



**Escola Politècnica Superior  
de Castelldefels**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# **TRABAJO FIN DE CARRERA**

**TÍTULO: Diseño de módulos ZigBee de bajo coste**

**AUTOR: Jose Manuel Tomé Castro**

**DIRECTOR: Roberto Casas Nebra, Marcos Quílez Figuerola**

**FECHA: 3/07/06**



**Título:** Diseño de módulos ZigBee de bajo coste

**Autor:** Jose Manuel Tomé Castro

**Director:** Roberto Casas Nebra, Marcos Quílez Figuerola

**Fecha:** 3/7/06

## Resumen

El objetivo principal de este proyecto es el desarrollo completo de un módulo de comunicaciones ZigBee. Para esto se ha tenido en cuenta en todo momento la idea de que ha de tratarse de un diseño que implique bajo coste, en la medida de lo posible. Del mismo modo la preocupación del impacto medioambiental ha sido otro de los puntos importantes, aunque este tipo de prácticas no conlleve demasiada carga medioambiental, al menos directamente.

De esta forma los pasos seguidos para el diseño han sido los siguientes:

- Estudio de las posibilidades de diseño de un módulo ZigBee, elección de componentes clave como el chip ZigBee, antena, etc.
- Diseño de esquemáticos necesarios para la comprensión del funcionamiento del sistema.
- Realización de los diseños (layouts) en sí del módulo de comunicaciones.
- Revisiones constantes en el diseño y todo un seguido de cambios para su optimización, recomendaciones del fabricante del chip (Ember), del fabricante de la antena (Fractus), etc.
- Pruebas funcionales de los módulos para sus posibles aplicaciones.

La interfaz de diseño utilizada durante todo el proceso ha sido el programa PCAD 2002, una potente herramienta para la realización de PCB's.

Otro punto añadido que en principio no era objetivo de este proyecto ha sido el de realizar un estudio de posibles presupuestos de producción en empresas reales dedicadas al montaje y ensamblado de PCB's. En esta parte se han detallado los precios por unidad que cada una de las empresas puede llegar a ofrecer en función del volumen de módulos a fabricar, ya sea un simple pedido de prototipos o cantidades más altas de cara a la comercialización.

Finalmente los resultados obtenidos en las pruebas han cumplido los objetivos de la aplicación a la que se desea emplear este módulo, que no es otra que la de dotar de una interfaz radio entre el lago y el edificio de la EPSC para realizar mediciones de temperatura, conductividad del agua, entre otras.

**Title:** Low cost ZigBee modules design

**Author:** Jose Manuel Tomé Castro

**Director:** Roberto Casas Nebra, Marcos Quílez Figuerola

**Date:** 3/7/06

## Overview

The main purpose of this project is the complete development of a ZigBee communications module. For this objective we have taken into account in any time an important issue, to try that the design should be a low cost design, when it is possible. Otherwise the environmental impact is another issue that has worried us over the development, in any case actually this kind of projects doesn't involve too many environmental liability, at least in a direct way.

In order to do this, these have been the steps we have followed to carry out the design:

- Study the possibilities to design a ZigBee module, choose key components like the ZigBee chip, the antenna, etc.
- Designing the schematics that are necessary to understand the system operation.
- Complete design development of the ZigBee module layouts.
- Constant checking of the designs in order to optimise them, following the manufacturer advices like the Ember or Fractus recommendations.
- Functional tests of the modules in order to check its possible applications.

It is also important to say that the design interface we have used is the PCAD 2002 software, a powerful tool of PCB design and schematics.

Another point we have been worked on, has been to carry out a study of production quotations in real factories that work manufacturing and assembling PCB designs. In this chapter we have introduced the price per unit that every factory offers to the costumer when you order some prototypes or when the quantity is bigger, in order to market the module.

The final results we have obtained in the functional tests have fulfil the main purpose of the application which is focused this module, I mean to have a radio interface between the EPSC and the lake.

Dedicado a mis padres a los que doy gracias  
por su apoyo constante, dedicación y confianza.  
Gracias también a mis hermanos que me mostraron  
el camino demostrándome que el esfuerzo nunca es en vano.  
GRACIAS.

*“Si nos hundimos antes de nadar  
no soñarán los peces con anzuelos,  
si nos rendimos para no llorar  
declarará el valor huelga de celos”*

*Joaquín Sabina*

# ÍNDICE

<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. ACERCA DE ZIGBEE .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1. Tecnología ZigBee.....</b>	<b>2</b>
1.1.1. Un poco de historia.....	2
1.1.2. ¿Qué es ZigBee? .....	3
1.1.3. ¿Cómo funciona? .....	3
1.1.4. Campos de aplicación .....	7
1.1.5. Impacto medioambiental .....	8
<b>1.2. Comparativas ZigBee – Bluetooth – WLAN .....</b>	<b>9</b>
1.2.1. Alternativas al ZigBee.....	9
1.2.2. Redes PAN: ZigBee versus Bluetooth .....	10
<b>CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL MÓDULO HARDWARE .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Pasos previos al diseño.....</b>	<b>11</b>
2.1.1. Topología de un módulo ZigBee .....	12
2.1.2. Tipos de chips ZigBee .....	12
2.1.3. Selección de la antena ZigBee.....	14
2.1.4. Directiva ROHS .....	18
<b>2.2. Diseño Hardware .....</b>	<b>18</b>
2.2.1. Esquemático ZigBee .....	20
2.2.2. Circuitería RF.....	21
2.2.3. Osciladores externos .....	23
2.2.4. Condensadores de desacoplo .....	23
2.2.5. Conectores del módulo.....	24
<b>2.3. Diseños PCB .....</b>	<b>25</b>
2.3.1. Layouts .....	26
2.3.2. Consideraciones de EMC .....	29
<b>2.4. Especificaciones del circuito .....</b>	<b>30</b>
2.4.1. Especificaciones RF .....	30
<b>2.5. Futuras mejoras del módulo .....</b>	<b>31</b>
2.5.1. Concepto de Front End .....	31
2.5.2. Implantación de un Front End en el diseño.....	31
<b>2.6. Certificación .....</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO 3. PRESUPUESTOS DE PRODUCCIÓN .....</b>	<b>35</b>
<b>3.1. Introducción .....</b>	<b>35</b>
<b>3.2. Listado de componentes (BOM) .....</b>	<b>35</b>
<b>3.3. Presupuestos de producción masiva.....</b>	<b>35</b>
3.3.1. Presupuesto de producción en Flextronics .....	36
3.3.2. Presupuesto de producción en Solectron .....	37
3.3.3. Presupuesto de producción en Beyonics .....	39

3.3.4.	Presupuesto de producción en Fymelec .....	41
3.3.5.	Presupuesto de producción en Beru .....	42
<b>3.4.</b>	<b>Resumen propuestas .....</b>	<b>43</b>
<b>CAPÍTULO 4. PRUEBAS FUNCIONALES DE LOS MÓDULOS .....</b>		<b>44</b>
<b>4.1.</b>	<b>Descripción aplicación “RangeTest” .....</b>	<b>44</b>
<b>4.2.</b>	<b>Descripción de las pruebas a realizar .....</b>	<b>44</b>
<b>4.3.</b>	<b>Resultados de las pruebas .....</b>	<b>44</b>
4.3.1.	Escenario 1: Rango en exteriores .....	44
4.3.2.	Escenario 2: Rango de interior hacia el exterior .....	47
4.3.3.	Escenario 3: Rango en interior .....	49
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>		<b>50</b>
<b>5.1.</b>	<b>Conclusiones del diseño .....</b>	<b>50</b>
<b>5.2.</b>	<b>Posibles utilidades de los módulos.....</b>	<b>51</b>
<b>CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>52</b>
<b>ANEXO A: COMPARATIVA ANTENAS .....</b>		<b>53</b>
<b>ANEXO B: LISTADO DE COMPONENTES Y PRECIOS.....</b>		<b>55</b>
<b>ANEXO C: COMPARATIVA PRESUPUESTOS.....</b>		<b>57</b>
<b>ANEXO D: ESQUEMÁTICOS.....</b>		<b>58</b>

## INTRODUCCIÓN

La necesidad de empresas de informática y de telecomunicaciones de desarrollar una interfaz abierta y de bajo coste para facilitar la comunicación entre dispositivos dio como resultado la tecnología ZigBee.

Todos hemos experimentado la incomodidad que surge cuando se empiezan a conectar periféricos a un ordenador, o cuando conectamos otros dispositivos electrónicos en el hogar, con una maraña de cables que se hace difícil de controlar. Pues ahora llevemos esta idea a aplicaciones domóticas o industriales en las que a parte existe el problema del coste que supone tirar cable a distancias relativamente grandes. Por eso podríamos pensar en lo fácil que sería si todas estas conexiones se hicieran utilizando otros medios distintos a los cables físicos, como pueden ser los infrarrojos, la radio o las microondas.

Por lo tanto si el objetivo es diseñar un sistema de bajo consumo el cual no necesite de altas velocidades, la tecnología 802.11 (WLAN) resulta ser excesiva y cara para satisfacer los requerimientos de conexión, el Bluetooth, aunque se concibió originalmente como un sustituto del cable es caro, de poca distancia y alto consumo, por lo que nos quedan los sistemas ZigBee, pensados específicamente para este tipo de conexiones.

En el año 2000 dos grupos especialistas en estándares (ZigBee y el grupo de trabajo IEEE 802) se unieron para dar a conocer la necesidad de un nuevo estándar para redes inalámbricas de bajo consumo y de bajo coste para aplicaciones domóticas e industriales. Dando como resultado un nuevo estándar para áreas personales (LR-WPAN, Low Range Wíreles Personal Area Network) que ahora se conoce como el 802.15.4, más conocido como ZigBee.

Así pues el objetivo de este trabajo es realizar el diseño completo de un módulo de comunicaciones ZigBee y su posterior montaje para su uso dentro del Campus de Castelldefels, en especial para posibles aplicaciones como enlace de sensor de temperatura en el lago, etc. Todo esto intentando que se trate de un diseño a bajo coste teniendo en cuenta las limitaciones de lo que “bajo coste” significa ya que siempre el montaje de una serie pequeña módulos resultará obviamente más cara que una producción masiva.

Se puede decir que después de la conclusión del diseño y posteriores pruebas realizadas se ha conseguido adaptarnos bastante a nuestro objetivo de coste reducido, a su vez se ha logrado que dicho diseño pueda ser utilizado en las aplicaciones que se habían propuesto como la de interfaz radio entre el edificio EPSC y el lago. Todo esto se explica detalladamente en las diversas secciones de esta memoria. Para introducir, primero se explicará un poco en que consiste la tecnología ZigBee, en el siguiente capítulo se detallan ya las bases del diseño en sí del módulo. En el capítulo tres se ha realizado un estudio de producción masiva del módulo. Por último detallaremos las pruebas funcionales de los módulos así como las conclusiones a las que se ha llegado.



## **CAPÍTULO 1. ACERCA DE ZIGBEE**

### **1.1. Tecnología ZigBee**

Las características más importantes del estándar IEEE 802.15.4, conocido como ZigBee, son la flexibilidad de la red, bajo coste y bajo consumo de energía. Este estándar se puede utilizar para muchas aplicaciones domóticas e industriales, donde se requiere una baja tasa de transmisión de datos. De la misma forma los sistemas domóticos también pueden utilizar redes cableadas como pueden ser las líneas telefónicas, módems por cable o líneas de transmisión de energía eléctrica. Cada uno de ellos ofrece ventajas y desventajas que dependen principalmente de su capacidad de ancho de banda, instalación, mantenimiento y coste, entre otros.

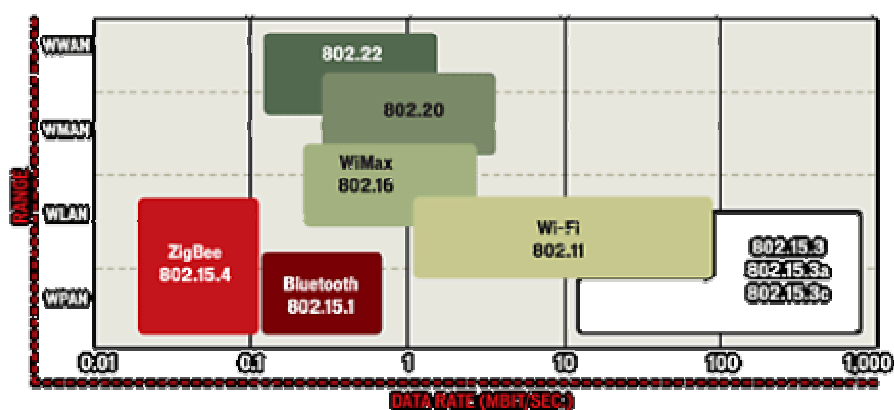
ZigBee presenta del mismo modo sus ventajas y desventajas respecto a estos sistemas, de esta forma en este capítulo vamos a describir en que se basa la tecnología inalámbrica ZigBee, cómo se creó, cómo funciona y sus posibles aplicaciones.

#### **1.1.1. Un poco de historia**

La idea de ZigBee empezó a finales de los 90 cuando muchos ingenieros se planteaban que Wi-Fi y Bluetooth dejaban un hueco vacío para cierto tipo de aplicaciones. En particular muchos grupos de ingenieros tenían la necesidad de diseñar redes ad-hoc de interfaz radio digital que pudieran organizarse automáticamente sin la necesidad de configuración externa o administración de la red. El estándar IEEE 802.15.4 se completó en 2003 y fue ratificado a finales de 2004.

Por otro lado, ZigBee Alliance es una asociación formada en 2002, sin ánimo de lucro, de más de 175 empresas, la mayoría de ellas fabricantes de semiconductores, con el objetivo de auspiciar el desarrollo e implantación de una tecnología inalámbrica de bajo coste, así como la de promocionar eventos entre fabricantes como los llamados “BeeFests” dedicados a intentar mejorar la interoperabilidad entre marcas, de la misma forma que Bluetooth SIG. promociona los conocidos como “UnplugFests”.

Destacan empresas como Invensys, Mitsubishi, Honeywell, Ember, Philips y Motorola que trabajan para convertir ZigBee en un sistema estándar de comunicaciones, vía radio y bidireccional, para usarlo dentro de dispositivos de domótica, automatización de edificios (inmótica), control industrial, periféricos de PC, juguetería, sensores médicos, etc. Los miembros de esta alianza justifican, como se comentaba antes, el desarrollo de este estándar para cubrir el vacío que se produce por debajo del Bluetooth. En la figura 1.1 se puede ver que este vacío se ha cubierto con el estándar ZigBee.



