



UNIVERSIDAD DE CANTABRIA
FACULTAD DE CIENCIAS



INSTITUTO DE FÍSICA DE CANTABRIA

Trabajo de Fin de Máster

**ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA HW/SW DE TOMA DE DATOS
MEDIOAMBIENTALES Y MONITORIZACIÓN
INALÁMBRICA**

**(Study and implementation of a HW/SW
system for environmental data collection and
wireless monitoring)**

Para acceder al Título de

Máster en Computación

Autor: Jose Ángel Juárez Crespo
Director: Jesús E. Marco de Lucas
07 - 2012

MÁSTER EN COMPUTACIÓN

ACTA DE CALIFICACIÓN

Estudiante (nombre y apellidos):	JOSE ÁNGEL JUÁREZ CRESPO
Director/es del Trabajo de Fin de Máster (nombre y apellidos):	JESÚS E. MARCO DE LUCAS
Título:	ESTUDIO E IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA HW/SW DE TOMA DE DATOS MEDIOAMBIENTALES Y MONITORIZACIÓN INALÁMBRICA
Title:	STUDY AND IMPLEMENTATION OF A HW/SW SYSTEM FOR ENVIRONMENTAL DATA COLLECTION AND WIRELESS MONITORING
Presentado a examen el día:	27 de JULIO de 2012

COMPOSICIÓN DEL TRIBUNAL

Presidente (Apellidos, Nombre):	ALDEA RIVAS, MARIO
Secretario (Apellidos, Nombre):	CAMPOS PLASENCIA, ISABEL
Vocal (Apellidos, Nombre):	FERNÁNDEZ SOLORZANO, VÍCTOR

Este tribunal ha resuelto otorgar la calificación de:

Fdo.: El Presidente	Fdo.: El Secretario
Fdo.: ☐ El Vocal ☐ El Coordinador del máster	Fdo.: El Director del TFM
	Vº Bº del Subdirector – Jefe de Estudios

A mis padres, por haber dedicado vuestra vida al éxito de la de vuestros hijos.

Quiero manifestar mi agradecimiento al Grupo de Computación Avanzada y e-Ciencia y de forma muy especial a mi director de proyecto, el Dr. Jesús Marco, que con sus palabras e ideas transmite el ánimo y la curiosidad por todo tipo de ciencias.

Índice

Prólogo	6
Introducción	7
1. Objetivos, estado del arte y captación de requisitos	9
1.1 Objetivos del proyecto	9
1.2 Estado del arte	10
1.3 Captación de requisitos	12
1.3.1 Funcionalidades electrónicas	12
1.3.2 Iteración con el usuario final	14
2. Suministro eléctrico y comunicación	15
2.1 Baterías de ion de litio (Li-ion)	15
2.2 Panel solar fotovoltaico	16
2.3 Otras fuentes de alimentación alternativa	18
2.4 Estándar Bluetooth de comunicación por radio	19
3. Diseño electrónico	20
3.1 La etapa de alimentación	21
3.1.1 Subetapa de administración energética	21
3.1.2 Subetapa de regulación de la señal de entrada	27
3.1.3 Subetapas de conversión-regulación de la señal de salida	30
3.2 La etapa de procesado	33
3.3 La etapa de grabación y test	36
3.4 La etapa o interfaz de comunicación externa	37
3.5 La etapa de muestreo analógico	39
3.6 La etapa de muestreo digital	40
3.7 Conclusiones finales sobre el diseño electrónico	41
4. Diseño y fabricación de la PCB e integridad de señal	42
4.1 Diseño de la PCB	42

4.2 Integridad de señal	44
4.3 Fabricación de la PCB	46
5. Integración electrónica de sensores. Dos casos de uso	49
5.1 Integración de un sensor a través de I2C	49
5.2 Integración de un sensor con salida analógica	51
6. Generación de Firmware	52
7. Monitorización inalámbrica	57
8. Explotación	60
8.1 Consumo	60
8.2 Alimentación con paneles solares y autonomía eléctrica	61
8.3 Coste	63
Conclusiones y líneas futuras	64
Bibliografía	65

Prólogo

En la actualidad tenemos muy presente que la parametrización de variables medioambientales permite al ser humano, ser capaz de concebir soluciones estratégicas para un mejor aprovechamiento de los recursos naturales, sin poner en peligro el origen del que proceden. En las últimas décadas, el hombre se ha empezado a preocupar por diversos fenómenos que afectan en mayor o menor medida al medio en el que vive, a otros seres vivos y a sí mismo. El aumento de la producción de gases de efecto invernadero procedentes del rápido crecimiento de la industria en el último siglo, así como el cambio en las costumbres de las personas han provocado un aumento del calentamiento global derivando en toda clase de problemas medioambientales desde la extinción de especies hasta el cambio de las condiciones climáticas estacionales.

Aunque el desarrollo tecnológico en los últimos doscientos años es parte del problema, cada vez nos concienciamos más de que también es parte de la solución. La tecnología se reinventa a si misma cada día, desembocando en el desarrollo de nuevas herramientas que nos permiten hacer un control más exhaustivo de las variables medioambientales que condicionan nuestro planeta, nuestra vida y la del resto de seres vivos que nos rodean. Esto nos está permitiendo realizar estimaciones que desemboquen en planes de prevención, implementar nuevos métodos de trabajo y, en definitiva concienciar, que las costumbres que nos están llevando al desastre pueden ser cambiadas y que la tecnología, que a priori puede parecer el principal enemigo, no deja de ser un producto de nuestro intelecto que puede cambiarse, mejorarse, auto-sostenerse y aprovecharse en pos de un mundo mejor y más habitable.

El Máster en Computación de la Universidad de Cantabria me ha dado la oportunidad de adquirir nuevos y más avanzados conocimientos sobre dos campos que especialmente me apasionan como son la electrónica y la informática. Ambas ciencias caminan cada vez más juntas de forma que en la actualidad es casi impensable la una sin la otra. En este proyecto se ponen de manifiesto muchos de los conocimientos adquiridos en el máster, aunque todos podrían aplicarse en uno u otro sentido.

Introducción

El presente proyecto pretende aportar su grano de arena al ámbito de la vigilancia medioambiental haciendo participe al ciudadano de a pie. Si bien es cierto que en el mercado existen diversos productos capaces de realizar la monitorización de diversos parámetros medioambientales o de otra índole, son pocos aquellos en los que la predisposición y la participación activa del ser humano son claves para la obtención del dato.

Existe una gran cantidad de variables medioambientales que resultan de interés para científicos, educadores y el público en general; algunas son tomadas directamente del aire como la temperatura, la humedad o la concentración de diversos gases como: carbono, oxígeno, ozono, metano, sulfuros, etc., otras tomadas del agua como: nivel de agua, pH, conductividad, concentraciones de fosfatos, carbonatos, nitratos, algas microscópicas, etc., e incluso las tomadas sobre seres vivos como: temperatura corporal, localización geográfica, velocidad, etc.

En este contexto se enmarca la iniciativa ESFRI europea LifeWatch [1], que involucra a más de diez países europeos, en la que España participa de forma relevante, y en la que el IFCA ha empezado a colaborar recientemente. LifeWatch pretende ser una Infraestructura distribuida de referencia mundial para la protección, gestión y uso sostenible de la biodiversidad. Actualmente en la fase preparatoria, LifeWatch construirá la Infraestructura de e-Ciencia y Tecnología de Investigación para Datos y Observatorios Relacionados con la Biodiversidad y que reunirá entre otros: una red de observatorios marinos, terrestres y de agua dulce, con un punto de acceso único y abierto e instalaciones de computación en laboratorios virtuales con herramientas analíticas.

Esta infraestructura puede tener interés científico/tecnológico en relación al eje de instrumentación. LifeWatch necesitará redes TIC para la generación, procesado y almacenamiento de datos, y componentes *in situ*, para la monitorización y adquisición de datos relacionados con biodiversidad (sensores). En este último punto podemos enmarcar el presente proyecto, que pretende dar un primer paso, un ejemplo propio sobre integración de sensores.

El objetivo final del proyecto, es la implementación de un dispositivo electrónico libre (open hardware) y económico, de captura de variables medioambientales, que dé la posibilidad de integrar diferentes y diversos sensores y cuya monitorización pueda realizarse de forma inalámbrica por el usuario final. A su vez, ha de poder ser alimentado a través de algún tipo de energía renovable con el fin de ampliar las zonas de instalación. En conclusión, un dispositivo de bajo coste y autosuficiente, que permita implementar un acceso a datos sin restricciones para todo aquel que lo desee.

Para ver el proyecto de forma estructurada, se dividirá en varias etapas bien diferenciadas que nos permitan entender y organizar el trabajo de forma eficiente y que más adelante, se describirán con detalle en todos sus ámbitos y con un mayor o menor

grado de profundidad, dado que se trata de un proyecto tecnológico. Se tratarán los siguientes puntos:

1. Objetivos, estado del arte y captación de requisitos iniciales tales como: funcionalidades electrónicas básicas, etapas de alimentación y procesado, interfaces de comunicación disponibles tanto entre componentes como hacia el exterior. Alimentación eléctrica. Posibles modos de explotación de datos de cara al usuario final.
2. Estudio inicial de elementos clave: Suministro y almacenamiento eléctrico. Fuentes externas de carga. Uso de energías renovables para su implantación en lugares sin suministro eléctrico. Estándar Bluetooth de comunicación por radio.
3. Diseño electrónico de las etapas que componen el circuito electrónico y que lleven a la consecución de los requisitos inicialmente propuestos. Descripción de las etapas de diseño.
4. Integración de las etapas y fabricación del prototipo mediante técnicas tradicionales de fabricación de PCBs. Descripción de la técnica y materiales utilizados. Integridad de señal de la redes del circuito.
5. Integración e implementación electrónica de sensores. Dos casos de uso.
6. Generación del firmware necesario para la integración de las etapas con el núcleo de procesado procurando el máximo ahorro energético.
7. Monitorización inalámbrica. Caso de uso: generación de software necesario para la explotación de los datos por parte del usuario final, vía dispositivos comunes tales como teléfonos o dispositivos multimedia de uso cotidiano basados en sistemas operativos actuales.

Cabe destacar que el coste y el consumo han sido durante la consecución de este trabajo las principales variables a mejorar, siendo la meta final, un dispositivo auto-sostenible capaz de ofrecer unas buenas relaciones calidad/coste y consumo/empleabilidad. Procurando en todo momento que los datos ofrecidos tengan una calidad acorde a la finalidad del proyecto y a los recursos empleados para su consecución.

8. Explotación: estimación del consumo y autonomía eléctrica, alimentación con paneles solares y estimación del coste.

Para finalizar, el trabajo desembocará en una serie de conclusiones derivadas de todas las etapas anteriores procurando ser autocrítico en todas ellas. Así mismo se indicarán propuestas de mejora derivadas de los resultados obtenidos y de la experiencia adquirida durante todo este tiempo.

1. Objetivos, estado del arte y captación de requisitos.

Inicialmente se comentarán los objetivos pretendidos, ofreciendo al lector un esquema básico de funcionamiento del sistema a implementar, que le ayude a comprender más rápidamente las motivaciones del proyecto.

Seguidamente se comentará de forma breve cuál es el estado del arte en cuanto a sensores inalámbricos se refiere, revisando las principales casas que están desarrollando este tipo de dispositivos en la actualidad y la arquitectura que usan en sus desarrollos.

Finalmente se detallarán los requisitos iniciales y las funcionalidades básicas que más tarde se van a implementar y que funcionaran como eje y objetivo final del proyecto. De este modo partiremos de un esquema de diseño previamente fijado, que ayudará a delimitar el área de trabajo y permitirá reducir las posibilidades del diseño, con el fin de decidir entre la multitud de posibilidades que la electrónica ofrece.

1.1 Objetivos del proyecto.

Podemos imaginar un sistema de adquisición de datos medioambientales en el que la participación ciudadana sea un punto clave del mismo. De este modo, cualquier individuo puede acercarse a un punto de muestreo y capturar datos de forma inalámbrica mediante un dispositivo multimedia común como puede ser un teléfono multimedia, una tablet, etc., y a través de un modo de comunicación estandarizado y comúnmente distribuido en este tipo de dispositivos, como es bluetooth. El sistema ha de ser autosostenible, ya que puede estar localizado en zonas donde la alimentación eléctrica tradicional no sea posible. Por ello, ha de poder hacer uso de energías renovables e incluir acumuladores de energía.

El principal objetivo de este proyecto es el desarrollo de un prototipo electrónico de bajo coste, capaz de captar diversas variables medioambientales comunes de interés para la mayoría de ciudadanos [Figura 1.1].



Figura 1.1

Este dispositivo ha de poder establecer canales de comunicación bluetooth con el fin de servir estos datos al ciudadano de a pie; ha de estar preparado para ser alimentado mediante energía solar, como ejemplo de energía renovable, con el fin de poder ser situado en áreas de difícil acceso; y ha de poder almacenar la energía, para poder ser usada en momentos en los que ésta escasee. Por todo ello, el precio y el consumo serán las principales restricciones y variables a controlar en todo momento

Se pretende implementar un producto original desde cero, que no sea una simple integración de productos existentes ya acabados y que permita ofrecerlo libremente (open hardware) a la sociedad. Cabe destacar entonces, que se ha de pasar por todas sus fases, desde el estudio de requisitos hasta la implementación física del circuito final, pasando por el diseño y optimización de los módulos del mismo, la relación calidad/coste, el consumo eléctrico y su funcionalidad final de cara al usuario.

1.2 Estado del arte.

En 1998 Crossbow Technologies [2], el mayor fabricante de nodos de sensores de la época, uno de los más importantes actualmente, y mayor proveedor dentro de los principales grupos de investigación, puso en el mercado el primer modelo de nodo sensor o “mote”, iniciando así una evolución que continúa actualmente. Con estos nodos como hardware de referencia, la Universidad de Berkeley tiene la iniciativa más importante y la que más repercusión ha tenido: el desarrollo en 2003 de un sistema operativo capaz de gestionar los recursos de los motes y permitir la ejecución de aplicaciones. A este SO se le denominó TinyOS. Probablemente el éxito de este SO se debe a que ofreció una referencia común a los investigadores, de manera que facilitó oportunidades para que otros pudieran trabajar, dando cohesión a las distintas soluciones.

Según el estudio realizado por On World, “Wireless Sensor Networks: Growing Markets, Accelerating Demand” [3], el mercado de redes de sensores inalámbricos está experimentando un alto crecimiento en la demanda, porque cada vez más empresas quieren instalar este tipo de redes. El tiempo da la razón a este estudio que hace una comparativa en profundidad de las arquitecturas de los principales fabricantes de este tipo de dispositivos.

Entre las principales casas que disponen de tecnología para redes de sensores inalámbricos cabe destacar las siguientes:

1. Crossbow: la tecnología desarrollada por esta firma ha estado a la vanguardia de la tecnología de sensores inteligentes durante más de dos décadas. Se trata de una empresa que desarrolla plataformas HW/SW que dan soluciones para las redes de sensores inalámbricos. Entre sus productos de este tipo, podemos encontrar las plataformas: Mica, Mica2, Micaz, Mica2dot, telos, telosb, Iris, Imote2 e ILC2000.
2. BTnode [4]: los módulos fabricados por BTnode fueron desarrollados por el ETH Zurich, conjuntamente por el Computer Engineering and Networks

Laboratory (TIK) y el Research Group for Distributed Systems. Actualmente son usados en dos grandes proyectos de investigación que apoyan la plataforma de desarrollo inicial, estos son NCCS MICs y Smart-Its.

3. Ember [5]: es uno de los promotores de la Zigbee Alliance y las soluciones propuestas por esta empresa cumple la capa física según el estándar IEEE 802.15.4. la tecnología de Ember basada en Zigbee, es la adecuada para aplicaciones de redes de sensores escalables que requieran una implementación en malla de bajo consumo como automatizaciones en edificios, entre otras.
4. Nano-RK [6]: ha desarrollado la plataforma FireFly como plataforma de nodos inalámbricos de bajo consumo y bajo coste, con la idea de dar el mejor soporte en aplicaciones de tiempo real

Las principales arquitecturas usadas por estas y otras casas pueden verse en la siguiente tabla [Tabla 1.1].

Nombre	Casa	µControlador	Transmisor	Memoria de programa y datos	Memoria externa	Programación
EM250	Ember	12MHz XAP2b 16bits	Zigbee	5KB RAM	128K Flash	C
Mica	Crossbow	Atmega103 4MHz 8bits	RFM TR1000 50kbit/s	128+4K RAM	512K Flash	nesC
Mica2	Crossbow	Atmega 128L	Chipcon 868/916 MHz	4K RAM	128K Flash	
Mica2Dot	Crossbow	Atmega 128		4K RAM	128K Flash	
MicaZ	Crossbow	Atmega 128	Zigbee	4K RAM	128 K Flash	nesC
TelosB	Crossbow	MSP430 de TI	Zigbee 250kbit/s	10K RAM	48 K Flash	
IMote	Intel	ARM core 12MHz	Bluetooth con 30m de alcance	64K SRAM	512K Flash	
IMote 1.0	Intel	ARM 7TDMI 48MHz	Bluetooth con 30m de alcance	64K SRAM	512K Flash	
IMote 2.0	Crossbow	ARM 11-400MHz	Zigbee	32MB RAM	32MB Flash	
Iris	Crossbow	Atmega1281	Zigbee	8K RAM	128K Flash	
FireFly	Nano-RK	Atmega 1281	Chipcon CC2420 (Zigbee)	8K RAM	128K Flash ROM, 4K EEPROM	C
BTNode	BTNode	Atmega128L	Bluetooth: Zeevo ZV4002	64+128K RAM	128 K Flash ROM, 4K EEPROM	C
eyesIFXv2.1	BTNode	MSP430F1611 de TI	TDA5250 868MHz	10 KB RAM	48KB Flash	

Tabla 1.1

En la actualidad existen además, plataformas de integración usadas mayoritariamente en el ámbito educativo y de investigación, por ofrecer interfaces sencillas de desarrollo. El principal ejemplo es Arduino [7]. Arduino es una plataforma de hardware libre basada en un microcontrolador Atmel y en un entorno de desarrollo que facilita la electrónica en proyectos multidisciplinarios. Su principal atractivo es disponer de una amplia bibliografía, gran cantidad de librerías, compatibilidad con multitud de lenguajes de programación y con varios módulos de comunicación bluetooth, zigbee, etc.

A nivel nacional, podemos destacar Libelium [8], una spin-off de la Universidad de Zaragoza reconocida con varios premios nacionales e internacionales, que orienta sus desarrollos a la implementación de redes sensoriales inalámbricas, para la monitorización de diversas variables, tanto ambientales como de otra índole.

Finalmente, a pesar del gran futuro de esta tecnología, todavía hay barreras que hacen que muchas empresas no opten por ella. Las más importantes son el consumo y la potencia de transmisión de los nodos, dos variables enfrentadas que en ocasiones hacen difícil la integración de redes de nodos dotados con este tipo de tecnologías.

1.3 Captación de requisitos.

Con el fin de simplificar el diseño electrónico se van a distinguir las etapas necesarias que compondrán el dispositivo final. De este modo, de la forma más esquemática posible, acotaremos la funcionalidad del circuito. Adicionalmente, con el fin de acotar las posibilidades existentes en cuanto a la monitorización y uso del dato por parte del usuario final, se ofrecerá un ejemplo de integración a partir de una plataforma multimedia cotidiana, como es un Smartphone.

1.3.1 Funcionalidades electrónicas.

Atendiendo a la función que va a desempeñar cada una de las etapas del circuito, será necesario elegir en la fase de diseño los componentes necesarios y estudiar el modo de interconexión entre los mismos.

Unidad de alimentación:

Se propone implementar una etapa de alimentación que además administre la carga en una batería de li-ion:

- Se dotará al circuito de un conector micro-USB y de un conector de 2 hilos para conexión de una fuente externa. La alimentación podrá venir por cualquiera de los dos conectores y el uso de uno u otro, dependerá del lugar en el que se vaya a instalar el dispositivo. De este modo el instalador podrá realizar una carga rápida mediante USB (5V y 500mA como máximo) de la batería y por otro lado el circuito podrá ser alimentado con una fuente externa de energía, por ejemplo, paneles solares.
- La intensidad de entrada no será superior a 500mA, siendo este valor el de demanda de intensidad máxima para el caso de una batería completamente descargada y un circuito alimentado a través del conector micro-USB; sin embargo, en el caso de que la fuente no sea capaz de entregar la intensidad demandada por el administrador o repartidor de carga, ha de ser capaz de hacerlo con una corriente de al menos 100mA, realizando una carga más lenta de la batería.
- En el caso de que exista alimentación externa, el administrador de carga alimentará primero el circuito y la corriente sobrante la usará para cargar la batería.
- En el caso de que no exista alimentación externa, el circuito será alimentado por la batería.

- Finalmente, la etapa de alimentación ha de ser capaz de dar tres niveles de tensión al circuito con el fin de alimentar el resto de las etapas. Estos niveles serán 3V y $\pm 5V$.

Unidad de proceso:

Se propone el uso de un microcontrolador cuya función será la de controlar e integrar el resto de las etapas. Además se encargará de gestionar la comunicación con el resto de periféricos así como con el exterior, realizando el trabajo de procesamiento y los cálculos matemáticos necesarios.

