* externo por lo que se han añadido pines para medida de tensiones del dispositivo y resistencias de *shunt* para medir las corrientes obtenidas por el panel solar, así como las consumidas por las salidas.

Con el diseño electrónico terminado se procederá a su implementación en PCB, creando un prototipo con las tres entradas de alimentación, los circuitos de carga para los dos tipos, los pines para captura de señales y las dos salidas.

Una vez cumplido este objetivo se procederá al segundo, el diseño de una pequeña PCB donde montar un sensor de temperatura y el módulo *Bluetooth*, con sus posteriores pruebas.

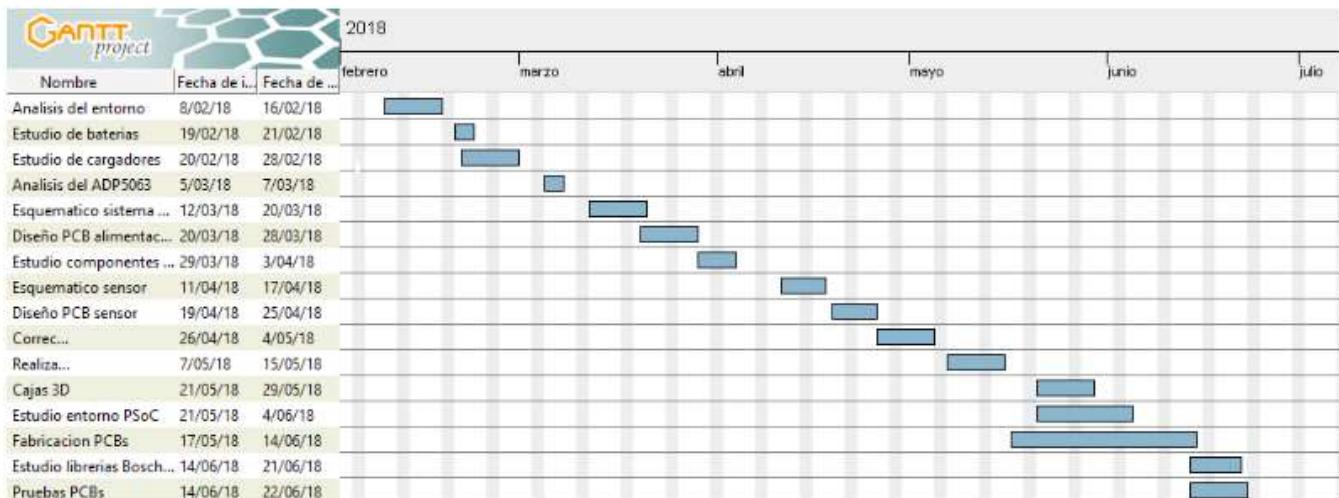
Con todo el sistema electrónico ya diseñado y fabricado se va a diseñar e imprimir en 3D una caja para poder tener un producto final totalmente versátil y funcional en distintos entornos.

1.2 División trabajo

La metodología que seguir en este proyecto se basa por un lado en el diseño y fabricación del hardware que abarca el sistema de alimentación (optimizando la carga de la batería y el aprovechamiento de la energía sobre todo la del *harvester*) así como el estudio, diseño e implementación de un sensor por *Bluetooth* y, por otro lado, el encapsulado 3D del producto. A continuación, se muestra una planificación de las distintas tareas en las que se va a dividir el trabajo:

- Análisis del entorno: estudio de los niveles de energía que se dan en el entorno de estudio para elegir el sistema de alimentación *harvester*.
- Análisis del dispositivo de almacenamiento: estudio de los tipos de baterías y supercondensadores que existen para elegir el sistema de almacenamiento.
- Estudio de componentes I: análisis de los dispositivos de carga para el tipo de batería y las alimentaciones seleccionadas.
- Estudio de componentes II: análisis de componentes pasivos y activos que serán necesarios para la adaptación de señales y configuración de los cargadores.
- Diseño de esquemático Alimentación: desarrollado en la herramienta CircuitMaker.
- Diseño PCB y fabricación Alimentación: desarrollado en la herramienta CircuitMaker.
- Estudio de componentes III: análisis de componentes para formar la placa en la que irá montada el sensor, haciendo un diseño de bajo consumo.
- Diseño de esquemático Sensor: desarrollado en la herramienta CircuitMaker.
- Diseño PCB y fabricación Sensor: desarrollado en la herramienta CircuitMaker
- Estudio de entorno PSoC: estudio de ejemplos proporcionados por Cypress.
- Estudio del Firmware: Análisis de librerías de una aplicación con sensor.
- Diseño y fabricación caja 3D.
- Pruebas PCB en entorno.

A continuación, se muestra un diagrama de Gantt con la línea temporal del trabajo.

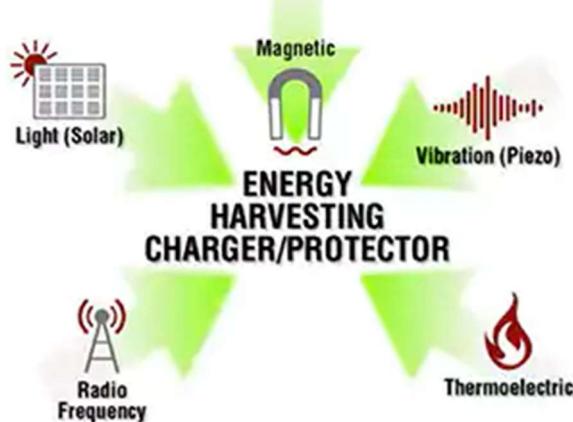


1.3 Estado del arte

Cada vez es más normal encontrarse dispositivos inalámbricos bien como teléfonos móviles, ordenadores, o bien sensores en los que se centra este proyecto.

Al no necesitar estar conectados a un puesto de mando para recolectar sus datos ahorramos toda la instalación de cable ganando tanto en tiempo como en dinero, sin embargo, sigue existiendo un problema y es que ese sensor necesita alimentarse. El principal criterio de diseño de estos dispositivos son los bajos consumos del orden de miliwatios en su modo funcionamiento o nanowatios en modo espera y así utilizar baterías de larga duración que una vez consumidas puedan ser remplazadas, pero y si pudiéramos recolectar la energía que nos rodea y transformarla en electricidad para crear un sistema autónomo energéticamente.

La cosecha de energía o *harvesting* es el proceso por el cual la energía derivada de fuentes externas es capturada y almacenada para ser empleada en un proceso posterior.



3

Figura 2. Tipos de fuentes de energía

En la figura 2 [3] podemos ver los principales tipos de fuentes de energía de los que se extrae energía, siendo la solar la fuente más utilizada.

Se ha realizado un estudio de cuáles serían las principales fuentes de energía en los túneles siendo:

1. Solar-> Mediante paneles fotovoltaicos adaptados a iluminación artificial.
La energía captada sería la luz residual que hay en el túnel proveniente de la propia iluminación del túnel u orientando los paneles hacia las zonas de paso de los coches para aprovechar la luz de los focos.
2. Movimiento de Aire-> Mediante micro generadores eólicos movidos por las corrientes de aire en el túnel.
3. Presión-> Mediante cables de presión transformar la presión ejercida por los coches en energía a través de superficies piezoelectricas o magnetoestritivas.

En la siguiente tabla se recogen los datos a favor y en contra del uso de estas opciones en el túnel.

³ <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/5259>

	PROS,	CONS.
Solar	<ul style="list-style-type: none"> - Tecnología muy asentada. - Coste de implantación asequible y conocido a priori. - Facilidad de sobredimensionar 	<ul style="list-style-type: none"> -Incógnita por intensidad luminosa insuficiente o de baja calidad (en función del tipo de lámpara). Puede tratar de compensarse con un sobredimensionamiento. -Ensuciamiento de superficie. Puede minimizarse con el uso de superficies autolimpiables y operaciones de limpieza durante el mantenimiento.
Aire	<ul style="list-style-type: none"> -Tecnología asentada. -Si existe suficiente flujo de aire, la capacidad de extracción de energía puede ser mayor que la solar. 	<ul style="list-style-type: none"> -Partes mecánicas móviles. Puede requerirse algún tipo de mantenimiento (limpieza, engrasado etc.) -Capacidad energética en función del tránsito en el túnel, puede ser difícil de estimar a priori.
Presión:	<ul style="list-style-type: none"> -Capacidad de generación energética elevada y fácilmente predecible en función del tránsito. 	<ul style="list-style-type: none"> - Invasión de calzada. - Conste de instalación y mantenimiento. - Posible degradación de dispositivos

En este proyecto se va a escoger la solar puesto que será la más fácil de probar en distintos entornos y podría ser la opción más viable debido a su coste y tecnología para una aplicación real.

A pesar de ser la fuente más empleada las células solares tienen un rendimiento bajo [1], según el tipo de construcción de esta podemos encontrar un rendimiento máximo de entorno al 20%, los datos de los paneles solares se explicarán más adelante en el Capítulo 2.

El uso típico de estas células solares es cargar baterías o supercondensadores para proporcionar una fuente de energía estable. Al igual que los tipos de paneles solares en el Capítulo 2 aparecerá una explicación más detallada de los tipos de dispositivos de carga y tipos de batería estudiados para el proyecto y el seleccionado.

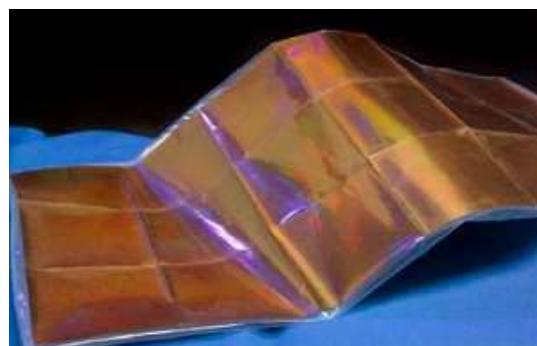
Existen muchos tipos de aplicaciones en los que podemos encontrar este sistema de almacenamiento de energía por panel solar: calculadoras, juguetes, baterías portátiles, satélites, sistemas de alumbrado.

Al fin y al cabo, en nuestro proyecto podemos ver una etapa similar a lo que sería un cargador de baterías solar por ejemplo las *powerbank* solares para móviles, Tablet o los cargadores solares de batería de coche, pero no hay que olvidar el objetivo que queremos darle, una aplicación especial para entornos de iluminación escasa.

En cuanto a innovación en este campo, recientes estudios de la universidad de Missouri y del Laboratorio Nacional de Idaho [2] han desarrollado una película solar flexible que podría conseguir un rendimiento del 90%, esta nueva película se conoce como Nanoantenas o “Nantenas” se muestra un panel solar formado por esta tecnología en la figura 3.

La diferencia con las células fotovoltaicas convencionales es que la película está formada por nanoantenas cada una ajustada a una frecuencia específica de la luz, permitiendo absorber todo el espectro solar o ser configurados como filtro paso banda centrado en una longitud de onda de 6,5 μm captando así la radiación infrarroja y reciclando el calor residual de fuentes de temperatura.

La tecnología sigue en desarrollo a la espera de más financiación y más tiempo para producir un producto en masa.



4

Figura 3.Nanoantena

Además del ahorro que conlleva el uso de las técnicas de *harvester* en la ausencia de cables de instalación hay que sumarle el ahorro energético que supone.

A continuación, en la figura 4 y figura 5, se muestran dos gráficos; uno de 2012 y otro de 2017 reflejando el crecimiento del mercado del *harvester* a través de un estudio realizado por IDTechEx.