**Fig. 1.1** Gráfico de los diferentes estándares en función de su campo de aplicación y su tasa de transferencia de datos.

### 1.1.2. ¿Qué es ZigBee?

El término ZigBee describe un protocolo inalámbrico normalizado para redes de tipo Área Personal o WPAN. ZigBee es diferente de los otros estándares inalámbricos, ha sido diseñado para soportar un diverso mercado de aplicaciones que requieren bajo coste y bajo consumo, con una conectividad más sofisticada que los anteriores sistemas inalámbricos. El estándar ZigBee enfoca a un segmento del mercado no atendido por los estándares existentes, con baja transmisión de datos y bajo ciclo de servicio de conectividad.

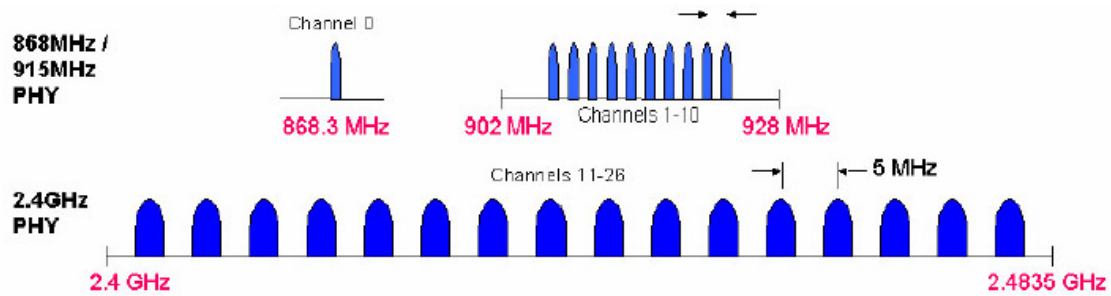
La razón de promover un nuevo protocolo como un estándar es para permitir la interoperabilidad entre dispositivos fabricados por compañías diferentes.

ZigBee es un estándar de hardware y software basado en el estándar IEEE 802.15.4. Este importante estándar define el hardware y el software, el cual ha sido descrito en los términos de conexión de redes, como las capas físicas (PHY), y la capa de control de acceso al medio (Mac). La alianza ZigBee ha añadido las especificaciones de las capas red (NWK) y aplicación (APL) para completar lo que se llama la pila o stack ZigBee.

### 1.1.3. ¿Cómo funciona?

Propiedades del IEEE 802.15.4 ZigBee	
Bandas de frecuencia y Tasa de transferencia	868MHz: 20kbps 915MHz: 40kbps 2.4GHz: 250kbps
Alcance	50 - 100m.
Canales	868/915MHz: 11canales 2.4GHz: 16canales
Red	Hasta $2^{64}$ dispositivos
Rango de temperatura	-40° a +85° C

**Tabla 1.1** Propiedades ZigBee



**Fig. 1.2** Estructura de canales ZigBee

Tal y como se observa en la figura 1.2, el estándar IEEE 802.15.4 define 27 canales de frecuencia entre las tres bandas. La capa física a 868/915 MHz soporta un solo canal entre los 868 y los 868.6 MHz, y diez canales entre los 902.0 y 928.0 MHz. Debido al soporte regional de esas dos bandas de frecuencias, es muy improbable que una sola red utilice los 11 canales. Sin embargo, las dos bandas se consideran lo suficientemente cercanas en frecuencia para que se puedan utilizar con el mismo hardware para ambas y así reducir costes de manufacturación. La capa física a 2.4 GHz soporta 16 canales entre los 2.4 y los 2.4835 GHz con un amplio espacio entre canales (5 MHz), con el objetivo de facilitar los requerimientos de filtrado en la transmisión y en la recepción.

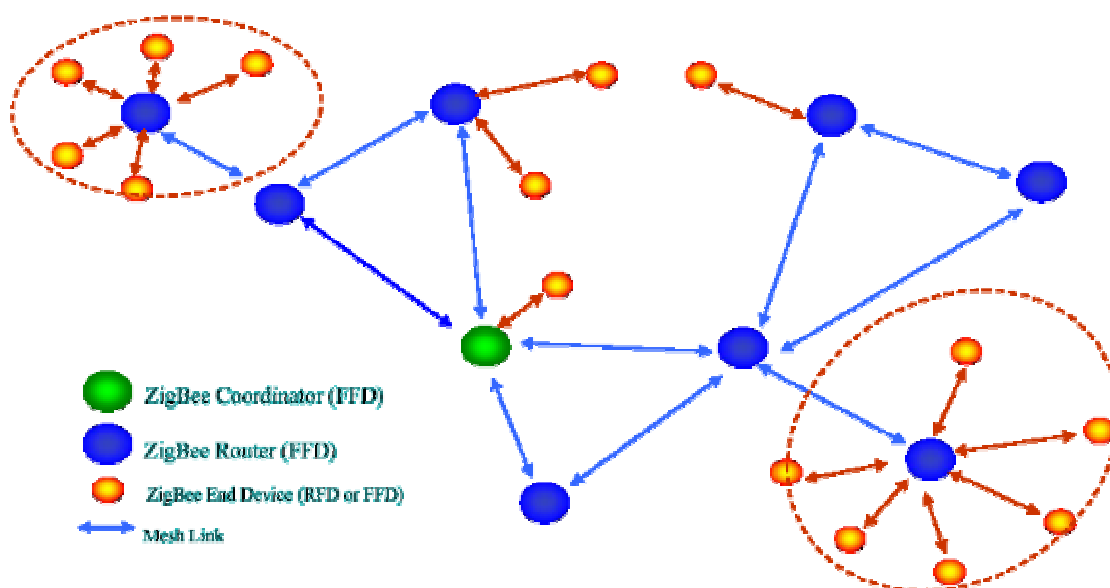
Dado que en el hogar es propenso a tener múltiples redes inalámbricas trabajando en las mismas bandas de frecuencias, así como una interferencia no intencionada de las diferentes aplicaciones, la capacidad de relocalización dentro del espectro será un factor importante en el éxito de las redes inalámbricas dentro del hogar. El estándar fue diseñado para implementar una selección dinámica de canales, a través de una selección específica de algoritmos la cual es responsabilidad de la capa de red. La capa MAC incluye funciones de búsqueda que sigue paso a paso a través de una lista de canales permitidos en busca de una señal de guía, mientras que la capa física contiene varias funciones de bajo nivel, tales como la detección de los niveles de energía recibidos, indicadores de calidad en el enlace, así como de conmutación de canales, lo que permite asignación de canales y agilidad en la selección de frecuencias. Esas funciones son utilizadas por la red para establecer su canal inicial de operación y para cambiar los canales en respuesta a una pausa muy prolongada.

#### 1.1.3.1. Capa de red

El estándar IEEE 802.15.4 soporta múltiples topologías para su conexión en red, entre ellas la topología tipo “Estrella”, la topología “Punto a Punto” y “Punto a Multipunto”. La topología a escoger es una elección de diseño y va a estar dada por la aplicación a la que se desee orientar, algunas aplicaciones como periféricos e interfaces de PC, requieren de conexiones de baja potencia de tipo estrella, mientras que otras como los perímetros de seguridad requieren de una mayor área de cobertura por lo que es necesario implementar una red Punto a Punto.

La red puede tener un Coordinador de red (PAN) y múltiples RFDs/FFDs, en la figura 1.3 podemos observar un ejemplo de red ZigBee:

- **FFD (Full Function Device):** Es un dispositivo de función completa que se puede usar en cualquier topología. Tiene la capacidad de poder ser Coordinador de red y puede hablar con cualquier dispositivo.
- **RFD (Reduced Function Device):** Es un dispositivo de función reducida. Limitado a una topología en estrella. No puede ser Coordinador de red, solo puede hablar con un Coordinador y es muy fácil de implementar.



**Fig. 1.3** Ejemplo de red ZigBee

#### 1.1.3.2. Capa física

La capa física a 2.4 GHz emplea una técnica de modulación semi-ortogonal basada en métodos DSSS.

Los datos binarios están agrupados en símbolos de 4 bits, y cada símbolo especifica una de las 16 secuencias de transmisión semi-ortogonales de código de seudo-ruído (PN). Las secuencias PN son concatenadas para que sean datos de símbolos exitosos, y la secuencia agregada al chip es modulada en la portadora utilizando MSK (Minimum Shift Keying). El uso de símbolos “casi ortogonales” simplifica la implementación a cambio de un desempeño ligeramente menor (< 0.5 dB).

En términos de eficiencia (energía requerida por bit), la señalización ortogonal mejora su funcionamiento en 2 dB respecto a la BPSK diferencial. Sin embargo, en términos de sensibilidad de recepción, la capa física 868/915 MHz tiene una ventaja de 6-8 dB debido a que tiene velocidades de transmisión más bajas. Por supuesto, que en ambos casos las pérdidas de implementación

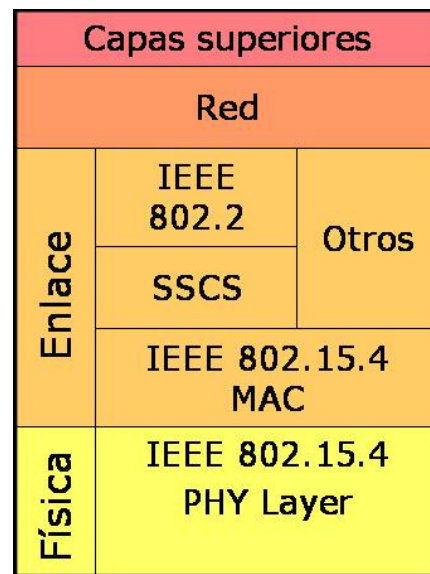
debido a la sincronización, forma del pulso, simplificaciones en el detector y demás cosas, resultan en desviaciones en sus curvas óptimas de detección. Los parámetros de modulación se resumen en la tabla 1.2.

Capa física	Banda	Parámetros de los Datos			Parámetros de chip	
		Velocidad bits (kbps)	Velocidad símbolos (kbaud)	Modulación	Velocidad chip (kchip/s)	Modulación
868/915 MHz	868 – 868.6 MHz	20	20	BPSK	300	BPSK
	902 – 928 MHz	40	40	BPSK	600	BPSK
2.4GHz	2.4 – 2.4835 GHz	250	62.5	16-ary ortogonal	2000	O-QPSK

**Tabla 1.2** Parámetros de modulación

#### 1.1.3.3. Capa de enlace

El estándar IEEE 802 divide la capa de enlace de datos (DLL) en dos sub-capas, la sub-capas de enlace al Control de Acceso al Medio (Medium Access Control, MAC) y la sub-capas de Control de enlaces lógicos (Logical Link Control, LLC). El LLC es común a todos los estándares 802, mientras que la sub-capas MAC depende del hardware y varía respecto a la implementación física de esta capa. La siguiente figura muestra la forma en que el estándar IEEE 802.15.4 se basa en la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) del modelo de referencia para la Interconexión de Sistemas Abiertos (OSI).



**Fig. 1.4** ZigBee en el modelo OSI

#### 1.1.3.4. Sensibilidad y Potencia

Las especificaciones actuales de sensibilidad de IEEE 802.15.4 especifican -85 dBm para la capa física a 2.4 GHz y de -92 dBm para la capa de física a 868-915 MHz. Dichos valores incluyen suficiente margen para las tolerancias que se requieren debido a las imperfecciones en la fabricación, de la misma manera que permite implementar aplicaciones de bajo coste. En cada caso, los mejores equipos deben ser del orden de 10 dB mejor que las especificaciones. Naturalmente, el rango deseado estará en función de la

sensibilidad del receptor, así como de la potencia del transmisor. El estándar IEEE 802.15.4 especifica que cada dispositivo debe de ser IEEE 802.15.4 – ZigBee capaz de transmitir al menos a 1 mW, pero dependiendo de las necesidades de la aplicación, la potencia de transmisión puede ser mayor o menor para aprovechar la energía. Los dispositivos típicos (1mW) se esperan que cubran un rango de entre 50-100 metros, sin embargo, con una buena sensibilidad y un incremento moderado en la potencia de transmisión, una red con topología tipo estrella puede proporcionar una cobertura total para toda una casa. Para aplicaciones que requieran mayor tiempo de latencia, la topología tipo “punto a punto” ofrece una alternativa atractiva con buenas coberturas del hogar, dado que cada dispositivo solo necesita suficiente energía para comunicarse con su vecino más cercano.

#### *1.1.3.5. Consideraciones EMC, Interferencias de y para otros dispositivos*

Los dispositivos que operan en la banda de 2.4 GHz pueden recibir interferencias causadas por otros servicios que operan en dicha banda. Esta situación es aceptable en las aplicaciones que utilizan el estándar IEEE 802.15.4, las cuales requieren una baja calidad de servicio (QoS), no requieren comunicación asíncrona, y se espera que realice varios intentos para completar la transmisión de paquetes. Por el contrario, un requerimiento primario de las aplicaciones del IEEE 802.15.4 es una larga duración en las baterías, esto se logra con poca energía de transmisión y muy pocos ciclos de servicio.

Dado que los dispositivos IEEE 802.15.4 se pasan dormidos el 99 por ciento del tiempo, y ocupan transmisiones de baja energía en un espectro extendido, deben estar trabajando en la banda de los 2.4 GHz.

Sin embargo para asegurarnos de esto, los fabricantes y proveedores de componentes para el módulo ZigBee han de cumplir las normativas pertinentes tanto en temas de radio frecuencia como en compatibilidad electromagnética.

#### **1.1.4. Campos de aplicación**

Las soluciones sobre el estándar ZigBee, en conexión de redes, se centran en mercados y aplicaciones específicas. El estándar ZigBee se ha hecho a medida para la monitorización y para aplicaciones de control. Por lo tanto, los mercados como la automatización de edificios y hogares, la atención sanitaria, control industrial, control de alumbrado y control comercial, son los principales campos de aplicación.

- **Automatización de edificios y hogares:** seguridad, alarmas, control del aire acondicionado, lectura de contadores de agua, gas, electricidad, control de iluminación, control de accesos, control de riego, etc.
- **Atención sanitaria:** Monitorización de pacientes y equipos para la salud (fitness).

- **Control industrial:** Control de procesos, sensores de temperatura, instrumentación remota, etc.

Además, debido a su baja velocidad de transmisión de datos y su naturaleza de bajo consumo, también entra en los mercados del control remoto para la electrónica de consumo y lo que se llaman Dispositivos para la Interfaz Humana (HID), como teclados, ratones y joysticks.