- Se usará un microcontrolador de bajo consumo capaz de trabajar a frecuencias relativamente bajas. Del orden de 1 – 32 MHz.
- Proveerá soporte para distintas interfaces de comunicación con dispositivos adyacentes. Estas serán: I2C y USART.
- Será posible la actualización de su firmware de forma externa a través de una interfaz dedicada para tal efecto.
- Podrá ser reiniciado de forma externa.
- La funcionalidad (pines) que no se use, será habilitada en forma de pin hacia el exterior con el fin de no limitar posibles ampliaciones o necesidades futuras.

Unidad de comunicación con el exterior:

Se propone el uso de una interfaz inalámbrica de comunicación con el exterior. Esta unidad ha de ser manejada y controlada en todo momento por el microcontrolador a través de alguna de sus interfaces de comunicación con dispositivos adyacentes.

- Se usará un módulo de radio bluetooth, capaz de comunicarse mediante un puerto USART (TTL de 2 hilos).
- Ha de poder alimentarse con una tensión de, al menos, 3V.
- El módulo de comunicación bluetooth ha de ser capaz de funcionar en modo cliente o servidor, dependiendo del uso final de la electrónica a implementar.
- Ha de ser capaz de funcionar en modo de bajo consumo o de ultra bajo consumo en periodos de inactividad.

Unidades disponibles para la integración de sensores en placa:

Se propone la posibilidad de que se puedan integrar sensores o dispositivos externos a través de diferentes vías.

- Se han de poder integrar sensores u otros dispositivos externos a través de la interfaz de comunicación I2C con el microcontrolador.
- Se han de poder realizar lecturas analógicas de tensión de tal forma que a través de convertidores analógicos/digitales internos al microcontrolador o incorporados a la electrónica de forma externa, estén disponibles para su posterior procesamiento.

- En el caso de señales analógicas se exige una precisión de al menos 16 bits en la conversión a señales digitales.
- Los sensores han de poder acoplarse a la circuitería o placa base mediante conectores, de este modo, la placa dispondrá de sendos conectores hembra para dicha tarea. En el caso de que la integración necesite de algún otro componente electrónico se realizará a parte. Esto se explicará con mayor detalle más adelante.

1.3.2 Interacción con el usuario final.

Con el fin de que el usuario final pueda explotar y/o visualizar los datos generados, el sistema ha de ser capaz de comunicarse con él de un modo al que este acostumbrado. De esta forma, se hace indispensable que el usuario posea las herramientas necesarias para lograr esta tarea de forma sencilla, que no necesite poseer avanzados conocimientos del sistema y que no tenga que adquirir dispositivos adicionales a los que normalmente ya posea.

Esta es la principal razón por la que se ha elegido el estándar de comunicación de radio Bluetooth y no otro que quizá hubiera sido más económico y más sostenible energéticamente, como es Zigbee. Sin embargo, el diseño no es cerrado y podría modificarse fácilmente para adaptarse a otros tipos de tecnologías de comunicación inalámbrica.

Desde hace una década, la inmensa mayoría de la población y desde cada vez más temprano, posee teléfono móvil. Más recientemente, la mayoría de estos son multimedia e incorporan transceptores para comunicación bluetooth. Actualmente además, estos dispositivos poseen sistemas operativos avanzados tales como Android, iOS, Symbian etc. En este trabajo utilizaremos un teléfono multimedia (también llamados Smartphones) con sistema operativo Android, con el fin de generar un ejemplo de integración del sistema y visualización de los datos que aporte. Elegimos Android por tratarse de uno de los sistemas operativos más extendidos, de código completamente abierto y que proporciona las herramientas y librerías necesarias para generar aplicaciones de una forma relativamente sencilla.

En apartados sucesivos de este informe se hablará con detalle del proceso de integración así como de las herramientas utilizadas para llevarlo a cabo. Adicionalmente, se mostrará cómo, de forma sencilla, el usuario puede manejar los datos disponibles y hacer uso de ellos.

2. Suministro eléctrico y comunicación.

Como se deriva de los requisitos iniciales, nos encontramos ante un dispositivo donde la velocidad de procesamiento no será una restricción. Bien es sabido que el consumo de un microcontrolador o microprocesador es proporcional a su frecuencia de trabajo, por lo que podemos utilizar frecuencias bajas para conseguir un mayor ahorro energético.

Sin embargo, otros componentes usados en el diseño poseen un mayor coste energético. El transceptor bluetooth, sin ir más lejos, necesita intensidades relativamente altas en diversas etapas de su funcionamiento, tales como la emisión o recepción de información. La integración de algunos sensores implica también una alimentación relativamente elevada para el tipo de dispositivo que se quiere diseñar. El consumo de los distintos componentes del circuito, así como los métodos usados para lograr una reducción de los mismos, serán tratados en el siguiente capítulo, una vez inmersos en el proceso de diseño.

A continuación se estudiarán los aspectos más importantes de algunos puntos clave del diseño. Por una parte el suministro eléctrico y el almacenamiento de la energía no consumida, con el fin de hacer uso de ella en momentos donde la fuente de alimentación no sea capaz de alimentar el sistema. Por la otra, se hablará del estándar de comunicación bluetooth.

2.1 Baterías de ion de litio (Li-ion)

Comúnmente conocidas como baterías de litio [9], emplean un electrolito, una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre ánodo y cátodo. Las principales ventajas de estas sobre otro tipo de baterías son:

- Una elevada densidad de energía: Acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen [Figura 2.1].
- Poco peso: A igualdad de carga almacenada, son menos pesadas y ocupan menos volumen que las de tipo Ni-MH y mucho menos que las de Ni-Cd y Plomo.
- Gran capacidad de descarga. Algunas baterías de Li-Ion que hay en el mercado, se pueden descargar totalmente en menos de dos minutos.
- Poco espesor: Se presentan en placas rectangulares, con menos de 5 mm de espesor. Esto las hace especialmente interesantes para integrarlas en dispositivos portátiles que deben tener poco espesor.
- Alto voltaje por célula: Cada batería proporciona 3,7 voltios, lo mismo que tres baterías de Ni-MH o Ni-Cd (1,2 V cada una).
- Carecen de efecto memoria.



Figura 2.1

- Descarga lineal: Durante toda la descarga, el voltaje de la batería varía poco, lo que evita la necesidad de circuitos reguladores. Esto es una ventaja, ya que hace muy fácil saber la carga que almacena la batería.
- Larga vida en las baterías profesionales para vehículos eléctricos. Algunos fabricantes muestran datos de más de 3.000 ciclos de carga/descarga para una pérdida de capacidad del 20%.
- Facilidad para saber la carga que almacenan. Basta con medir, en reposo, el voltaje de la batería. La energía almacenada es función del voltaje medido.
- Muy baja tasa de autodescarga: Cuando guardamos una batería, ésta se descarga progresivamente aunque no la usemos. En el caso de las baterías de Ni-MH, esta "autodescarga" puede suponer más de un 20% mensual. En el caso de Li-Ion es de menos un 6% en el mismo periodo. Muchas de ellas, tras seis meses en reposo, pueden retener un 70% de su carga.

Por supuesto también posee inconvenientes, entre los más reseñables se pueden destacar:

- Su fabricación es más costosa que las de Ni-Cd e igual que las de Ni-MH, no obstante, actualmente su precio es asequible cuando su uso está destinado a dispositivos que necesitan una mayor autonomía energética.
- Pueden sobrecalentarse hasta el punto de explotar: Están fabricadas con materiales inflamables que las hace propensas a detonaciones o incendios, por lo que es necesario dotarlas de circuitos electrónicos que controlen en todo momento la temperatura de la batería.

Se puede apreciar que las ventajas de este tipo de baterías son muy abundantes y que la principal de ellas es poder almacenar una gran cantidad de energía en las reducidas dimensiones que presentan este tipo de dispositivos. En cuanto al sobrecalentamiento, bastará con controlar de forma meticulosa la carga de la batería en todo momento. En la fase de diseño se dará solución a este inconveniente.

2.2 Panel solar fotovoltaico.

Los paneles fotovoltaicos [10] están formados por numerosas celdas que convierten la luz en electricidad. Estas celdas dependen del efecto fotovoltaico por el que la energía luminosa produce cargas positiva y negativa en dos semiconductores próximos de diferente tipo, produciendo así un campo eléctrico capaz de generar una corriente.

Silicio cristalino y arseniuro de galio son la elección típica de materiales para celdas solares. Los cristales de arseniuro de galio son creados especialmente para uso fotovoltaico, mientras que los cristales de silicio están disponibles en lingotes estándar más baratos producidos principalmente para el consumo de la industria microelectrónica. El silicio policristalino tiene una menor eficacia de conversión, pero también menor coste.

Básicamente, una celda solar comprende una unión p-n en la cual la foto-energía causa recombinaciones electrón-hueco, generando corriente eléctrica. El circuito eléctrico mostrado en la siguiente imagen [Figura 2.2] se usa a menudo como modelo simplificado de una celda solar.

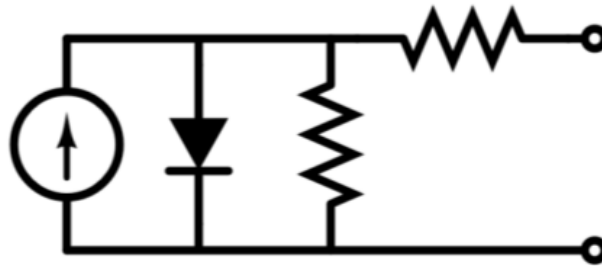


Figura 2.2

La fuente de corriente modela una corriente proporcional a la radiación solar incidente. Sin la carga conectada, la mayor parte de la corriente pasará por el diodo cuya tensión en directa determina la tensión del circuito abierto. Esta tensión varía con cada tipo de celda solar pero para la mayoría de las celdas de silicio está entre 0.5V y 0.6V.

La resistencia en paralelo representa la corriente de escape y la resistencia en serie las pérdidas por conexión que se dan en la práctica. Al aumentar la corriente de carga, la mayor parte de la corriente generada por la celda solar es desviada en dirección a la carga. Aunque existe un pequeño término de tensión debido a la resistencia en serie, la tensión a la salida permanece constante. Cuando la mayor parte de la corriente atraviesa la carga, la corriente que atraviesa el diodo tiende a anularse produciendo tensión cero. A esta corriente se la conoce como corriente de cortocircuito de la celda solar. Por lo tanto, la celda solar es considerada una fuente de potencia limitada por corriente.

Aunque la información relativa a esta tecnología es abundante, el dimensionamiento de la misma de cara a su uso en diferentes tipos de instalaciones no es evidente. Las condiciones de intensidad solar varían enormemente dependiendo de varios factores entre los que destacan la zona geográfica, la época del año y la hora del día.

Para el dimensionamiento de la instalación fotovoltaica necesaria para poder alimentar el dispositivo a diseñar, se hace necesario conocer de antemano el consumo de los componentes que lo forman así como el comportamiento que muestran dentro del sistema, el cual en muchos casos, varía dependiendo enormemente de factores tales como la elección adecuada de componentes de bajo consumo, la correcta adaptación de las líneas, la velocidad de procesamiento, el tiempo entre transmisiones, etc. Como el consumo, o mejor dicho, la reducción de este, es uno de los principales objetivos del proyecto, el diseño se ha tenido que adaptar paulatinamente con el fin de cumplir los requisitos iniciales, intentando sufrir la menor penalización en cuanto a gasto energético se refiere. En puntos sucesivos, se volverá a hablar sobre consumos, sobre el consumo de componentes o de etapas enteras hasta llegar, finalmente, al consumo total del dispositivo, con el fin de dimensionar correctamente la instalación fotovoltaica ideal que consiga abastecer el sistema para que funcione de forma correcta y continuada.

2.3 Otras fuentes de alimentación alternativa.

Nos encontramos ante un dispositivo que, aunque es de bajo consumo, debe de llegar a funcionar de forma permanente, en ocasiones, en lugares donde no se dispone del abastecimiento eléctrico tradicional. Por esta razón se optado por emplear tecnologías alternativas basadas en energías renovables y más concretamente en energía solar. Del mismo modo además, se han de emplear dispositivos que acumulen la energía sobrante con el fin de poder ser utilizada en aquellos momentos en los que escasee o se anule la energía del sol. Para este cometido se ha propuesto el uso de una batería de litio común. Sin embargo, se hace necesario incorporar algún sistema de carga rápida de la batería, con el fin usarlo en aquellos casos de abastecimiento crítico o de consumo excesivo, provocados por situaciones no acotadas.

Para este cometido, se ha incluido en las especificaciones la posibilidad de alimentación a través de puerto USB.

El bus universal en serie USB (Universal Serial Bus) es un estándar industrial desarrollado en los años noventa que define los cables, conectores y protocolos usados en un bus para conectar, comunicar y proveer de alimentación eléctrica entre ordenadores y periféricos y dispositivos electrónicos [11].

En el caso que nos ocupa, el conector micro USB [Figura 2.3] va a ser empleado exclusivamente para alimentación eléctrica en aquellos momentos en los que se necesite una carga rápida de la batería aunque, pudiera ser usado en cualquier caso, de forma permanente. Por esta razón no vale la pena adentrarse en más bibliografía relativa a este tema ya que se prescinde de las líneas dedicadas de datos y por extensión, de los protocolos necesarios para establecer comunicación con este tipo de interfaz.



Figura 2.3

La mayoría de los puertos USB usados en la actualidad son del estándar 2.0 aunque cada vez se está tendiendo más al nuevo 3.0. La tensión que es capaz de suministrar cualquiera de ellos es de 5V mientras que la intensidad varía entre los 500mA de intensidad máxima del estándar 2.0 a los 900mA de intensidad máxima del 3.0. En cualquiera caso, la etapa de alimentación será diseñada para soportar tales niveles de potencia de entrada con el fin de proteger al resto del circuito y aprovechar al máximo la energía recibida, administrando de forma correcta la carga de la batería y la alimentación del sistema.

2.4 Estándar Bluetooth de comunicación por radio.

El estándar Bluetooth (IEEE 802.15.1) [12] es una especificación industrial para Redes Inalámbricas de Área Personal (WPAN) que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes dispositivos mediante un enlace de radiofrecuencia en la banda ISM (banda libre de frecuencias) de los 2,4 GHz. Los principales objetivos que se pretenden conseguir con esta norma son:

- Facilitar las comunicaciones entre equipos móviles y fijos eliminando cables y conectores entre éstos.
- Ofrecer la posibilidad de crear pequeñas redes inalámbricas y facilitar la sincronización de datos entre equipos personales.

Los dispositivos que con mayor frecuencia utilizan esta tecnología pertenecen a sectores de las telecomunicaciones y la informática personal, como PDAs, teléfonos móviles, ordenadores personales, impresoras o cámaras digitales. Se denomina Bluetooth al protocolo de comunicaciones diseñado especialmente para dispositivos de bajo consumo, baja cobertura y basados en transceptores de bajo coste. Gracias a este protocolo, los dispositivos que lo implementan pueden comunicarse entre ellos cuando se encuentran dentro de su alcance. Las comunicaciones se realizan por radiofrecuencia de forma que los dispositivos no tienen que estar alineados y pueden incluso estar en habitaciones separadas si la potencia de transmisión lo permite. Estos dispositivos se clasifican como "Clase 1", "Clase 2" o "Clase 3" en referencia a su potencia de transmisión, siendo totalmente compatibles los dispositivos de una clase con los de las otras.

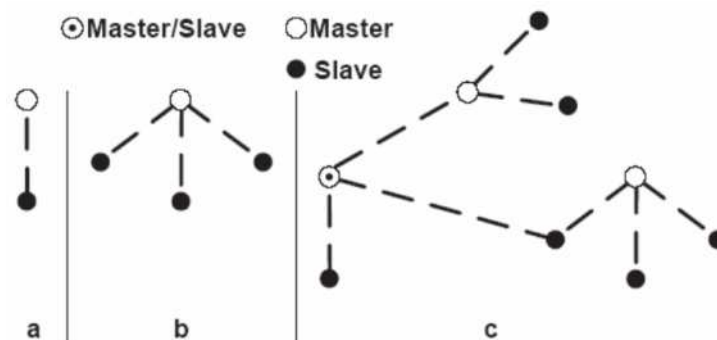


Figura 2.4

La especificación Bluetooth define un canal de comunicación máximo de 720 Kb/s (1 Mbps de capacidad bruta) con un alcance de 10 metros. La potencia de salida para transmitir a una distancia máxima de 10 metros es de 0 dBm (1 mW), mientras que la versión de largo alcance transmite entre 20 y 30 dBm (entre 100 mW y 1 W).

Las topologías de red que pueden llegar a formarse con dispositivos bluetooth pueden ser diversas, desde simples piconets [Figuras 2.4.a y 2.4.b] hasta un conjunto de varias de ellas formando scatternets [Figura 2.4.c]. En este sentido los transceptores pueden comportarse como maestros y/o esclavos y los maestros pueden llegar a soportar una sola conexión punto a punto (monoescravo) o varias de ellas al mismo tiempo, punto multipunto (multiexclavo).

3. Diseño electrónico.

A continuación se procederá a explicar de forma detallada el diseño de las diferentes etapas que componen el circuito electrónico final. Hablaremos sobre la funcionalidad a implementar y sobre los componentes necesarios para que cada etapa funcione de acuerdo a los requisitos iniciales. A su vez, se describirá de forma exhaustiva aquellos componentes que por su complejidad requieren una mayor información técnica.

Atendiendo a los requisitos previamente establecidos, vamos a poder dividir el diseño electrónico en diferentes etapas con el fin de poder simplificar el trabajo de diseño. De este modo, trabajaremos individualmente en cada etapa, estudiaremos la mejor forma de conseguir unos resultados convenientes y daremos las pautas finales para conseguir integrar las etapas entre sí.

Finalmente, las etapas o subsistemas electrónicos en los que dividiremos el diseño serán:

- Etapa de alimentación: compuesto por el administrador de carga y abastecimiento eléctrico como elemento más importante; incluyendo además, circuitos de regulación de los niveles de señal de entrada, para la protección eléctrica del resto del circuito y circuitos de regulación a los niveles de tensión de salida, necesarios para el correcto funcionamiento del resto de las etapas.
- Etapa de procesamiento: formada por el microcontrolador o microprocesador correspondiente, circuito de reset, entradas analógicas y digitales, osciladores, etc.
- Etapa grabación y test: circuito especialmente dedicado a la grabación y depuración del firmware.
- Etapa o interfaz de comunicación externa: comprenderá el conjunto de componentes encargados de integrar el transceptor de comunicaciones (en este caso bluetooth) con el exterior, que facilitará la explotación e integración de datos por parte del usuario final.
- Etapa de muestreo analógico: se trata de una etapa dedicada a la lectura de señales analógicas de tensión. Su finalidad es ofrecer una pre-integración de sensores y/u otros dispositivos, a través de circuitería básica de amplificación y conversión analógica/digital de alta resolución.
- Etapa de muestreo digital: estrechamente relacionada con la etapa de procesamiento, trata de explotar las diferentes opciones que da el microcontrolador, en cuanto a comunicación digital se refiere. En este caso se ofrece como solución digital la interfaz de comunicación I2C.

El diseño electrónico no ha sido un trabajo continuado de principio a fin, sino que se ha intercalado con diferentes pruebas, con el fin de comprobar el funcionamiento simulado y en ocasiones real, de algunas de las etapas del sistema.

3.1 La etapa de alimentación

Todas las etapas son igual de importantes para el sistema ya que cada una de ellas cumple un objetivo particular. Sin embargo, no todas son igual de críticas. Nos encontramos quizá ante la etapa más crítica en cuanto a rendimiento y consumo eléctrico se refiere. La etapa de alimentación será la encargada de administrar el abastecimiento eléctrico al resto del circuito por un lado y la carga de la batería por otro.

Como ya se ha adelantado previamente, la etapa de alimentación es un diseño electrónico más o menos complejo que comprende varias subetapas:

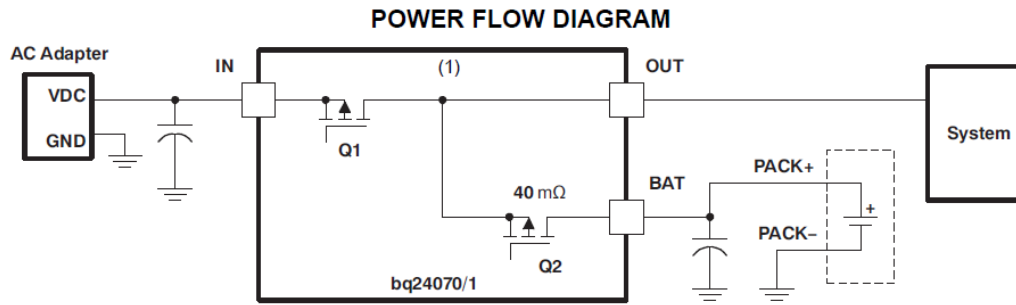
- Subetapa de administración energética: es la etapa principal, se encargará de abastecer eléctricamente al resto del sistema y almacenar aquella energía no consumida en una batería de li-ion.
- Subetapa de regulación de la señal de entrada: su propósito será adecuar los niveles de tensión de entrada, a niveles adecuados de tensión de entrada de la subetapa de administración.
- Subetapas de conversión-regulación de la señal de salida: su propósito será adecuar la tensión de salida de la subetapa de administración, a niveles de tensión adecuados para el correcto funcionamiento del resto de las etapas del sistema.