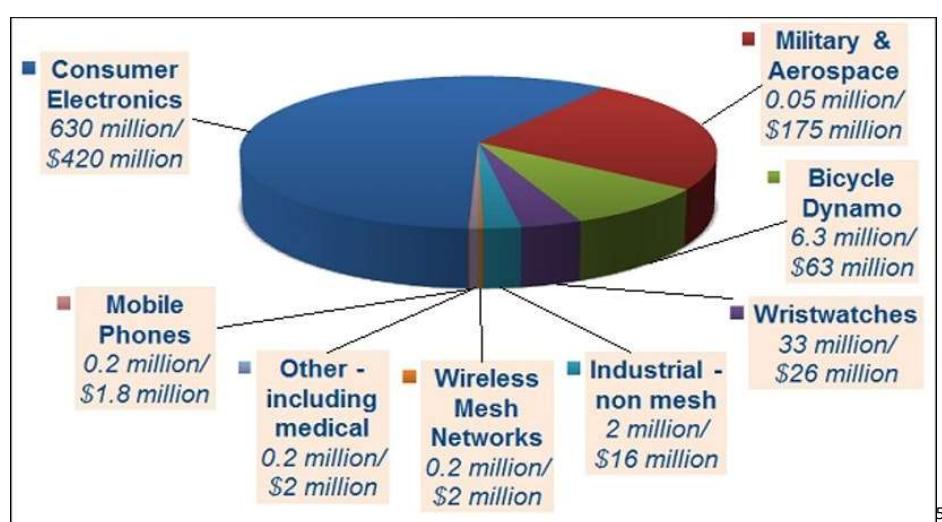


Figura 4.Mercado 2012(IDTechEx)

⁴ [2]

⁵ <https://www.idtechex.com/research/articles/energy-harvesting-comes-to-market-00005163.asp>

Energy Harvesting Market in 2017 \$1.5Bn

Source: IDTechEx Energy Harvesting Report



Figura 5.Mercado 2017(IDTechEx)

6

⁶ <https://www.slideshare.net/Funk98/energy-harvesting-for-iot>

Capítulo 2. Diseño del sistema de alimentación

En este capítulo se realizará el diseño del sistema que se va a implementar para satisfacer las demandas citadas anteriormente. Se ha dividido en tres partes para realizar un estudio profundo de cada elemento y de su conjunto.

- Diagrama de bloques: División en bloques del problema y solución a cada uno de ellos
- Esquemático: Representación de los circuitos eléctricos que describen todos los bloques.
- PCB: Implementación del esquema eléctrico a placa con las características propias de una fabricación de PCB algunas como clase de dificultad, numero de caras.

2.1 Diagrama de bloques

A continuación, se muestra un diagrama de bloques en la Figura 6 con los bloques que componen al sistema y seguido se explican en profundidad las elecciones que se han escogido para cada uno de ellos.

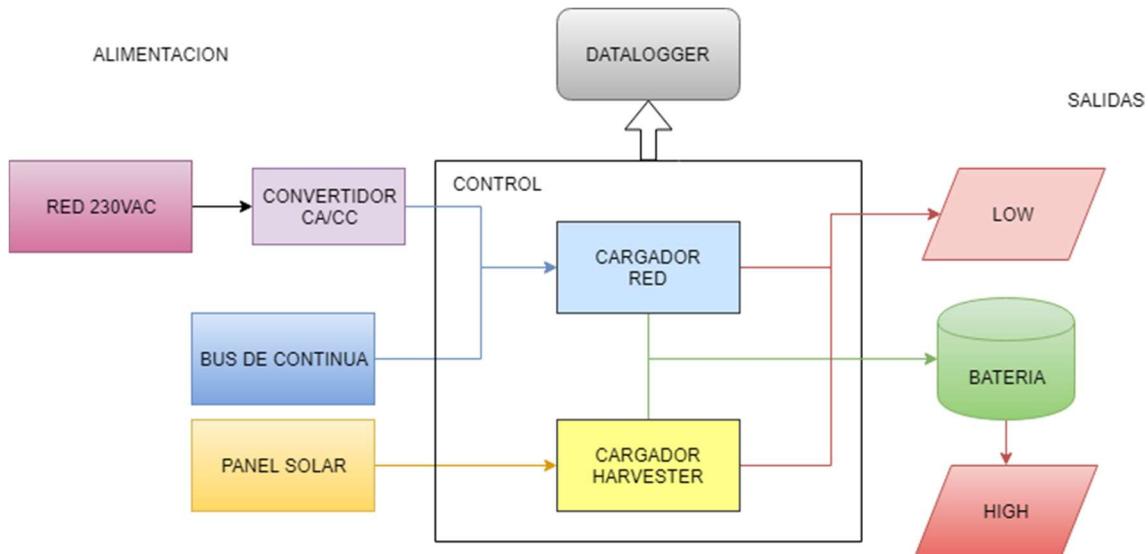


Figura 6. Diagrama de bloques

Para empezar a diseñar el sistema la primera decisión deberá ser que batería empleamos en nuestro dispositivo, puesto que la tecnología que la forme determinara que tipo de cargador ahí que usar y más tarde que alimentaciones requieren dichos cargadores.

2.1.1 Almacenamiento de energía (Batería)

El tipo de batería seleccionada para este trabajo vendrá determinado tanto por los requisitos del sistema como por su precio y disponibilidad.

Requisitos de aplicación:

- Baja Auto descarga: Para aumentar la vida útil de la batería
- Batería con tecnología asentada: Se busca una aplicación optima no una prueba de baterías emergentes. litio oxido de titanio
- Capacidad de descarga elevada: Para dar el máximo posible cuando sea necesario al sistema.
- Capaces de operar en rangos amplios de temperatura: Tanto frio y calor para estaciones de invierno y verano, así como temperaturas del orden de 60°C si se produce un incendio.
- Libre de compuestos tóxicos: RoHs, PBFREE, etc.

Los tipos de batería más utilizados son:

- Baterías de Plomo acido
- Baterías de Níquel: entre ellas níquel-hierro, níquel cadmio o níquel-hidruro metal.
- Baterías de iones de Litio
- Baterías de fosfato de litio
- Baterías de ferro fosfato de litio
- Baterías de nuevas tecnologías: Litio titanio o zinc aire,

A continuación, se muestran en una tabla la comparativa entre distintas tecnologías estudiadas:

Bateria	Lilon	LiFePO ₄	Li ₄ Ti ₅ O ₁₂	LiPo	LeadAcid	Zinc Air
Voltaje celda(V)	3,6	3,2	2,4	3,7	6	1,65
Autodescarga (%/mes)	<4%	1-3%	<3%	5%	3-7%	<3%
Capacidad descarga continua máxima(A)	<10	>20	10-20	>20	<10	10-20
Seguridad y estabilidad	Pueden dañarse si Tº↑↑	Alta	Alta	Pueden dañarse si Tº↑↑	Contiene materiales contaminantes	Alta
Rango temperatura(ºC)	-25/50	-30/60	-30/55	-25/60	-40/50	-20/50
Disponibilidad	Alta	Alta	Baja	Alta	Alta	Baja

Tras evaluar la tabla llegamos a la conclusión en 3 pasos de que la mejor opción por el momento sería una batería de LiFePO₄. En el primer paso eliminaríamos aquellas que planteen problemas de seguridad que lleguen a destruir la batería así pues las de litio ion, fosfato de litio y las de ácido plomo serían eliminadas. Con las opciones restantes pasaríamos a analizar sus rangos de temperatura y la seguridad, siendo todas las opciones válidas, pero buscando una mayor capacidad de descarga y menor auto descarga nos quedaríamos con las LiFePO₄, Zinc Air y las de Li₄Ti₅O₁₂. Finalmente se toma la decisión por la disponibilidad en el mercado de la batería.

Para este proyecto se va a usar una batería tipo LiFePO₄ como la de la figura 7 [6] con un voltaje de celda 3,2 V, una capacidad de 20 Ah que permita la descarga a 10 A durante el tiempo requerido.



7

Figura 7.Batería LiFePO₄

2.1.2 Sistemas de carga

el Ahora que conocemos la tecnología que usará la batería podemos hacer un estudio de los distintos tipos de cargadores que ahí.

- Carga por *harvesting*

Se ha realizado un estudio de los principales cargadores que ahí para la batería seleccionada con $V_{bat}=3,6$ V, durante el estudio se han seleccionado 4 candidatos en relación con el precio y disponibilidad en mercado.

En la siguiente tabla podemos ver la comparación de parámetros más relevante en una aplicación de *harvesting* para tomar la decisión.

Parámetros	Bq25505	Bq25570	Adp5091	Adp5090
Vin	0,3/5,1 V	0,3/5,1 V	0,08/3,3 V	0,1/3,3 V
Vin min-max	0,1/5,5 V	0,1/5,5 V	-0,3/3,6V	-0,3/3,6V
Vin cold-start	330 mV	330 mV	380 mV	380 mV
Vbat	2-5 V	2-5 V	2-5,2 V	2-5,2V
Iq_operation	325 nA	448 nA	510 nA	320 nA
Iout	100 mA	110 mA	150 mA	0-800mA
Input current poweroperation	510 mW	510 mW	600 mW	200mW
Minimun power cold start	15 µW	15 µW	6 µW	16 µW
Battery switch on Resistance	0,95-1,55 Ω	0,95-1,55 Ω	0,59-0,85 Ω	0,55-0,73Ω
Boost	Si	Si	Si	Si
Rango temp	(-40/125) °C	(-40/125) °C	(-40/125) °C	(-40/125) °C

Los parámetros seleccionados en la tabla son los más discriminantes a la hora de elegir el cargador.

Debe tener el mayor rango de tensión de entrada (Vin) para poder probar con distintos paneles y hacer la aplicación lo más versátil posible, a su vez tener un voltaje de salida de batería (Vbat) del rango de la tensión de la celda (3,6 V).

Se desea la mínima corriente quiescente para evitar consumir la corriente producida por el panel solar ya que esta será del orden de los µA.

El parámetro *cold-start* será el determinante del tipo de panel solar a usar, este valor tendrá que ser menor a la mínima potencia generada por el panel solar.

⁷ <https://www.ev-power.eu/LiFePO4-small-cells/LiFePO4-High-Power-Cell-3-2V-20Ah-Alu-case-CE.html>

Analizando estos parámetros y la tabla sacamos la conclusión de que por el tema de rangos de Vin los BQ son superiores a los de Analog, dentro de los BQ la diferencia entre las corrientes de quiescencia deja claro que la opción a escoger es el BQ25505.



8

Figura 8.BQ25505

Para configurar los parámetros del microcontrolador, este dispone de configuraciones y lógicas internas que se explican con detalle en su hoja de características [4].

- Cargador de red

Al igual que el cargador de *harvester* se ha realizado un estudio de los cargadores de red que existen para seleccionar el más adecuado.

En la siguiente tabla se presentan cuatro candidatos con las principales características del estudio.

Parámetros	MCP73123	LTC4098	ADP5063	BQ25071
Vin	4-16 V	-0,3-7 V	-0,5-20 V	3,75-28 V
Vbat	3,6 V	3,6 V	3,6 V	3,6 V
Vout	0,Vbat,4,3 V	0,Vbat,4,3 V	0,Vbat,4,3 V	0,Vbat,5 V
Iin	1200 mA	2100 mA	2100 mA	1200 mA
ICHR	130-1100 mA	135-1300 mA	50-1300 mA	41,5-1000 mA
Rango temp	-40 a 85 °C	-40 a 85 °C	-40 a 125 °C	-40 a 125 °C
Salida y carga separada	NO	SI	SI	NO

Todos los cargadores disponen de patillas para ajustar con resistencias los valores de corriente máxima de entrada, corriente de carga, estado del cargador.

El ADP5063 tiene como particular que incorpora un módulo de comunicación I2C para controlar todos estos parámetros del cargador a través de sus registros, además de 3 pines configurados para determinadas aplicaciones según se pidan a fabrica.

De los 4 candidatos los mejores por rangos de temperatura y rangos de entrada son el ADP5063 y el BQ25071, el de Analog tiene mayor corriente de carga y, de entrada, pero por el tema comentado antes de su programación por I2C no sabremos si podremos usarlo con la misma facilidad que sus compañeros.

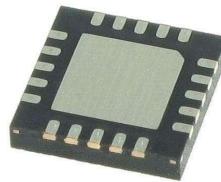
Para decidirnos por uno de los dos se ha testeado el ADP5063 por medio del kit ADP5063 EVALUATION BOARD Anexo 10.

Se han obtenido resultados positivos, con las configuraciones de fábrica y los tres pines digitales conseguimos limitar la corriente de entrada y activar la función de carga.

A su vez se ha comprobado el comportamiento de la salida para verificar que pueda operar sin batería y a su vez que por la lógica interna del micro en ausencia de tensión de entrada la salida está conectada con la batería de tal forma que podemos tener la salida de baja corriente disponible si fallan las alimentaciones hasta que la batería se descargue.

⁸ <http://www.ti.com/product/BQ25505>

Se ha escogido este tras verificarlo por mayor admisión de valores de entrada y mayores niveles de carga.