Como características deseables de sistemas basados en ZigBee, la instalación debe ser automática o semiautomática, con el propósito de que los consumidores puedan poner redes inalámbricas fácilmente. Además, añadir nuevo hardware a un sistema existente debe ser sencillo. Debido a que ZigBee reemplaza cables y otros sistemas inalámbricos, el coste debe ser bajo para hacer el cambio a ZigBee más ventajoso. Esto se asegura teniendo en cuenta que se pueden poner hasta 100 redes de ZigBee y todavía funcionar, ya que los dispositivos “end point” de la red pueden funcionar hasta 2 años con baterías del tipo AA y AAA.

#### 1.1.5. Impacto medioambiental

Se podría decir que todo el trabajo de diseño de nuestro módulo ZigBee no presenta implicación ambiental ninguna, ya que los sistemas ZigBee están pensados para maximizar el tiempo de vida de las baterías debido a que se pasan prácticamente todo el tiempo dormidos, como comentábamos en los apartados anteriores. El único pero que se podría ver sería por cuestiones de fabricación del módulo, pero esto queda bastante atado debido a las nuevas normativas (certificación ROHS) que prohíben el uso de diversas sustancias perjudiciales en las soldaduras y fabricación de componentes.

Sin embargo por otra parte sí que es cierto que forzosamente el módulo ha de ser alimentado por baterías para su funcionamiento, en nuestro caso pilas de tipo AA. Las pilas ofrecen una fuente de energía cómoda y portátil, pero suponen una carga para el medio ambiente tanto en su fabricación como en su eliminación. En todo caso es evidente que su potencial contaminante está en función del método de eliminación empleado. Por eso nos podríamos preguntar:

¿Qué hacer con las pilas una vez usadas? Pues bien, si tiramos las pilas con el resto de basuras las estamos depositando en un vertedero. No debemos tirar jamás a la basura las pilas alcalinas y todavía menos las de botón, ambas son especialmente peligrosas. En los vertederos, los ácidos del interior de la pila liberan el mercurio, litio, cadmio, manganeso, de tal manera que si estos metales pesados alcanzan los suministros de agua se crea un grave problema de contaminación.

Algunos de los componentes de las pilas no sólo son contaminantes para el medio ambiente (ecotóxicos), sino que son nocivos para el ser humano. Así, la pérdida del electrolito de pilas y acumuladores fuera de uso puede provocar quemaduras en la piel e irritaciones en las mucosas. La ingestión accidental de una pila botón puede producir la perforación química de las vías digestivas o bloqueo de la glotis o del esófago.

Todos estos factores de riesgo se están viendo rápidamente incrementados con la fabricación de dispositivos que necesitan pilas cada vez de menor tamaño, como podría ser el caso de módulos ZigBee de uso comercial. Con el desarrollo de la electrónica y de la robótica el número creciente de pilas en el mercado irá acompañado de normas cada vez más estrictas en cuanto a la fabricación y el manejo de las mismas, así como en lo referente a su posterior eliminación.

## 1.2. Comparativas ZigBee – Bluetooth – WLAN

### 1.2.1. Alternativas al ZigBee

Hay muchas alternativas inalámbricas asequibles a los diseñadores, comparando ZigBee con algunos de los estándares más populares que comparten la banda de 2.4 GHz sin licencia. Los parámetros mostrados en la tabla 1.3 incluyen el estándar del MAC, la máxima velocidad de transmisión, el consumo de corriente típica en transmisión y en “standby”, los requisitos de memoria de programa para un dispositivo típico, aplicaciones y opciones de conexión de la red.

**Bluetooth** es un popular sistema de comunicación inalámbrico basado en el estándar IEEE 802.15.1. Bluetooth trabaja a una velocidad de transmisión de datos de 1 Mbps. Se puede ver que Bluetooth y ZigBee tienen similares corrientes en transmisión, pero ZigBee tiene un recurso significativamente mejor, más baja corriente en “standby”. Esto es debido a que los dispositivos en redes Bluetooth deben dar información a la red frecuentemente para mantener la sincronización, así que no pueden ir fácilmente a modo “Sleep”.

**Wi-Fi o WLAN** es una red que requiere la actividad casi ininterrumpida de los dispositivos en la red. La ventaja de este estándar es la cantidad tremenda de datos que se pueden transferir de un punto a multi-puntos, pero se puede ver que la corriente en transmisión es alta.

Se puede ver que de los tres estándares de radio, solamente ZigBee brinda la flexibilidad de la conexión de redes en malla. También se pueden ver los reducidos requisitos de memoria de programa de ZigBee. Las aplicaciones ZigBee son típicamente muy simples. La potencia está en la conexión de redes y el hecho de que los dispositivos “end point” de ZigBee puedan “dormir”

En la tabla 1.3 podemos observar como los estándares inalámbricos están basados en lo que se llaman “modelos de uso” o “aplicaciones”. Ningún estándar cubre todos los requerimientos de todos los “modelos de uso”. Los diseñadores deben escoger el estándar que cubra mejor sus requisitos de aplicación.



<b>ZigBee (WPAN)</b>	<b>Bluetooth (WLAN/WPAN)</b>	<b>Wi-Fi (WLAN)</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estándar 802.15.4</li> <li>• 250 kbps</li> <li>• TX: 35 mA</li> <li>• Standby: 3µA</li> <li>• 32-60KB memoria</li> <li>• Iluminación, sensores, control remoto, etc.</li> <li>• Red en malla, punto a punto o punto a multipunto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estándar 802.15.1</li> <li>• 1 Mbps</li> <li>• TX: 40 mA</li> <li>• Standby: 200µA</li> <li>• &gt;100KB memoria</li> <li>• Telecomunicaciones, audio, etc.</li> <li>• Punto a multipunto</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Estándar 802.11</li> <li>• Hasta 54Mbps</li> <li>• TX: &gt;400 mA</li> <li>• Standby: 20mA</li> <li>• &gt;100KB memoria</li> <li>• Internet, etc.</li> <li>• Punto a multipunto</li> </ul>

**Tabla 1.3** Comparativa ZigBee – Bluetooth – Wi-Fi

### 1.2.2. Redes PAN: ZigBee versus Bluetooth

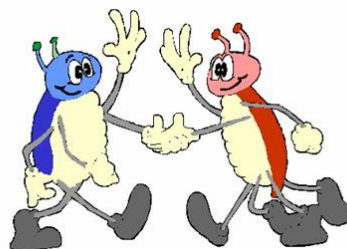
Examinando la comparativa de los dos estándares más cercanos, ambos están en la categoría PAN, ambos tienen radios similares, pero no lo son en cuanto al consumo de energía. La diferencia entre los dos estándares está en su campo de aplicación.

Bluetooth apunta a las aplicaciones de una transferencia media de datos y servicio ininterrumpido, como transferencia de ficheros y transmisión de sonido en telecomunicaciones.

ZigBee apunta las aplicaciones de baja transferencia de datos y ciclos de servicio bajos. Dispositivos “end point” no transmiten o reciben tan frecuentemente en este tipo de aplicaciones, y permiten una duración de la pila excepcional.

Por ejemplo, si un sensor transmite una vez durante un minuto para informar sobre su estado y esto 10 veces al día, cuando hay un evento tal como abrir una puerta. En este caso con un dispositivo Bluetooth duraría 100 días y con un dispositivo ZigBee duraría 9.8 años, sobrepasando el tiempo de caducidad de la batería. Evidentemente, ZigBee es una mejor opción para este tipo de aplicación controlada por eventos.

Se podría decir en cualquier caso que no son tecnologías competitivas sino complementarias ya que son dos soluciones distintas para áreas de aplicación también diferentes.



## CAPÍTULO 2. DISEÑO DEL MÓDULO HARDWARE

### 2.1. Pasos previos al diseño

Antes de empezar a diseñar el módulo a fondo se han tenido que tener en cuenta varias posibilidades que ofrece el diseño de una placa ZigBee.

Para empezar se puede plantear un diseño a 4 capas que hace obviamente las cosas más fáciles para el diseñador a la hora de “enrutar” y distribuir las capas de alimentación, masa, etc, o bien optar por intentar un diseño a 2 capas. Éste último implica más problemática a la hora de colocar pistas de alimentación, de señal y masa, ya que en diseños tan relativamente reducidos el espacio puede empezar a ser un punto en contra. De todas formas ni que decir tiene que resulta en un diseño más económico que al fin y al cabo es uno de los objetivos de este proyecto.

Por otra parte también existe la posibilidad de ensamblar componentes a una sola cara o hacerlo en las dos. En este tema, está prácticamente relacionado el hecho de hacer un diseño a 2 capas con la necesidad de colocar componentes en las dos caras ya que de otra forma se haría bastante difícil de diseñar un módulo de dimensiones reducidas.

Así pues, queda a elección del diseñador y de los objetivos y aplicaciones que vaya a tener la placa la decisión de hacer 2 o 4 capas, con componentes a una o dos caras. Habría que considerar que posiblemente el intento de rebajar coste con 2 capas se puede ver anulado por el hecho de ensamblar a 2 caras si el diseño se llevara a producción masiva. En este caso es probable que no saliera a cuenta colocar componentes en las dos caras, ya que se obliga a pasar dos veces la placa por las líneas de ensamblado SMT (figura 2.1), y sí hacerlo sólo a una cara pero con una placa de 4 capas, ya que la diferencia de precio entre PCB's de 2 o 4 capas se compensa si hay componentes en una sola cara.



**Fig. 2.1** Detalle de una línea de ensamblado SMT de componentes

### 2.1.1. Topología de un módulo ZigBee

Más adelante explicaremos detalladamente las diferentes partes de un módulo ZigBee, pero a modo de introducción se puede decir que cualquier sistema ZigBee ha de tener una serie de partes imprescindibles en común, entre ellas constan los siguientes subsistemas:

- Parte RF: Cabe destacar que aunque ZigBee nos deja bastante alisado el tema de RF, se necesita un transmisor/receptor capaz de implementar el modulado, mezclado, filtrado y amplificación de los datos a transmitir, es el que se conoce con el nombre inglés de “transceiver”.
- Por otra parte es necesario en cualquier caso de algo capaz de procesar la señal, llámese DSP, microcontrolador, CPU, etc. De hecho existen ya muchos fabricantes y cada vez es más habitual encontrar chips todo en uno que incluyen ya el transceiver y el procesador en la misma pieza, reduciendo así las dimensiones del módulo.
- A parte de estas dos piezas fundamentales para el desarrollo, también se tendrá que disponer y de forma más libre para el diseñador, de cristales u osciladores externos cuando el propio chip lo requiera, así como de líneas de alimentación, condensadores de desacoplo de éstas, etc.
- De la misma forma es posible que dependiendo de la aplicación a la que se destine el diseño se requiera de una batería portátil que vaya integrada en el mismo módulo. En este caso se tendría que disponer también de algún tipo de puerto de carga, que a su vez podría ser aprovechado por ejemplo para dotar de una conexión serie USB que permitiera interactividad con un PC.

### 2.1.2. Tipos de chips ZigBee

Actualmente existen cerca de una veintena de compañías dedicadas entre otras cosas a la manufacturación de chips ZigBee, entre ellas, las más importantes son la siguientes:

- |  |                                  |
|--|----------------------------------|
| • Atmel Corporation                    | • Integration Associates, Inc.   |
| • Chipcon                              | • Luxoft Labs.                   |
| • CompXS                               | • OKI                            |
| • Crossbow                             | • Panasonic/Industrial solutions |
| • Ember Corporation                    | • Philips Semiconductors         |
| • Freescale, Inc.                      | • PrairieComm, Inc.              |
| • Helicomm, Inc.                       | • UBEC                           |
| • Innovative Wireless Technology (IWT) | • ZMD                            |

En las tablas 2.1 y 2.2 describimos detalladamente algunos de los diferentes chips ZigBee más destacados de los fabricantes nombrados arriba, entre otras cosas podemos ver si se tratan de chips todo en uno, sus frecuencias de trabajo, consumos, etc.

<b>Fabricante</b>	<b>Atmel</b>	<b>Chipcon</b>	<b>CompXS</b>	<b>Ember</b>	<b>Freescall</b>
<b>Chip</b>	AT86RF210	CC2430	CX1540	EM250	MC13192
<b>800/900MHz</b>	Sí	No	No	No	No
<b>2400MHz</b>	No	Sí	Sí	Sí	Sí
<b>Vdd (V)</b>	1,8-3,6	2,1-3,6	3	2,1-3,6	2-3,4
<b>Standby (µA)</b>	1	1	1	1	3
<b>TX (mA)</b>	60	25	56	35,5	34
<b>RX (mA)</b>	14,5	27	57	35,5	37
<b>Interfaz</b>	SPI	SPI	SPI	SPI	SPI
<b>Encriptado?</b>	No	Sí	No	Sí	No
<b>Chip todo en uno?</b>	Sólo Transceiver	Sí	Sólo Transceiver	Sí	Sólo Transceiver

**Tabla 2.1** Propiedades de los chips ZigBee

<b>Fabricante</b>	<b>IWT</b>	<b>OKI</b>	<b>Panasonic</b>	<b>UBEC</b>	<b>ZMD</b>
<b>Chip</b>	mProm	ML7065	PAN802154	UZ2400	ZMD44101
<b>800/900MHz</b>	No	No	No	No	Sí
<b>2400MHz</b>	Sí	Sí	Sí	Sí	No
<b>Vdd (V)</b>	1,4-3,3	3	2,2-3,4	1,8	2,4
<b>Standby (µA)</b>	14	1		2	4
<b>TX (mA)</b>	19	56	35	22	20
<b>RX (mA)</b>	21	57	40	18	19
<b>Interfaz</b>	SPI	SPI	SPI	SPI	SPI/Paralelo
<b>Encriptado?</b>	No	No	No	No	No
<b>Chip todo en uno?</b>	Sólo Transceiver	Sólo Transceiver	Sólo Transceiver	Sólo Transceiver	Sólo Transceiver

**Tabla 2.2** Propiedades de los chips ZigBee

Como conclusión podemos decir que al comienzo de este proyecto el único fabricante que ofrecía chips SOC (System on Chip), con el transceiver y el microcontrolador integrados, era Ember y por este motivo se decidió realizar el diseño basándonos en el chip Ember EM250. Ahora se puede ver como ya existen más marcas que comercializan chips SOC como el de Ember, como puede ser Chipcon, entre otras, así que se podría volver a considerar la posibilidad de realizar otro diseño con el chip de Chipcon ya que según las especificaciones tiene un consumo algo menor al EM250 que usaremos en este diseño.

En cualquier caso el chip que escogimos en definitiva fue el de Ember y será a partir del cual detallaremos los pasos del diseño, antes veremos una selección de las posibles antenas a utilizar en el apartado siguiente.