3.1.1 Subetapa de administración energética.

Para llevar a cabo la compleja tarea que resulta una administración energética eficiente, debemos de buscar entre aquellos componentes y fabricantes que han tenido una mayor repercusión a nivel internacional y que, a través de experiencias contrastadas han servido en multitud de dispositivos electrónicos de consumo. Para el caso que nos ocupa se hará uso del integrado de Texas Instruments BQ24071.

El BQ24071 [13] es un integrado de reducidas dimensiones capaz de efectuar la carga de forma lineal en baterías de Li-ion y controlar tanto la carga de las baterías como la alimentación del sistema dependiente, administrando en todo momento la potencia que recibe, gracias al uso de sensores de tensión y corriente eléctrica basados en tecnología FET. Posee a su vez reguladores internos de tensión y corriente de alta precisión [Figura 3.1], pines de estado de carga y terminal de carga en un solo chip. Su uso está extendido en el diseño y fabricación de aplicaciones portátiles tales como Smartphones, PDAs, MP3, cámaras digitales, etc. Entre las características más importantes, se incluyen además:

- Soporta corrientes de entrada de hasta 2A.
- Incorpora regulación térmica para un mejor proceso de carga.
- Protección contra cortocircuitos y corrientes de retorno.
- Se fabrica en dos versiones atendiendo a la regulación de su tensión de salida: 4.4V (BQ24070) y 6V (BQ24071).



(1) P-FET back gate body diodes are disconnected to prevent body diode conduction.

Figura 3.1

Ambas versiones del integrado tiene las misma apariencia y funcionamiento y su única diferencia radica en la tensión que son capaces de regular, como máximo, a su salida.

En este caso se ha elegido la versión BQ24071, ya que es capaz de regular tensiones de salida de hasta 6V, siempre y cuando su tensión de entrada sea de al menos 6V. En aquellos casos en los que la tensión de entrada no llegue a este valor, el chip regulará a la tensión máxima de la batería, que en el caso de baterías de li-ion suele ser de 4.2V. La explicación de haber elegido la versión BQ24071 y no la otra reside en aprovechar al máximo los niveles de salida en esta subetapa con el fin de facilitar el trabajo de conversión de las siguientes; que como ya se adelantó en la captura de requisitos, la necesidad de una señal de alimentación de 5V, requerirá el diseño de una etapa sucesiva para adecuar los niveles de tensión, este tema sin embargo, se abordará con más en detalle en puntos sucesivos.

Con las premisas anteriores y con el objetivo de no forzar el chip, convendremos que la tensión de entrada no deberá de superar en ningún caso los $6.0 + 0.3V$ en ningún caso, recomendando una tensión real de entre 5V y 6V que garantice el correcto funcionamiento de la etapa. Esto se adecúa perfectamente a la tensión proporcionada por el terminal micro USB, cuando el sistema es alimentado con este conector. En cambio, si se usa otro tipo de fuente de alimentación variable, a través del conector de dos pines instalado para tal efecto, será necesario adecuar la señal de dicha fuente para cumplir los requerimientos de tensión de entrada del chip BQ24071. De nuevo esta tarea, será explicada con detalle en el siguiente punto.

Con el fin de proceder a la integración del chip se hace necesario conocer cómo usarlo y para ello observaremos detenidamente la función de sus pines [Figura 3.2]:

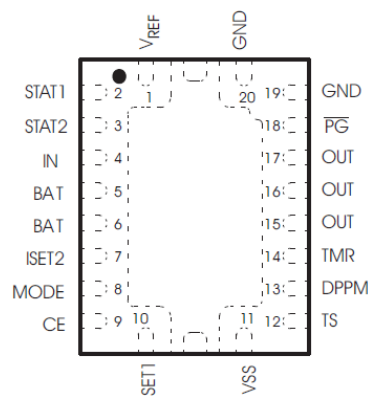


Figura 3.2

- IN (4): es el pin de potencia de entrada.
- OUT (15, 16,17): pines de potencia de salida.
- BAT (5,6): son los pines de carga para la conexión de la batería.
- CE (9): se trata de una entrada digital que activa (en modo alto) la funcionalidad del chip.
- STAT1 (2): nos indica el estado de la carga.
- STAT2 (3): nos indica el estado de la carga.
- PG (18): nos indica si el chip esta correctamente alimentado (modo bajo).
- DPPM (13): pin que se ha de adaptar con el fin de configurar la tensión mínima de salida cuando se produce una caída de tensión ante una disminución de la corriente de alimentación.
- ISET1 (10): pin que se ha de adaptar con el fin de configurar la intensidad máxima de precarga de la batería.
- ISET2 (7): se usa para configurar el límite de corriente de carga en modo USB, que será 100mA en modo bajo y 500mA en modo alto.
- MODE (8): pin con el que se indica si la fuente de alimentación es USB o no.
- TMR (14): pin que se ha de adaptar con el fin de configurar el tiempo de seguridad a partir del cual se desactiva la carga en la batería.
- TS (12): entrada para el sensor de temperatura de la batería si lo tuviera.
- GND, V_{REF} y V_{SS} (19,20; 1; 11): pines usados como señal de referencia interna (V_{REF}) o como método de disipación térmica y masa (GND y V_{SS}).

Con el fin de integrar el chip de forma adecuada se deberá de calcular el valor de los componentes que lo integran atendiendo al funcionamiento final deseado.

Primeramente, se establecerá el modo de carga, por simplificar, al de USB. De este modo, ya sea a través del conector micro USB o a través de conector de dos hilos para otro tipo de fuentes de alimentación externas (panel solar por ejemplo), el nivel de corriente permanecerán configurado de forma única sea cual sea el origen de potencia. Consecuentemente limitaremos la intensidad de la corriente de entrada a 500mA como máximo. Para lograr este objetivo, por una parte el pin MODE será conectado a GND (modo de carga USB) y el pin ISET2 será activado (modo alto) llevándolo a IN. En ambos casos se usarán resistencias que limiten la intensidad de corriente de entrada en estos pines.

La intensidad de precarga máxima de la batería se configura colocando una resistencia R_{SET} entre el pin ISET1 y GND. Esta intensidad se puede suponer también de 500mA que es, como se fijo anteriormente, la intensidad máxima de entrada al circuito. Para su cálculo se usará la ecuación 1 y los datos facilitados en la siguiente tabla [Tabla 3.1]:

PARAMETER		TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNIT
$I_{O(PRECHG)}$	Precharge range	$1V < V_{I(BAT)} < V_{I(LOWV)}$, $t < t_{I(PRECHG)}$, $I_{O(PRECHG)} = (K_{(SET)} \times V_{I(PRECHG)}) / R_{SET}$	10		150	mA
$V_{I(PRECHG)}$	Precharge set voltage	$1V < V_{I(BAT)} < V_{I(LOWV)}$, $t < t_{I(PRECHG)}$	225	250	275	mV
$K_{(SET)}$	Charge current set factor, BAT	$100mA \leq I_{O(BAT)} \leq 1.5A$	375	425	450	
		$10mA \leq I_{O(BAT)} \leq 100mA^{(7)}$	300	450	600	

Tabla 3.1

$$I_{O(PRECHG)} = \frac{V_{(PRECHG)} \times K_{(SET)}}{R_{(SET)}} \quad (1)$$

De este modo:

$$I_{O(PRECHG)} = \frac{V_{(PRECHG)} \times K_{(SET)}}{R_{(SET)}} \rightarrow R_{(SET)} = \frac{V_{(PRECHG)} \times K_{(SET)}}{I_{O(PRECHG)}} = \frac{0.25V \times 425}{0.5A} = 225\Omega$$

La carga del sistema es alimentada directamente de la fuente de alimentación a través del transistor Q1 interno al chip [Figura 3.1]. Si la corriente demandada por el sistema excede de la capacidad de suministro, la tensión de salida desciende a la tensión de la batería; en ese momento Q2 se enciende con el fin de garantizar la corriente extra necesaria para alimentar el sistema haciendo uso de la corriente almacenada en la batería.

El chip ha de estar preparado para aquellos instantes en los que se produce una pérdida de potencia debido a una caída de tensión, una limitación de corriente o simplemente, la supresión de la fuente de alimentación, sea cual sea. Para este cometido se usa el pin DPPM, gestión dinámica del patrón de energía (Dynamic Power-Path Management). Si la tensión en el pin de salida (OUT) cae a un valor preestablecido por la inecuación 2, debido a una cantidad limitada en la corriente de entrada, la corriente destinada a la carga de la batería se reduce hasta que la tensión de salida se estabilice sobre dicha tensión. El control DPPM trata de llegar a una condición estacionaria en la que el sistema obtiene la corriente necesaria y la batería se carga con la corriente restante si la hubiera. La configuración de la tensión DPPM se basa en el uso de una resistencia entre el pin DPPM y GND, valor que se calcula según la ecuación 3.

$$V_{OUT} < V_{(DPPM)} \times SF \quad (2)$$

$$V_{(DPPM)} = I_{(DPPM)} \times R_{(DPPM)} \times SF \quad (3)$$

Donde $R_{(DPPM)}$ es la resistencia a calcular, $I_{(DPPM)}$ la corriente de la fuente interna y SF el factor de escala DPPM. Haciendo uso de los datos facilitados en la tabla mostrada a continuación [Tabla 3.2] y suponiendo un valor típico de $V_{(DPPM)}$ igual a la tensión nominal de la batería de 3.7V:

OUT PIN – DPPM REGULATION

$V_{(DPPM-SET)}$	DPPM set point ⁽²⁾	$V_{DPPM-SET} < V_{OUT}$	2.6	3.8	V
$I_{(DPPM-SET)}$	DPPM current source	Input present	95	100	105
SF	DPPM scale factor	$V_{(DPPM-REG)} = V_{(DPPM-SET)} \times SF$	1.139	1.150	1.162

Tabla 3.2

$$R_{(DPPM)} = \frac{V_{(DPPM)}}{I_{(DPPM)} \times SF} = \frac{3.7}{0.0001 \times 1.15} = 32174\Omega$$

De este modo, el control DPPM entrará en funcionamiento supliendo con la corriente necesaria siempre que se cumpla la inecuación 2, caso que se dará cuando la alimentación externa no sea capaz de suministrar la corriente demandada o cuando esta no exista.

$$V_{OUT} < V_{(DPPM)} \times SF \rightarrow V_{OUT} < 4.25V$$

Como medida de seguridad, el chip monitoriza el tiempo de carga de la batería. Si el fin de carga no se ha detectado durante un periodo de tiempo establecido por $t_{(CHG)}$, el chip detiene la carga y anuncia un fallo a través de los pines de estado STAT1 y STAT2. El periodo máximo de carga se configura mediante una resistencia conectada entre los pines TMR y GND, calculada según la expresión dada por la ecuación 4 y haciendo uso de los datos proporcionados por la siguiente tabla [Tabla 3.3]. Si por el contrario se prefiriese omitir esta medida de seguridad bastaría con llevar el pin TMR a V_{REF} . Sin embargo y en todo caso, si el dispositivo está en modo control DPPM, el temporizador de seguridad de ajusta dinámicamente, ampliándolo proporcionalmente a las necesidades de cada instante.

$$t_{(CHG)} = K_{(TMR)} \times R_{(TMR)} \quad (4)$$

TIMERS

$K_{(TMR)}$	Timer set factor	$t_{(CHG)} = K_{(TMR)} \times R_{(TMR)}$	0.313	0.360	0.414	s/ Ω
$R_{(TMR)}^{(10)}$	External resistor limits		30		100	k Ω
$t_{(PRECHG)}$	Precharge timer		$0.09 \times t_{(CHG)}$	$0.10 \times t_{(CHG)}$	$0.11 \times t_{(CHG)}$	s
$t_{(FAULT)}$	Timer fault recovery pullup from OUT to BAT			1		k Ω

Tabla 3.3

Teniendo en cuenta que nos encontramos ante baterías de li-ion comunes, el tiempo de carga máximo se establecerá en 5 horas, por esta razón:

$$R_{(TMR)} = \frac{t_{(CHG)}}{K_{(TMR)}} = \frac{18000s}{0.35 s/\Omega} = 50000\Omega$$

Otra medida de seguridad es la monitorización constante de la temperatura de la batería a través de la medida de tensión entre el pin TS y Vss (GND). La mayor parte de las baterías de li-ion empleadas en dispositivos electrónicos, incorporan un termistor con coeficiente negativo de temperatura (NTC). La tensión en el pin TS se compara con dos fuentes de tensión internas fijas $V_{(LTF)}$ y $V_{(HTF)}$. Si la tensión en TS se sale del intervalo $[V_{(LTF)}, V_{(HTF)}]$ la carga se suspende para salvaguardar la integridad de la batería. El rango de temperatura permitido es $[0^\circ, 45^\circ]$, sin embargo, si llega el caso, el rango se puede ampliar agregando un divisor de tensión externo al pin TS [Figura 3.3].

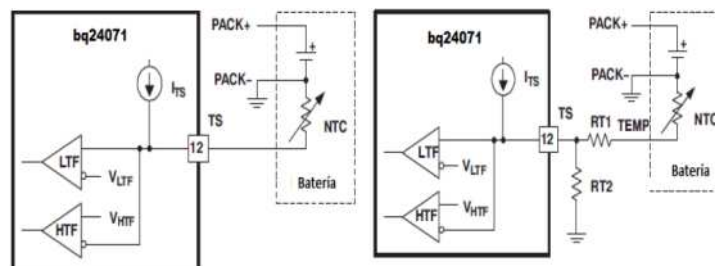


Figura 3.3

Por el contrario, si el control de temperatura no interesa puede ser anulado introduciendo una resistencia de 10K Ω entre el pin TS y Vss (GND).

Antes de finalizar con el estudio sobre la integración de este componente en el sistema, no debemos olvidarnos de las entradas y salidas digitales de chip que nos aportan información sobre el estado de la carga y control sobre el funcionamiento del mismo.

El pin CE (chip enabled), nos ofrece la posibilidad de habilitar o deshabilitar las funciones del componente, sin embargo, por tratarse de la etapa de alimentación principal su nivel se mantendrá a nivel alto en todo momento, conectándolo a través de una resistencia de control de intensidad al pin IN y habilitando con ello la funcionalidad del chip de forma permanente.

El pin PG (Power good) a nivel bajo, nos informa de una correcta alimentación del chip. Usaremos esta señal para iluminar un LED como indicativo visual de una correcta alimentación del circuito, a su vez y adelantándonos de nuevo al proceso de diseño, llevaremos esta línea a una de las entradas digitales del microcontrolador, por si fuera nuestro deseo monitorizar su estado más adelante. Haremos lo mismo con los pines STAT1 y STAT2, cuya función conjunta es la de informar del estado del proceso de carga [Tabla 3.4], sin embargo, con el pretexto del ahorro eléctrico, prescindiremos del LED para estas líneas. Estos tres pines, al igual que CE, incorporarán una resistencia que limite su corriente de entrada con el fin de evitar daños.

CHARGE STATE	STAT1	STAT2
Precharge in progress	ON	ON
Fast charge in progress	ON	OFF
Charge done	OFF	ON
Charge suspend (temperature), timer fault, and sleep mode	OFF	OFF

Tabla 3.4

Adicionalmente el fabricante recomienda el uso de condensadores con el fin de mejorar el funcionamiento de la etapa:

- Condensador cerámico de 0.22 μ F entre los pines BAT e ISET1 en el caso de que existan intensidades de carga menores de 300mA. En el caso que nos encontramos es posible encontrarse en tal situación ya que la intensidad de entrada estará entre los 100mA y los 500mA.
- Condensador cerámico de 0.47 μ F entre V_{REF} y GND.
- Condensador cerámico de 10nF entre DPPM y GND con el fin de provocar un retraso del cortocircuito que puede llegar a provocarse, en el momento de la inserción de la batería en el circuito.

Como hemos visto en esta completa descripción del chip BQ24071, nos encontramos ante un dispositivo de altas prestaciones que reduce considerablemente el trabajo de diseño al aglutinar en un solo integrado de reducidas dimensiones tanto la administración de la alimentación del circuito como la carga de baterías de li-ion. A su

vez proporciona seguridad a la demás etapas evitando sobrecargas y regulando en su caso la temperatura de la batería, con el fin de alargar su vida útil.

Finalmente se muestra a continuación [Figura 3.4] el diseño completo de la subetapa de administración energética representada mediante su esquemático correspondiente.

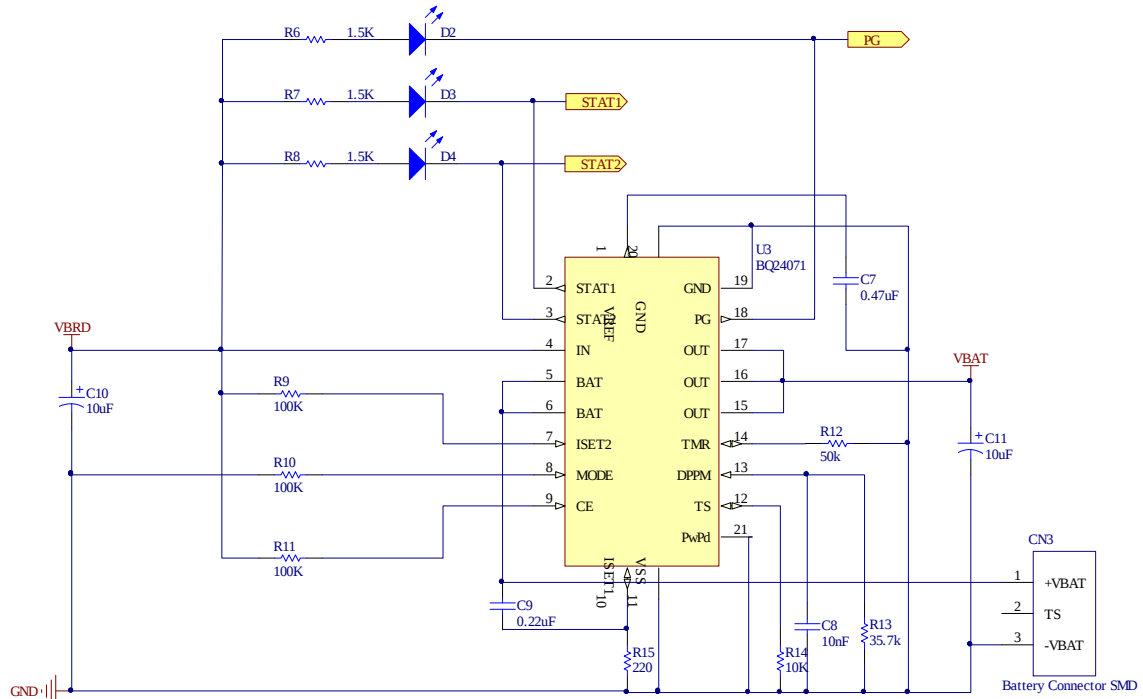


Figura 3.4

Como se puede observar se añaden además condensadores electrolíticos de 10uF cuya función será el desacoplo entre esta subetapa y las contiguas.

Los LEDs D3 y D4, se incorporan inicialmente al diseño con el fin de comprobar más fácilmente y de forma visual que el comportamiento del chip es el adecuado, sin embargo, más adelante se suprimen, cortocircuitando la línea con el fin de ahorrar energía (el consumo de cada LED es de 2mA).

3.1.2 Subetapa de regulación de la señal de entrada.

Aunque por un lado la alimentación del sistema puede realizarse a través del conector micro USB, los requerimientos de diseños nos especifican la habilitación de un conector de 2 hilos que permita alimentar el circuito mediante el uso de una fuente de alimentación externa de corriente continua. Como fuente de alimentación, puede usarse cualquier tipo de fuente capaz de entregar un nivel de tensión adecuado a la entrada del circuito, que permita el correcto funcionamiento del mismo.

Como se pudo ver en el diseño de la subetapa anterior, el funcionamiento óptimo del integrado BQ24071, se da con tensiones comprendidas en el rango [5V, 6V+0.3V]. De hecho, es para tensiones a partir de 6V cuando la subetapa es capaz de regular una

tensión de salida constante de 6V. Para otras tensiones de alimentación inferiores a 6V pero dentro del intervalo, la tensión de salida variará pero regulada a un valor entre 4.9V y 5.9V. Si por el contrario, la tensión de alimentación se encontrará fuera del intervalo por defecto, la tensión de salida quedará regulada a la tensión de entrada menos una penalización de 0.2V aproximadamente, siempre y cuando la tensión de entrada sea al menos la tensión máxima de la batería (4.2V en el caso de las batería de li-ion que usaremos).

El problema residirá en que la tensión de entrada se encuentre fuera del intervalo por exceso. En tal caso es aconsejable tomar las medidas oportunas con el fin de garantizar que el nivel de entrada no supere el umbral de 6.3V en el que se garantiza el buen funcionamiento del integrado. Para esta labor se procederá con el diseño de una subetapa previa cuya función sea la de regular la tensión de alimentación al máximo aconsejado para la el correcto funcionamiento del BQ24071.

El regulador de tensión de entrada al sistema será diseñado a partir del afamado integrado de Texas Instruments LM317M de la familia LM317.

Los LM317 [14], son una familia de reguladores de tensión ajustables, es decir, son configurados electrónicamente a través de otros componentes con el fin de conseguir el comportamiento deseado. Más concretamente, el LM317M de pequeño tamaño, permite señales de salida de 500mA, lo que en este caso es esencial para cumplir las especificaciones del diseño. Algunas de las características del LM317M son:

- Protege las etapas posteriores de excesos de temperatura.
- Protege las etapas posteriores de excesos de corriente.
- Permite tensiones de entrada de hasta 32V.