9

Figura 9.ADP5063

2.1.3 Panel fotovoltaico

Los niveles de luz que captaremos en el túnel serán bajos siendo a veces situaciones de penumbra, la luz que captaremos vendrá de focos de luz artificial como la iluminación interna del túnel o los focos de los coches.

Sabiendo esto será necesario primero elegir qué tipo de panel solar elegimos, en la siguiente tabla se muestra un estudio de los 4 tipos principales de paneles fotovoltaicos:

		PROS	CONS
Monocristalinos (c-Si)	Celdas color negro, esquinas cortadas a chaflán. Primeros en desarrollarse. Se parte de un lingote de un único cristal de silicio, obtenido por los métodos de Czochralski (Cz) o zona flotante (FZ), y se corta en obleas que constituyen el sustrato sobre el que tendrá lugar todo el proceso restante (unión "p-n", metalización, etc.). 35% de los sistemas fotovoltaicos	Tecnología probada. Buenos rendimientos (15% - 17%), record en 25%. Alta durabilidad (20 a 30 años). Banda de absorción espectral amplia	Caros
Policristalinos (p-Si)	Celdas color azulada, esquinas rectas Utilizan obleas de silicio como sustrato, pero a diferencia de las monocristalinas, éstas proceden del corte de un bloque de silicio que se ha dejado solidificar lentamente en un crisol y que está formado por muchos	Menor coste que los monocristalinos	Menor rendimiento (10 % -12%) que los monocristalinos. Su rendimiento cae con la temperatura. Record redimiento en 20.4%. Menor durabilidad que los monocristalinos.

⁹ <https://www.mouser.es/ProductDetail/Analog-Devices-Linear-Technology/ADP5063ACPZ-1-R7?qs=sGAEpiMZZMtQ1ytNI72Bk31qw5V1x2I3PGKNH08BaiA%3d>

	pequeños cristales de silicio. 55% de los sistemas fotovoltaicos.		El calor afecta a su vida útil
Amorfos Capa fina (a-Si)	No consisten en la unión de células individuales. Lámina cortada a medida en la que se observan unas tiras delgadas que separan las células, creadas	Menor coste de todos Típicos en aparatos de bajo consumo. Los flexibles: Funcionan mejor con luz indirecta. Pueden doblarse.	Menos eficientes, 6% al 10% tendiendo al 0 con el envejecimiento Se degradan más rápidamente. Pierden del 10% al 30% de eficiencia durante los 6 primeros meses de funcionamiento (efecto Staebler.Wronski) Contienen materiales tóxicos
Película delgada	Los más importantes son módulos de capa delgada de cobre, indio y selenio o de cobre, indio, galio y selenio y módulos de capa delgada a base de cadmio y teluro	Buenos rendimientos Ahorro de materiales Nuevas tecnologías	Poca experiencia Problemas de producción Inseguridad vida útil Elevada caída de la potencia de salida a medida de la vida útil.

El factor de vida útil es uno de los principales causantes del descenso de rendimiento de los paneles fotovoltaicos, la potencia nominal se degrada alrededor del 0.5% anual, pero no es un porcentaje fijo por ejemplo los paneles de película fija se degradan mucho más rápido que los paneles mono y policristalinos.

	Vida útil paneles
Monocristalino	La más alta entre los demás paneles solares y oscila alrededor de 30 años
Policristalino	Los paneles policristalinos tienen una gran resistencia y estabilidad para estar a la intemperie, lo cual les da una vida útil que oscila alrededor de 25 años
Película delgada	La producción de paneles de película delgada es comparativamente muy baja y su tiempo de vida oscila alrededor de los 12 años
Silicio amorfo	La vida útil del silicio amorfo de película delgada oscila alrededor de 15 años. Su eficiencia disminuye un 10% - 30% tras 6 meses de uso.

Teniendo esto en cuenta es hora de elegir qué tipo de panel escogeremos para nuestra aplicación, nuestro entorno tendrá luz artificial, un amplio rango de trabajo en función de la temperatura, la potencia generada deberá ser mayor que el parámetro *coldstart*¹⁰ del micro (16 µW), obtener el mejor rendimiento posible, una aplicación de bajo coste.

Los de película delgada por su deterioro en la vida útil y su escasa producción serían los primeros

¹⁰ Coldstar: mínima potencia para empezar el proceso de carga

descartados, seguidos de los monocristalinos por su elevado precio a pesar de sus buenos rendimientos. Estudiando la tabla de pros y contras vemos que los policristalinos obtienen mejor rendimiento que los amorfos y su degradación con el tiempo es menor, pero la degradación con la temperatura es un punto para tener en cuenta en el entorno, haciendo así que el bajo coste y los buenos resultados de captar luz indirecta hagan al panel amorfo el candidato final.

Podemos elegir entre cualquiera de estos paneles puesto que hemos diseñado el dispositivo para la mayor versatilidad de entrada posible y fijándonos que la iluminación en el túnel será de entre 50-200 lux¹¹, por tanto, la mínima potencia la pondrá la potencia generada a 50 lux. Se han extraído una serie de datos de sus hojas de características [7] [8] para compararlos.

	Voc [V]	Isc [μ A]	P[mW](Vope[V],Iope[μ A])	Rangos	Dimensiones	Precio
<u>AM-1815CA</u>	4,9 V	47,0 μ A	27,5 μ W (2,6 V – 10,5 μ A) Typ 50Lx, 25 °C	1000 Lux -10 - 60°C	58x48.6x1.3 mm	1:5,38€ 100:4.30€ 1000:2.96€
	200Lx 25 °C	200Lx 25 °C	94,5 μ W(3,0 V – 31,5 μ A) Min 126 μ W (3,0 V – 42 μ A) Typ 200Lx, 25 °C,		Wire overcoat e total=2.5 mm	
<u>AM-1816CA</u>	4,9 V	94,0 μ A	55,0 μ W (2,6 V – 21,0 μ A) Typ 50Lx, 25 °C	1000 Lux -10 – 60°C	97x56.6x1.3 mm	1:12,50€ 100:8.74€ 1000:6.87€
	200Lx 25 °C	200Lx 25 °C	189 μ W(3,0 V – 63 μ A) Min 262 μ W(3,0 V – 84 μ A) Typ 200Lx, 25 °C		Wire overcoat e total=2.5 mm	

¹¹ Lux: es la unidad derivada del SI para la iluminancia.

2.1.4 Alimentación de red 230VAC

Como fuente adicional tanto para hacer pruebas como por fallo del sistema de carga de *harvesting* se añade una entrada de alimentación a la red eléctrica.

Para ello se conectará a través de un conector y pasará por un fusible re armable y un varistor siguiendo así la normativa de baja tensión llegando al fin a un convertidor de CA/CC.

Se va a emplear directamente un módulo comercial evitando así el diseño de potencia de la fuente de alimentación puesto que no es lo competente en este proyecto.

La potencia máxima que disipa la entrada del micro será para el caso de corriente de entrada límite y tensión de alimentación máxima, dando lugar a una potencia de 7,5 W nuestro convertidor pues tendrá que tener una salida superior para aguantar la demanda de potencia.

$$PIN = 1,5 A * 5 V = 7,5 W$$

Se usará un convertidor CA/CC de entrada 230 VAC y salida 5 VDC que es lo que nuestro cargador soporta y con una potencia de salida de 10 W dejando por lo tanto 2 A al cargador suficiente para las funciones de carga que vamos a realizar.

Se ha escogido por precio y disponibilidad el módulo IRM 10-05 DE MEAN WELL.



12

Figura 10. Convertidor CA/CC

Como mecanismos de protección se utilizarán:

- Un varistor que deberá aguantar las variaciones de tensión que se produzcan en la línea con su posible destrucción y a su vez desconexión del sistema a la red si estas son más altas de su valor límite (250 VAC).
- Un fusible re armable que consta de una resistencia PTC en su interior que si aumenta la corriente aumenta de temperatura, llegando a un momento que corta la entrada de corriente al sistema protegiéndolo así de posibles cortocircuitos.



13

Figura 11. Varistor 250VAC



14

Figura 12. Fusible PTC

¹² <https://www.meanwell-web.com/en-gb/ac-dc-single-output-encapsulated-power-supply-irm--10--5>

¹³ <https://www.westfloridacomponents.com/VR010PE11/MOV+Metal+Oxide+Varistor+S20K250E2+Epcos.html>

¹⁴ <http://www.orbitelectronics.in/circuit-protection-fuse.html>

2.1.5 Alimentación de bus de continua

Como método adicional de alimentación por red, se propone una entrada que venga de un bus de continua y otra por micro USB para alimentar al cargador de red sin necesidad de usar el sistema de conversión de alterna para dar más versatilidad al producto.

2.1.6 Salidas

Se fijarán dos conectores para las salidas, así como numerosos pines para testear los valores de corriente y tensión durante los procesos de carga y descarga, además podrán ser recogidos por un *datalogger* para controlar el consumo del sistema y el estado de la batería.

Se han añadido unos jumpers que permitan medir la tensión entre sus extremos para calcular la corriente que circula por las zonas de medida.

2.2 Esquemático

Para realizar el esquemático se ha usado la herramienta CircuitMaker¹⁵, se ha ido diseñando bloques a bloques con sus necesidades y adaptación de señales.

Los planos completos del esquemático podemos encontrarlos en el Anexo 1.

2.2.1 Entradas de alimentación

2.2.1.1 Alimentación por harvester

Alimentacion Solar+SHUNT

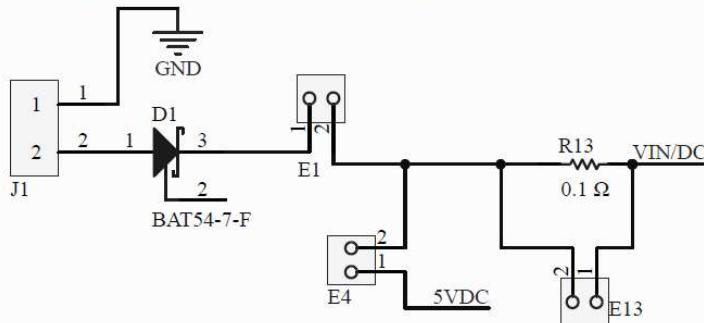


Figura 13.Esquemático entrada solar

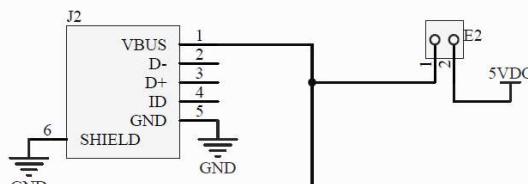
Podemos ver en la figura 13 el circuito que describirá la alimentación a partir de la alimentación solar. Al conector J1 se conectará el panel solar seguido de un diodo schottky D1 que hará de protección frente a tensiones inversas provenientes del cargador.

El Jumper E1 será el que habilite el panel solar seguido de una resistencia de shunt para medir la corriente producida por este midiendo en E13 o usando este mismo como corto de la resistencia por si no quiere usarse.

El E4 habilita la entrada de 5 VDC por si se quiere hacer pruebas con ese cargador con tensión del bus de continua.

2.2.1.2 Alimentación por Bus de continua

Alimentacion MicroUSB_5V



Alimentacion Fuente_5V

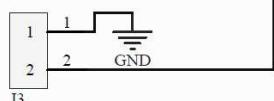


Figura 14.Esquemático bus continua

Como se aprecia en la figura 14 disponemos de dos entradas distintas el conector J2 que es un micro USB, y el J3 que es un conector para un bus de continua, al igual que en el caso de panel ahí un jumper para habilitarlo.

¹⁵ <https://circuitmaker.com/>

2.2.1.3 Alimentación de red 230VAC

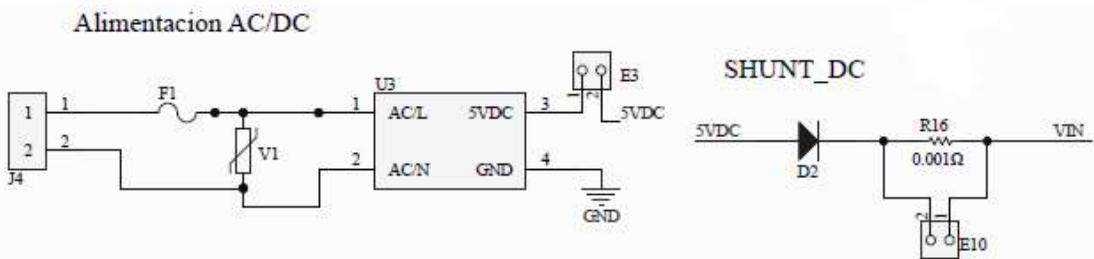


Figura 15. Esquemático Red230VAC

En la figura 15 se muestra el circuito que forma la alimentación a través del conector de red alterna.