### 2.1.3. Selección de la antena ZigBee

La elección de una buena antena es algo bastante clave en el diseño de un módulo de bajo consumo para conseguir unas características de rango aceptables, por este motivo en los apartados siguientes se muestra una comparativa de antenas de diversos fabricantes, en primer lugar se elegirá la antena para insertar en la placa (tipo SMD), además también se hará una comparativa de antenas SMA para una posible placa coordinadora.

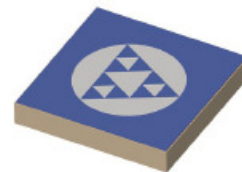
#### 4.3.1.1. Antenas tipo chip para inserción en placa

Dentro de los fabricantes de antenas tipo chip o SMD los principales son Fractus, GigaAnt y Murata, de tal modo que la comparativa se basará entre estos tres, en el Anexo A se puede ver una tabla detallada de características de las diferentes antenas consideradas, pero en definitiva los rasgos principales son los siguientes que resumimos a continuación, cabe decir que todos los modelos estudiados trabajan en la banda ISM 2,4GHz a una impedancia de 50 ohmios como se necesita para este diseño.

- **Modelos Fractus:**

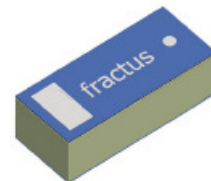
- I. Reach Xtend**

- Antena tipo Chip.
    - Ganancia máxima: 2dBi
    - Ganancia media: -2,5 dBi
    - Eficiencia máxima: 70%
    - Dimensiones (mm): 6,7x6,7x1



- II. Compact Reach Xtend**

- Antena tipo Chip.
    - Ganancia máxima: 1,5dBi
    - Ganancia media: -2,3 dBi
    - Eficiencia máxima: 75%
    - Dimensiones (mm): 10x10x0,8



- III. Slim Reach Xtend**

- Antena tipo Chip.
    - Ganancia máxima: 0.5dBi
    - Ganancia media: -2,9 dBi
    - Eficiencia máxima: 50%
    - Dimensiones (mm): 7x3x1



- **Modelos GigaAnt:**

### I. Comata

- Antena tipo SMD.
- Ganancia máxima: 1,1dBi
- Ganancia media: -3 dBi
- Eficiencia máxima: 60%
- Dimensiones (mm): 12,8x3,6x3,3



### II. Limata

- Antena tipo SMD.
- Ganancia máxima: 2,5dBi
- Ganancia media: -3,2 dBi
- Eficiencia máxima: 67%
- Dimensiones (mm): 18,5x3,9x1,1



### III. Mica

- Antena tipo SMD.
- Ganancia máxima: 1,9dBi
- Ganancia media: -3,4 dBi
- Eficiencia máxima: 79%
- Dimensiones (mm): 20,5x3,6x3,3



### IV. Rufa

- Antena tipo SMD.
- Ganancia máxima: 4,4dBi
- Ganancia media: -4,3 dBi
- Eficiencia máxima: 69%
- Dimensiones (mm): 12,8x3,9x1,1



### V. Impexa

- Antena tipo SMD.
- Ganancia máxima: 0,9dBi
- Ganancia media: -1,9 dBi
- Eficiencia máxima: 60%
- Dimensiones (mm): 6,3x3,9x1,1



### VI. Flavus

- Antena tipo Snap-in.
- Ganancia máxima: 4,3dBi
- Ganancia media: -4,6 dBi
- Eficiencia máxima: 66%
- Dimensiones (mm): 27,3x7,9x9,6



- **Modelos Murata:**

- I. ANCG12G44SAA129**

- Antena tipo Chip.
    - Ganancia máxima: 0 dBi
    - Dimensiones (mm): 10x4x3



- II. ANCM12G45SAA075**

- Antena tipo Chip.
    - Ganancia máxima: 0 dBi
    - Dimensiones (mm): 9x3x1



- III. ANCV12G44SAA127**

- Antena tipo Chip.
    - Ganancia máxima: 0 dBi
    - Dimensiones (mm): 4x2x1,5



- IV. ANCW12G45SAA117**

- Antena tipo Chip.
    - Ganancia máxima: 0 dBi
    - Dimensiones (mm): 9x3x2



En resumen, después de observar las características de todas ellas nos quedamos a decidir entre dos: la “Compact Reach Xtend” de *Fractus* o la “Rufa” de *GigaAnt*, debido entre otras cosas a que son las que tiene unas dimensiones más adecuadas para nuestro diseño (Fractus de GigaAnt es por ejemplo demasiado grande) y a que presentan buenas características de radiación y eficiencia, los modelos Murata por otra parte, han quedado prácticamente descartados de antemano debido a sus pobres rasgos de radiación.

Por lo tanto, teniendo en cuenta que nuestro deseo sería el tener un diagrama de radiación lo más omnidireccional posible nos hemos tenido que decantar por la antena de Fractus debido a que presenta un diagrama mucho más estable en todos los ángulos, es decir que aunque no tenga una ganancia máxima tan grande como la GigaAnt, también hay que decir que según las especificaciones de ambas, ésta última presenta muchos más “ceros” de radiación que la Fractus.

Así que después de haber elegido nuestro chip ZigBee (Ember EM250), ya tenemos ahora también elegida la antena a utilizar en el diseño (Fractus Compact Reach Xtend), la cual tiene un coste 0,85 euros en pedidos de 100 unidades, 0,60 euros en pedidos de 1000 unidades o 0,40 si se hace un pedido de 10000 unidades.

#### 4.3.1.2. Antenas con conector SMA

Como hemos comentado antes, sería posible la utilización de una antena de más ganancia para, por ejemplo un módulo que estuviera fijo en algún lugar haciendo de coordinador de otros dispositivos ZigBee. Para este cometido disponemos de una serie de antenas tanto de Fractus como de GigaAnt, estas son sus características:

- **Modelos Fractus:**

- I. Julia 12**

- Antena tipo Panel con conector SMA.
    - Ganancia máxima: 12dBi
    - Dimensiones (cm): 10x10x3



- II. Julia 12**

- Antena tipo Panel con conector SMA.
    - Ganancia máxima: 26dBi
    - Dimensiones (cm): 21x21x3



- **Modelos GigaAnt:**

- I. Picea**

- Antena tipo conector SMA.
    - Ganancia máxima: 4,1dBi
    - Eficiencia máxima: 60%
    - Dimensiones (mm): 49,3x12,2x8,55



- II. Titanis**

- Antena tipo conector SMA.
    - Ganancia máxima: 4,4dBi
    - Eficiencia máxima: 90%
    - Dimensiones (mm): 62,5x20



Para el caso de la antena externa hemos escogido también la Fractus, y de las dos se puede decir que con la Julia 12 de 12dBi de ganancia nos debería llegar sobradamente.

El coste de este modelo es aproximadamente de unos 23 euros para pedidos de 100 unidades, y de 21 euros cuando se hace un pedido de 1000, uno de los motivos de elegir esta y no la Julia 10 también es el precio ya que esta última cuesta 33 euros en pedidos de 100 unidades o 29 euros en pedidos de 1000.



#### 2.1.4. Directiva ROHS

RoHS (Restriction of use of certain Hazardous Substances) es una Directiva de la UE (Directiva Europea 2002/95/EC) la cual restringirá el uso de 6 materiales peligrosos en la fabricación de equipos eléctricos y electrónicos a partir del 1 de julio del 2006 en Europa, fecha que nos queda muy cercana a la conclusión de este proyecto. Los productores e importadores de componentes trabajan en soluciones internas y externas para la implementación de las demandas que el RoHS ha generado.

La Directiva RoHS requiere que los fabricantes puedan demostrar unos niveles mínimos de las seis sustancias siguientes:

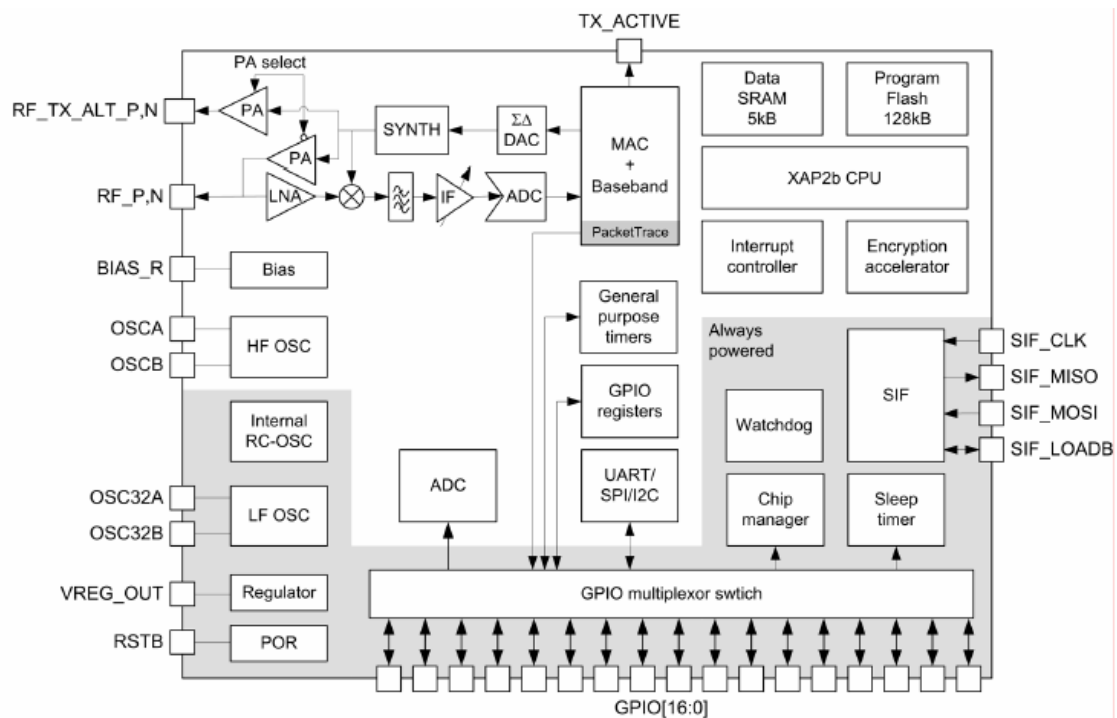
- Plomo (Pb) (máxima concentración 0,1%)
- Cromo Hexavalente (Cr +6) (máxima concentración 0,1%)
- Mercurio (Hg) (máxima concentración 0,1%)
- Polibromobifenilos (PBB) (máxima concentración 0,1%)
- Cadmio (Cd) (máxima concentración 0,01%)
- Polibromodifeniléteres (PBDE) (máxima concentración 0,1%)

La directiva RoHS normalmente va asociada con la directiva RAEE (Reutilización de aparatos eléctricos). El objetivo conjunto es el de mejorar el rendimiento medioambiental en todas las etapas del ciclo vital de un producto. Algunos de los materiales empleados en la electrónica pueden presentar un riesgo para el entorno y la salud durante el proceso de fabricación o de eliminación final del producto. Por consiguiente, la UE ha tomado medidas para restringir el uso de estos materiales (RoHS) y fomentar la eliminación segura o reutilización de los aparatos eléctricos.

En el caso de nuestro diseño hemos comprobado las declaraciones de conformidad de los componentes en las que se demuestra que cumplen con la directiva RoHS.

## 2.2. Diseño Hardware

El diseño de nuestro módulo ZigBee está basado en el chip EM250 de Ember, el cual integra en un espacio muy reducido, como hemos comentado en capítulos anteriores, la parte de radiofrecuencia (transceiver) junto con la parte de procesamiento de la señal (microprocesador). Obsérvese la arquitectura en la figura 2.2.



**Fig. 2.2** Arquitectura chip EM250 de Ember

El chip EM250 integra un transmisor/receptor de 2,4GHz adaptado al estándar IEEE 802.15.4 junto con un microprocesador XAP2b de 16 bits. Éste contiene memoria Flash y RAM junto con periféricos para uso de diseñadores de aplicaciones ZigBee.

El transmisor utiliza una arquitectura que sobrepasa en unos 15dB las recomendaciones del estándar IEEE 802.15.4. El filtrado en recepción por otra parte permite la completa coexistencia con otros sistemas en la banda de 2,4 GHz como Bluetooth o Wi-Fi.

En lo que a periféricos se refiere, el EM250 consta de diversos tipos para aplicaciones definidas por el usuario como GPIO, UART, SPI entre otros.

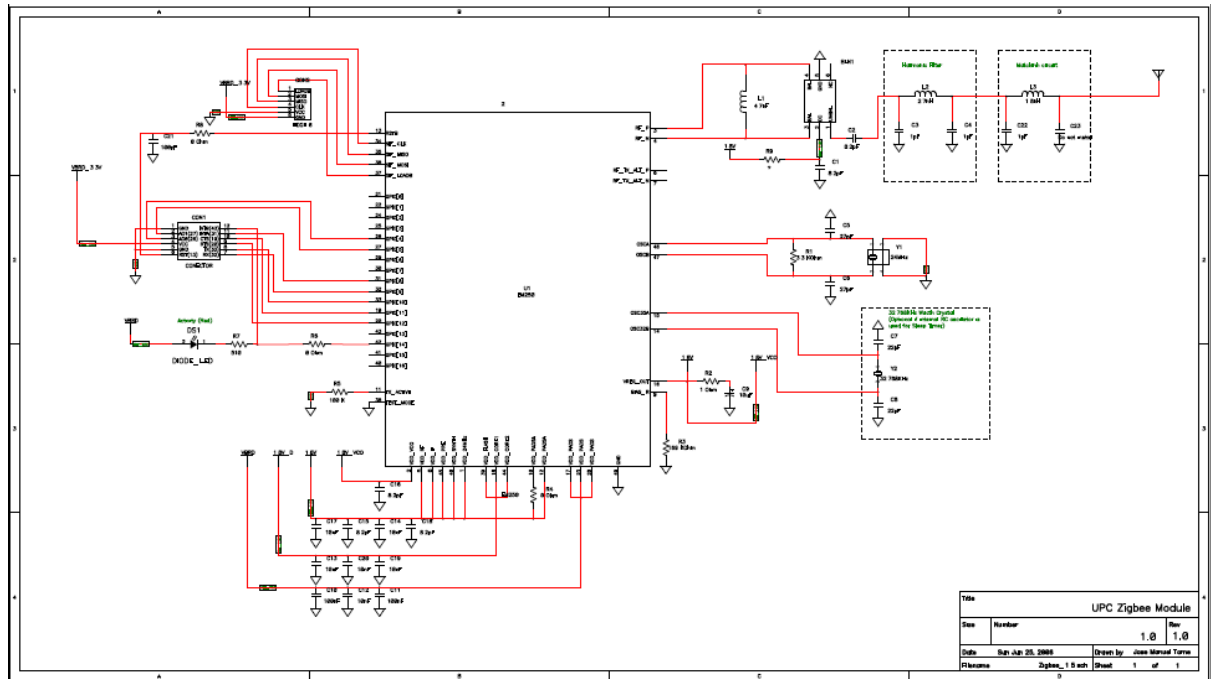
El EM250 consta también de 128kB de memoria Flash y 5kB de memoria SRAM integrada. Éste se utiliza con el stack de ZigBee EmberZNet que proporciona una solución directa para aplicaciones ZigBee.