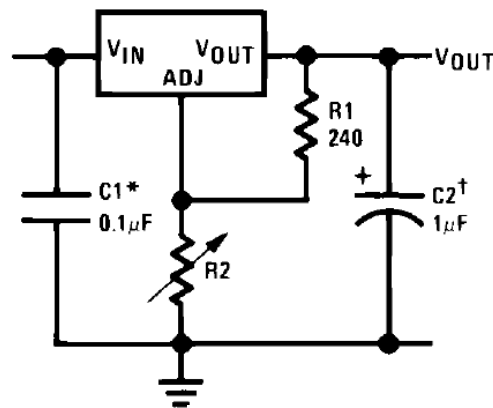


Figura 3.5

Su integración es muy sencilla y se reduce al cálculo de la resistencia R2, tal y como se muestra en la imagen anterior [Figura 3.5]. Para el cálculo del valor de R2 se usa la expresión de la ecuación (5).

$$V_{OUT} = V_{REF} \left(1 + \frac{R2}{R1} \right) + (I_{Adj} \times R2) \quad (5)$$

Teniendo en cuenta que $V_{REF}=1.25V$, I_{Adj} es típicamente $50\mu A$ y que la tensión pretendida a la salida es de $6V$:

$$R2 = \frac{R1 \times \left(\frac{V_{OUT}}{V_{REF}} - 1 \right)}{1 + I_{Adj} \times R1} = 901\Omega$$

El comportamiento de esta subetapa es fácilmente simulable debido a que, por ser un componente muy común, se disponen de los modelos eléctricos necesarios. Su simulación nos permitirá conocer la tensión de alimentación mínima que nos asegure una tensión constante de $6V$. Utilizando el software de simulación ISIS de Proteus [Figura 3.6] se comprueba cómo se consigue una tensión de $6V$ a partir de $8V$ de tensión de entrada y $5V$ a partir de $6.5V$, proporcionando además una corriente de salida de al menos $500mA$.

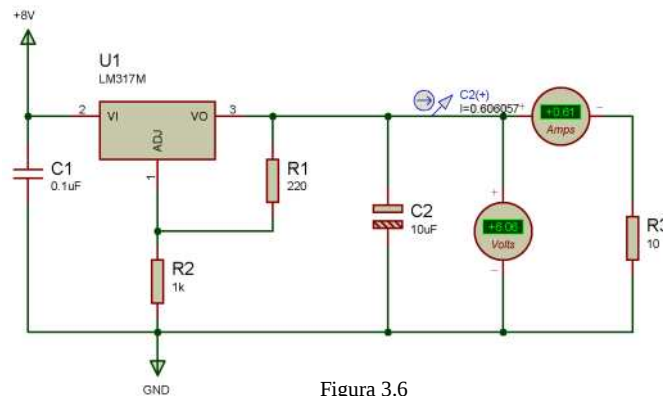


Figura 3.6

Para finalizar con el diseño de esta subetapa de alimentación, se proporciona a continuación el esquemático del diseño final [Figura 3.7]:

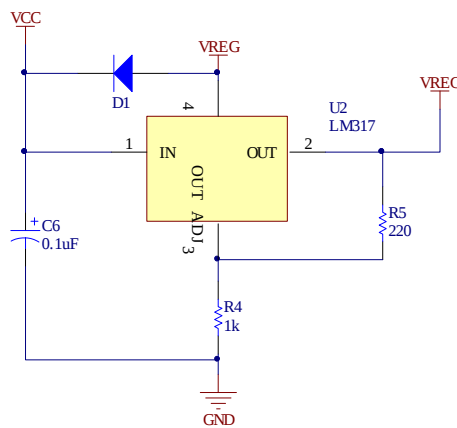


Figura 3.7

Podemos observar tanto en la simulación con ISIS como en diseño final que el valor de la resistencias $R1$ y $R2$ es aproximado a valores comerciales, este cambio además, mejora la respuesta a la salida, permitiendo tensiones mayores con niveles más bajos a la entrada. El diodo $D1$ se incorpora con el fin de evitar la corriente de retorno procedente de la descarga del condensador de desacoplo.

3.1.3 Subetapas de conversión-regulación de la señal de salida.

Con el fin de proporcionar unos niveles de alimentación estables al resto circuito, que polarice cada una de las etapas sucesivas en su punto de funcionamiento óptimo, es necesario regular la tensión proporcionada por la subetapa de administración energética.

Los requisitos iniciales de diseño, especifican la dotación al sistema de niveles de tensión de 3V y $\pm 5V$; niveles que se conseguirán mediante el diseño de dos subetapas convertidoras y una subetapa inversora del nivel de tensión. Para la primera de las tareas se usará el convertidor de Linear Technology LTC3525 en sus versiones de 3V y 5V. Para la segunda, se hará uso del convertidor a tensión negativa TL7660 de Texas Instruments.

El mundo de la microelectrónica ha tendido a mejorar el diseño de este tipo de componentes reguladores-convertidores de tensión, con el fin de ofrecer un gran abanico de productos de alta eficiencia capaces abarcar la inmensa mayoría de los requerimientos del mercado. A grandes rasgos se pueden diferenciar entre dos tipos de convertidores básicos, aquellos que elevan la tensión de salida o convertidores boost y aquellos que la reducen o convertidores buck. Además, dentro de cada tipo y/o con la combinación de ambos se crea una gran cantidad de combinaciones para diferentes usos.

El diseño de las subetapas anteriores a esta etapa de alimentación, ha establecido un intervalo de tensión en el que se moverá la señal de entrada a estas nuevas subetapas. Haciendo un rápido repaso a todo lo anterior podemos resumir que la subetapa de administración energética proporciona a su salida una señal de corriente continua con niveles de tensión, en su punto de funcionamiento normal (la fuente de alimentación proporciona la tensión adecuada a la entrada del circuito, mayor o igual a 6.5V regulados a través del LM317, o 5V directos a través del conector micro USB), entre 5V y 6V. A su vez, si la alimentación externa es insuficiente o inexistente, la tensión se reducirá al nivel de la batería. Sabiendo que la tensión máxima de la batería es de 4.2V a plena carga y que es capaz de alimentar al circuito aun estando a 3V, podemos establecer un intervalo de alimentación operativo mayor, entre 3V y 6V, a la entrada de esta etapa. Concluyendo se han de conseguir unos niveles de tensión fijos de 3V y $\pm 5V$ a partir de una tensión que puede variar en el intervalo [3V, 6V].

Para esta tarea no es posible el uso de simples reguladores de tensión como el LM317 usado anteriormente, debido a que su finalidad es siempre reductora (buck) y su nivel de penalización es elevado. Por ejemplo, sería imposible conseguir 3V a partir de un nivel de entrada de 3V o incluso de 4V debido a la penalización de tensión sufrida.

Para conseguir el objetivo propuesto se hará uso de los integrados LTC3525-3 y LTC3525-5. La familia LTC3525 [15] comprende una serie de convertidores a diferentes niveles de tensión de salida, de alta eficiencia. Sus características principales son:

- Hasta un 95% de eficiencia [Figura 3.8], dependiendo del nivel de tensión de entrada que puede ser de hasta 1V.
- Capaces de ofrecer hasta 400mA en su salida rectificada dependiendo de la carga.
- Ultra bajo consumo y pequeño tamaño.
- Protección ante cortocircuitos y temperaturas elevadas.
- Ideal para aplicaciones móviles que necesiten maximizar la vida de su batería.

Para su integración, tan solo son necesarios tres componentes adicionales, una inductancia y dos condensadores [Figura 3.9].

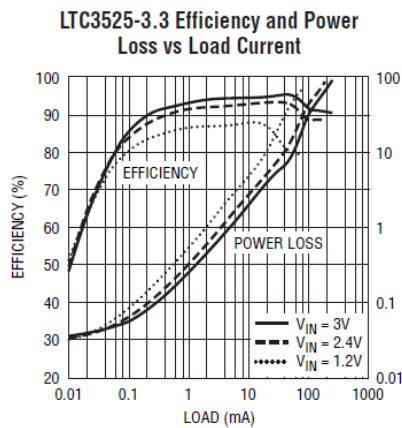


Figura 3.8

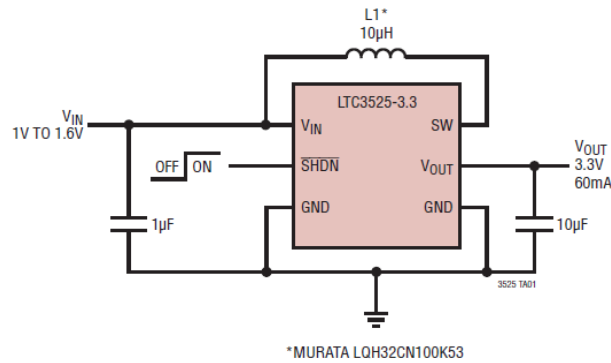


Figura 3.9

Para un mayor control de esta subetapa, el LTC3525 permite su conexión/desconexión a través de la activación o desactivación de la entrada SHDN (activa a nivel alto). A continuación se muestran los esquemáticos del diseño final para estas subetapas [Figura 3.10] y se explica el por qué de los valores de sus componentes:

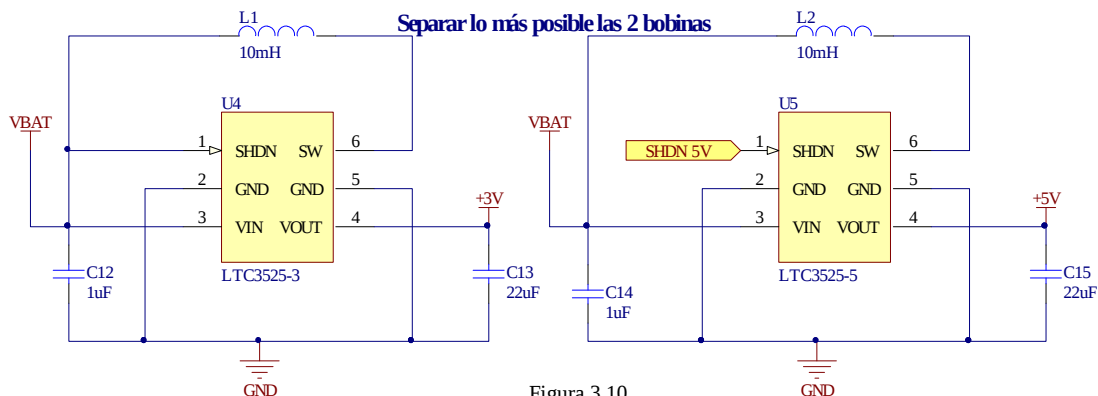


Figura 3.10

La tensión VBAT, representa la salida de la etapa de administración energética (salida del BQ24071). El fabricante a su vez propone una serie de valores para el diseño de estas subetapas. El valor de bobina ha de estar entre 4.7µH y 15µH, con lo que se elige una bobina Murata en el valor intermedio de intervalo. El condensador de entrada ha de ser cerámico de 1µF mientras que el de salida ha de tener un valor mínimo de 10µF, valor que se ha aumentado a 22µF con el fin de reducir el rizado de la señal de salida.

La línea SHDN de convertidor a 5V se llevará a uno de los pines del microcontrolador con el fin de poder habilitar o deshabilitar su funcionamiento a placer y tener un mayor control en el consumo del sistema. No se hará lo mismo con el convertidor a 3V que ha de alimentar directamente al microcontrolador.

Aunque el valor de las inductancias es pequeño, se deberá de tener especial cuidado en la futura fabricación de la PCB, de colocar ambas subetapas lo más separadas posible, con el fin de evitar efectos derivados de la interacción magnética entre sus bobinas.

El nivel de tensión de -5V lo conseguiremos utilizando el integrado TL7660. Se trata de un convertidor de voltaje [16] de alta eficiencia y fácil integración, cuyas características más importantes son las siguientes:

- Puede utilizarse como convertidor negativo de tensión o como doblador de tensión.
- Amplio rango de operación, entre 1.5V y 10V.
- Alta eficiencia, típicamente 98% y bajo consumo, típicamente 45uA.
- Ideal para aplicaciones portátiles.

Su funcionamiento es sencillo y su integración se realiza mediante el uso de dos condensadores electrolíticos externos de 10uF. El condensador C1 [Figura 3.11] se carga al valor de V_{in} en la primera mitad del ciclo de su oscilador interno (10KHz para $V_{in}=5V$), cuando S1 y S3 están cerrados y S2 y S4 abiertos; en la segunda mitad del ciclo el estado de los switches se invierte, provocando que C1 se descargue dando lugar a su salida, a una tensión negativa igual a $-V_{IN}$.

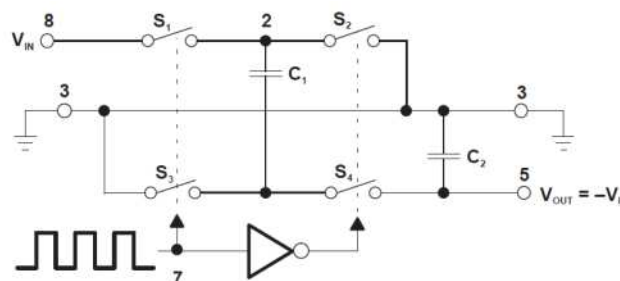


Figura 3.11

A continuación [Figura 3.12], se muestra el esquemático correspondiente a esta subetapa, donde la tensión de 5V generada por el convertidor boost, se traduce en una tensión negativa a su salida.

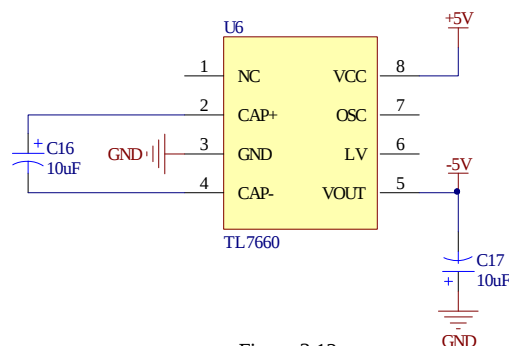


Figura 3.12

3.2 La etapa de procesado

La etapa de procesado es el “cerebro” del sistema y el nexo de unión entre todas las demás etapas que lo integran y el microprocesador o microcontrolador el núcleo de esta etapa. Su cometido es implementar la lógica necesaria para que el funcionamiento del circuito sea el esperado por el diseñador o en última instancia por el programador de su firmware. Se encargará de gestionar la comunicación con los demás periféricos del circuito y yendo más allá, gestionar incluso la comunicación del sistema con el exterior; proveyendo de forma transparente la información necesaria a través de protocolos sencillos, usados por integradores de aplicaciones o incluso, por el usuario final a través de una interfaz humana que le abstraiga de todo ese trabajo.

En el mercado existen multitud de familias de este tipo de componentes, a las que podemos acudir para elegir un producto que se adapte a nuestras expectativas Microchip, Atmel, ARM, etc. La elección de uno u otro viene determinada por la funcionalidad del producto, el consumo, la velocidad, la precisión, etc. Sin embargo, actualmente, las diferencias entre ellos se están acortando y un mismo fabricante provee soluciones para la mayor parte de combinaciones posibles con el fin de abrirse a todos los ámbitos y requerimientos del mercado.

En el diseño que nos ocupa, hay dos factores que sobresalen sobre el resto, el consumo y el precio. El componente que elijamos ha de tener una capacidad muy importante para este tipo de sistemas, poder controlar su consumo con precisión en aquellos momentos de inactividad. Por otro lado, ha de ser barato y proveer de las funcionalidades necesarias para cumplir con las especificaciones de diseño. No es tan importante en este sentido, la velocidad; la disponibilidad o actualización del dato puede esperar ya que no se tratan de variables críticas temporalmente. Generalizando, el consumo es directamente proporcional a la velocidad y en este caso la segunda se penaliza en favor de la primera.

Incluso habiendo reducido considerablemente la línea de productos entre los que buscar, que han de cumplir las especificaciones de diseño y poseer una atractiva relación calidad/precio y un buen comportamiento de cara al consumo final de sí mismo y del sistema completo; son todavía numerosos los modelos que podrían satisfacer nuestras necesidades. Podríamos seguir ampliando los requerimientos y seguiríamos teniendo donde elegir, sin embargo, por ser prácticos y por poseer ya de las herramientas para poder manejar este tipo de dispositivos (programarlos, depurarlos, etc.) elegiremos dentro de la familia Microchip un dispositivo dotado con la tecnología propietaria XLP (Extreme Low-Power Management).

El modelo de controlador finalmente elegido es el genéricamente llamado PIC18F4XK22, que comprende varias versiones de micro, desde la PIC18F43K22 a la PIC18F46K22 donde la única diferencia entre ellas radica en las dimensiones de su memoria, tanto de datos como de programa. El resto de funcionalidades en cambio, son idénticas [Tabla 3.5].

Device	Program Memory		Data Memory		I/O ⁽¹⁾	10-bit A/D Channels ⁽²⁾	CCP	ECCP (Full-Bridge)	ECCP (Half-Bridge)	MSSP		EUSART	Comparator	CTMU	BOR/LVD	SR Latch	8-bit Timer	16-bit Timer
	Flash (Bytes)	# Single-Word Instructions	SRAM (Bytes)	EEPROM (Bytes)						SPI	I ² C [™]							
PIC18(L)F43K22	8K	4096	512	256	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F44K22	16K	8192	768	256	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F45K22	32K	16384	1536	256	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4
PIC18(L)F46K22	64k	32768	3896	1024	36	30	2	2	1	2	2	2	2	Y	Y	Y	3	4

Tabla 3.5

Se trata de un chip de 40 pines útiles, cuyas características principales son las siguientes [17]:

- 16 bits por instrucción y 8 bits de anchura de datapath. Hasta 64KB de memoria de programa, 3896 bytes de memoria de datos SRAM y 1024 de memoria de datos EEPROM. Varios niveles de interrupción.
- Arquitectura optimizada para el uso de compiladores de C. Hasta 16MIPS.
- 2 osciladores internos. El primero variable entre 31KHz y 16MHz. El segundo de 32KHz. Posibilidad de añadir hasta 2 osciladores externos de hasta 64MHz.
- Hasta 30 canales ADC de 10 bits de resolución y modulo DAC.
- Ultra bajo consumo, 20nA en sleep mode. Tensiones de alimentación entre 2.3V y 5.5V. Entrada de reset.
- Watchdog. Programación y debug del micro mediante interfaz serie.
- 2 módulos CCP. 2 módulos EUSART. 2 puertos máster para comunicación serie (MSSP) configurables como I2C o SPI.

Se puede observar como este chip cumple casi todas las expectativas de diseño; a priori puede parecer que cumple todas ellas, sin embargo, la precisión de los canales ADC no es muy elevada. Aunque no forma parte de esta etapa del diseño, podemos adelantar que la precisión final requerida va a ser bastante superior. No es común encontrar en esta clase de chips convertidores con una resolución mayor de 12 bits y el convertidor analógico digital usado finalmente se añadirá como un periférico externo más al diseño del circuito.

Otro aspecto a destacar en este tipo de dispositivos es su fácil integración y la pequeña cantidad de componentes externos necesarios para que funcione. De hecho, este chip puede llegar a integrarse exclusivamente con dos condensadores cerámicos entre los pines de alimentación y masa. Sin embargo, se hace necesario incluir otros componentes que permitan un mayor control sobre las etapas periféricas, sobre el propio chip y finalmente sobre la funcionalidad última a implementar.

Fijándonos en la captación de requisitos se deberá tener en cuenta lo siguiente con el fin de conseguir la funcionalidad deseada:

- Un puerto EUSART para la integración de transceptor bluetooth.
- Un puerto I2C para la integración de otros periféricos I2C esclavos.
- Implementación de un circuito de reset.

- Adaptación de las líneas de entrada/salida necesarias para la monitorización y control de otras etapas del circuito tales como la interfaz de grabación/depuración de firmware, pulsadores, oscilador externo, etc.