El conector J4 representa la entrada de la alterna seguida del fusible de protección en serie y el varistor en paralelo para llegar al convertidor y obtener los 5 VDC a la salida, también disponemos de un jumper para habilitar esta entrada.

Los mismos 5 VDC que se obtienen del bus o del convertidor pasan por un circuito como el de *harvester* de diodo de protección y resistencia de *shunt* para medida de la corriente.

2.2.2 Batería

En la figura 16 podemos ver cómo hemos realizado de igual manera que para el resto de las entradas la conexión de la batería a través del conector J5 a nuestro sistema.

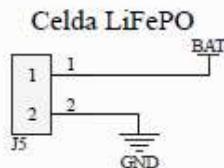


Figura 16. Esquemático batería

2.2.3 Carga harvester

En la figura 17 se muestra el esquema completo del circuito que forma el sistema de carga por medio del *harvester* solar se va a llevar a cabo una descripción de los pines y sus funciones para entender su propósito.

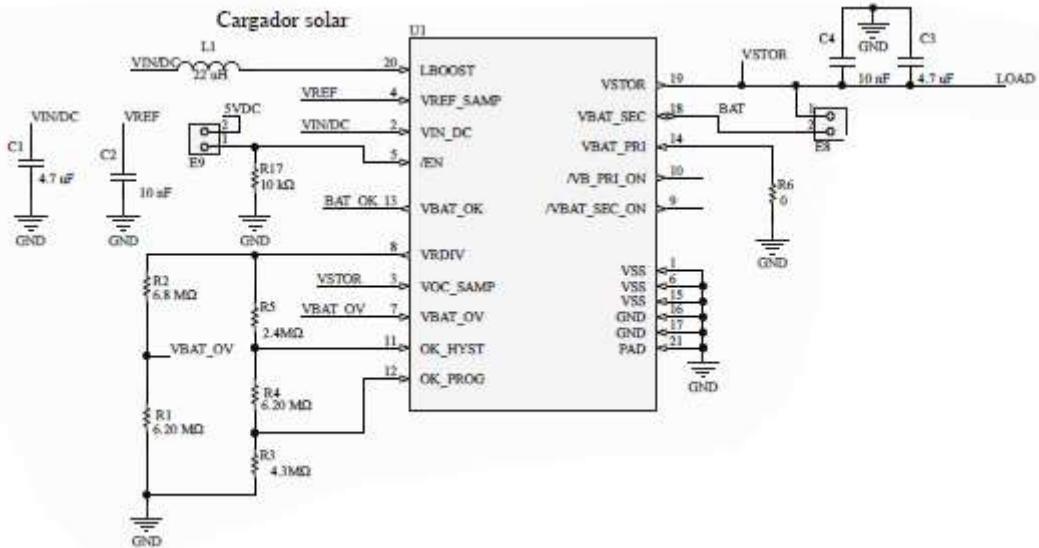


Figura 17. Esquemático Cargador bq25505

Siguiendo los valores recomendados y el esquema del fabricante obtenidos del *datasheet*¹⁶ se ha desarrollado el siguiente esquema con la etapa de entrada VIN/DC que ira a la bobina L1 y al condensador C1. Cuando el valor de C1 es mayor que el valor de voltaje de *coldstart* del micro $V_{Cold}=380$ mV comienza la etapa previa de carga mientras tanto la lógica interna bloquea la entrada de la bobina que se activara cuando se pase el proceso *coldstart* actuando luego como un circuito elevador para subir las bajas tensiones producidas por el panel.

El condensador C2 va a guardar la tensión de referencia que obtiene el micro en cada ciclo a través del MPPT¹⁷. El valor que guarda ese condensador viene de la entrada VOC_SAMP que es la que coge la muestra del MPPT, en este caso siguiendo las recomendaciones para del fabricante para aplicaciones solares al conectarlo a VSTOR se establece un MPPT al 80% de la potencia.

Para habilitar el micro esta la patilla de \overline{EN} , al estar negada, para que funcione será necesario un nivel bajo. Como medida preventiva al colocar el jumper E9 conectado 5VDC con la resistencia de *pull-down* si se activan las entradas de red deshabilita este cargador para que se ponga el de red, si estas están desactivadas el cargador solar está habilitado.

La red resistiva que forman R2 y R1 establece el valor máximo para prevenir a la batería de sobrecargas. Para elegir las resistencias se toman datos de los *datasheet* tanto de la batería como del BQ para saber cuál es el valor V_{rdri} que establece el micro y la tensión máxima de la celda de la batería V_{batOV} y poder sacar el divisor resistivo y elegir las resistencias.

$$VBAT_{OV} = VRDIV * \frac{R1}{R1 + R2} = VRDIV * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) = \frac{3}{2} VBIAS * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right)$$

Con $V_{batOV}=3,8$ V y $V_{rdri}=1,21$ V.

$$3.8(V) = \frac{3}{2} * 1,21(V) * \left(1 + \frac{R2}{R1}\right) \rightarrow \frac{R2}{R1} = \frac{3.8}{1,21 * \frac{3}{2}} - 1 = 1,094$$

¹⁶ Datasheet: hoja de características del componente

¹⁷ MPPT: Seguidor de Punto de Máxima Potencia

Para elegir definitivamente los valores de las resistencias el fabricante recomienda que la suma de ambas sea menor a $13 \text{ M}\Omega$.

Por lo tanto, planteando un sistema de ecuaciones con las dos ecuaciones obtenidas:

$$\begin{cases} R2 = 1,094 * R1 \\ R2 = 13 \text{ M}\Omega - R1 \end{cases}$$

Resolviendo por sustitución:

$$1,094R1 = 13\text{M}\Omega - R1 \rightarrow R1 = \frac{13\text{M}\Omega}{2,094} = 6,21 \text{ M}\Omega$$

$$R2 = 1.094 * 6,21\text{M}\Omega = 6,79 \text{ M}\Omega$$

El segundo divisor resistivo formado por R3, R4 y R5 establece los rangos de tensión de operación durante la carga, estos valores coincidirán con los datos de operación cogidos del datasheet de la batería.

$$V_{bat_{ov}} > V_{ok_{hyst}} > V_{ok_{prog}} > V_{bat_{uv}}$$

Siendo el $V_{ok\text{-prog}}$ el menor valor del rango [2,9V] y $V_{ok\text{-hysteresis}}$ el mayor valor [3,7 V]. Realizando los dos divisores resistivos obtenemos:

$$\begin{aligned} V_{BAT_{OK}} &= V_{BIAS} * \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}}\right) \\ V_{BAT_{OKHYST}} &= V_{BIAS} * \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}}\right) \end{aligned}$$

Igual que en el caso anterior impondremos que la suma de todas las resistencias sea igual a $13\text{M}\Omega$.

$$R_{ok_1} + R_{ok_2} + R_{ok_3} = 13 \text{ M}\Omega$$

Resolviendo el sistema de ecuaciones obtenido:

$$\begin{cases} V_{BAT_{OK}} = V_{BIAS} * \left(1 + \frac{R_{OK2}}{R_{OK1}}\right) \\ V_{BAT_{OKHYST}} = V_{BIAS} * \left(1 + \frac{R_{OK2} + R_{OK3}}{R_{OK1}}\right) \\ R_{ok_1} + R_{ok_2} + R_{ok_3} = 13 \text{ M}\Omega \end{cases}$$

- $R_{OK1} = \frac{V_{BIAS} * (R_{OK1} + R_{OK2} + R_{OK3})}{V_{BAT_{OKHYST}}} = \frac{1,21 \text{ V} * 13 \text{ M}\Omega}{3,7 \text{ V}} = 4,25 \text{ M}\Omega$
- $R_{OK2} = \left(\frac{V_{BAT_{OK}}}{V_{BIAS}} - 1\right) * R_{OK1} = \left(\frac{2,9 \text{ V}}{1,21 \text{ V}} - 1\right) * 4,25 \text{ M}\Omega = 6 \text{ M}\Omega$
- $R_{OK3} = 13\text{M}\Omega - 6\text{M}\Omega - 4,25\text{M}\Omega = 2,75 \text{ M}\Omega$

Se han aproximado los valores a los más cercanos que se comercializan para escoger las resistencias.

La salida del sistema es VSTOR en ella se conectan dos condensadores en paralelo para aguantar la tensión a salida, impidiendo así que caiga de nuevo en *coldstart* mientras esta activo, el C4

hace la función de un condensador de bypass actuando ante perturbaciones indeseadas como variaciones de tensión y componentes de alta frecuencia.

Esta salida Vstor estará conectada a la salida de bajo consumo, el jumper E8 se ha colocado como medida preventiva por si se quisiera, aunque no será el caso de saltarse el paso de coldstart conectando a la batería.

2.2.4 Carga red/bus continua

En la figura 18 se muestra el esquema completo del circuito que forma el sistema de carga por medio de la red, se va a llevar a cabo una descripción de los pines y sus funciones para entender su propósito.

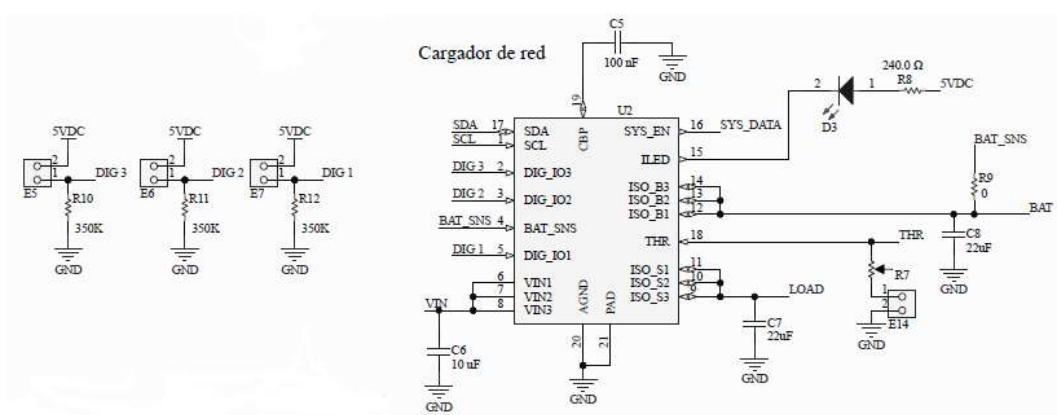


Figura 18.Esquemático Cargador de red

Siguiendo el camino de la alimentación que vendría del bus o de la red colocamos un condensador C6 para mantener la entrada estable y entra al micro por las tres entradas de VIN, a su vez los 3 pines digitales comentados antes los vamos a colocar con tres jumper y resistencias de *pull-down* para conectarlos al micro con valor LOW o HIGH.

Pines	LOW	HIGH
DIG1	$I_{IN}=100\text{ mA}$	$I_{IN}=500\text{ mA}$
DIG2	Límite de DIG1	$I_{IN}=1500\text{ mA}$
DIG3	CARGA OFF	CARGA ON

En principio los tres estarían siempre conectados dando lugar a la mayor corriente de entrada y carga continua al caer por debajo de los valores umbrales.

La entrada BAT_SNS irá conectado al positivo de la batería para detectar su voltaje.

La comunicación I2C se realizará a través de los pines SDA y SCL, en este proyecto no se ha realizado ninguna implementación de cara a esta comunicación.

El condensador C5 hace de función de Bypass actuando ante perturbaciones indeseadas como variaciones de tensión y componentes de alta frecuencia.

La salida ILED actúa en bajo cuando estamos en proceso de carga indicando así con el D3 el estado del cargador, otros casos de que se encienda es que parpadee por sobre temperatura.

La salida ISO_B sería por la que se va a cargar la batería y la ISO_S la salida del sistema conectada a la salida de bajo consumo.