Cabe decir que en este proyecto se lleva a cabo el diseño de dos módulos que básicamente se distinguen en que uno de ellos está pensado para integrar una antena SMD (concretamente la Compact Reach Xtend de Fractus), y el otro integra un conector SMA para la posibilidad de conectar el módulo a algún tipo de antena externa de mucha más ganancia pero lógicamente menor movilidad debido a la diferencia de dimensiones.

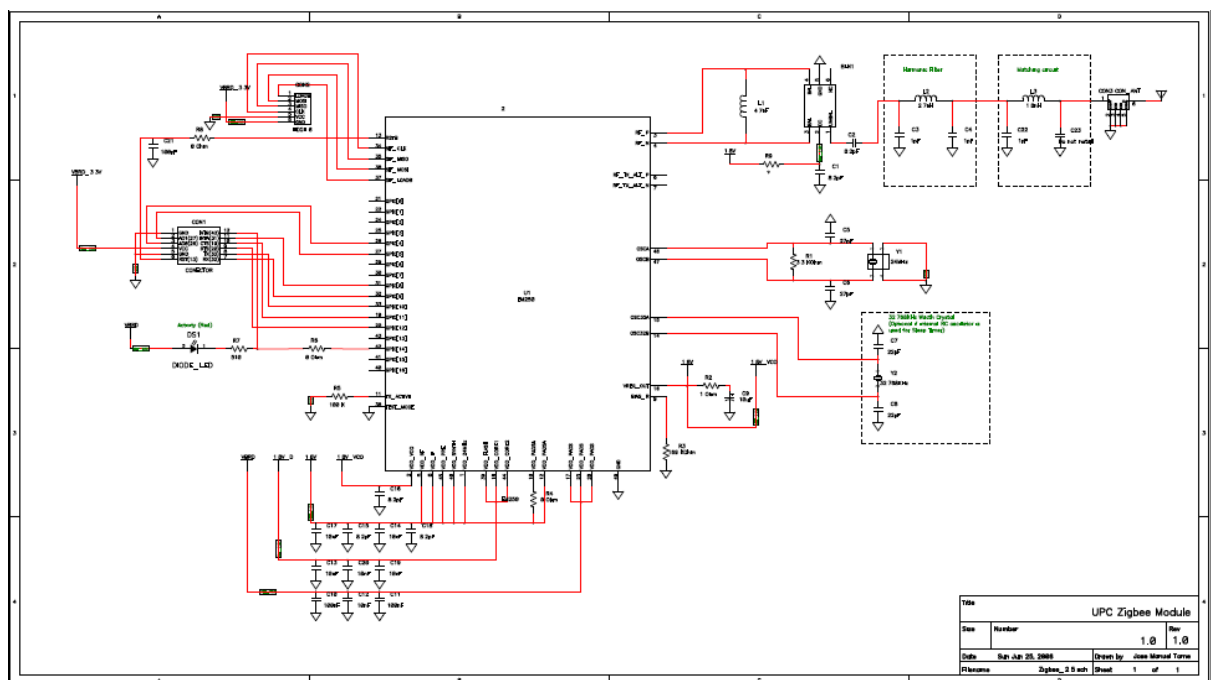
En los apartados siguientes pasamos a explicar detalladamente el proceso de diseño que se ha seguido.

### 2.2.1. Esquemático ZigBee

En la figura 2.2 podemos observar el esquemático completo del módulo ZigBee con antena SMD, en la figura 2.3 podemos observar el esquemático de la placa con conector SMA, que como hemos comentado es básicamente el mismo con la excepción de la antena.



**Fig. 2.2** Esquemático completo diseño con antena SMD

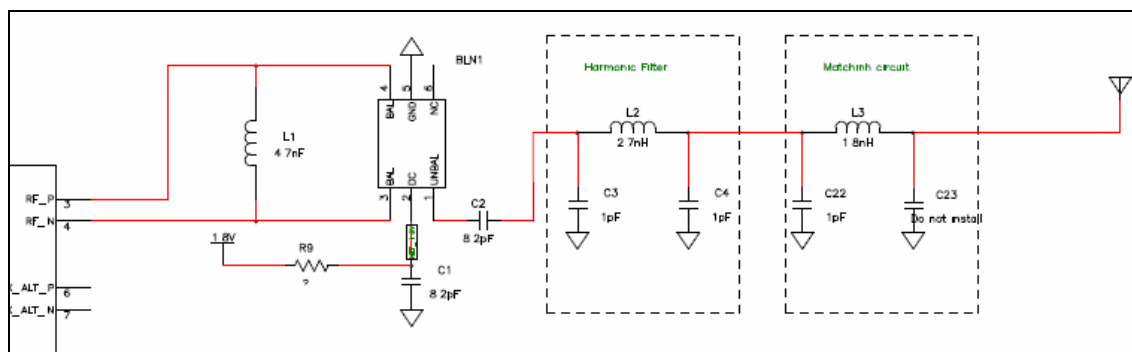


**Fig. 2.3** Esquemático completo diseño con conector SMA

Para simplificar a partir de ahora y para no repetir explicaciones, nos centraremos únicamente en el diseño con antena SMD, ya que como hemos dicho anteriormente el diseño con conector es el mismo. (Véase los esquemáticos detallados en el Anexo D)

### 2.2.2. Circuitería RF

En este apartado se detalla la parte de Radiofrecuencia del módulo. Podemos observar en la figura 2.4 todo el esquema.

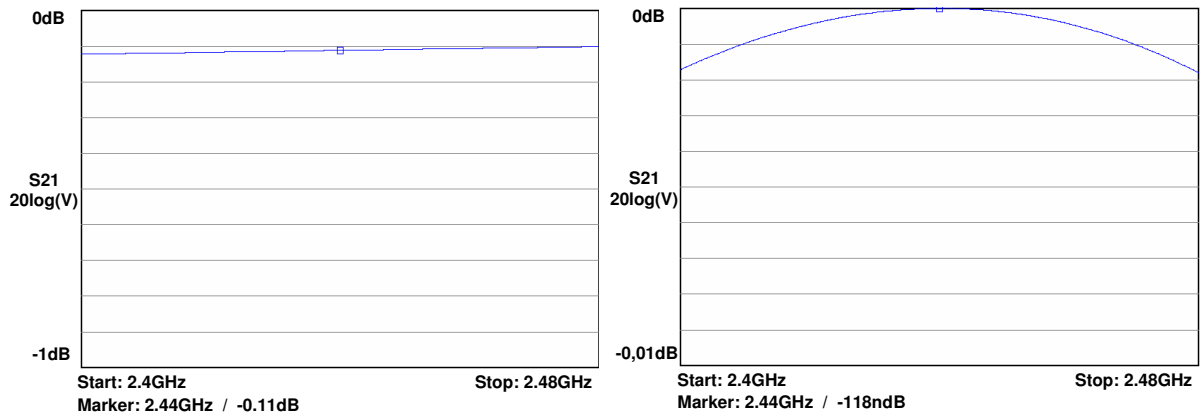


**Fig. 2.4** Esquemático de la parte de Radiofrecuencia

Debido a que las señales de transmisión y recepción son diferenciales para mejorar la inmunidad al ruido, es necesaria la implementación de un balun de RF para la conexión de antenas no balanceadas de 50 ohmios. El balun se puede implementar con componentes discretos mediante bobinas y condensadores o con un componente cerámico integrado, siempre y cuando se realice la conversión de 200 a 50 ohmios que se requiere. Debido a que el balun cerámico proporciona más eficiencia haciendo que el diseño sea más sencillo y gracias a que el coste no se ve afectado en exceso, en este proyecto se decidió la implementación de un balun integrado, aunque cabe decir que se dispone del diseño con componentes discretos que también podría ser implementado pero aumentando ligeramente las dimensiones de la placa.

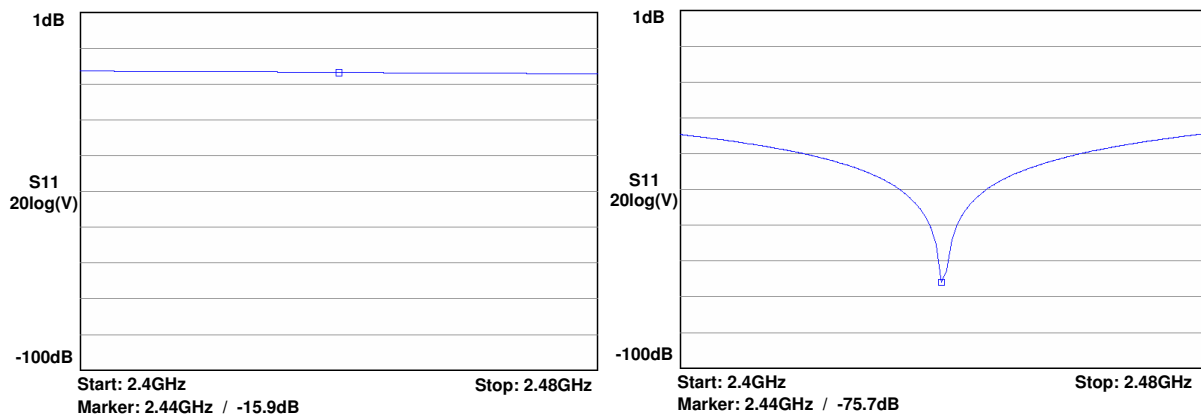
Para adaptar los dos puertos balanceados del chip EM250 con las entradas del balun se ha utilizado una única bobina de 4,7nH. En lo que refiere a la alimentación del balun, se ha implementado un filtro RC adicional para mejorar la inmunidad al ruido. En la salida no balanceada del balun se ha implementado por una parte un filtro para el segundo armónico con el objetivo de mejorar el margen de 2º armónico requerido por la FCC y ETSI (50dBuV/m a 3m). Por otra parte se ha realizado una adaptación entre el balun y la antena teniendo en cuenta la anchura de pista y el filtro ya comentado.

Para detallar un poco más, en las siguientes figuras se muestran las simulaciones de los parámetros de la parte de RF, antes y después de adaptar.



**Fig. 2.5** Parámetro S21 antes y después de adaptar

Como se observa en la figura 2.5 conseguimos un mayor coeficiente de transferencia después de adaptar (nótese que el gráfico va de 0dB a -0.01dB), cabe decir de todas formas que se trata de una simulación y por tanto al aplicar componentes comerciales la adaptación queda reducida a una S21 de -0.05 dB's. De cualquier modo se consigue mejorar este parámetro en relación a la situación inicial.



**Fig. 2.6** Parámetro S11 antes y después de adaptar

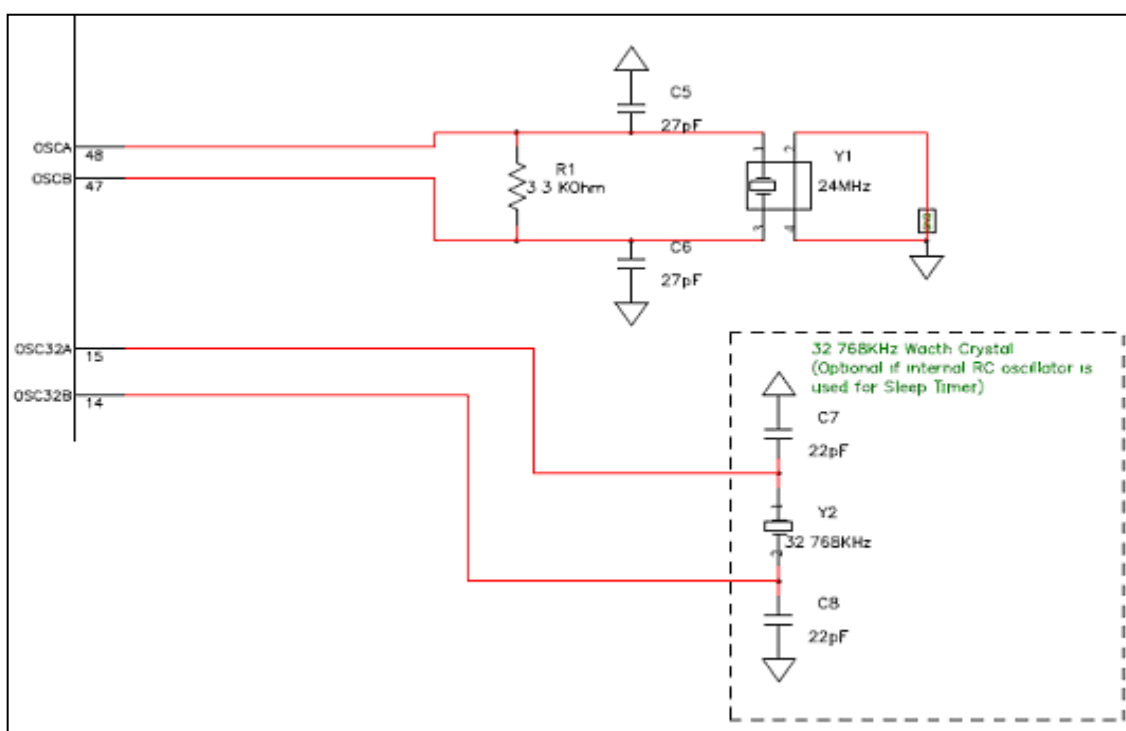
En el caso del coeficiente de reflexión a la entrada de la antena observamos también la notable mejora que supone la adaptación. De igual modo que con S21 al aplicar valores comerciales a la adaptación este coeficiente S11 queda reducido a -27.5dB según las simulaciones.

De cualquier modo queda abierta una posible mejora de la adaptación una vez fabricada la placa y midiendo estos mismos parámetros en el analizador de redes. En esta situación se podría ya de forma empírica realizar lo que se conoce como “trimming” o adaptación de la adaptación, valga la redundancia. Para esta causa se ha tenido en cuenta en el diseño de la PCB como veremos más adelante, el dejar las huellas para un posible circuito en Pi de adaptación, pudiendo insertar una adaptación LC o de tres elementos.