Para entender mejor la integración del chip, se muestra a continuación [Figura 3.13], el esquemático generado para el diseño de esta etapa de procesamiento:

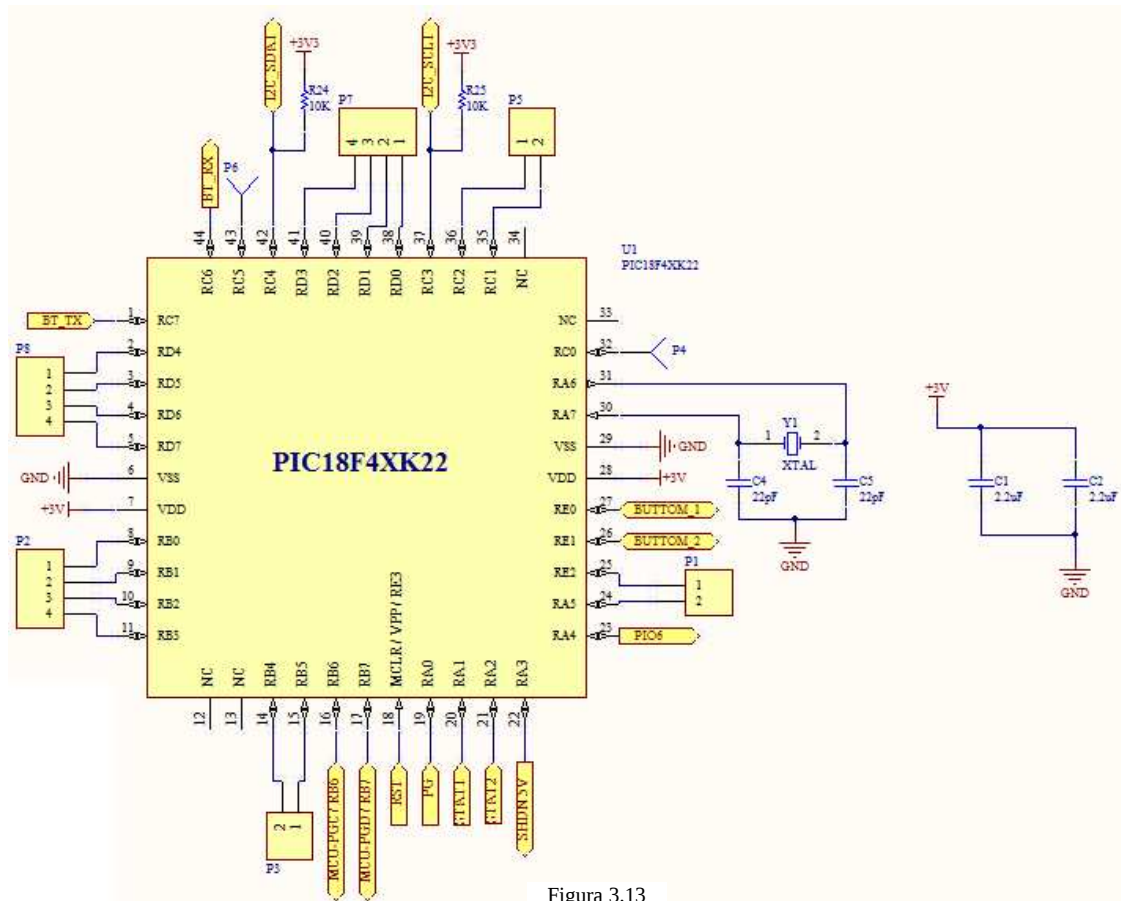


Figura 3.13

En cuanto a su alimentación, basta con introducir un condensador cerámico de 2.2uF entre cada uno de los dos pines de alimentación V_{DD} y masa V_{SS} .

Para los pines correspondientes a la comunicación mediante el puerto EUSART con el transceptor bluetooth, es necesario adaptación, pero esta se muestra en su etapa de diseño. Si podemos observar, cómo se incluyen resistencias de pull-up en las líneas I2C según las especificaciones de su estándar.

Aunque se podría usar su oscilador interno regulándolo a la frecuencia de oscilación deseada, se prefiere añadir la posibilidad de utilizar un oscilador externo, con el fin de aumentar la velocidad de trabajo del chip hasta su máximo permitido de 64MHz si fuera de interés. La introducción de un oscilador externo se hace con el fin de no cerrar puertas a posibles modificaciones del sistema, sin embargo, si finalmente se optará por usar el oscilador interno simplemente bastaría con configurar el chip de esa forma e incluso suprimir el oscilador externo del circuito. La integración del oscilador o cristal se reduce a la utilización de dos condensadores cerámicos entre cada uno de los pines

del oscilador y masa. El valor de los mismos usualmente se calcula como el doble de la capacidad del propio oscilador o el valor comercial más cercano a la misma.

Con el fin de acceder con mayor facilidad a aquellos pines que no se usan porque no son necesarios según las especificaciones iniciales, todos ellos se sacan al exterior a través de conectores. Esto nos permite realizar ampliaciones futuras de forma cómoda.

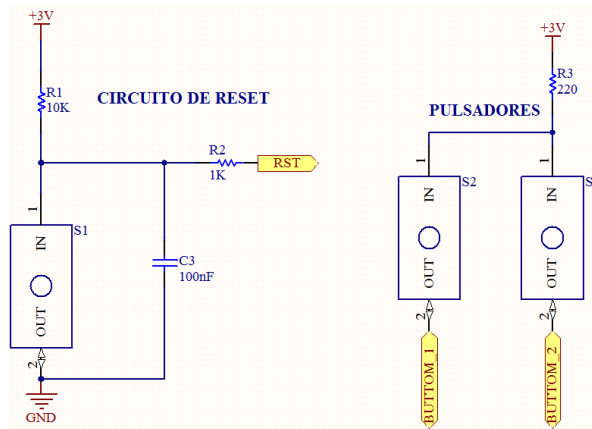


Figura 3.14

Finalmente se incluye el circuito de reset y dos pulsadores que funcionarán como entradas digitales asíncronas, por si fuera necesaria una actuación exterior para manejar posibles opciones no disponibles por defecto. Los esquemáticos correspondientes a estas funcionalidades pueden verse en la imagen anterior [Figura 3.14].

3.3 La etapa de grabación y test.

La grabación del microcontrolador requiere de una interfaz especial dedicada exclusivamente para esta tarea. Es muy ventajoso poder realizar actualizaciones del firmware del sistema e incluso hacer depuraciones del mismo sobre la propia PCB. Para este cometido, el microcontrolador usado incorpora ICSP (In-Circuit Serial Programming) e ICD (In-Circuit Debug).

Ambas herramientas facilitan las librerías y la interfaz necesaria para grabar y depurar (debugger) el firmware del microcontrolador. Este tipo de depuración es muy ventajosa ya que permite, no solo manejar y comprender el comportamiento del chip, sino conocer el comportamiento de la comunicación de éste, con sus periféricos y con el exterior y tomar las medidas oportunas con el fin de conseguir el comportamiento más apropiado de cara a las especificaciones iniciales.

Para la implementación en capa física de estas herramientas, tan solo es necesario dotar al sistema de un sencillo modo de acceso a los pines del microcontrolador habilitados para tal fin. Para esta tarea, se usará un conector RJ12 estándar de 6 pines, que permita al grabador/depurador acceder desde el exterior, a las líneas MCU-PGC (ICSP programming clock pin), MCU-PGD (ICSP programming data pin) y RESET, del microcontrolador.

En la siguiente imagen [Figura 3.15], se ve en detalle la implementación física necesaria para el uso de estas herramientas, a través del esquemático correspondiente de la etapa.

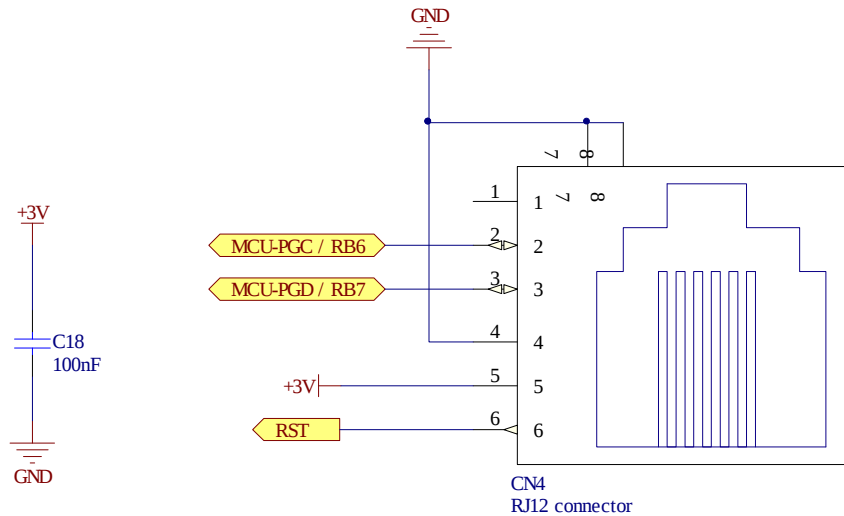


Figura 3.15

Se incorporan además las líneas de alimentación y masa. Esto permitirá alimentar el sistema desde el propio grabador o viceversa.

3.4 La etapa o interfaz de comunicación externa.

La etapa de comunicación externa se encarga de proveer los componentes electrónicos necesarios para integrar el transceptor de comunicación Bluetooth. Ésta permitirá la explotación de datos por parte del usuario final y la integración de los mismos en otros sistemas de almacenamiento o procesamiento de información. En este sentido, ha sido necesario buscar un componente de fácil integración, perfectamente compatible con el microcontrolador utilizado y con los estándares actuales para comunicación vía radio, según estándar de comunicación Bluetooth (IEEE 802.15.1).

El módulo transceptor de bluetooth elegido es el modelo RN-41 de Roving Networks, aunque el diseño sería perfectamente compatible con el modelo RN-42 del mismo fabricante, cuyas únicas diferencias radican en la potencia de transmisión y el precio, siendo menores las de este último. Se trata de un módulo bluetooth de clase 1, con antena cerámica integrada y fácil integración, a través de los más importantes estándares de comunicación con microcontroladores actuales [Figura 3.16]. Las características más destacables de este módulo transceptor de bluetooth son [18]:

- Compatible con todas las versiones del estándar bluetooth hasta la 2.1.
- Bluetooth v2.0 con soporte para EDR.
- Reducidas dimensiones: 13.4mm x 25.8mm x 2mm.
- Modalidad de bajo consumo o sniff mode <10mA.
- Posibilidad de integración a partir de varias interfaces de comunicación: UART, USB, PCM y PIO.

- Velocidades de transmisión de hasta 240Kbps en modo esclavo y 300Kbps en modo máster. Sensibilidad de -80dBm. Potencia de transmisión de 15dBm.
- Modulación FHSS/GFSK con hasta 79 canales.
- Encriptación de datos de 128 bits y corrección de errores.

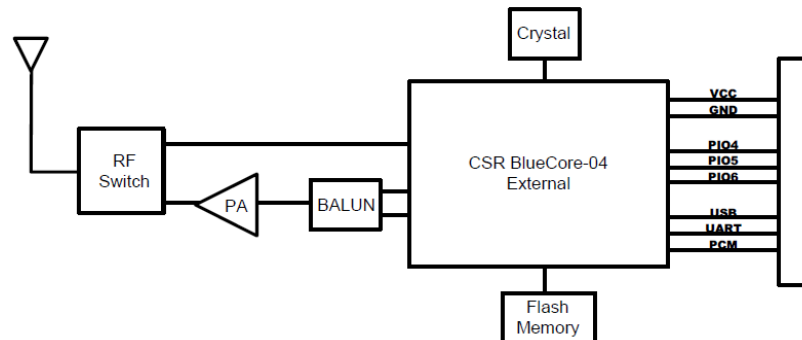


Figura 3.16

Su interfaz de comunicación UART nos permitirá integrarlo fácilmente con el microcontrolador a través de cualquiera de los dos puertos EUSART de los que dispone. Adicionalmente, la configuración del transceptor puede ser realizada a través de comandos ASCII sencillos. Esto nos permite pasar del modo configuración al modo envío/recepción de datos, descubrir dispositivos cercanos durante un tiempo configurable y emparejarse y conectarse de forma segura con aquellos dispositivos móviles que deseemos.

A continuación [Figura 3.17] se muestra el esquemático correspondiente a esta etapa.

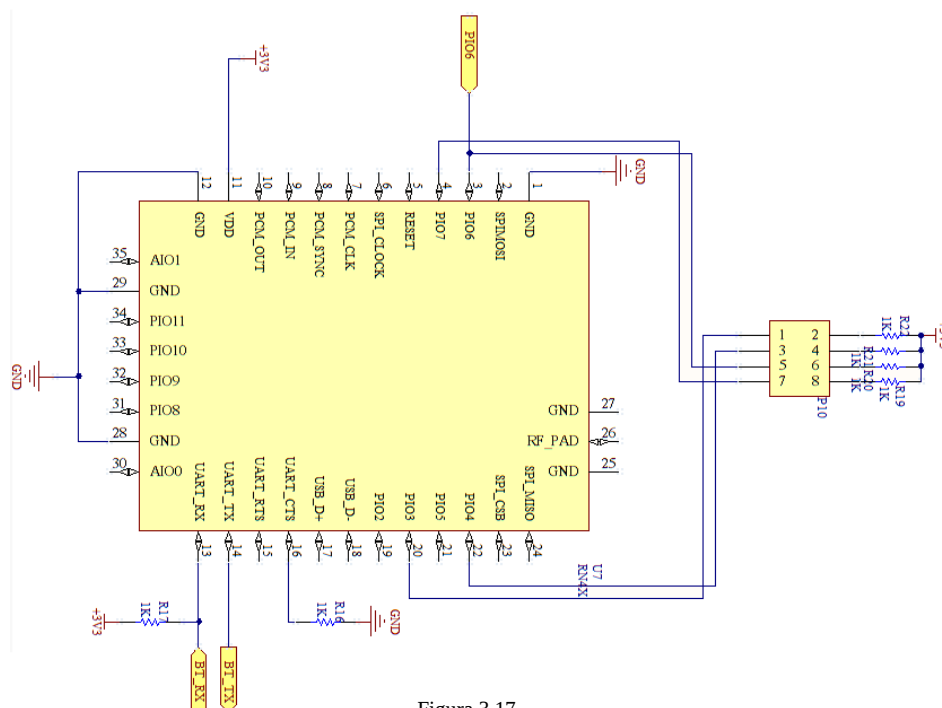


Figura 3.17

Se puede observar como su integración en el sistema básicamente consiste en una resistencia de pull-up en la línea de recepción de datos BT_RX que conecta el pin correspondiente del módulo bluetooth con uno de los pines de transmisión EUSART del

microcontrolador. El puerto PIO6 del módulo, permite en modo alto realizar la conexión directa con un dispositivo determinado, fijo o previamente hallado en una búsqueda (inquiry). Este modo de conexión es más eficiente, según los test realizados, que hacerlo mediante comandos ASCII, ya que activando o desactivando esta línea desde el microcontrolador, la conexión o desconexión se realiza de forma inmediata a nivel de hardware. Tanto el puerto PIO6 como los PIO3, PIO4 y PIO7 son mapeados hacia el exterior a través de conectores independientes que permitan la habilitación o deshabilitación de los mismos a través de una resistencia de pull-up de 10K Ω . El uso de estos puertos, permite una configuración más abierta y directa del módulo a nivel de hardware.

3.5 La etapa de muestreo analógico.

La descripción del diseño de esta etapa y la siguiente (muestreo digital) podrían hacerse al mismo tiempo ya que la etapa de muestreo analógico puede verse como una continuación de la etapa de muestreo digital o viceversa. Esto es así porque el muestreo de toda señal analógica lleva asociado su conversión a una señal digital que es, finalmente, la que podremos cuantificar en la etapa de procesado.

De este modo, vamos a llamar etapa de muestreo analógico, a una pre-integración de sensores u otros dispositivos, que se facilita al usuario o integrador del sistema, con el fin de ahorrarle parte del trabajo de fabricación y diseño electrónico. Para tal tarea, se habilitan en el sistema un conjunto de conectores que permiten la inclusión de otros subsistemas y que facilitan el acceso a los pines de un amplificador operacional de bajo consumo. Con el fin de entender mejor esta idea, se muestra a continuación [Figura 3.18] el esquemático correspondiente al diseño de esta etapa.

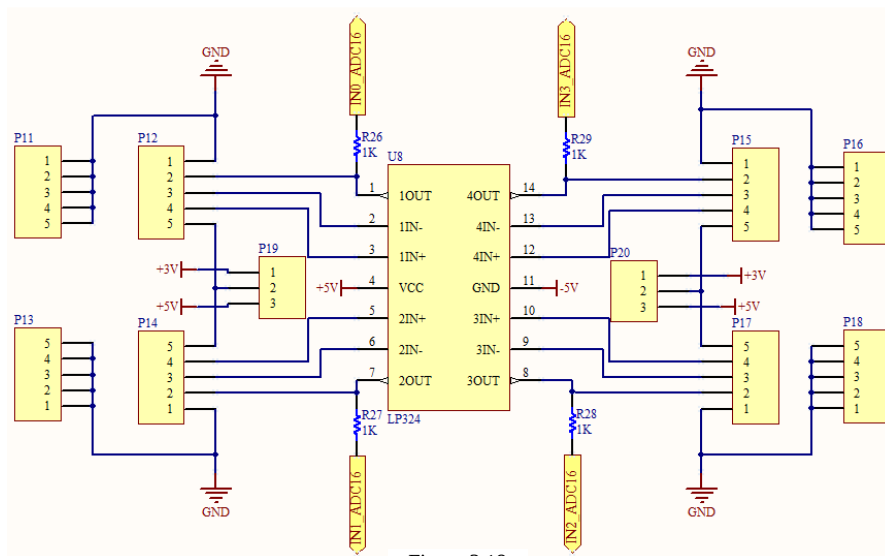


Figura 3.18

Como puede observarse en el esquemático de la etapa, se habilitan hacia el exterior cuatro pares de conectores, que actuarán como slots de conexión para tarjetas externas, que integren sensores u otro tipo de dispositivos analógicos a cuantificar.

Cada slot (par de conectores) facilita las señales de alimentación (+5V o +3V) y masa (GND), además de las dos entradas (IN+ e IN-) y la salida (OUT) de un amplificador operacional, que es alimentado de forma diferencial a los niveles de $\pm 5V$ proporcionados por la etapa de alimentación. El usuario puede elegir usar este amplificador de la forma más conveniente para la integración de su dispositivo, o por el contrario, ignorarlo.

El integrado utilizado en este caso es el LP324 [19] de Texas Instruments. Se trata de un amplificador operacional cuádruple, es decir, el integrado contiene cuatro amplificadores operacionales independientes. Las características más importantes que han llevado a la elección de este componente son su reducido consumo y las altas prestaciones que ofrece para aplicaciones portátiles:

- Corriente de alimentación típica de 85uA y corriente de Bias de 2nA
- Pin de masa común y tensión de alimentación $3V < V_{CC} < 32V$

Finalmente, los pines de salida (OUT) de cada operacional, son llevados a la entrada de uno de los canales del convertidor analógico/digital externo al microcontrolador, descrito en la siguiente y última etapa, a través de una resistencia que proteja y limite la intensidad que circule por la línea.

3.6 La etapa de muestreo digital.

Para finalizar la etapa de diseño electrónico del sistema, se presenta a continuación los pasos dados para el diseño de esta última etapa, cuya fin último es la de proveer al usuario o integrador la posibilidad de conectar al sistema sensores u otros dispositivos cuya lectura se facilita en forma de señal digital.

Para este fin, se habilitan varios conectores o slots, al igual que en la etapa anterior, que externalizan el uso del bus I2C del microcontrolador, con el propósito de conectar dispositivos que se rijan por este modo de comunicación. A continuación se puede observar el esquemático correspondiente a esta etapa del diseño [Figura 3.19]:

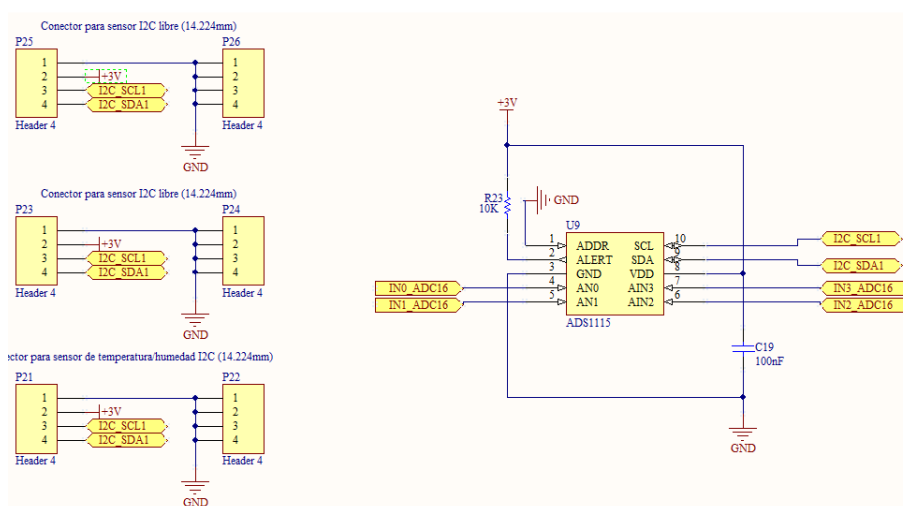


Figura 3.24

De forma análoga a lo visto en la etapa de muestreo analógico, tres pares de conectores habilitan el conexionado de hasta tres dispositivos, proveyendo tanto las señales de alimentación (3V) y masa (GND), como las de las líneas de reloj (I2C1_SCL) y datos (I2C1_SDA) del primer bus I2C del microcontrolador.

Se añade en esta etapa y como primer componente esclavo del bus I2C, un convertidor analógico/digital de 16 bits, cuyo propósito sea realizar una conversión de alta resolución, de los niveles de tensión vistos a la salida de los amplificadores operacionales de la etapa anterior y comunicar bajo petición, el valor digital correspondiente al microcontrolador.

La razón de usar un convertidor externo al microcontrolador, es proporcionar una mayor resolución ante señales de baja potencia (del orden de milivoltios o microamperios), ya que el módulo convertidor integrado en el microcontrolador posee una resolución de tan solo 10 bits. El convertidor analógico/digital usado es el ADS1115 de Texas Instruments [20], un componente de bajo coste y referencia interna de tensión, cuyas características más significativas son las siguientes:

- Pequeño tamaño 2mm x 1.4mm x 0.4mm y bajo coste.
- Ultra bajo consumo, tan solo 150uA alimentado a tensiones entre 2V y 5.5V.
- Velocidad de muestreo de hasta 860 muestras por segundo y oscilador interno.
- Posibilidad de medir respecto a masa o de forma diferencial.
- Interfaz de comunicación I2C esclavo.