El pin THR sirve para medir la temperatura de la batería, a través de una resistencia incorporada de protección térmica, y desconectar la carga si esta sobrepasa unos límites, si no dispones de la resistencia térmica en tu batería se debe conectar un potenciómetro de 10 KΩ a masa simulando así una batería <0 °C teniendo la carga deshabilitada y esperando a la activación por el pin DIG_03, esta será la configuración que nosotros adoptemos aun así se ha dejado un jumper E14 por si se conecta una batería que disponga de esta resistencia.

El pin SYS_EN actúa como salida de los registros indicando una serie de estados del cargador.

2.2.5 Salidas y puntos de test

Para realizar las labores de test y para la conexión de un posible *datalogger* se han habilitado una serie de pines para poder medir con el osciloscopio y ver el estado del dispositivo en la figura 19 se muestran los valores que podremos conocer.

Una de las salidas de nuestro sistema de alimentación será una para bajo consumo, a través del conector J7 y con un circuito de medida *shunt* a través de la R14 y el pin E12 como se muestra en la figura 20.

La salida de alto consumo se conectará directamente a la batería como se muestra en la figura 21.

PINES	
VIN	1 — VIN
LOAD	1 — LOAD
BAT	1 — BAT
SOLAR	1 — VIN/DC
SDA	1 — SDA
SCL	1 — SCL
DATA	1 — SYS_DATA
BAT_OK	1 — BAT_OK
THR	1 — THR

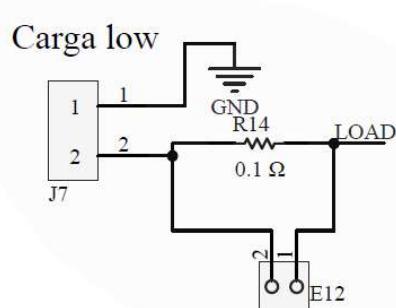


Figura 20.Salida carga LOW

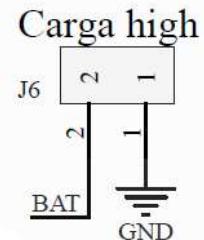


Figura 21.Salida carga HIGH

Figura 19.Puntos de test

2.3 Diseño y fabricación de la PCB

El diseño de la PCB se ha desarrollado siguiendo las normas que se muestran en el anexo 15 para producir una de clase de dificultad 3 permitiendo así mayor comodidad a la hora de soldar.

La placa está fabricada en una PCB de doble cara al tener componentes SMD y THD facilitando así su ruteado, se ha fabricado con taladro metalizado, además se han colocado planos de masa para las tensiones alterna y continua, así como un plano para la salida de alto consumo.

Se ha fabricado con un espesor de 2 onzas debido al manejo de altas corrientes a la salida derivando esto también en aumento de la temperatura en esas pistas.

Para la elección del tamaño de las pistas en nuestra PCB nos hemos basado en la norma UNE 20-621-84/3 figura 22.

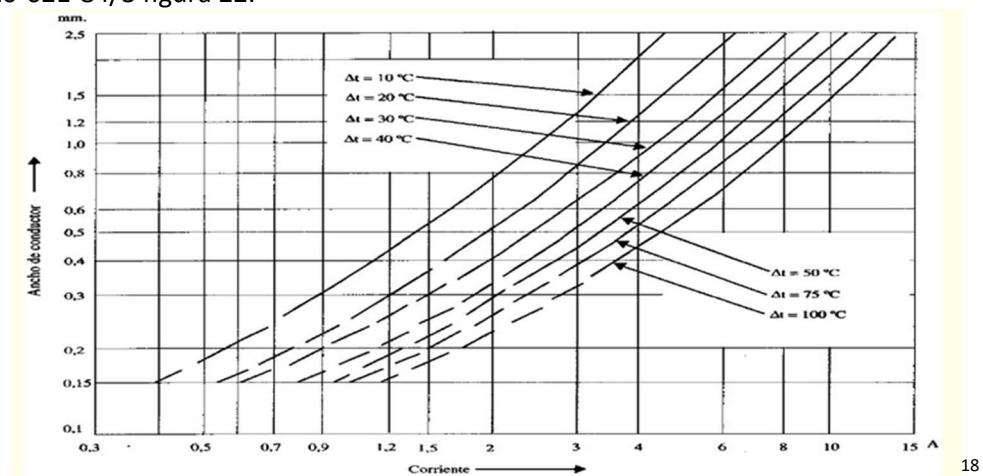


Figura 22.Ancho de pistas PCB

Se ha separado la alterna de la continua aislando los componentes de alterna a la izquierda de la placa y colocando por la cara top y bottom un plano de masa que podría ir conectado a la masa de red a través de uno de los tornillos de sujeción.

En la parte de continua se ha colocado un plano conectado a masa y separándolo del plano de alterna para evitar interferencias y ruido proveniente de la alta frecuencia, dentro del propio plano de masa se ha colocado un plano que conecta la salida de alto consumo con la batería tanto por la cara top como por la bottom ya que por esas pistas circularían 10 amperios necesitando un ancho de unos 12 mm, con este sistema repartimos la corriente por los dos planos, en el Anexo 2 se encuentran los planos de ruteado de la PCB.

En la figura 23 podemos ver una imagen de la PCB en la que se aprecian las pistas de la cara top, así como los tres planos nombrados anteriormente:

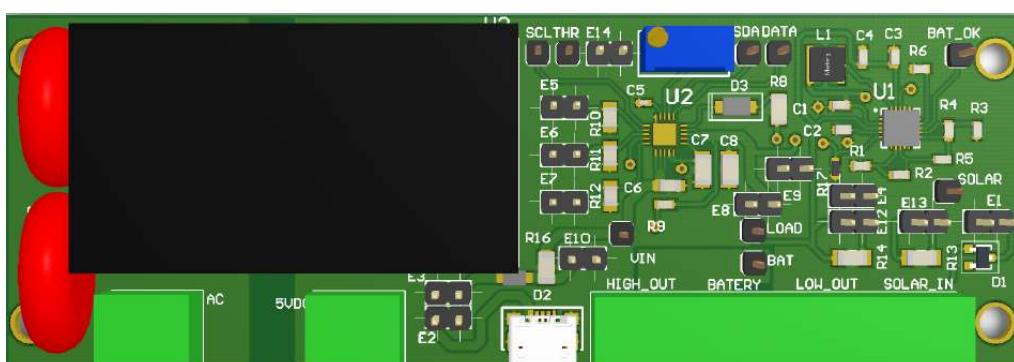


Figura 23.Cara top PCB

¹⁸ http://www.rclibros.es/pdf/cap_KiCad.pdf

Capítulo 3. Diseño de sensor inalámbrico

En este capítulo se realizará el diseño del sensor inalámbrico que se va a implementar para medir temperatura y humedad del ambiente.

Se ha dividido en tres partes para realizar un estudio profundo de cada elemento y de su conjunto.

- Diagrama de bloques: División en bloques del problema y solución a cada uno de ellos
- Esquemático: Representación de los circuitos eléctricos que describen todos los bloques.
- PCB: Implementación del esquema eléctrico a placa con las características propias de una fabricación de PCB algunas como clase de dificultad, numero de caras.

3.1 Diagrama de bloques

A continuación, se muestra un diagrama de bloques en la Figura 24 con los bloques que componen al sistema y seguido se explican en profundidad las elecciones que se han escogido para cada uno de ellos.

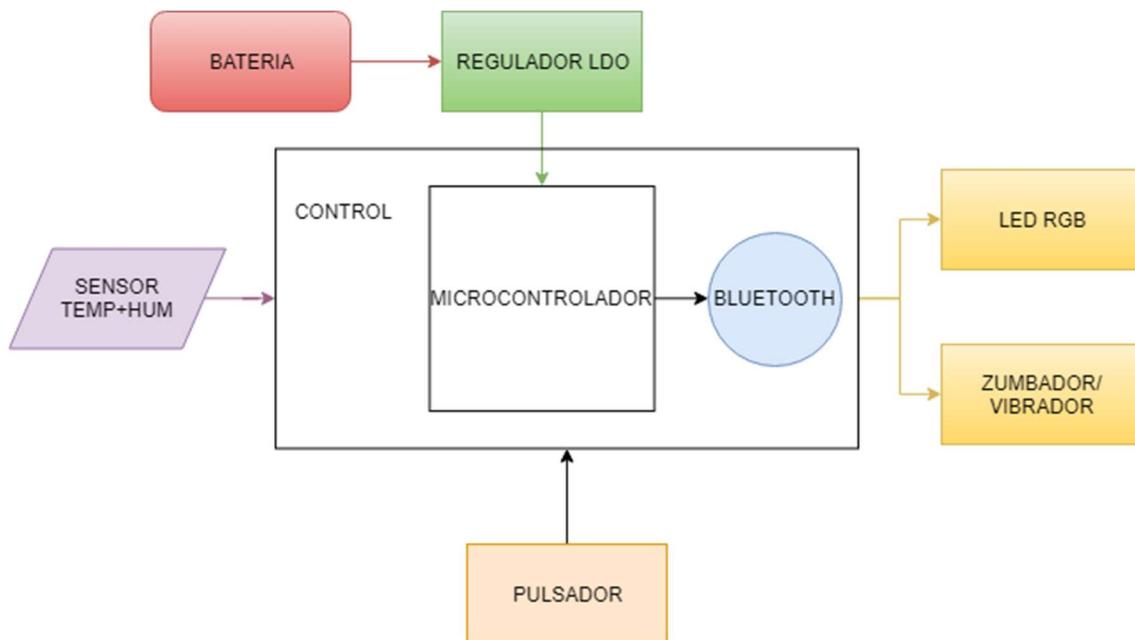


Figura 24. Diagrama de bloques

3.1.1 Batería

Usaremos la batería LiFePO₄.

3.1.2 Regulador LDO

Para alimentar al sensor y al microcontrolador necesitamos una tensión fija de valor menor a la tensión de celda de la batería se ha cogido una de 2,5 V, que la va a suministrar un regulador de tensión este deberá tener un valor bajo de corriente de quiescencia ya que estamos orientando a un uso de bajo consumo para alargar la energía de la batería.

Se ha estudiado la posibilidad de un regulador que ofrezca varias salidas también para poder usar distintos niveles lógicos.

Regulador	Vout (V)	Iq(µA)	Iout(mA)	VDrop(mV)
MIC5356	1,8 y 2,5	38	500	350
MIC5212	2,2 y 3,3	225	500	350
MCP1700	2,5	1,6	250	178
MCP1711T	2,5	0,6	150	178

El de menor Iq es el MCP1711T que es el que se va a escoger ya que los de varios niveles de voltaje tienen corrientes de quiescencia del orden de 100 veces más.

3.1.3 Controlador

Se va a trabajar con el módulo de Cypress 202007 y con la tarjeta que lo monta EVAL202007-1 como el de la figura 25.



19

Figura 25.Cyble 202007

El micro dispone [12] de bluetooth de bajo consumo, soporte para ADC, timers, PWM y protocolos de comunicación I²C, UART, SPI.

Rango de bluetooth 400 metros sin ningún obstáculo con una potencia de transmisión de +7.5 dBm.

Procesador de 32-bit, con 256 KB de memoria flash y 32 KB de memoria SRAM.

ADC con registros de 12 bits, 4 módulos para timer o PWM.

Alimentación entre 1,8 V y 5,5 V.

Unos consumos muy bajos para su modo Stop 20 nA, modo Deep-Sleep 1,5µA, modo hibernación 150 nA.

Se puede programar con el programa PSoC Creator²⁰ de la compañía Cypress , ofrece un entorno grafico para configurar un esquemático, así como asignar los pines y luego uno de programación en lenguaje C del microcontrolador con mucha variedad de ejemplos.

¹⁹ <https://www.digikey.com/product-detail/en/cypress-semiconductor-corp/CYBLE-212006-01/428-4019-ND/7063418>

²⁰ <http://www.cypress.com/sdc>

3.1.4 Sensor de temperatura y humedad

El sensor escogido es el BME680 [10] que es uno de los más usados en las aplicaciones móviles y wearables²¹, ofrece medidas de temperatura, humedad, presión y nivel de gases a través de la comunicación I²C o SPI.



22

Figura 26.BME680

El sensor se alimenta de 1.7 a 3.6 V.

El rango de trabajo del micro es de -40 a 85°C, 0-100% r.H y 300-1100 hPa.