### 2.2.3. Osciladores externos

Como podemos observar en la figura 2.7 el sistema requiere teóricamente de dos osciladores externos, y digo teóricamente ya que en la práctica el segundo de ellos, de 32,768KHz puede ser substituido por el oscilador interno de tipo RC que ofrece el chip EM250, este se usa para los tiempos de “sleep” del chip y es suficiente con el oscilador interno. Realmente en la construcción de los módulos éste no se integrará logrando reducir costes, aunque se tenga en cuenta su huella en los diseños PCB.

Si nos centramos en el primero de ellos (Y1), éste es necesario para dotar al EM250 de una correcta distribución del reloj y los tiempos requeridos por el 802.15.4, el cristal ha de tener una precisión de  $\pm 40\text{ppm}$  y para conseguir una buena estabilidad se necesita de la resistencia R1. Gracias a los dos condensadores C5 y C6 (de 27pF) se consigue adaptar el cristal a su frecuencia correcta, en este caso de 24MHz. Se podrían tener en cuenta también posibles efectos parásitos de la PCB para adecuar estos valores una vez construida la placa.



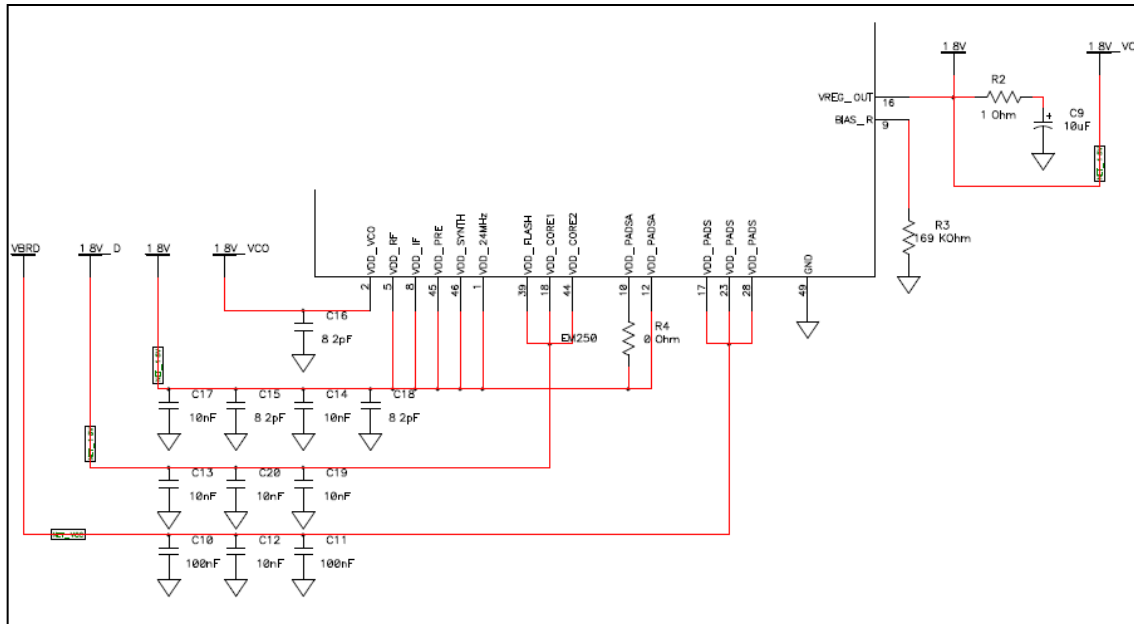
**Fig. 2.7** Detalle del esquemático de los osciladores

### 2.2.4. Condensadores de desacoplo

Para reducir ruido y acoplamientos en las líneas de alimentación se dispone de toda una serie de condensadores de desacoplo los cuales se ilustran en la figura 2.8 para cada pin de alimentación, éstos se han diseñado lo más cerca posible de los pins como veremos en los diseños posteriores. A su

vez se observa en la parte izquierda la salida regulada de 1.8V que ofrece el chip Ember a partir de la alimentación VBRD de 2.1 a 3,6V del EM250 para poder alimentar el resto del circuito, como se puede ver ésta es estabilizada gracias a un condensador “tantalum” de 10uF para evitar efectos parásitos en las líneas de tensión que entre otros alimentan al oscilador externo, de vital importancia.

Por otra parte se puede observar la resistencia de bias de 169Kohm y 1% de tolerancia para dotar de la referencia de corriente adecuada para el funcionamiento del bloque.



**Fig. 2.8** Condensadores de desacoplo y filtrado de red de 1,8V.

### 2.2.5. Conectores del módulo

Podemos observar en la figura 2.9 el LED DS1 que nos informará cuando exista actividad en el módulo. Por otra parte observamos en la línea de Reset del módulo un condensador C21 de 100nF para reducir posibles acoplamientos estáticos que pudieran producir que el sistema se reseteara todo el tiempo.

Finalmente observamos dos conectores, uno de ellos se tratará de un conector sobre placa para poder insertar directamente en conectores tipo ranura, en este contamos con todas los pins SIF del módulo a parte de la alimentación y masa. El otro conector (CON 1) tenemos bastantes más salidas/entradas para poder grabar el chip, o monitorizar todos los paquetes de cada física transmitidos/recibidos gracias a los pins PTI En (Packet Trace Interface) y PTI Data (AD0 y AD1 respectivamente) de forma no intrusiva.

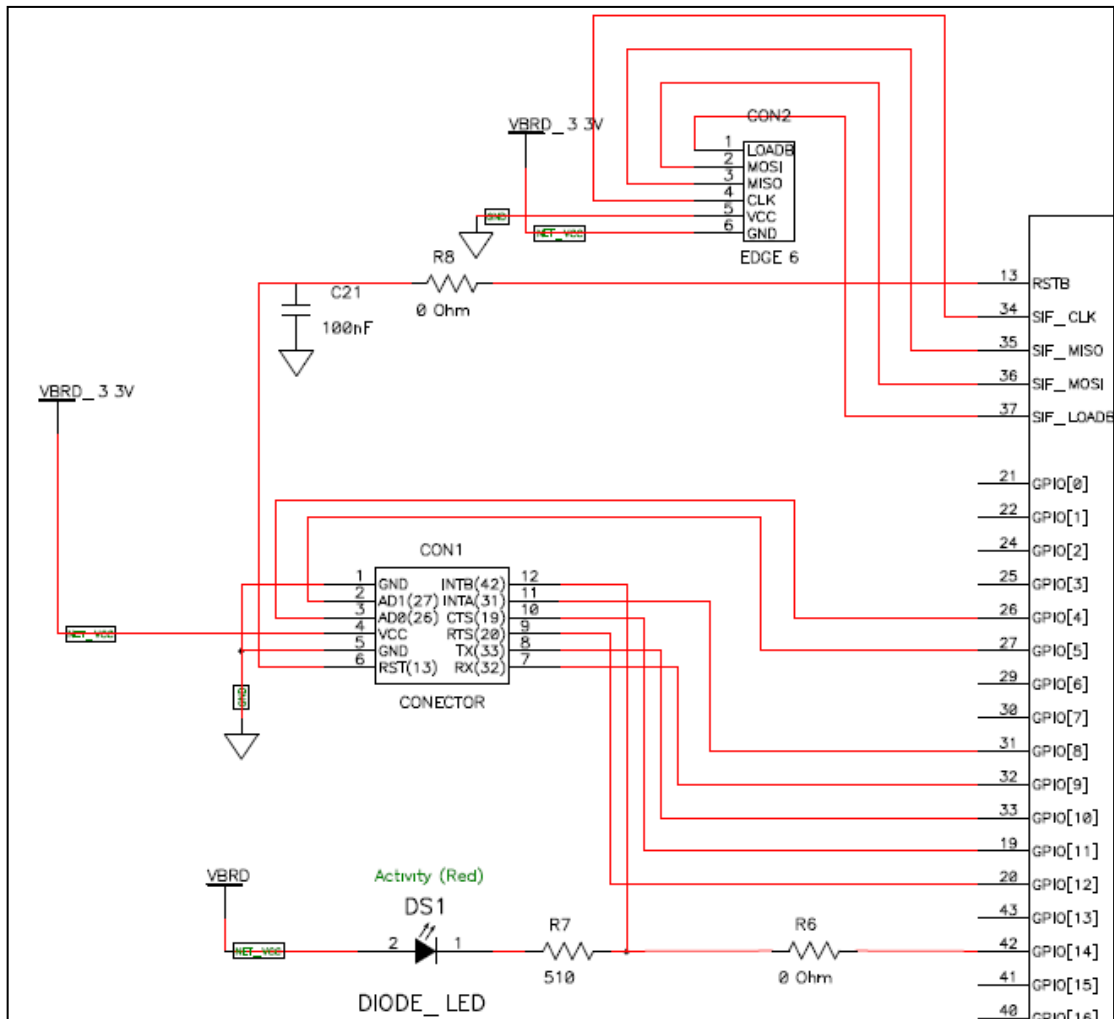


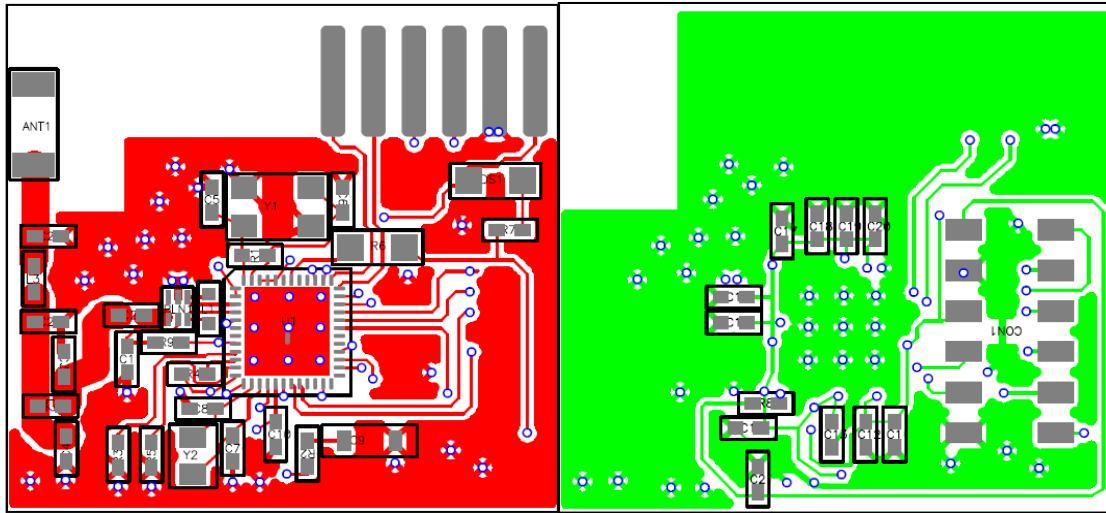
Fig. 2.9 Conectores

### 2.3. Diseños PCB

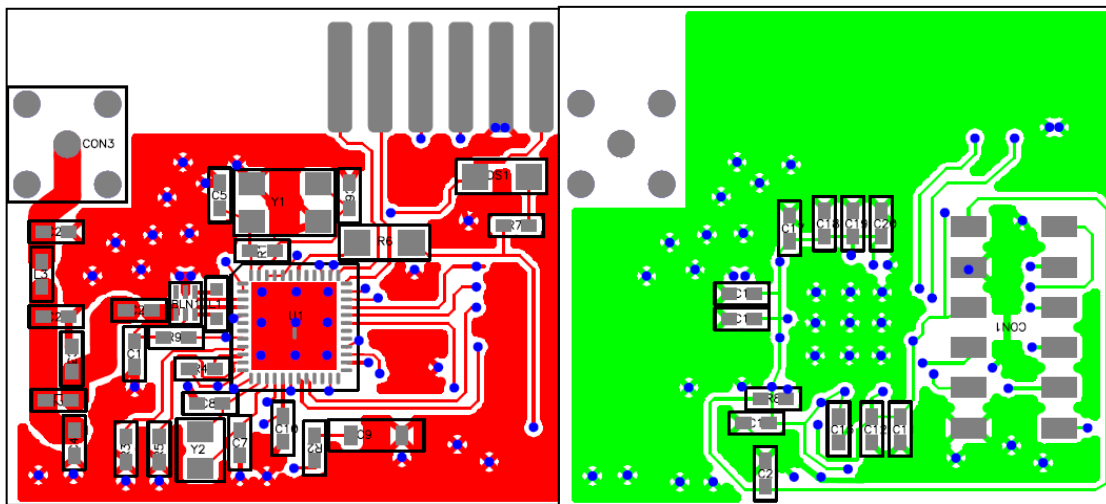
En los siguientes apartados describiremos los layouts de las diferentes secciones del módulo. Para introducir un poco se puede decir que como ya anticipábamos en apartados anteriores el diseño se basa en una placa de dos capas con componentes en ambas caras, en la capa superior se sitúan todas las líneas de señal además de algunas líneas de alimentación de los diferentes componentes. Por otra parte la capa inferior se usa para masa y enrutado de más líneas de alimentación, en concreto para las líneas de alimentación de los pins del chip los cuales requieren de condensadores de desacoplo, con lo que se pueden situar éstos lo más cerca posible del chip.

En las figuras 2.10 y 2.11 observamos ambas caras de los diseños completos con antena SMD y con conector SMA respectivamente, como se puede ver el diseño es básicamente el mismo con el único cambio del conector por la antena, por lo tanto a partir de ahora de nuevo nos centraremos únicamente en los layouts del diseño con antena SMD de Fractus.