3.7 Conclusiones finales sobre el diseño electrónico.

Siguiendo la captación de requisitos iniciales, se ha procedido al diseño de aquellas etapas necesarias para la consecución de todos ellos. Al mismo tiempo se han descrito los componentes más importantes, que por su complejidad pueden tener un comportamiento y un tratamiento especial dentro del circuito. Se han dado también pautas de comportamiento que ayudarán a la futura implementación del prototipo PCB, obtenidos de la bibliografía consultada y de la experiencia personal acumulada, relativo a todos los componentes y estándares que participan en el diseño.

4. Diseño y fabricación de la PCB e integridad de señal.

En esta parte del proyecto se describirán todos los pasos dados para la fabricación real de un prototipo electrónico fiel al diseño previamente descrito. Para este cometido será necesario contar de forma ordenada y precisa todas aquellas etapas que llevan a una correcta y funcional implementación física. De este modo podemos dividir este capítulo en:

- Diseño por computador de la PCB.
- Estudio de la integridad de señal en aquellas redes del circuito que puedan afectar su funcionalidad.
- Implementación física del sistema. Método de fabricación.

4.1 Diseño de la PCB.

El diseño de la PCB (Printed Circuit Board) o circuito impreso consiste en la colocación estratégica de todos los componentes que forman parte del diseño electrónico y del trazado de pistas que los conectan. Este trabajo puede resultar trivial en circuitos sencillos, sin embargo, su complejidad aumenta de forma proporcional al número de componentes e inversamente proporcional al tamaño final deseado de la PCB. En este caso nos encontramos ante un circuito que ya posee un número importante de componentes, que forman un número mayor de redes de conexión entre ellos.

El diseño de la PCB se realizará con el software de diseño electrónico Altium Designer, de hecho, todos los esquemáticos vistos anteriormente son parte de este diseño de PCB; ya que el software parte de ellos para unir todas las etapas. Nos permite, de este modo, ya sea de forma manual o automática, colocar los componentes en el área de placa y trazar las pistas de conexión entre ellos.

Aunque Altium dispone de una herramienta de posicionado automático de componentes, finalmente se ha optado por un posicionado manual, debido a que la gran cantidad de componentes hace muy difícil su utilización. Lo mismo se puede decir para el conexionado o enrutado de las pistas, que también se ha hecho de forma manual por el mismo motivo.

Debido a restricciones de fabricación, ya que como se verá posteriormente, se recurre a una fabricación tradicional, el diseño de la PCB será de doble capa. Esto quiere decir que los componentes y las pistas ocuparán tan solo las caras anterior y posterior del circuito impreso. El diseño de doble capa es perfectamente factible en este tipo de diseños debido a que, aunque el número de componentes ya es importante, no es lo suficientemente elevado como necesitar más de dos capas. Además, la frecuencia de trabajo del microcontrolador es relativamente baja, por lo que la integridad de señal está asegurada siempre y cuando el diseño del circuito sea correcto. En cualquier caso el software Altium permite el diseño en tantas capas como el usuario estime oportuno.

El trabajo de posicionamiento y enrutado manual puede resultar tedioso y costoso en tiempo, cuando el número de componentes y redes de conexión es lo suficientemente elevado; por este motivo, no vamos a detenernos en describir este proceso, sino que pasaremos directamente a observar la apariencia final de la PCB y a comentar los principales puntos tenidos en cuenta en su diseño.

Las imágenes siguientes [Figuras 4.1 y 4.2] muestran el aspecto que la PCB mostrará por su cara superior e inferior respectivamente.

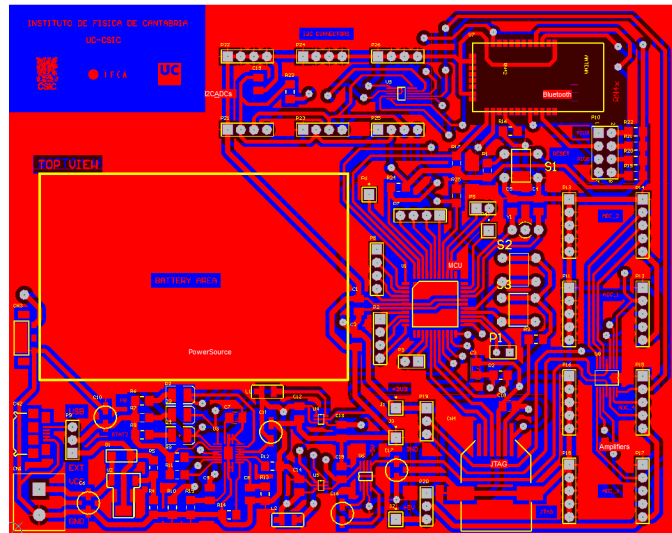


Figura 4.1

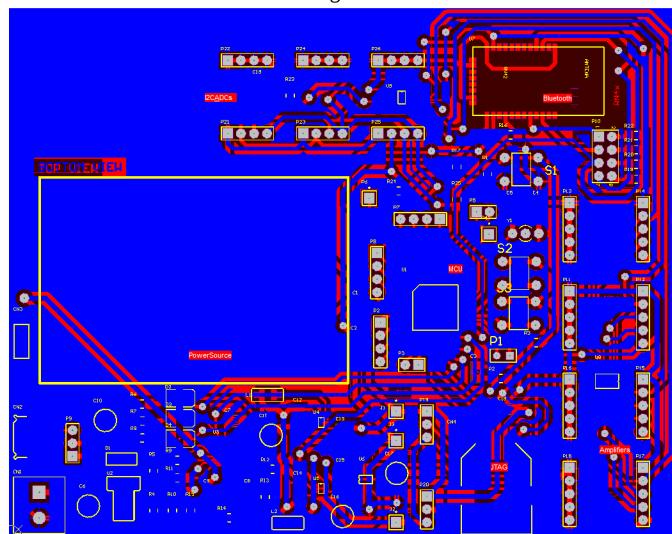


Figura 4.2

En este caso, los aspectos más importantes tenidos en cuenta en el posicionado de componentes y el trazado de pistas son los siguientes:

- Se ha procurado la máxima separación de las bobinas que forman parte de las subetapas boost, de la etapa de alimentación.
- Se ha evitado el trazado de pistas o planos de masa en la zona ocupada por el transceptor de comunicaciones con el fin de evitar interferencias no deseadas en la comunicación.
- El plano de masa se ha extendido a toda la superficie libre en ambas caras.

- Se ha procurado la mejor disposición de componentes para disminuir el número de vías necesarias en la posterior fabricación de la PCB.
- Se ha procurado, en todo caso, la máxima anchura posible de las pistas en el enrutado, teniendo especial cuidado en las pistas de potencia de la etapa de alimentación.
- Se han tenido en cuenta las dimensiones de cada componente, diseñando los pads de todos ellos según sus datasheets correspondientes. Igualmente se ha dejado el espacio suficiente para alojar una batería de li-ion estándar.

Después de todo este trabajo, se pueden dar unos números que den una idea de las complejidades que afectarán al proceso de fabricación y que se tendrán en cuenta para emplear las técnicas más apropiadas.

- El tamaño de la pista más estrecha será de 0.35mm.
- El diámetro de los taladros más pequeños será de 0.5mm.
- El número de vías a practicar será de más de 180, entre vías estratégicas para el enrutado de pistas y vías obligatorias para el posicionado de componentes de agujero pasante.
- Las dimensiones de la PCB serán de 102mm x 75mm. Estas dimensiones pueden reducirse, sin embargo, por tratarse de un prototipo que se testeará más adelante, se ha querido dejar el espacio suficiente para poder trabajar más libremente.

4.2 Integridad de señal.

Altium Designer dispone de una herramienta que nos permite analizar la integridad de señal de nuestro circuito. Para ello todos los componentes de los que se ha hecho uso han de tener asociado un archivo en el que se especifica el comportamiento de cada uno de sus pines, es decir, si es un pin de entrada, salida, alimentación, etc. Muchos fabricantes distribuyen esta información en forma de archivos IBIS. Altium a su vez es capaz de asociar el comportamiento a cada pin por defecto si no le proveemos del archivo IBIS necesario. Esta opción puede ser factible en el caso de componentes sencillos tales como resistencias, condensadores, inductancias, conectores, cristales, diodos, etc., ya que su modelo es bien conocido y Altium lo incluye en su instalación. Es factible también para componentes como los reguladores de tensión cuyos pines son, generalmente POWER. Sin embargo, para componentes más complejos como los microprocesadores o microcontroladores es necesario que el fabricante distribuya de uno u otro modo el comportamiento del mismo.

Con el fin de realizar un análisis exhaustivo, se importó el archivo IBIS del microcontrolador y se generó manualmente el del transceptor Bluetooth, de acuerdo a las especificaciones del fabricante.

El análisis de integridad de Altium permite estudiar las reflexiones y el crosstalk en cada una de las redes que componen nuestro circuito. Sin embargo, incluir aquí un estudio gráfico de las reflexiones y el crosstalk de cada una de ellas sería largo y poco

práctico. En vez de esto, se mostrará el comportamiento de aquellas que pueden comprometer con mayor probabilidad la funcionalidad del sistema.

Como primer ejemplo podemos estudiar alguna de las líneas entrada/salida del microcontrolador. A continuación [Figura 4.3], muestra la reflexión de la línea de interconexión entre el micro y uno de los pulsadores.

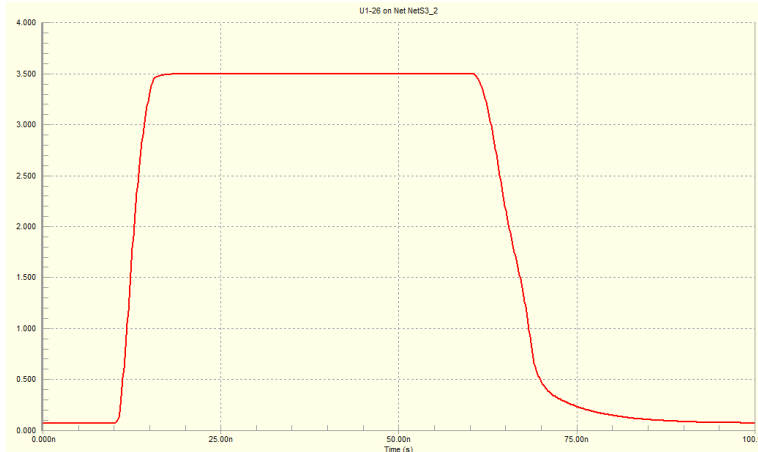


Figura 4.3

Se puede observar como el comportamiento es cercano al ideal sin presencia de overshoots ni undershoots en la señal.

Otro ejemplo más comprometido pueden ser las redes formadas por los buses I2C de comunicación del microcontrolador. El estudio de reflexión de la línea de datos I2C con sus terminaciones adyacentes puede verse en la siguiente imagen [Figura 4.4].

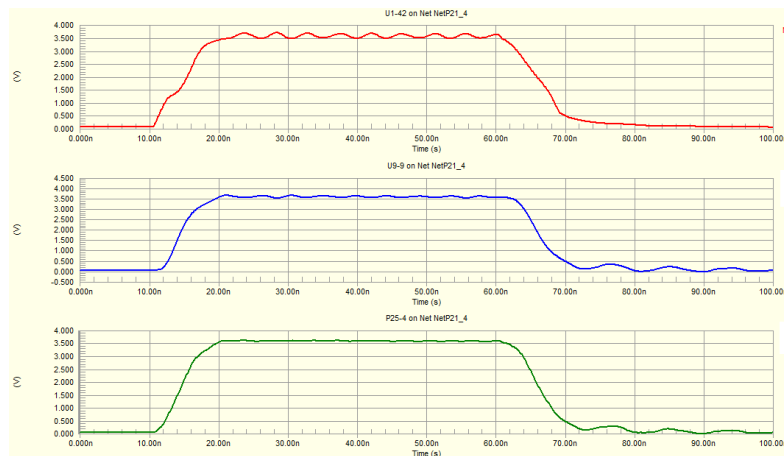


Figura 4.4

En este caso sí se observan ligeras oscilaciones y leves overshoots que se amortiguan rápidamente motivados por la no adaptación de las líneas. Esto es debido a que las dos líneas del bus I2C se llevan hacia el exterior a través de los conectores habilitados para la conexión de sensores u otros dispositivos externos. Este comportamiento puede reducirse introduciendo una resistencia en el bus, sin embargo, la propia integración del sensor amortiguará estos efectos, incluyendo en sí misma la adaptación de las líneas.

Como ejemplo de crosstalk puede observarse el comportamiento del bus UART que permite la comunicación entre el micro y el transceptor bluetooth. La imagen siguiente [Figura 4.5] muestra el análisis de crosstalk en ambas redes.

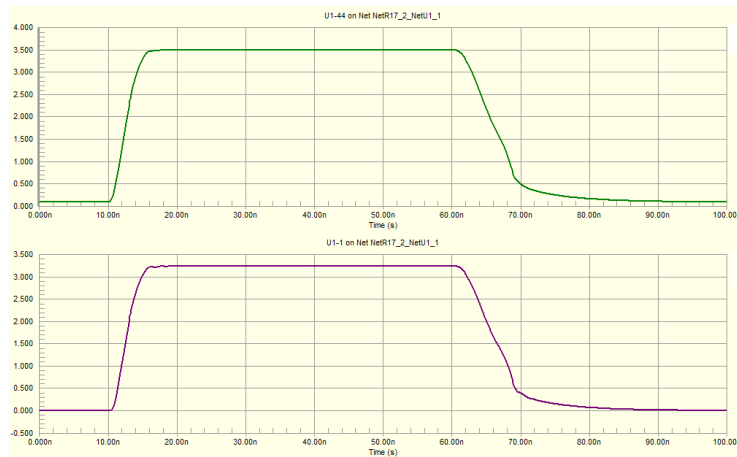


Figura 4.5

Nuevamente se observa un buen comportamiento, característico de una línea sin crosstalk bien adaptada.

El estudio de reflexión y crosstalk se ha realizado sobre muchas de las líneas que forman parte del circuito, con resultados satisfactorios. Sin embargo, se observan mínimamente estos efectos sobre líneas no adaptadas como aquellas que incluyen terminaciones de conectores externos.

4.3 Fabricación de la PCB.

La fabricación de la PCB prototipo se realizará mediante el método tradicional de revelado más atacado del circuito impreso. Para esta tarea podemos enumerar una serie de pasos y materiales empleados para la obtención de un prototipo con un aspecto y unas características de comportamiento eléctrico cuasi profesionales.

Los pasos empleados para la generación de la PCB son los siguientes:

1. Obtención de los fotolitos de ambas caras de la PCB e impresión de buena calidad en papel transparente o translucido.
2. Revelado de la circuito impreso haciendo uso de una insoladora, al ser posible, de doble cara.
3. Atacado del circuito impreso mediante algún atacante químico típico.
4. Pulido de la PCB resultante de los pasos anteriores.
5. Primer tratamiento de estañado químico que permita una sobreprotección del circuito ante la corrosión y un aumento la conductividad de sus pistas.
6. Practicar los taladros correspondientes, con el diámetro prefijado en la etapa de diseño de la PCB e implementar físicamente las vías allí donde correspondan.
7. Segundo tratamiento de estañado químico con la finalidad de proteger las vías previamente realizadas.
8. Soldado de todos los componentes electrónicos que forman parte del diseño de la PCB.

Los materiales y herramientas empleados para la fabricación son:

- Papel transparente o translucido, en este caso se ha usado papel vegetal. Pegamento y cinta adhesiva.
- Útiles básicos para el revelado de PCBs tales como palancas de PVC, pinzas, guantes de látex, mascarillas, etc.
- Agua, líquido revelador, cloruro férrico y plateado químico.
- Insoladora COVENCO de doble cara y 6 tubos fluorescentes de 15W de luz ultravioleta por cara.
- Soporte y taladro DREMEL con brocas de diferentes diámetros. Guillotina.
- Remaches y lija de grano fino.
- Polímetro.
- Flux, cinta desoldadora, hilo de estaño grueso y fino, pinzas, lupa, tijeras, estación de soldadura y puntas de soldador de diferente diámetro.

El primer paso para la fabricación de la PCB es la obtención en papel transparente o translucido de los fotolitos de ambas caras de la PCB. Altium nos hace este trabajo automáticamente una vez se ha diseñado la PCB tal y como se ha visto en el capítulo anterior. En la imagen [Figura 4.6] se muestra el fotolito de la cara superior de la PCB (no a escala).

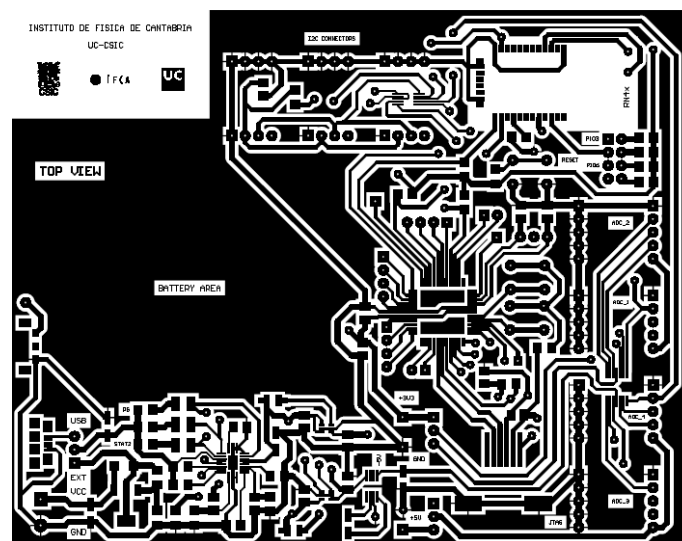


Figura 4.6

Una vez impresos ambos fotolitos y comprobado visualmente su integridad, se superponen en ambas caras de una placa fotosensible virgen. En este caso se usa una placa fotosensible positiva de fibra de vidrio de doble cara de la casa BUNGARO, con un espesor total de 1.5mm y un espesor de la lámina de cobre de 35um/35. Se ha de tener especial cuidado de alinear bien los fotolitos con el fin de que los taladros de la capa superior coincidan con los de la capa inferior.

La placa fotosensible se revelará en la insoladora, teniendo en cuenta la potencia de los tubos de luz UVA y algunas pruebas hechas para el tipo de placa en cuestión. El tiempo óptimo de revelado se fija en 2' 10''.

Concluida la etapa de revelado y una vez bien aclarada con agua, se procederá a la etapa de atacado químico. Como nos encontramos ante un circuito impreso que contiene pistas muy estrechas (algunas de ellas de 0.35mm) se necesitará un atacado lento que permita tener un mayor control y un tiempo de actuación más elevado. Por esta razón, se usará una solución de cloruro férrico (FeCl_3). Como se prefiere un atacado lento no se calentará la solución y se procederá a una temperatura ambiente de 26°C aproximadamente, adecuada en este caso. Entre 10' y 15' después se habrá conseguido finalizar el proceso de atacado.

Después del atacado y una vez bien enjuagada con agua, se comprobará visualmente primero y con un polímetro después, la conductividad de todas las pistas del circuito, esto permitirá encontrar posibles cortes y decidir si es conveniente arreglar la pista o empezar de nuevo el proceso de fabricación.

Con el fin de proteger la PCB de la corrosión se opta con bañarla en una solución a base de cristales de estaño, esta solución además de proteger la PCB aumenta la conductividad de sus pistas. Visualmente pasará del color anaranjado del cobre a un plateado mate. Finalmente se aclara con agua y se deja secar al aire.

Una vez fabricada la placa, se practicarán los taladros correspondiente a las vías y a los componentes de agujero pasante, teniendo en cuenta en todo momento las dimensiones del taladro en cada caso. Las vías se rematarán con remaches de cobre cuyos extremos se prensarán contra ambas caras de la PCB. Acabado este proceso se concluirá con un nuevo estañado químico que proteja la integridad de los remaches.

Para finalizar el proceso de fabricación de la PCB se soldarán los componentes que componen el diseño, empezando por aquellos de montaje superficial (SMD) y/o de menor tamaño. En la siguiente imagen [Figura 4.7] se puede ver el resultado final del proceso de fabricación.

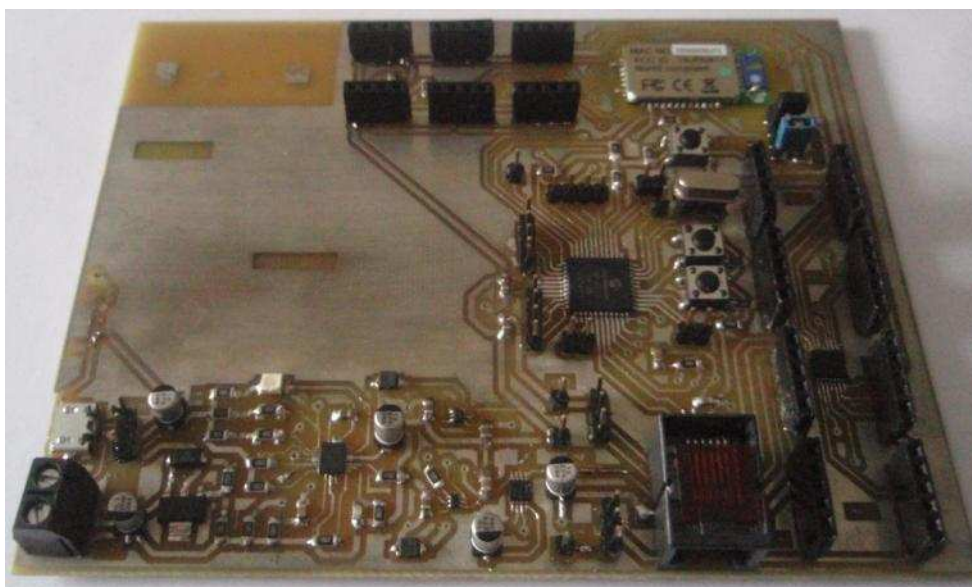


Figura 4.7

5. Integración electrónica de sensores. Dos casos de uso.

La PCB diseñada funcionará como placa base o placa de integración de uno o más sensores, que podrán acoplarse a la misma a través de los slots implementados para tal efecto. En este caso, disponemos de 4 slots para la integración de sensores cuya lectura se realiza de forma analógica (nivel de voltaje), y 3 slots para la integración de sensores cuya lectura se realiza de forma digital a través del bus de comunicación I2C.