Los consumos varían según las medidas que queramos tomar:

Modo	Consumo(µA)
Sleep	0,15
Standby	0,29
Humedad	340
Temperatura	350
Presión	714

A continuación, se muestran unas tablas con las resoluciones de las medidas a tomar:

Medida	Resolución	Ruido en la medida
Gas	0,08%	1,5%
Humedad	±3% r.H.	0,01% r.H.
Presión	±0,12 hPa	0,2 Pa
Temperatura	±0,5°C(25°C)±1,0°C(0-65°C)	0,005°C

Para nuestra aplicación usaremos la comunicación I²C con el módulo de Cypress para la obtención de datos con la adaptación de las librerías del fabricante.

3.1.5 Salidas

Los datos se enviarán por bluetooth a un dispositivo remoto desde el que ver el estado, se han incorporado un led RGB y un zumbador para emitir señales tanto acústicas como luminosas para comunicación con el usuario que este en la zona donde esté ubicado el sensor.

²¹ Wearable: Dispositivo electrónico que se incorpora de alguna forma a nuestro cuerpo interactuando de forma continua con el usuario y con los otros dispositivos.

²² https://www.bosch-sensortec.com/bst/applicationssolutions/iotsmarthome/overview_iot-smarthome

3.2 Esquemático

En el esquemático podemos ver la representación de los bloques descritos con anterioridad junto con algunos sistemas de medida y configuración, el esquemático completo se encuentra en Anexos 3.

En la figura 27 podemos observar la alimentación del sistema:

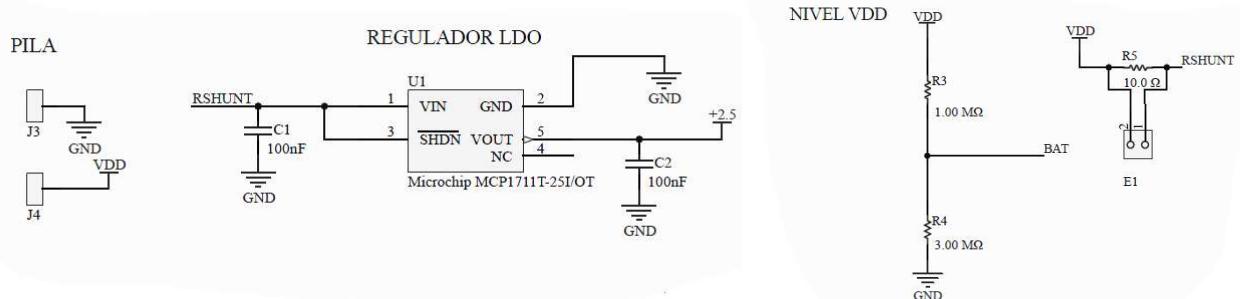


Figura 27.Alimentación Cyble_Kit

Los conectores J3 y J4 son conectores de una batería AA la cual podríamos cargar con nuestro sistema de alimentación o conectar nuestra batería directamente con unas pinzas a los conectores.

Se ha incorporado un sistema de medida Shunt para saber el consumo de la batería y un divisor resistivo que irá al ADC del Cyble para saber el estado del voltaje de la celda.

Junto a todo esto se encuentra el regulador LDO con condensadores a la entrada y salida para aguantar los niveles de voltaje.

En la figura 28 se muestra los dos conectores J1 y J2 que irán en módulo 202007-EVAL y las patillas que se van a emplear, XRES con su resistencia *pull-up* para el Reset y el j5 y j6 son una huella de dos posiciones para una resistencia SMD 0805 de 0 Ω para configurar los pines de comunicación i²C para dos tipos de módulos Cypress.

CONECTORES CYBLE

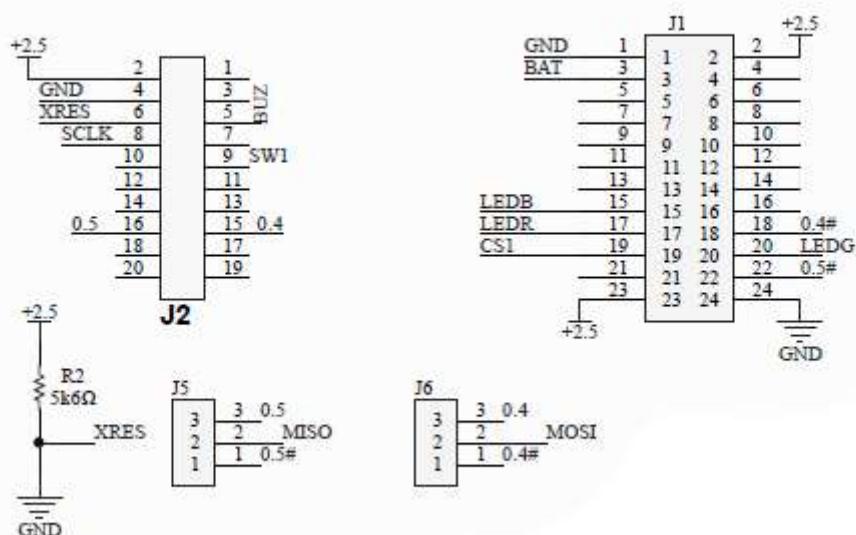


Figura 28.Conexión Modulo PCB

En la figura 29 aparecen las salidas y entradas al micro, describiendo de izquierda a derecha

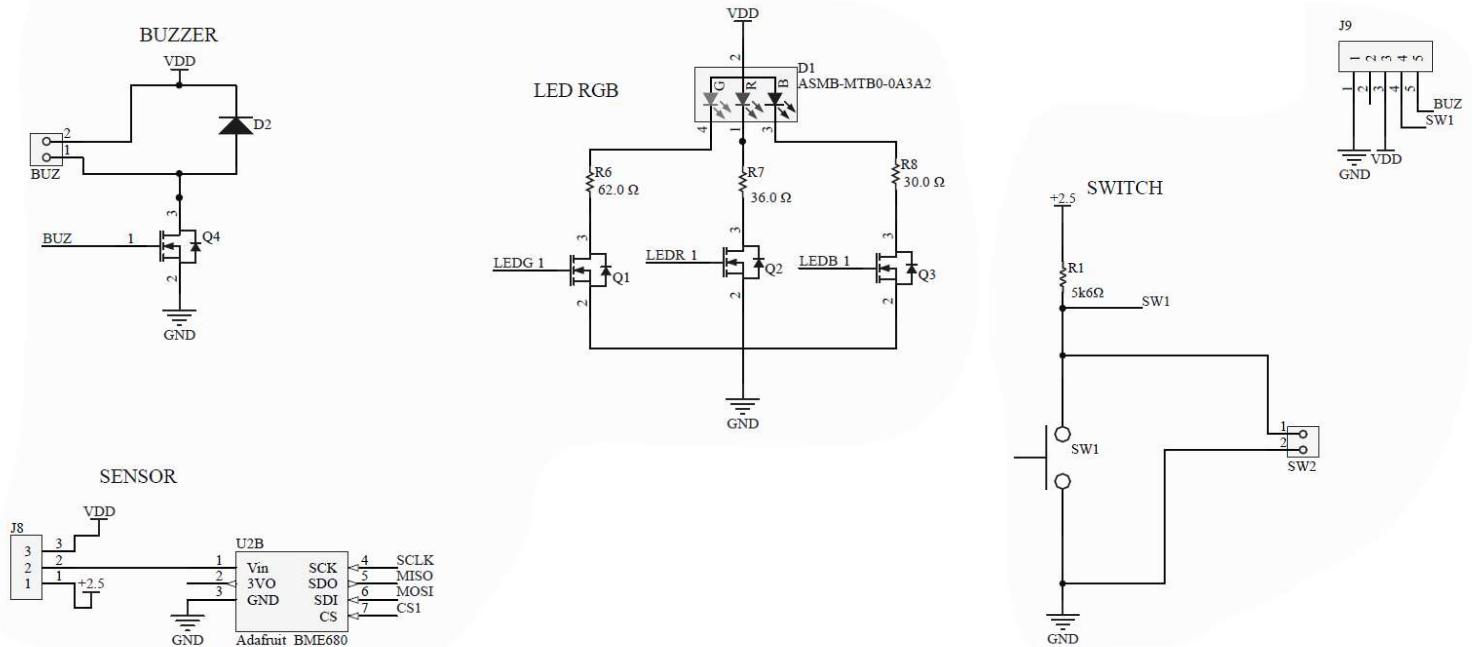


Figura 29. Entradas y salidas Cyble_Kit

Tenemos un zumbador que ira conectado directamente a la batería, ya que las salidas del micro dan niveles muy bajos de corriente del orden de 0,5 mA, este se activara por medio de un transistor Nmos seleccionado en relación al valor de VGS que se quiere vencer con el nivel que sale del micro, se ha incorporado un diodo en antiparalelo para proteger el zumbador de las tensiones inversas.

Justo debajo tenemos el ADAFRUITBME680 [11] con una huella de dos posiciones de resistencia 0805 para elegir si lo alimentamos entre VDD o 2,5 VDC, el resto son sus salidas y entradas conectadas al micro.

En medio está el LEDRGB también conectado a la batería y controlado con Nmos además se ha seleccionado en función del color del Led su resistencia para que emita con la intensidad adecuada.

Un pulsador con su resistencia de *pull-up* conectado al nivel lógico de alimentación del micro para evitar problemas de tensiones de entrada, se ha incorporado un conector SW2 por si se quiere poner un pulsador externo a la placa como un ReedSwitch.

El conector J9 se ha colocado por si se quiere sacar un bus externo desde el que ver el nivel de la batería, así como utilizar la entrada del pulsador o la salida del zumbador.

3.3 Diseño y fabricación de la PCB

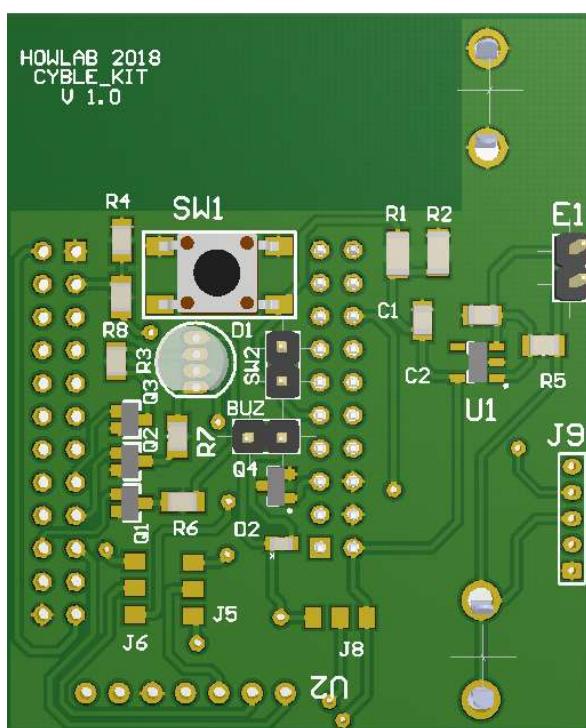
El diseño de la PCB se ha desarrollado siguiendo las normas que se muestran en el anexo 15 para producir una de clase de dificultad 3 permitiendo así mayor comodidad a la hora de soldar.

La placa está fabricada en una PCB de doble cara al tener componentes SMD y THD facilitando así su ruteado, se ha fabricado con taladro metalizado, se han colocado planos de masa para reducir el ruido por acoplamientos inductivos y capacitivos, en la zona donde estaría la antena de bluetooth se ha dejado sin plano para evitar los ruidos.

Al aplicar planos de masa con SMD este hace de jaula de Faraday con los componentes que tiene encima.

En esta placa no vamos a tener problemas por consumo de corriente ya que todo consumo será del orden de mA, por tanto, bastará con una PCB de una onza y no será necesario hacer planos de salida para la corriente.

Para la anchura de las pistas se ha seguido la norma UNE 20-621-84/3 figura 22.



Se ha diseñado para que todos los componentes estén en la cara bottom y en la cara top dejar solo los dos conectores del módulo EVAL-202007 y los conectores de batería.

Los planos con el ruteado de la placa se encuentran en Anexos 4.