**Fig. 2.10** Cara superior e inferior de diseño con antena SMD de Fractus



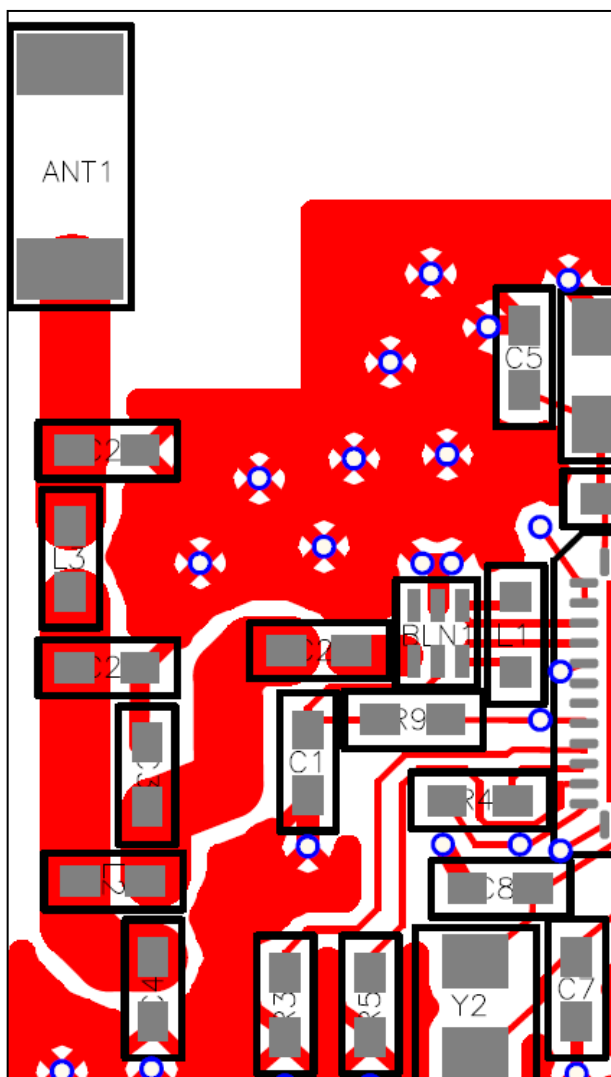
**Fig. 2.11** Cara superior e inferior de diseño con conector SMA

### 2.3.1. Layouts

Como comentábamos antes los diseños se basan en placas de dos capas de material FR4 con un espesor de aproximadamente 1.2 milímetros y 0,1 milímetros de espesor de pistas, la gran mayoría de los componentes serán de dimensiones 0603 con excepción de algún condensador y resistencia, debido a su posibilidad de ensamblado manual, ya que con componentes 0402 se haría prácticamente imposible su soldadura a mano. Sabiendo esto podemos pasar ya a comentar el diseño de cada una de las secciones del módulo de forma más detallada, entre ellos veremos las huellas de la parte de RF, de los osciladores, de los condensadores de desacoplo y de los conectores.

A parte de todo esto también se ha realizado el diseño adicional de una pequeña placa de conectores para poder acoplar al módulo con el fin de poder usar los módulos de desarrollo de Ember para grabar aplicaciones o el stack EmberZNet de ZigBee en el chip.

### 2.3.1.1. Huella de la circuitería de Radio Frecuencia



**Fig. 2.11** Layout balun y antena

Podemos observar en la figura 2.12 por una parte la huella del balun (BLN) junto con los componentes off-chip que requiere, por otro lado vemos toda la línea vertical a la izquierda en la que se sitúa la antena, su adaptación y el filtrado de 2º armónico, de arriba a abajo. Se observa también un detalle del cristal de 32,768KHz, el cual no será necesario instalar.

Así pues el diseño de la parte de RF en módulos de bajo coste como es nuestro caso es fundamental. Para éste cometido hemos seguido una serie de pautas recomendadas por el fabricante del chip, Ember:

- L1 está situada lo más cerca posible de los pins del chip.
- Las líneas hacia el balun han de ser rutadas hacia el balun primero y en segunda instancia hacia el inductor L1, estas han de tener un grosor de 0,2mm para adaptar a 200ohmios.

- Para reducir efectos inductivos la masa del balun ha de disponer de dos vías directas hacia la capa inferior.
- El condensador de desacoplo C1 ha de estar situado lo más cerca posible al balun.
- Los giros de las líneas han de ser de 45º para minimizar las pérdidas en el cambio de dirección.

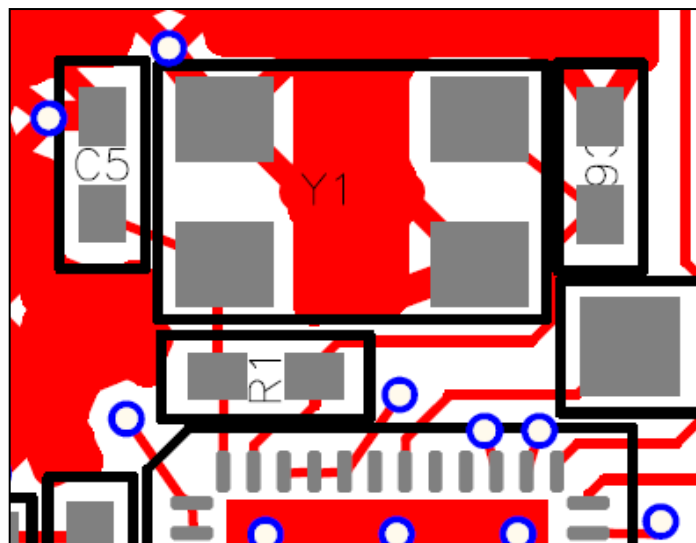
En lo que concierne a la línea de la antena observamos el filtro para 2º armónico del que hablábamos antes formado por C4 (1pF), L2 (2,7nH) y C3(1pF). Además de la adaptación formada por C22 (1pF), L3 (1,8nH) y C22 el cual según nuestro diseño no se debe instalar ya que usamos una adaptación LC, de todas formas se deja su huella para una posible futura mejora de ésta con la posibilidad de insertar una adaptación en Pi.

Para acabar sin nada más que añadir vemos la huella de la antena de la cual sólo un pad es útil (el que recibe la señal) ya que el superior sólo se utiliza para

fijar la antena a la PCB, se puede ver también que el grosor de las líneas que salen del balun a la antena es notablemente superior ya que se ha calculado con el objetivo de mantener la adaptación a 50ohmios necesaria para la antena.

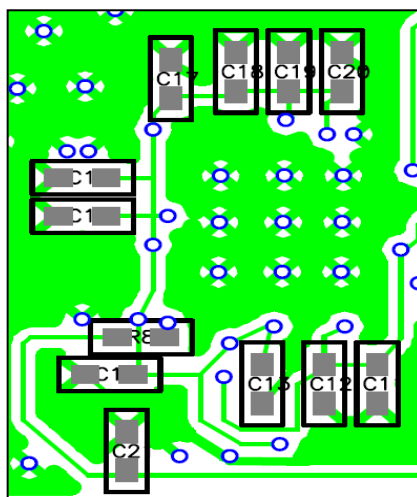
### 2.3.1.2. Huella del oscilador

A continuación observamos en la figura 2.12 la huella del oscilador de 24MHz, para su diseño hemos intentado seguir unas ciertas pautas, para empezar era importante situarlo lo más cerca posible del chip ya que supone una importante fuente de ruido para el resto de componentes. Además se ha tratado de mantener una cierta simetría al situar los condensadores y su resistencia siguiendo los consejos del fabricante.



**Fig. 2.12** Huella del cristal de 24MHz

### 2.3.1.3. Condensadores de desacoplo



Observamos en la figura 2.13 todos los condensadores de desacoplo los cuales por motivos de falta de espacio en nuestro diseño a dos capas, se han situado en la capa inferior con conexiones directas a los pins de alimentación. Podemos decir que estos son los únicos componentes situados en esta cara junto con el conector con lo que de esta forma hemos conseguido situarlos cercanos al chip para lograr una mayor inmunidad al ruido.

**Fig. 2.13** Condensadores desacoplo

#### 2.3.1.4. Conectores

Por último vemos en las figuras siguientes los dos conectores de los que dispondrá la placa para sus posibles aplicaciones. La utilidad de éstos se ha descrito en el apartado 2.2.5 por lo que sólo nos queda comentar el hecho de que el conector CON1 está situado en la capa inferior para poder acoplarlo con la placa de conectores, mientras que el conector CON2 sobre placa está en la capa superior para poder introducir en un conector tipo ranura, obsérvese el LED de actividad DS1 al lado del conector CON2

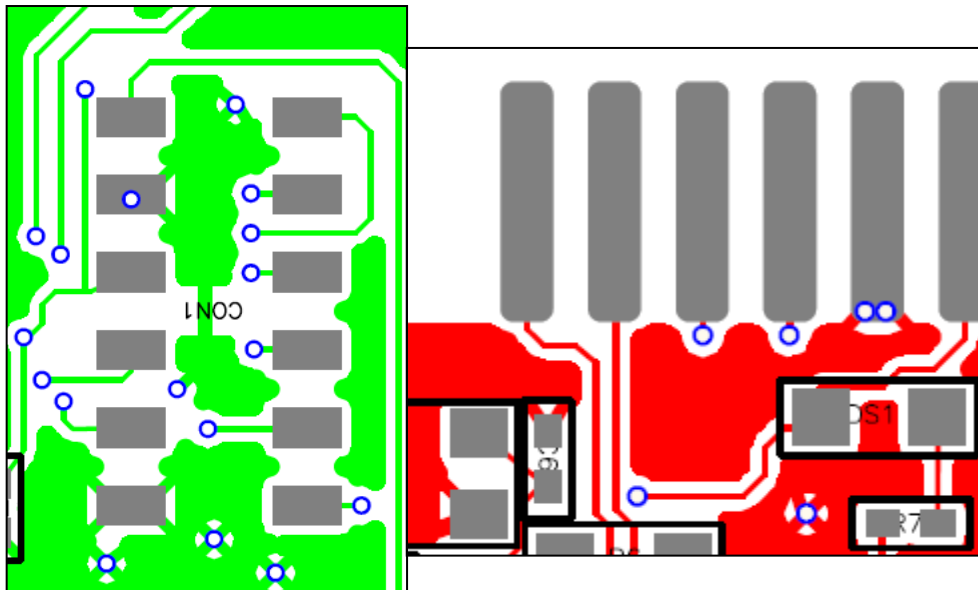


Fig. 2.14 Conectores

#### 2.3.2. Consideraciones de EMC

Durante todo el proceso de diseño se ha intentado seguir una buena práctica de ingeniería la cual básicamente se ha comentado en los apartados previos de cada sección. De todas formas faltaría destacar que para obtener unas buenas características en lo que a Compatibilidad Electromagnética se refiere hemos tenido en cuenta diversos puntos:

- Como podemos observar en las figuras 2.10 y 2.11 del apartado 2.3 se ha intentado que tanto el oscilador de 24MHz, como el balun y los condensadores de desacoplo estén lo más próximos al chip posible. Esto evita posibles acoplamientos entre pistas aunque se puede decir que debido a las pequeñas dimensiones del módulo todo queda bastante compactado como para no esperar importantes acoplamientos.
- Por otra parte si nos fijamos se puede observar que se ha intentado aislar el oscilador de 24MHz de la antena mediante una serie de

- vías a masa, consiguiendo así que no se acople ruido del oscilador a la parte de Radio Frecuencia.
- Se puede comprobar como cada conexión a masa se ha realizado con vías independientes evitando así enrutar más de una conexión a masa por la misma vía, lo que podría provocar acoplamientos entre componentes. Siguiendo con este punto se observa que el chip dispone de una matriz de 3x3 de vías directas a masa para intentar evitar su sobrecalentamiento.
- Finalmente se puede decir que se dispone de una capa de masa lo suficientemente grande para que las pistas de señal y alimentación dispongan de una buena masa en la capa inferior para su correcto enrutado.

## 2.4. Especificaciones del circuito

A continuación podemos ver una tabla resumida de características de Radio Frecuencia del módulo.

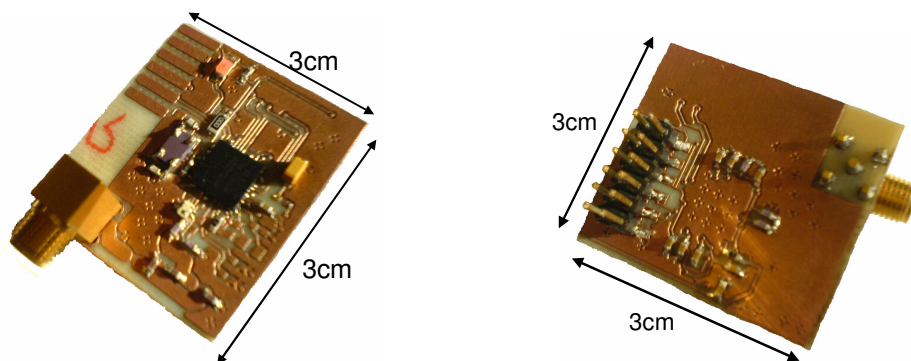
En la figura 2.15 se observa una imagen del módulo con conector SMA.

### 2.4.1. Especificaciones RF

En la tabla 2.3 podemos observar las características del módulo en los que se refiere a consumos y potencias de emisión/recepción.

Características DC	
Tensión de entrada	2,1 – 3,6V
Corriente consumida en transmisión	35,5 mA
Corriente consumida en recepción	35,5 mA
Características Transmisión / Recepción	
Potencia máxima de emisión	3dBm
Sensibilidad	-92dBm

**Tabla 2.3** Características RF



**Fig. 2.15** Módulo con conector SMA

## 2.5. Futuras mejoras del módulo

En una segunda parte del proyecto se podrían llegar a considerar algunas mejoras en el diseño, entre ellas la implantación de una etapa amplificadora externa, lo que normalmente se conoce con el nombre de Amplificadores Front End. Para esto a continuación mostramos un pequeño estudio que se hizo al inicio de este proyecto con la intención de dejar la posibilidad de incluirlo en el diseño en una futura continuación del proyecto.

### 2.5.1. Concepto de Front End

Teniendo en cuenta las potencias de transmisión del módulo diseñado (unos 3dBm) se puede considerar como comentábamos la implantación de un Front End en el diseño. Un amplificador Front End puede llegar a aumentar esta potencia de emisión así como la sensibilidad del sistema ZigBee de forma considerable, en el apartado siguiente comentaremos uno de los posibles Front Ends que se podrían integrar en nuestro diseño, pero antes cabe explicar que un sistema Front End se basa principalmente de cuatro sub-partes:

- Switch Transmisión / Recepción a la salida no balanceada del balun. Éste switch sería controlado, como hemos podido comprobar una vez construida nuestra placa, por el pin 11 (TX\_ACTIVE) del chip EM250, el cual proporciona la señal necesaria para hacer el cambio de emisión / recepción en el switch externo.
- Amplificador LNA (Low Noise Amplifier) con filtro paso banda para incrementar la sensibilidad en recepción.
- Amplificador LPA (Low current Power Amplifier) con filtro paso bajo para aumentar así la potencia de transmisión.
- Switch a la entrada de la antena controlado de igual forma por la señal proporcionada por el pin 11 del EM250.

Para finalizar teniendo en cuenta las partes necesarias para implementar un Front End se presentan dos posibilidades, diseñarlo con componentes discretos, es decir amplificadores y switches independientes, o bien con un solo chip que integre todas las partes comentadas. A continuación mostramos un posible Front End para nuestro módulo.