En este capítulo se describe la integración de dos sensores, uno para cada tipo de slot. El primero de ellos se trata de un sensor de temperatura y humedad con interfaz I2C y el segundo, consiste en la integración de un sensor de monóxido de carbono que proporciona una señal de tensión proporcional a la concentración de este gas.

5.1 Integración de un sensor a través de I2C.

Como ejemplo de integración de un sensor digital capaz de comunicarse mediante un bus I2C [21] con el microcontrolador, se usará el sensor HIH-6130 de Honeywell. El HIH-6130 es un sensor de bajo coste capaz de proporcionar la medida de humedad relativa y temperatura del ambiente. Las principales características de este sensor [22] son las siguientes:

- Bajo coste y alta eficiencia energética, capaz de operar a tensiones menores de 2.3V y con un consumo de 650uA en modo activo contra 1uA en modo inactivo.
- Alta resolución: 14 bits para ambas medidas.
- Capaz de funcionar a temperaturas entre -25°C y 85°C.
- Compensación automática de la variación de temperatura provocada por la comunicación I2C.

El procedimiento de integración es sencillo ya que tan solo se necesitan dos condensadores para la integración más simple. Como se observa [Figura 5.1], basta con un condensador cerámico de 0.22uF entre los pines V_{DD} y V_{SS} y otro de 0.1uF entre V_{CORE} y V_{SS} . En este caso se va a prescindir de los pines de alarma, por no ser de interés, y las resistencias de pull-up del las líneas I2C (SCL y SDA), ya que fueron incluidas en el diseño de la PCB base y no será necesario volver a hacerlo.

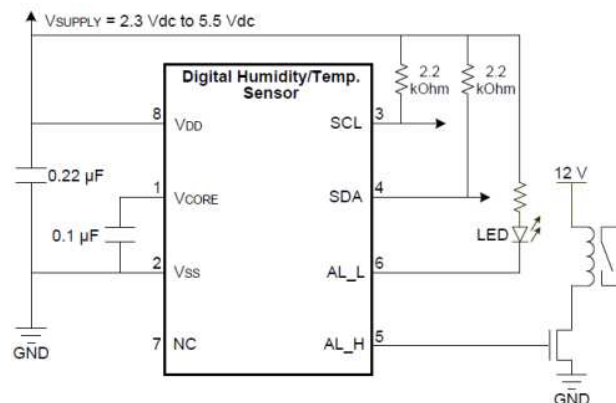


Figura 5.1

El diseño del esquemático se efectúa siguiendo escrupulosamente las recomendaciones del fabricante, en cuanto al valor y tipo de componentes necesarios. El esquemático además, debe incluir el conector macho que permita su inserción en la placa base. El diseño final queda como se observa en la imagen siguiente [Figura 5.2].

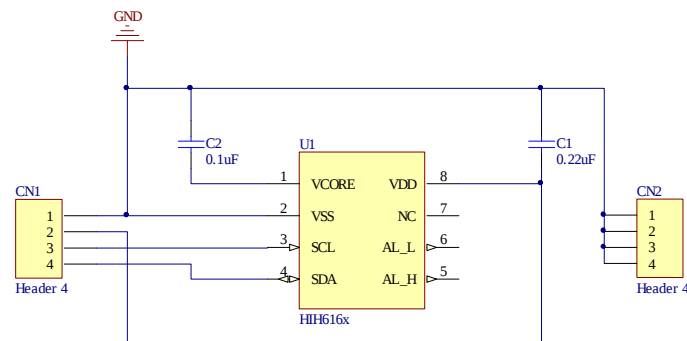


Figura 5.2

Seguidamente se procederá al diseño de la PCB, que en este caso se tratará de reducidas dimensiones e irá montada sobre la PCB base [Figura 5.3]. El proceso de diseño usado es idéntico al utilizado anteriormente y en este caso, se ha de tener especial cuidado de situar los conectores a la distancia apropiada, con el fin de que el encaje de ambas PCBs sea perfecto.

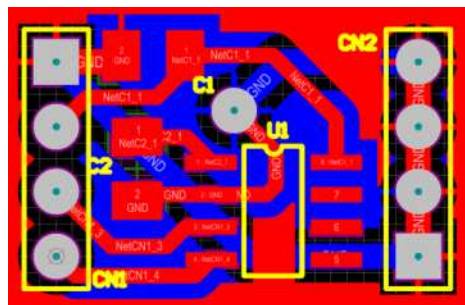


Figura 5.3

Finalmente, se procederá a la fabricación [Figura 5.4] de la misma, siguiendo el método tradicional anteriormente descrito con meticulosidad.



Figura 5.4

Se habrá de tener especial cuidado en el soldado de este integrado puesto que posee una ventana en contacto con el aire que le permite muestrear la humedad y la temperatura con mayor precisión.

5.2 Integración de un sensor con salida analógica

Como ejemplo de integración de un sensor analógico, se usará un sensor de monóxido de carbono (CO), concretamente el modelo TGS5042 de Figaro. El TGS5042 es un sensor electroquímico que opera a modo de batería ofreciendo ventajas sobre otros sensores electroquímicos tradicionales. Las principales características de este sensor [23] son las siguientes:

- Es capaz detectar concentraciones de CO₂ más altas del 1% (0 – 10000ppm).
- Opera en un rango de temperatura entre -40°C y 70°C.
- Tiene muy baja sensibilidad ante otro tipo de gases.
- Larga durabilidad, gran estabilidad y precisión.

Adicionalmente, al no necesitar alimentación, su consumo es nulo ya que es la propia interacción de su electrólito con el gas, la que genera una corriente eléctrica proporcional a la concentración del CO en partes por millón.

Su integración es sencilla y consiste en convertir la pequeña corriente generada por el sensor en una tensión fácilmente medible [Figura 5.5] por uno de los conversores analógico/digital de la placa madre.

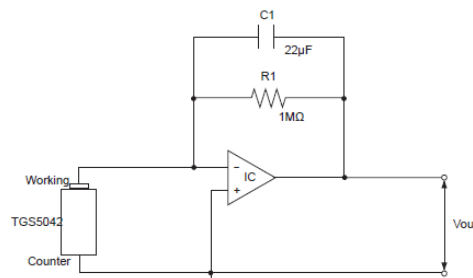


Figura 5.5

La mayoría de sensores de este tipo incluyen un amplificador operacional en su integración, es la principal razón por la que se incorporó un integrado de operacionales de bajo consumo en la placa madre que permita ahorrar trabajo al integrador, en este caso se hará uso de esta ventaja y se ahorrará un componente en el diseño de la mini PCB que integrará el sensor de CO. El diseño final del esquemático deberá de tener en cuenta la posición de los pines de los slots ofrecidos para la integración de este tipo de sensores, usando en este caso los tres terminales correspondientes al amplificador operacional y la masa (GND) [Figura 5.6].

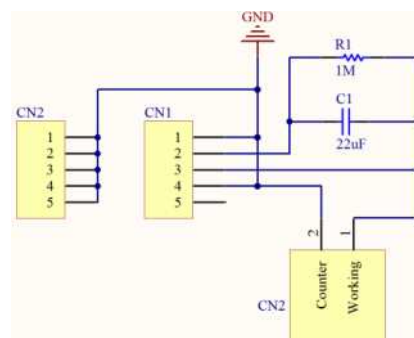


Figura 5.6

El modo de diseño de la PCB es idéntico al de etapas anteriores, en la imagen siguiente [Figura 5.7] se muestra el diseño final de la PCB para este sensor.

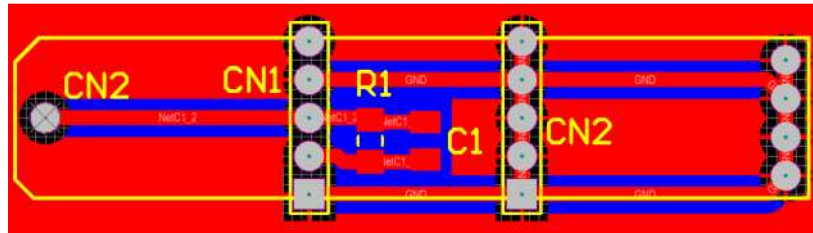


Figura 5.7

Igual que ocurría con el sensor anterior se ha de tener especial cuidado en la distancia entre los conectores CN, con el fin de que el encaje en la placa madre sea preciso.

Finalmente y después de su fabricación se muestra la PCB generada con el sensor ya montado sobre ella [Figura 5.8].



Figura 5.8

6. Generación de Firmware.

Para completar la integración de todo el hardware generado hasta el momento, es necesario implementar la lógica en el microcontrolador. El firmware es el nexo de unión de todas las etapas a nivel lógico y ejecuta las órdenes necesarias con el fin de cumplir la funcionalidad para la cual el hardware ha sido diseñado.

La generación del Firmware del microcontrolador requiere conocer a fondo las características del mismo y tener a disposición toda la bibliografía posible que haga llevadera esta tarea. Cuando los microprocesadores y microcontroladores aumentan en prestaciones, la información sobre ellos puede sobrepasarnos sino estructuramos las prioridades atendiendo a la funcionalidad deseada y por lo tanto, a las herramientas que necesitamos conocer para implementarla.

El firmware no es más que una lista de comandos y configuraciones que el microcontrolador ejecuta de forma ordenada. Por esta razón son necesarias herramientas que permitan la generación de dicho código en un lenguaje que podamos comprender y más adelante, la traducción de dicho código a un lenguaje que pueda comprender la máquina. El compilador hará este trabajo por nosotros y será la principal herramienta en esta etapa.

Existen números tipos de compiladores, para distintos lenguajes de programación, de mayor o menor nivel. Los hay comerciales y también de código libre y unos son más atractivos para el usuario que otros. Aquí es el usuario quien decide y elige la utilización de un compilador u otro.

Existen además, herramientas más complejas; aplicaciones más grandes que integran el compilador dentro de sí y que, a través de una interfaz gráfica, ofrecen un aspecto más atractivo al programador y útiles y variadas herramientas a golpe de clic. Incluyen en ocasiones, completas librerías que abstraen al programador de la complejidad de la arquitectura del chip ahorrándole tiempo y trabajo.

Para el caso que nos ocupa se va a usar un compilador de código C integrado en una aplicación gráfica. Su nombre es MikroC de MikroElektronika, una empresa de reciente creación (1997), pero con un rápido crecimiento y un gran potencial, que ha orientado sus herramientas software a la creación de código de forma sencilla y que incluye una gran cantidad de librerías para diferentes arquitecturas (PIC, AVR, ARM, STM32, etc.), siendo compatible con dispositivos de grabación y depuración propietarios y de los principales fabricantes.

En este capítulo se describe la generación de un firmware a partir del código fuente escrito especialmente para nuestra arquitectura de hardware. Si bien es cierto, que no se incluirá la totalidad del código implementado por resultar tediosa su asimilación, sí se incluirán diversos fragmentos y se comentará como afecta al funcionamiento del sistema y más en profundidad, en qué sentido ayudan a una disminución del consumo eléctrico. En la siguiente imagen [Figura 6.1] se puede observar una captura del entorno utilizado.

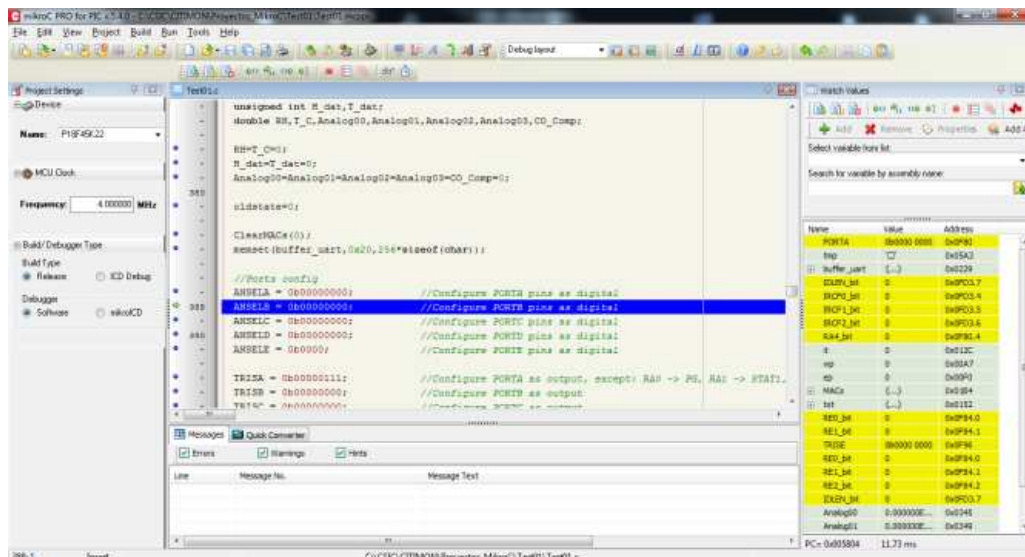


Figura 6.1

El primer paso para la creación de un proyecto en esta plataforma es elegir la arquitectura para la que se va a realizar la programación, activar/desactivar los fusibles necesarios y elegir la frecuencia del oscilador o reloj. Los fusibles sirven para configurar ciertos aspectos del microcontrolador y cada fuse activa o desactiva una de estas opciones, por ejemplo, qué oscilador se usará (interno o externo), habilitación del watchdog, comparadores, etc. En este caso se va a tener especial cuidado en indicar el uso de un oscilador externo de 4MHz. Se ha elegido esta frecuencia debido a que la tasa de error del bus UART del microcontrolador se hace mínima a este valor [17], por otra parte, la velocidad de procesamiento no es una restricción y siempre podemos ahorrar en consumo disminuyéndola.

Como ya se ha dicho, la programación será en lenguaje C. La primera tarea será inicializar, según nos convenga, los puertos de entrada/salida así como habilitar o deshabilitar algunas opciones del microcontrolador a través de sus registros de configuración. A continuación [Figura 6.2] se muestra parte del código que realiza esta tarea.

```
...
//Ports configuration
ANSELA = 0b00000000; //Configure PORTA pins as digital
ANSELB = 0b00000000; //Configure PORTB pins as digital
ANSELC = 0b00000000; //Configure PORTC pins as digital
ANSELD = 0b00000000; //Configure PORTD pins as digital
ANSELE = 0b0000; //Configure PORTE pins as digital

TRISA = 0b00000111; //Configure PORTA as output, except: RA0 -> PG, RA1 -> STAT1, RA2 -> STAT2
TRISB = 0b00000000; //Configure PORTB as output
TRISC = 0b00000000; //Configure PORTC as output
TRISD = 0b00000000; //Configure PORTD as output
TRISE = 0b00000110; //Configure PORTE as output except: RE1 -> button 1, RE2 -> button 2

...
GIE_bit = 1; //Enable general interruptions
C1ON_bit = 0; //Disable comparators
C2ON_bit = 0;

PIE1.RCIE = 1; //Enable uart rx interrupt
INTCON.PEIE = 1;
```

Figura 6.2

Ya a esta altura del código, podemos empezar a tomar medidas con el fin de disminuir el consumo del microcontrolador [Figura 6.3].

```
...
OSCCON.IDLEN=0; //PIC go to sleep mode when SLEEP instruction is executed
...
```

Figura 6.3

Habilitar este bit es de especial importancia ya que obliga al microcontrolador a pasar a modo de ultra bajo consumo durante el tiempo de inactividad provocado por una orden SLEEP.

A continuación, se puede inicializar la comunicación UART con el transceptor bluetooth y la I2C, este trabajo se abrevia si usamos las librerías facilitadas por el entorno de programación [Figura 6.4].

```
...
I2C1_Init(100000);    //Initialize I2C to 100KHz
Delay_ms(500);
UART1_init(9600);     //Initialize UART1 to 9600 bps
Delay_ms(500);
...
```

Figura 6.4

Finalmente y antes de entrar en el ciclo infinito de procesado, se inicializará el módulo bluetooth, configurándolo según convenga y procurando en todo momento un ahorro energético máximo por su parte [Figura 6.5].

```
...
UART1_Write_Text("$$$");    // Enter command mode
while(Find_BTcmd("CMD",3)!=0); // Find the reply
...
UART1_Write_Text("SW,0050"); // SNIFF mode, wake once every 50ms
UART1_Write(13);
...
UART1_Write_Text("---");    // End of bluetooth configuration commands
UART1_Write(13);
...
```

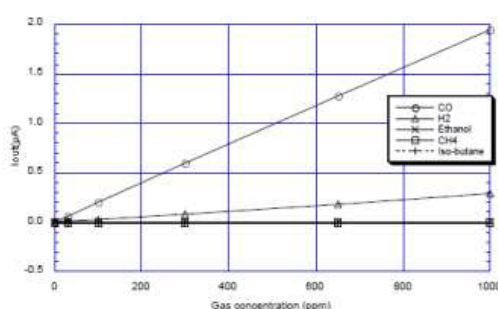
Figura 6.5

En modo de funcionamiento sniff, el módulo bluetooth se duerme y se despierta cada cierto tiempo para vigilar si ha de realizar alguna acción de emisión, recepción, búsqueda de dispositivos, etc. Para finalizar, se entrará en un ciclo infinito que se encargará de diversas tareas tales como:

- Petición de datos a los módulos I2C integrados, tales como el sensor y temperatura y humedad y el convertidor analógico/digital.
- Búsqueda, cada cierto tiempo, de dispositivos en el área de cobertura y auto conexión si responden correctamente.
- Envío de datos vía bluetooth al receptor. Intervalos de SLEEP.

En el caso de la lectura dada por el sensor de CO, se hace necesario según especifica el fabricante, su compensación debido al efecto provocado por la temperatura [Figura 6.6]

Sensitivity Characteristics:



Temperature Dependency:

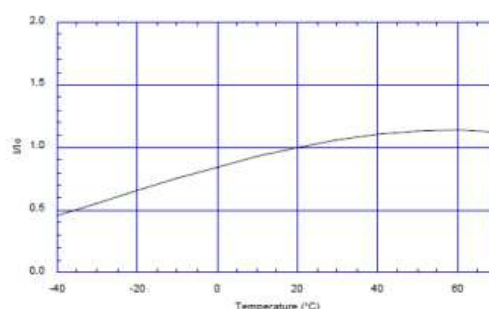


Figura 6.6

En este caso se obtendrá la ecuación de la curva a partir de varios puntos de la misma y se introducirá en el código [Figura 6.7] con el fin de ofrecer un dato más preciso.

```
...
while(1)
{
    ...
    if(Read_HIH6130(&H_dat, &T_dat)==0){
        RH = (double) H_dat * 6.10e-3;
        T_C = (double) T_dat * 1.007e-2 - 40.0;}

    CO = read_ADS1115(0,1,0,0,2); //Voltage proportional to the concentration of CO, channel 0
    CO_Comp_Coef = ((-0.00000075)*pow(T_C,3)-0.0000225*pow(T_C,2)+0.00945*T_C+0.826); //CO compensation coef.

    CO=500*CO*CO_Comp_Coef; //CO = Analog value * Slope of the curve (Gas(ppm)/Io) * Coefficient(T°C)

    reconnect(); //See if it have to search for devices

    if(RA4_bit==1){ //Transmit the frame via bluetooth.
        UART1_Write(0x02);
        sprintf(txt, "V%+07.3fT%+07.2fCO%+07.1f",RH,T_C,CO);
        UART1_Write_Text(txt);
        UART1_Write(0x03);}

    Delay_ms(1000); //Sleep for 1 second
}
```

Figura 6.7

Para este caso de uso y por simplicidad para mostrar como ejemplo, se hará la búsqueda de un dispositivo concreto, buscando por su dirección física MAC, adicionalmente y como se explicará en el siguiente capítulo, se generará un ejemplo de monitorización de los datos capturados en un dispositivo multimedia. Otras posibles funcionalidades a implementar serían:

- La función “reconnect()”, ejecuta cada minuto una búsqueda de dispositivos, almacenando sus direcciones MAC en una cola FIFO. Durante el siguiente minuto envía información a cada MAC de forma cíclica.
- El módulo bluetooth es configurado como MASTER y es el propio usuario desde su dispositivo multimedia quien realiza la búsqueda y se auto-conecta al sistema.
- A partir de varios dispositivos como el diseñado se forma una red más o menos compleja, cuyos nodos intercambian información entre sí. La implantación de redes de nodos de este tipo, es uno de los casos de uso, en cuanto monitorización medioambiental, que pretende el proyecto europeo LifeWatch comentado en la introducción.
- Etcétera.