Figura 30.3D PCB Bottom

Capítulo 4. Caja 3D

En este capítulo se va a diseñar la caja en la que irá integrado el sistema de alimentación. Para todos los modelos se ha seguido una norma de protección IP66 para garantizar al sistema protección contra el agua que pueda provenir del entorno en el que nos encontremos. Para ello se ha diseñado el encapsulado con juntas tóricas de protección para sellar el interior de la caja, así como pasa muros para poder llevar los cables del sistema al exterior o viceversa. Las cajas han sido desarrolladas en la herramienta Fusion360²³ e imprimidas con una impresora del grupo HOWLAB en material ABS. Para el sistema de alimentación se han planteado dos diseños en función de la entrada que queramos emplear.

4.1. Caja 3D para cargador de red

En este caso vamos a encapsular todo en una caja en la que irá la batería, un soporte para la PCB y la propia placa, todo cerrado por la tapa con la junta de protección y dos pasa muros cubriendo la entrada de alimentación y las salidas de alta y baja carga.

El diseño de la caja incorpora una base con unas aletas que la permitan atornillar a la pared para quedar fija, una tapa atornillada por 4 tornillos que apretara la junta para aislar de agua y resto de suciedad que intente entrar al interior, un soporte en forma de X en el que se sujetara la placa y dejara a la batería registrada en su posición impidiendo que se mueva en el interior de la caja como se muestra en la figura 31.

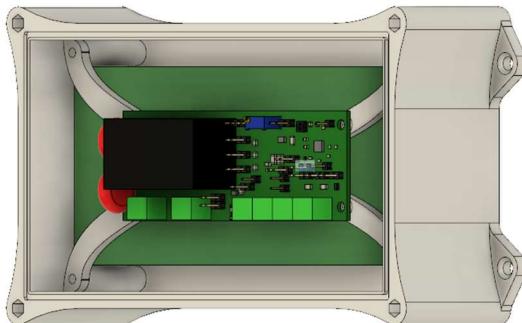
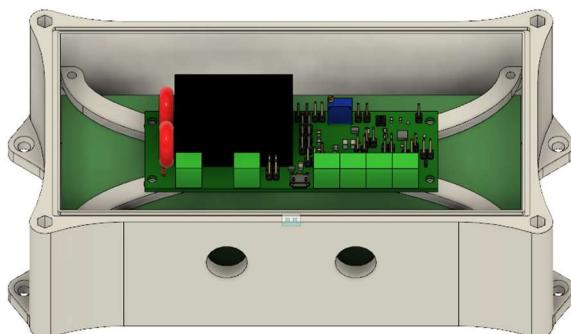


Figura 31.Caja Para cargador de red

²³ <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/students-teachers-educators>



En los dos agujeros que podemos ver en la figura 32 es donde colocaríamos los pasa muros que llevarías los cables de alimentación y las salidas:



24

Figura 32.Pasamuros

4.2. Caja 3D para carga solar

Para este caso se va a dividir la caja en dos partes una caja atornillada a la pared en la que ira la batería y otra que ira unida por una rotula a la primera para la placa y el panel solar.

De esta manera tendremos el panel solar pegado en la caja con la placa de tal forma que el panel este protegido y en la placa no sería necesario soldar las partes del cargador de red, así como las alimentaciones de continua y alterna. La rotula nos ofrece grados de libertad para poder orientar la caja con el panel hacia el mejor foco de luz.



Figura 33.Caja Panel+Bateria

Tendríamos un conjunto como el de la figura 33, formado por una caja con el hueco para pegar el panel solar con varios agujeros para introducir los cables de alimentación al interior donde estaría la placa atornillada en un soporte de 4 tornillos y con un agujero para introducir la rótula²⁵ que une con la caja de la batería que estaría atornillada a la pared, los cables irían de una a otra protegidos por pasamuros como la caja anterior y las dos llevan una junta tórica de 1.5 mm.

²⁴ <https://www.mouser.es/ProductDetail/Phoenix-Contact/1411124?qs=sGAEpiMZZMt5bLT1twLketlmt0jroxRd3JKcupUqjVaQs%2fXZH3qALA%3d%3d>

²⁵ <http://es.farnell.com/huco/373p05-c-f/kit-r-tula-m5-pk2/dp/7060622>

4.3. Caja 3D para el sensor

Para la PCB con el sensor y el módulo *Bluetooth* se ha pensado una caja aparte que pueda ser pegada en la pared del medio que se quiera medir, también con una protección frente a agua de tal forma que volveremos a usar el sistema de junta tórica para cerrar el interior de la caja, para reducir el tamaño se ha colocado solo un tornillo de fijación y se ha colocado una pestaña en la zona inferior que ofrezca un punto de sujeción, lleva un agujero preformado en la tapa para colocar una antena para amplificar la señal del *Bluetooth* si este lo precisa.

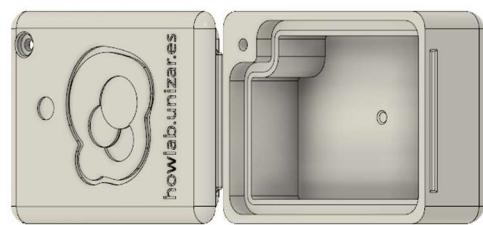


Figura 34.Caja sensor

A continuación, se muestra una imagen con los sistemas integrados en sus cajas 3D.



Figura 35.Sensor y sistema de alimentación

Capítulo 5. Pruebas

En este capítulo se va a testear el funcionamiento de los diseños producidos tanto de alimentación como del sensor de temperatura.

En los Anexos 9 se encontrará también un manual de usuario con la configuración de los pines de las pruebas.

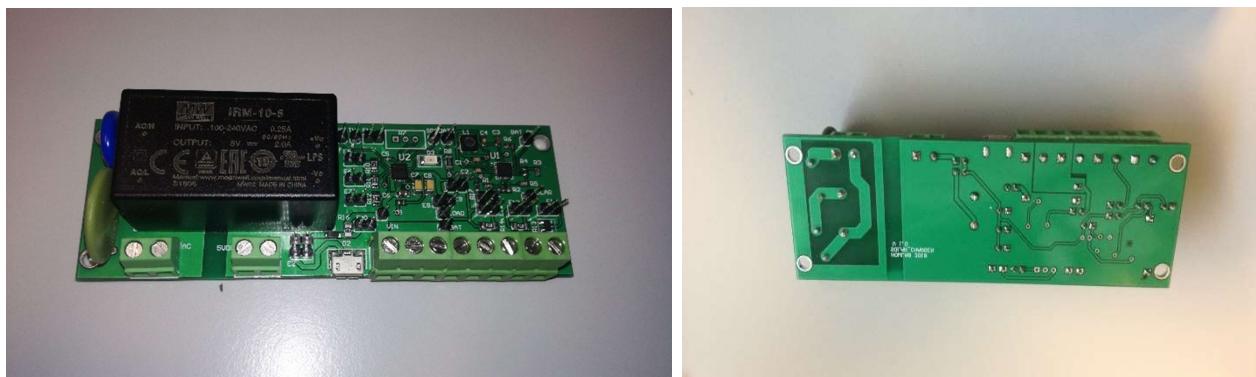


Figura 36. Placa alimentación

En la figura 36 se muestra las dos caras de la PCB fabricada, vamos a proceder a verificar individualmente cada uno de los cargadores.

5.1. Sistema de alimentación ADP5063

Primero vamos a verificar el funcionamiento del ADP5063, lo primero será comprobar que las tensiones de alimentación que llegan al micro son las correctas, para luego analizar las situaciones de carga y descarga de la batería, en los Anexos 11 podemos encontrar las gráficas y los resultados medidos en las pruebas de manera más detallada.

El resultado obtenido ha sido favorable, el sistema era capaz de cargar la batería a la corriente asignada a la vez que suministraba a la salida suficiente potencia para hacer funcionar dispositivos de bajo consumo. La demanda de corriente tanto para la carga como para la batería viene fijada por el límite de entrada. Hemos analizado para las pruebas cinco escenarios de uso contando que dejamos configurado el cargador para dar la máxima carga según los valores de fábrica 700mA:

Modo	Tensión entrada	Tensión salida	Tensión batería	Corriente de carga batería
Sin alimentación	0 V	VBAT	VBAT	0 mA
Alimentado sin batería	5 V	4,2 V	0 V	0 mA
Cargando sin salidas	5 V	3,6 V – 3,4 V	3,6 V – 3,4 V	700 mA
Cargando con salida baja	5 V	3,6 V – 3,4 V	3,6 V – 3,4 V	700 mA- corriente salida
Cargando con salida alta	5 V	3,6 V – 3,4 V	3,6 V – 3,4 V	-(Corriente salida - 700mA)

Este valor de carga se podría modificar cambiando el registro 0x04 llegando hasta corrientes

de carga de 1300 mA.

Para el caso en que solo carguemos la batería y tengamos una salida de bajo consumo de unos 50mA constantes que no será el caso si el dispositivo es de bajo consumo, podremos determinar el tiempo que le costaría a la batería cargarse con condiciones óptimas de operación:

$$T_{carga} = \frac{\text{Capacidad batería}}{\text{Corriente de carga}} + T_{fin} = \frac{20000}{650} + \frac{7,5}{60} = 30,77 + 0,125 = 30,9 \text{ horas}$$

Este cargador dispone de la capacidad de cargar otro tipo de baterías bastaría con cambiar los registros del micro que tienen que ver con la tensión de carga, la tensión mínima de celda, la tensión de arranque de carga, etc. Por ejemplo, el registro 0X03 que viene por defecto 000101 para cargar hasta llegar a 3,6 V, si lo cambiamos a 011111 fijaríamos una tensión de fin de 4,2 V propia de las celdas de litio.

5.2. Sistema de alimentación BQ25505

Para el cargador de *harvester* solar se ha procedido de la misma manera que en el caso anterior, se ha verificado primero los niveles captados por el panel para conectarlo al micro posteriormente.

Durante este estudio se ha realizado distintas pruebas tanto a cambios de iluminación como al uso de dos paneles distintos para observar la energía extraída en cada caso, en los anexos 10 podemos encontrar las gráficas y medidas realizadas, así como fotos con los distintos entornos en los que se han tomado los datos.

Con el panel de exteriores AM5608CA [9] se obtienen los siguientes datos:

Entorno	Lux	P _{SOLAR}	P _{VSTOR}	I _{BAT}	P _{BAT}	η (%)
Luz fluorescente	601	575 µW	129 µW	115 µA	379 µW	88,35
Luz natural	335	294 µW	129 µW	33 µA	108 µW	80,91
Luz solar directa	21535	44 mW	144 µW	11,1 mA	39,6 mW	90,0

Se ve pues que este tipo de paneles tiene su pico de rendimiento en zonas con luz solar directa, aunque con la luz fluorescente que sería la que encontraríamos en la zona de trabajo también somos capaces de extraer energía del entorno que podría cubrir una salida de consumos del orden de µA o bien darnos la posibilidad de ir recuperando la batería en intervalos de ausencia de consumo.

Como se puede apreciar en el anexo en condiciones de iluminación baja no somos capaces de extraer suficiente energía para vencer la barrera de cargador.

Con el panel de interiores AM1815CA se obtienen los siguientes datos:

Entorno	Lux	P _{SOLAR}	P _{VSTOR}	I _{BAT}	P _{BAT}	η (%)
Luz fluorescente	450	392 µW	129 µW	70 µA	231 µW	91,8
Luz natural	610	410 µW	129 µW	76 µA	250 µW	92,43
Luz fluorescente	50	29 µW	-	6 µA	19,5 µW	68,3
Luz fluorescente	200	160 µW	-	37 µA	122 µW	76,3

Con el panel de interiores AM1816CA se obtienen los siguientes datos:

Entorno	Lux	P_{SOLAR}	P_{VSTOR}	I_{BAT}	P_{BAT}	$\eta (%)$
Luz fluorescente	500	650 μW	129 μW	141 μA	465,3 μW	93,27
Luz natural	610	775 μW	129 μW	186 μA	613,8 μW	95,2
Luz fluorescente	50	61 μW	-	14 μA	46,2 μW	75,7
Luz fluorescente	200	260 μW	-	63 μA	207,9 μW	79,9

En relación al panel de interiores, está más optimizado para niveles bajos de iluminación haciéndolo el candidato perfecto para nuestra aplicación, para las pruebas se ha tenido en cuenta la orientación del panel para observar el comportamiento a distintos niveles de iluminación, existen algunas variaciones entre las pruebas de los de interiores y el de exteriores ya que, debido a cambios en la luz solar ese día entraba más luz por la ventana de la que daba el fluorescente, al final de este capítulo se habla de la energía extraída para los niveles de iluminación propios en el túnel.