7. Monitorización inalámbrica.

La principal ventaja del sistema diseñado, es poder disponer de los datos capturados de forma inalámbrica a través de dispositivos de uso cotidiano, que nativamente disponen de transceptores bluetooth. El mejor ejemplo lo tenemos en los actuales teléfonos multimedia o Smartphones. Sin embargo, para poder recibir esta información en nuestro teléfono necesitamos de una interfaz que, por un lado, sepa establecer un enlace de comunicación con el dispositivo remoto y por el otro, ofrezca al usuario una interfaz gráfica atractiva que le permita visualizar y manejar los datos de forma sencilla.

En este proyecto se ha querido dar un pequeño ejemplo de cómo visualizar los datos muestreados en un Smartphone. Concretamente usaremos un Sony Ericson Xperia Active con Android. Aunque el dispositivo en principio es lo de menos, pues simplemente basta con que posea bluetooth y una plataforma abierta para la programación de aplicaciones; debe destacarse que se ha seleccionado un Smartphone capaz de operar en condiciones exteriores (incluyendo lluvia), lo que permite un uso más profesional. Usaremos Android para ilustrar el caso de uso porque se trata de un sistema operativo móvil basado en Linux y de código abierto.

Android proporciona a los desarrolladores facilidades para la programación de aplicaciones. Tanto es así, que distribuye a quien lo desee un completo SDK (software Development Kit) que facilita el uso de la API (Application Programming Interface) de Android. El SDK de Android se integra perfectamente en Eclipse [Figura 7.1], la famosa plataforma para programación en Java.

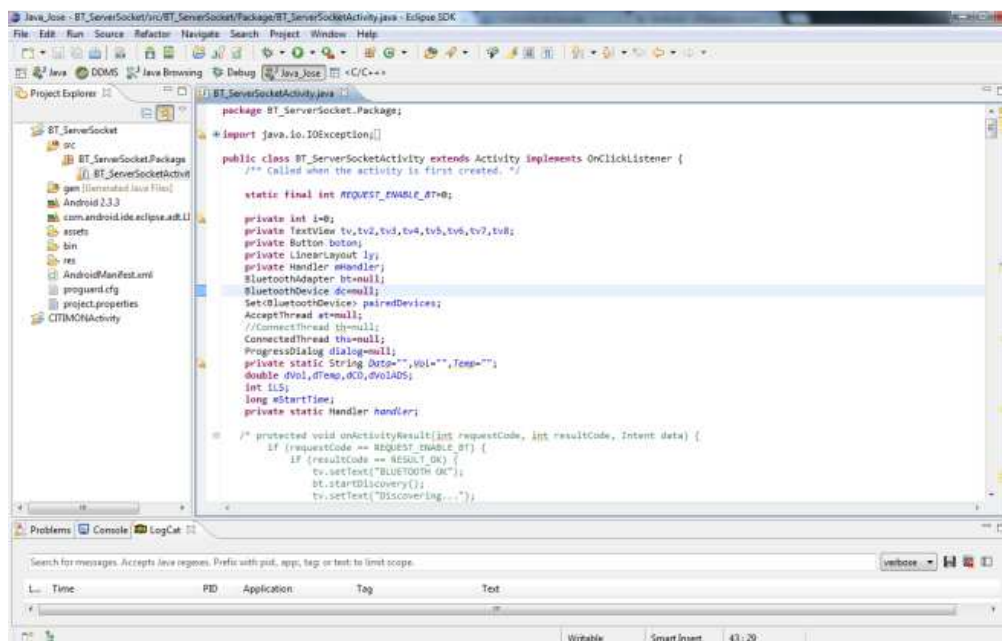


Figura 7.1

A continuación se va a explicar resumidamente, como de forma sencilla se puede programar una aplicación Java para Android, que sea capaz de comunicarse con el dispositivo fabricado y visualizar los datos recibidos. Al igual que se hizo anteriormente con la generación del firmware del microcontrolador, se irán incluyendo y comentando aquellos trozos de código más importantes.

El final del capítulo anterior, tiene mucho que ver ahora, ya que el firmware generado será el que marque la pauta de programación de la aplicación Android. En este caso de uso, el dispositivo fabricado buscaba un dispositivo concreto usando su dirección física MAC, por ello, funcionará como esclavo esporádico de nuestro dispositivo multimedia. En esta línea, deberemos de programar una aplicación que levante un servidor bluetooth capaz de aceptar conexiones entrantes y a su vez disponga de una interfaz gráfica sencilla que nos permita visualizar el dato. Empezaremos declarando algunas variables y objetos y habilitando la comunicación bluetooth [Figura 7.2]

```
...
private TextView tv,tv2,tv3,tv4;
BluetoothAdapter bt=null;
BluetoothDevice dc=null;
AcceptThread at=null;
ConnectedThread ths=null;
...
public synchronized void onCreate(Bundle savedInstanceState) {
    super.onCreate(savedInstanceState);

    bt=BluetoothAdapter.getDefaultAdapter();
    if(bt==null)
    {
        tv.setText("NO BLUETOOTH");
    }
    else {
        bt.enable();
        Intent discoverableIntent = new Intent(BluetoothAdapter.ACTION_REQUEST_DISCOVERABLE);
        discoverableIntent.putExtra(BluetoothAdapter.EXTRA_DISCOVERABLE_DURATION, 300);
        startActivity(discoverableIntent);
    }
    ...
}
```

Figura 7.2

Por supuesto, el usuario ha de dar su conformidad para activar está herramienta en su dispositivo, por esta razón aparecerá en pantalla una venta de aceptación. Una vez el usuario haya aceptado será creado el servidor bluetooth [Figura7.3] que estará a la espera de conexiones. Si algún dispositivo accede al servido creará un hilo de comunicación.

```
...
at=new AcceptThread();
new Thread(at).start();
}

private class AcceptThread extends Thread {
    private final BluetoothServerSocket mmServerSocket;
    private final UUID MY_UUID;
    public AcceptThread() {
        BluetoothServerSocket tmp = null;
        MY_UUID=UUID.fromString("00001101-0000-1000-8000-00805F9B34FB");
        try {
            tmp = bt.listenUsingInsecureRfcommWithServiceRecord("SPPort", MY_UUID);
        } catch (IOException e) { }
        mmServerSocket = tmp; }

    public synchronized void run(){
        BluetoothSocket socket = null;

        // Keep listening until exception occurs or a socket is returned
        while (true) {
            try {
                socket = mmServerSocket.accept();
            } if (socket != null) {
                ths=new ConnectedThread(socket);
                new Thread(ths).start();
            }
        }
    }
}
```

Figura 7.3

El hilo de comunicación será paralelo a otras posibles conexiones que se establezcan y pudiéndose diferenciar aquellas que proceden del nuestro sistema de otras sea cual sea su origen. Se ha de implementar un protocolo de comunicación que ambas partes entiendan. Si el dispositivo conectado es el nuestro, se empezarán a recibir tramas con la información de las lecturas tomadas y será la entonces cuando se deberán imprimir en pantalla, informando para ello al hilo de pintado [Figura 7.4].

```
...
nb=mmInStream.read(buffer,wp,128-wp);
if(nb>0){
    for(int i=0; i<128; i++){
        if(buffer[i]==0x02)
            begin=i;
        else if((buffer[i]==0x03)&&begin>-1){

            dTemp =Double.valueOf(bytesToStringUTFCustom(buffer,begin+2,7)).doubleValue();
            dHume=Double.valueOf(bytesToStringUTFCustom(buffer,begin+10,7)).doubleValue();
            dCO= Double.valueOf(bytesToStringUTFCustom(buffer,begin+19,2)). doubleValue ();
            handler.post(new MyRunnable());

        }
    }
}

public class MyRunnable implements Runnable {
    public void run() {
        tv1.setText(String.format("Temperatura:\t%.1f °C",dTemp));
        tv2.setText(String.format("Humedad:\t\t%.1f %%", dHume));
        tv3.setText(String.format("Monóxido:\t\t%d ppm", (int)(dCO))); }
}
```

Figura 7.4

Finalmente podemos ver el resultado del ejemplo de monitorización realizado [Figura 7.5]. Por supuesto, se trata de una interfaz sencilla que puede complicarse todo lo que el desarrollador quiera de forma que, no solo se pueda visualizar el dato, sino que también pueda ser procesado, guardado o compartido.



Figura 7.5

Otra posible integración, consiste en que el dispositivo se autoconecte a varios dispositivos bluetooth visitantes de forma automática cuando los usuarios se acerquen al sistema, de este modo, se atenderá a todos ellos de forma cíclica. El usuario verá el último dato transmitido por el sistema y una actualización del mismo cada cierto tiempo dando sensación de dinamismo. En este caso bastaría con instalar una aplicación que publique un servicio que se mantenga a la escucha, habilitando esporádicamente la comunicación bluetooth del Smartphone, y avisando al usuario en el momento de la recepción de datos.

8. Explotación.

Quizá la principal restricción de este tipo de dispositivos es su autonomía eléctrica, cuando son instalados en entornos en los que no es posible la alimentación eléctrica por métodos tradicionales. Es entonces cuando se hace patente la necesidad de reducir al máximo el consumo con el fin de alargar la vida útil de los acumuladores de energía que usemos. Adicionalmente, es cada vez más común incluir el uso de fuentes de alimentación impulsadas por energías renovables, tales como la energía solar o eólica, que sean capaces de generar la suficiente energía como para alimentar el dispositivo y/o recargar los acumuladores de energía, reservando estos últimos para momentos en los que la energía renovable escasee o sea nula.

Como se ha visto a lo largo de todo el proyecto, el consumo ha sido unas de las principales variables a mejorar en todo momento. En este sentido, se han elegido componentes de bajo consumo, se ha incorporado una etapa de administración energética y se ha habilitado la posibilidad de conectar una batería de li-ion y una fuente de alimentación externa como puede ser un panel solar.

Otra variable muy a tener en cuenta para una posible implantación a gran escala es el coste. Reducir al máximo los costes de fabricación de este tipo de dispositivos hace más atractivo su uso, siempre y cuando redunde lo menos posible en el rendimiento y la calidad de los datos suministrados.

En este capítulo se hará un repaso a todas estas variables con el fin de darlas respuesta. Inicialmente al consumo total del sistema indicado los umbrales máximo del mismo. A continuación procuraremos al sistema un panel solar como fuente de alimentación para observar su comportamiento y estimar su autonomía. Finalmente estimaremos parcial y totalmente el coste del sistema.

8.1 Consumo.

Nos encontramos con un dispositivo cuyo consumo varía a cada momento, motivado por el uso de la comunicación bluetooth y los estados por los que esta pasa tales como: búsqueda y emparejamiento de dispositivos, conexión, transmisión de datos, modo inactivo, etc.

En la tabla siguiente [Tabla 8.1] se dan los valores máximos, medios y mínimos de consumo para el dispositivo electrónico diseñado. Los consumos mostrados a continuación se han medido con el dispositivo alimentado a través de un conector USB 2.0 y sin batería, con el fin de que la carga de la misma no afecte el resultado final y que tampoco lo haga la etapa de regulación de tensión, cuando la alimentación se hace a través del conector de dos hilos habilitado para la conexión de una fuente de alimentación externa.

Variable	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
V_{SUPPLY}		5		V
I_{SUPPLY}	8 (modo de bajo consumo)	15mA (conectado y transmitiendo vía BT)	90mA (solo durante la conexión $\approx 3s$)	mA
Potencia	40	75	450	mW

Tabla 8.1

El consumo medio total del sistema cuando este se encuentra conectado y transmitiendo datos de forma constante a un dispositivo remoto con el que ha establecido comunicación es de 75mW.

8.2 Alimentación con paneles solares y autonomía eléctrica.

Cuando el sistema se alimenta a través de una fuente de alimentación externa a través del conector de dos hilos, en este caso, cuando se utiliza un panel solar; la etapa de regulación posterior encargada de regular la tensión ofrecida por el panel a la tensión que necesita el circuito, penaliza la tensión de entrada que ha de ser superior a 5V. En este caso, la tensión ofrecida por el panel solar ha de ser [Tabla 8.2]:

Variable	Mínimo	Típico	Máximo	Unidad
V _{SOLAR PANEL}	6.5	-	32	V

Tabla 8.2

La etapa de regulación de tensión asegura la protección del circuito hasta un máximo de 32V, siendo necesaria al menos una tensión de 6.5V para conseguir los 5V de tensión de alimentación del circuito.

Para realizar las pruebas oportunas con alimentación a través de paneles solares, se adquirieron dos modelos de panel de reducidas dimensiones. A continuación se muestra una tabla [Tabla 8.3] con las características eléctricas de cada panel.

Modelo	Dimensiones	Tensión	Intensidad máxima	Potencia máxima
KS-M140140G	140x140x4.5mm	7V	300mA	2.1W
KS-Q280G	280mm de Ø	9V	555mA	5W

Tabla 8.3

Las pruebas realizadas con ambos paneles son a priori satisfactorias, sin embargo, cuando el día es nublado, el primer modelo no alcanza la intensidad mínima de alimentación requerida haciendo caer su tensión de salida a niveles muy bajos. En cambio, con el segundo modelo en un día nublado, se consigue una intensidad mínima de salida de 120mA en campo abierto, intensidad más que suficiente para alimentar el circuito y realizar una carga lenta de la batería si fuera necesario. Para días soleados, en ambos casos, la intensidad proporcionada es la máxima.

Claro está que la luz solar es intermitente ya que se anula por la noche, periodo de tiempo en el que el sistema ha de ser alimentado exclusivamente por la batería. La autonomía del sistema, en el caso de alimentación intermitente con paneles solares, dependerá en gran medida de la capacidad de la batería usada. En este caso, se ha utilizado una batería de li-ion estándar, reciclada de un teléfono móvil antiguo con una capacidad de 800mAh y tensión umbral de 4.2V. Por supuesto, se pueden utilizar baterías de mayor capacidad.

Teniendo en cuenta que la capacidad de la batería es de 800mAh y el consumo medio del dispositivo durante la noche será aproximadamente el consumo en modo “de bajo consumo” debido a la inexistencia de conexiones, esta capacidad se estima suficiente para satisfacer los requisitos de alimentación durante estos periodos. Durante un día

nublado, en el peor de los casos, la intensidad máxima ofrecida por el panel permitirá cargar la batería en menos de 5 horas, lo que asegura la carga de la misma en cualquier época del año. En el caso de días soleados, cuando la intensidad aportada por el panel solar sea máxima, la batería se cargará rápidamente, (2 horas aproximadamente).

A continuación [Figura 8.1] se muestra una imagen del sistema al completo alimentado con un panel solar y funcionando, conectado a un teléfono móvil con SO Android y la aplicación de test mostrada en el capítulo anterior.



Figura 8.1

Durante el día, el panel solar alimenta el sistema almacenando la energía sobrante en la batería de li-ion, si ésta no estuviera cargada completamente. Si en algún momento del día la energía solar incidente no fuera suficiente como para alimentar el circuito, la diferencia será compensada por la batería. A medida que llega el ocaso, la intensidad de corriente proporcionada por el panel solar tiende a cero y la tensión suministrada cae, tendiendo a anularse. En este momento, el sistema funcionará de forma autónoma alimentándose de la batería durante las horas de oscuridad. La potencia de la luz solar incidente sobre el panel irá creciendo a medida que amanece; en el momento que esta sea suficiente como para generar una intensidad de salida igual a la mínima intensidad de alimentación, la batería dejará de suministrar energía para empezar un nuevo ciclo de carga con la energía sobrante.

Aunque se tiene experiencia real sobre el funcionamiento del sistema alimentado con el panel solar, esta ha sido de corta duración debido a que el circuito hasta el momento carece de carcasa que lo proteja de las inclemencias del tiempo. No obstante se ha

comprobado en un día nublado que la alimentación proporcionada por el panel solar de mayor potencia, es suficiente para alimentar el circuito e incluso cargar lentamente la batería de li-ion. Por el mismo motivo comentado anteriormente, no se ha testado el sistema por la noche a la intemperie, sin embargo, se ha comprobado que la capacidad de la batería es más que suficiente para conseguir un funcionamiento óptimo durante la noche e incluso durante más tiempo.

8.3 Coste.

Para finalizar este capítulo, se estima que el coste [Tabla 8.4] de los materiales en compra unitaria es inferior a los 100€, incluyendo los dos sensores utilizados y el panel solar. Por supuesto, este coste variará en función de las unidades fabricadas, los métodos empleados, cantidad de mano de obra, etc.

Ítem	Precio por unidad aproximado	Unidad
Dispositivo electrónico (con batería)	40 - 45	€
Sensor de temperatura y humedad	10	€
Sensor de CO	12	€
Panel solar KS-Q280G	18	€

Tabla 8.4

Conclusiones y líneas futuras.

Una vez finalizada la implementación del sistema y testeadas las variables que más restringen su funcionamiento e implantación a gran escala, tales como: consumo, comunicaciones y coste; se llega a la conclusión de que este tipo de tecnologías son perfectamente viables técnica y económicamente. Si bien es cierto que no se ha llegado a testear de forma exhaustiva y ni mucho menos, se ha conseguido minimizar al máximo el consumo del sistema, los resultados iniciales arrojados ofrecen buenas expectativas de mejora.

Se ha conseguido diseñar y llevar a la práctica un sistema de monitorización medioambiental autónomo con un coste relativamente bajo, que permite ofrecer datos de calidad elevada. Así mismo, se ha implementado un modo de monitorización que aprovecha la tecnología inalámbrica bluetooth para comunicarse con todo aquel que disponga de un dispositivo multimedia, que en la actualidad es una gran parte de la población.

Este proyecto de hardware libre, puede servir como ejemplo de integración de sensores de forma inalámbrica, ya que acota los posibles problemas dados en este tipo de desarrollos.

Más concretamente se pondrá a disposición como ejemplo de desarrollo, contribuyendo a la implementación de redes inalámbricas de sensores, en el eje de instrumentación del proyecto europeo LifeWatch, que pretende ser la principal iniciativa europea en biodiversidad.

A la vista de los resultados obtenidos y de la experiencia acumulada, se señalan las posibles líneas futuras que pueden contribuir a la mejora del sistema:

- Estudio en detalle del consumo. Cómo el firmware afecta al consumo, depuración de código fuente, anulación de etapas electrónicas, explotación del modo de ultra bajo consumo de los componentes. Utilización de un RTOS (Real Time Operative System) como núcleo del firmware.
- Análisis de la alimentación a través de energía solar, así como mediante otro tipo de energías renovables como la eólica.
- Fabricación de una carcasa que impermeabilice el circuito electrónico y lo proteja de las inclemencias del tiempo.
- Adaptación de un módulo bluetooth que permita conexiones punto – multipunto y en su caso, que ofrezca una mayor potencia de transmisión con el fin de aumentar la cobertura del dispositivo. Estimación y estudio del consumo eléctrico en este caso.
- Adaptación a otros protocolos de comunicación como Zigbee, con el fin de confeccionar redes de sensores inalámbricos de muy bajo consumo y gran autonomía.
- Implantación del sistema en campo abierto y testeo del mismo.

Bibliografía.

- [1] www.lifewatch.eu
- [2] <http://www.xbow.com/>
- [3] Mareca Hatler / Charlie Chi. Wireless Sensor Networks: Growing Markets, Accelerating Demand (Julio 2005). On World.
- [4] www.btnode.ethz.ch
- [5] www.ember.com
- [6] www.nanork.org
- [7] www.arduino.cc
- [8] www.libelium.com
- [9] http://es.wikipedia.org/wiki/Bater%C3%ADa_de_ion_de_litio
- [10] Gevorkian, Peter. (2007). Solar power in building design: the engineer's complete design resource. Ed. McGraw-Hill Professional.
- [11] http://es.wikipedia.org/wiki/Universal_Serial_Bus
- [12] www.ieee802.org
- [13] Texas Instruments (2009). Single-Chip Li-Ion Charge and System Power-Path Management IC: BQ24071. Texas Instruments.
- [14] Texas Instruments (2006). 3 Terminal Adjustable Regulator: LM317M. Texas Instruments.
- [15] Linear Technology (2005). 400mA Micropower Synchronous Step-Up DC/DC Converter with Output Disconnect: LTC3525. Linear Technology Corporation.
- [16] Texas Instruments (2006). 3 CMOS Voltage Converter: TL7660. Texas Instruments.
- [17] Microchip (2010-2012). PIC18(L)F2X/4XK22 Data Sheet. Microchip Technology Inc.
- [18] Roving Networks (2011). Class 1 Bluetooth® Module: RN-41. Roving Networks.
- [19] Texas Instruments (2005). Ultra-Low-Power Quadruple Operational Amplifiers: LP324. Texas Instruments.
- [20] Texas Instruments (2009). Ultra-Small, Low-Power, 16-Bit Analog-to-Digital Converter with Internal Reference: ADS1115. Texas Instruments.
- [21] Honeywell (2011). Technical Note: I2C Communication with the Honeywell HumidIcon™ Digital Humidity/Temperature Sensors: HIH-6130/6131 Series. Honeywell.
- [22] Honeywell (2011). Data Sheet: Honeywell HumidIcon™ Digital Humidity/Temperature Sensors: HIH6130/6131 Series HIH6130. Honeywell.
- [23] Figaro (2010). TGS 5042 - for the detection of Carbon Monoxide. Figaro Engineering Inc.