Con el AM1816CA somos capaces de doblar la energía captada ya que este es el doble que el anterior como podemos ver en la figura 37.

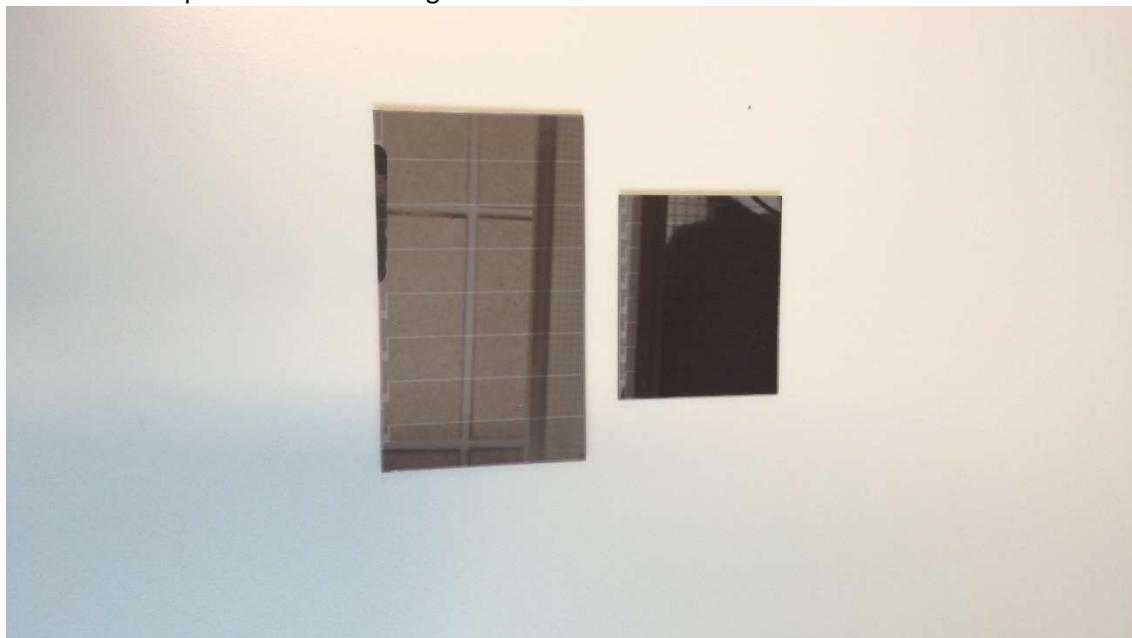


Figura 37. AM1816CA y AM1815CA

Para nuestra aplicación usaremos pues el AM1816CA, vamos a contrastar nuestros resultados con las gráficas del Datasheet del panel [8].

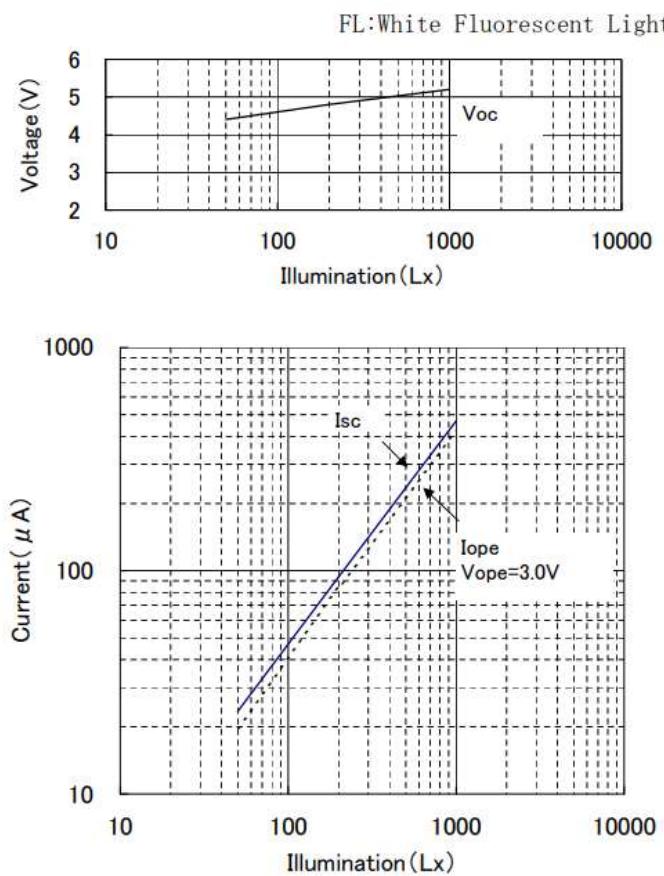


Figura 38. V , I a variación de Lx

Como podemos apreciar para un caso como el nuestro de unos 310 Lx equivale a una tensión de 4.8 V. La medida en abierto de nuestro panel señala una tensión de 4.95 V. Para la corriente podemos observar que teóricamente deberíamos ser capaces de extraer a 521 lx una corriente de 240 μ A y la obtenida fue 260 μ A dando lugar a los 650 μ W extraídos del medio. Por lo tanto, nuestra aplicación sigue las curvas del fabricante. Para casos de iluminación reducida 50 lux y 200 lux. El fabricante obtendría una potencia de 55 μ W y 247 μ W. En nuestra aplicación hemos obtenido 61 μ W y 260 μ W. Serían los valores que tendríamos en entornos de escasa iluminación.

5.3. Sensor BME680

Aquí se muestra la placa con el sensor montado, una batería LiFePO tamaño AA en lugar de la batería grande para tener un producto más pequeño esta batería la podríamos ir cargando con el cargador periódicamente de manera externa o juntar todo y cargarla directamente ahí como se muestra en la figura 39, por último, montamos en su soporte el módulo Cyble 202007, dando lugar al sistema autónomo que hemos estado buscando durante todo el proceso tanto por parte de la alimentación como por la señal.

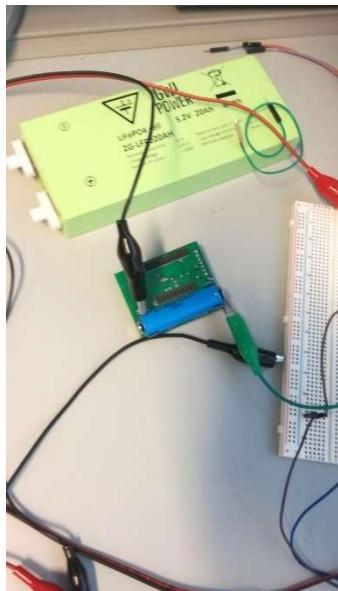


Figura 39.Carga batería Sensor

Estos son los datos que ha reportado el sensor al activarlo en el laboratorio en el teléfono mediante la aplicación CySmart²⁶.

```
Setting sensor settings: 0
Setting power mode
Waiting (ms): 183
t_fine: 140247
Getting sensor data: 0
Humidity (%): 47.73
Pressure (hPa): 989.79
Temperature (°C): 27.39
Gas Resistance: 190251
```

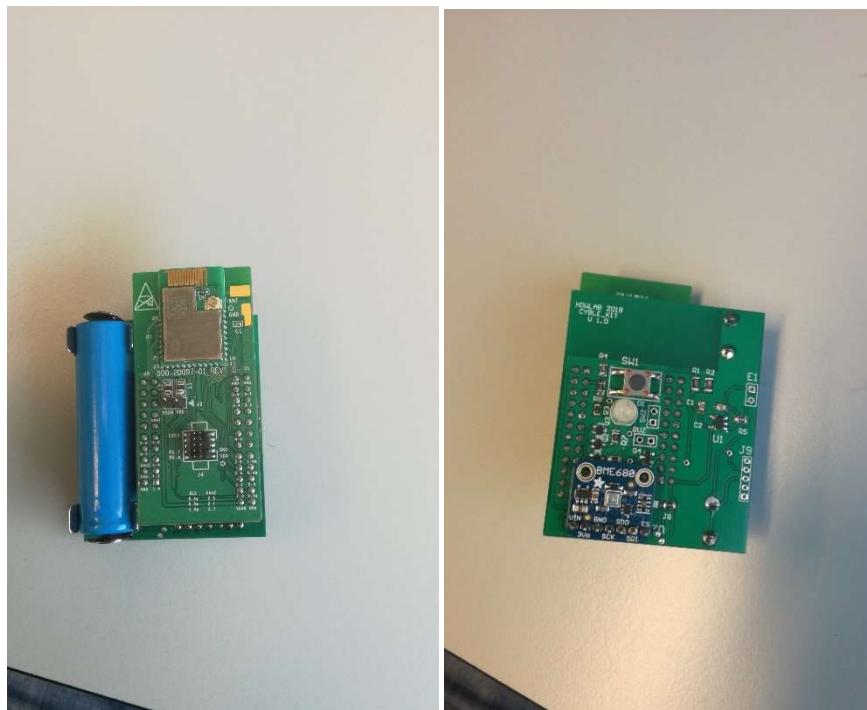


Figura 40.PCB sensor

²⁶ <http://www.cypress.com/documentation/software-and-drivers/cysmart-bluetooth-le-test-and-debug-tool>

Capítulo 6. Conclusiones y Mejoras

Analizando los resultados obtenidos se puede decir que el trabajo ha sido muy satisfactorio ya que todo el esfuerzo y dedicación que se dedicaron al diseño previo y estudio de componentes han hecho que con un prototipo podamos haber verificado todos los objetivos del estudio, con el fin de lograr un producto final se han incorporado en el Anexo 14 una serie de mejoras de cara a los prototipos para hacerlos más funcionales y estandarizarlos para un producto final.

El análisis de las distintas situaciones ha valido para validar un perfil de estudio dentro de unos valores de iluminación y permitir conocer que rendimiento podemos sacar de estas fuentes de *harvesting* para posibles usos del sistema en distintos entornos.

Se han adquirido muchos conocimientos a la hora de extraer información de los *Datasheet* de componentes y buscar en los distribuidores, para poder hacer tanto un diseño completo como una búsqueda lo más metódica posible.

Sumando todo lo aprendido en búsqueda diseño y fabricación de prototipos hay que sumarle la lección de diseño 3D que hace que puedas ver tu prototipo como un producto final que podría existir siendo además otra rama de conocimiento que en el grado hemos dejado más a un lado para centrarnos en las “tripas” del producto.

En la parte del firmware se habría querido introducirse más ya que es un tema muy relevante para el futuro ya que conocer las comunicaciones entre sensores y micro es muy importante y desempeña una buena parte de la elección del sensor, por falta de tiempo se ha llevado a cabo solo un análisis profundo del funcionamiento del sensor y las librerías que lo componen usando una aplicación ya programada para probarlo.

A nivel personal creo que este trabajo me ha hecho crecer como ingeniero adquiriendo conocimientos nuevos y aplicando lo aprendido durante el grado para resolver los distintos problemas que se planteaban.



Figura 41. Prototipos

Bibliografía

Estado del Arte

- [1] *Energy Harvesting*, https://www.mouser.es/applications/energy_harvesting/
- [2] Dale K. Kotter, W. Dennis Slafer, Steven D. Novack, Patrick Pinhero, 2008, SOLAR NANTENNA ELECTROMAGNETIC COLLECTORS
- [3] Maxim Integrates, 2012, APPLICATION NOTE 5259: Energy Harvesting Systems Power the Powerless

Datasheet

- [4] Texas Instrument BQ25505, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25505.pdf>
- [5] Analog Devices ADP5063, <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADP5063.pdf>
- [6] Batería LiFePO₄, <https://www.ev-power.eu/docs/web/2014/GWL-ZG-LFP020AH-Spec.pdf>
- [7] Panel de interiores AM1815, <http://www.farnell.com/datasheets/87124.pdf>
- [8] Panel de interiores AM1816, https://www.mouser.es/datasheet/2/315/panasonic_AM-1816CA-1196985.pdf
- [9] Panel de exteriores AM5608, <https://www.mouser.com/ds/2/315/EP120B-775610.pdf>
- [10] Sensor BME680, <https://www.mouser.com/datasheet/2/783/BST-BME680-DS001-00-1221303.pdf>
- [11] Adafruit BME680, <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bme680-humidity-temperature-barometric-pressure-voc-gas.pdf>
- [12] Cyble 202007,212006, <http://www.cypress.com/file/318881/download>