### 2.5.2. Implantación de un Front End en el diseño

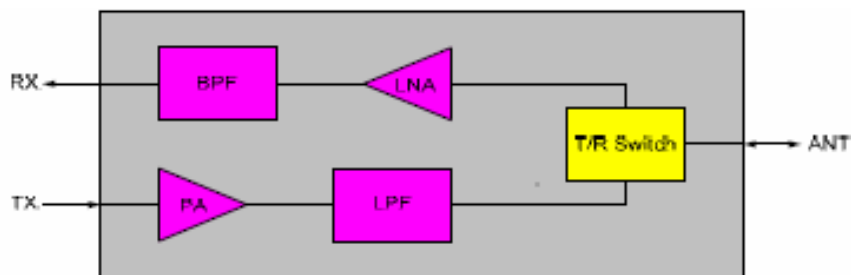
De hecho se podría decir que existe otra posibilidad de Front End, y esta es la que mostramos a continuación. Debido a que es difícil y quizá caro encontrar un chip que integre todos los requerimientos necesarios para ser usados con nuestro chip, ya que hay que tener en cuenta tensiones de alimentación, salidas y entradas no balanceadas de 50 ohmios, etc, se puede pensar en una solución intermedia entre las dos primeras. Nosotros hemos

pensado en una solución con un Front End en un solo chip con un switch externo a la entrada de éste, es decir a la salida del balun.

Después de buscar posibles implementaciones de Front End en nuestro módulo ZigBee llegamos a la conclusión que una buena solución sería la integración de estos dos componentes:

- Front End de Epicom (diseñado en principio para Wi-Fi). Referencia Fabricante FM 2422.
- Switch externo de RFMD. Referencia fabricante RF2436.

En la figura 2.16 mostramos el diagrama de bloques del Front End de Epicom, podemos observar que éste incluye todas las partes necesarias que comentábamos, a excepción del switch a la entrada debido a que las líneas TX/RX del FM2422 no son diferenciales, mientras que las salidas de nuestro chip sí que lo son, y por tanto necesitamos un balun que proporcione una sola salida no balanceada.



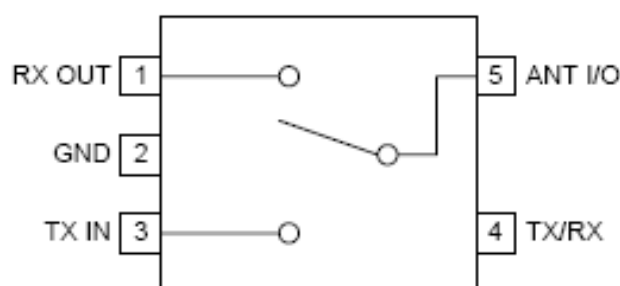
**Fig. 2.16** Front End FM2422 de Epicom

Siguiendo con esta parte, en la tabla 2.4 podemos observar las características del FM2422.

Características FM2422	
Tensión alimentación	3,3V
Dimensiones	4x4x0,8 mm
Rango frecuencial	2,4 – 2,5GHz
Ganancia Transmisión	25dB (Pout mas = 20dBm)
Ganancia Recepción	7,5dB
Perdidas retorno mínimas	Entrada = 15dB Salida = 15dB
Aislamientos mínimos	Tx – Rx = 20dB Tx/Rx – Antena = 20dB

**Tabla 2.4** Características FM2422

Para la segunda parte como ya hemos comentado disponemos de un switch externo de RFMD, en la figura 2.17 observamos su diagrama de bloques. Se puede ver que los pines Rx out y Tx In irían conectados a la entrada del Front End de Epicom, la salida del switch, ANT IO, se conectaría a la línea de entrada de la antena, mientras que para controlar dicho switch se usaría el pin 11 del chip EM250 conectado al pin Tx/Rx del RF2436.



**Fig. 2.17** Switch externo de RMFD

Como conclusión y uniendo los dos componentes descritos podríamos llegar a disponer de un módulo ZigBee capaz de transmitir a unos 20dBm con una sensibilidad de unos -100dBm. Queda claro de esta forma que la inclusión del Front End en el diseño del módulo dotaría a este de unas características de radiación inmejorables para un sistema ZigBee, de todas formas habría que poner en una balanza si interesa unas características tan buenas en frente de las dimensiones de la placa, que se verían afectadas, además de un posible aumento del consumo, entre otras cosas que habría que valorar antes de integrarlo en el diseño.

## 2.6. Certificación

Como todo diseño que se haga, éste se ha de certificar, este es un proceso que puede llegar a ser relativamente largo y costoso. En nuestro caso podríamos introducir cuales serían los pasos principales a seguir en una segunda fase del proyecto encarada a dicha certificación.

Por una parte hay que comentar que existen una serie de normas armonizadas destinadas a dar a conocer a los fabricantes y diseñadores cuales son y de que tipo son las pruebas a realizar para cumplir con las normativas de EMC para asegurar la compatibilidad electromagnética, y la de RTTE (Radio and Telecommunications Terminal Equipment) para asegurar un uso adecuado del espectro.

Sin embargo en nuestro caso no disponemos de un equipo final, es decir nuestro módulo formará parte de todo un sistema el cual si que haría falta certificar. Por este motivo en el momento en que se disponga de todo el



sistema se debería aplicar la norma armonizada. Mientras tanto nuestro trabajo podría ser el de facilitar las cosas y realizar pruebas para asegurar que nuestro módulo, aunque no se trate de un producto final, cumple las recomendaciones. Para esto podríamos contar con los servicios de algún laboratorio certificado como Cetecom o Applus. Después de realizar el estudio y las pruebas podríamos enviar un informe de éstas a un organismo competente (Secretaría General de Telecomunicaciones) para que comprobase que las pruebas realizadas tienen validez, están bien hechas y sirven para demostrar que el diseño cumple normativas.

Por lo tanto esta podría ser una segunda parte del proyecto para conseguir el sello de conformidad CE.

## **CAPÍTULO 3. PRESUPUESTOS DE PRODUCCIÓN**

### **3.1. Introducción**

En el supuesto caso de querer comercializar el módulo diseñado a gran escala, nos harían falta los servicios de alguna empresa dedicada a la producción de placas integradas y a ser posible en el posterior montaje de componentes. Para este propósito en este capítulo se presentan una serie de propuestas y presupuestos de producción en empresas reales e internacionales del sector de manufacturación de servicios electrónicos.

Cabe decir que todos los datos presentados en este capítulo son datos estimados extraídos a partir de presupuestos reales de una empresa dedicada al diseño y comercialización de productos de telecomunicaciones. Estos datos han sido obtenidos con los permisos oportunos de dicha empresa, y se han intentado adaptar a la placa diseñada teniendo en cuenta la diferencia en los componentes y en las características del diseño en sí. En todos estos cálculos se incluye a su vez los conocidos como costes de preproducción, inherentes a cualquier producción en cadena debidos al coste de preparación y puesta en marcha de ésta, junto con el equipamiento específico de producción como las máscaras de componentes, moldes, etc.

### **3.2. Listado de componentes (BOM)**

Lo primero que se necesita para poder preparar presupuestos de producción es el coste total en lo que a componentes se refiere de la placa a realizar. Para esto podemos consultar el Anexo B en el que se detallan todos los componentes de la placa junto con su precio de mercado, la marca que se encarga de producirlos y el distribuidor encargado de la venta.

### **3.3. Presupuestos de producción masiva**

Como hemos introducido anteriormente en los siguientes apartados nos dedicaremos a desglosar posibles propuestas del coste que supondría llevar el diseño del módulo ZigBee a producción.

Para ello contamos con datos de diversas empresas reales entre las cuales tenemos:

- Flextronics International (Cuartel general Austria) [www.flextronics.com](http://www.flextronics.com)
- Solectron (Cuartel general Shanghai) [www.solectron.com](http://www.solectron.com)
- Beyonics Technology (Cuartel general Singapur) [www.beyonics.com](http://www.beyonics.com)
- Fymelec S.A.L. (Cuartel general en Toledo, España) [www.fymelec.com](http://www.fymelec.com)
- Beru Microelectrónica (Cuartel general Vitoria, España) [www.beru.com](http://www.beru.com)

### 3.3.1. Presupuesto de producción en Flextronics

Flextronics es una compañía líder en servicios de manufacturación de componentes electrónicos, con sede en Austria dispone de ingeniería, operaciones logísticas y manufacturación en 28 países, con una capacidad en su factoría de Austria de 500.000 componentes por hora de ensamblado SMT (técnica de montaje en superficie). En la figura 3.1 podemos observar un detalle de las líneas de ensamblaje de componentes.



**Fig. 3.1** Detalle de las líneas SMT de ensamblaje de componentes

Los datos obtenidos para el presupuesto de Flextronics son los que se muestran en la tabla 3.1.

<b>Presupuesto Flextronics Módulo ZigBee</b>			
Cantidad/año	Pre-producción (<1000 Prototipos)	10000	100000
Coste componentes	10,46 €	8,94 €	7,96 €
Circuito impreso (PCB)	3,34 €	3,206 €	2,082 €
Montaje componentes+Pruebas +Transporte (por mar)	3,26 €	2,086 €	2,082 €
<b>Coste total</b>	<b>17,06 €</b>	<b>14,23 €</b>	<b>12,12 €</b>

	Coste configuración del proceso	Coste equipamiento específico	Coste inicial total
<b>Módulo ZigBee (Costes iniciales)</b>	4900 €	500 €	<b>5400 €</b>

**Tabla 3.1** Presupuestos de producción

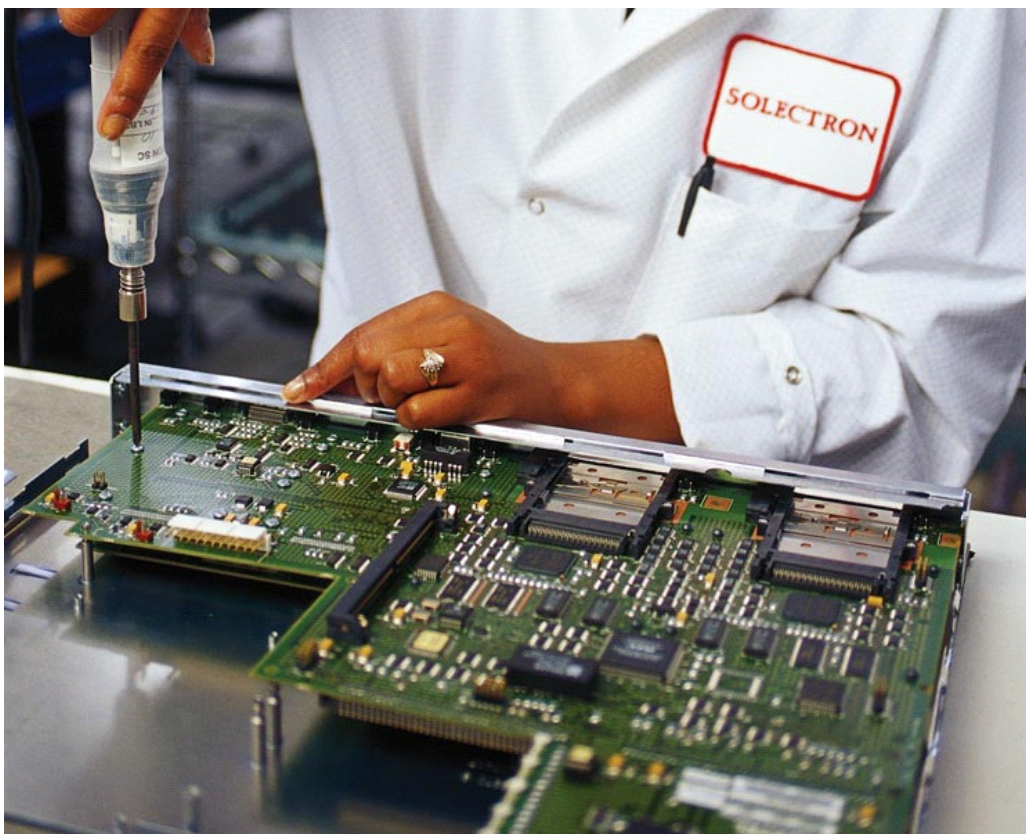
Teniendo en cuenta estas cantidades, las condiciones presentadas por Flextronics para el acuerdo de producción masiva se resumen en las siguientes:

- Coste de material → Proporcionado por el cliente
- Condiciones de pago → Máximo de 30 días después del pedido.
- Calidad producto → A ser discutida junto con mejoras en coste.
- Beneficios Flextronics → A revisar para producción masiva

### 3.3.2. Presupuesto de producción en Solectron

Solectron se trata de una empresa pionera en el sector de la manufacturación de equipos electrónicos desde 1977. Como curiosidad el primer cliente de Solectron diseñó un controlador electrónico para equipamientos de energía solar, de ahí su nombre, Solectron (Solar + Electronics). Hoy en día dispone de más de 50 factorías en Asia, Europa y América con unos niveles de calidad bastante considerables. Cumple entre otras la conocida ISO 9000 y utiliza herramientas del tipo Lean Six Sigma para mejorar y optimizar rendimiento y calidad de sus procesos.

Solectron se trata en definitiva de la compañía más competitiva de toda la comparativa, por lo que profundizaremos un poco más su propuesta de presupuesto.



**Fig. 3.2** Detalle de la línea de producción de Solectron Shanghai

Para empezar podemos observar en la tabla 3.2 las cifras del presupuesto de Solectron Shanghai

Presupuesto Solectron Módulo ZigBee			
Cantidad/año	Pre-producción (<1000 Prototipos)	10000	100000
Coste componentes	10,46 €	8,94 €	? €
Circuito impreso (PCB)	0.98 €	0.37 €	0.33 €
Montaje componentes+Pruebas +Transporte (por mar)	2.26 €	1.36 €	1.19 €
<b>Coste total</b>	<b>13,7 €</b>	<b>10,67 €</b>	<b>9,48 €</b>

	Coste configuración del proceso	Coste equipamiento específico	<b>Coste inicial total</b>
<b>Módulo ZigBee (Costes iniciales)</b>	7250 €	750 €	<b>8000 €</b>

**Tabla 3.2** Presupuestos de producción de Solectron con transporte por mar

A continuación mostramos otra posibilidad de presupuesto, en este caso se considera el transporte por aire, que obviamente es más caro pero rebaja el tiempo de entrega de unas 4 semanas a aproximadamente 2 o 3 días.

<b>Presupuesto Solectron Módulo ZigBee</b>			
Cantidad/año	Pre-producción (<1000 Prototipos)	10000	100000
Coste componentes	10,46 €	? €	? €
Circuito impreso (PCB)	0.98 €	0.37 €	0.33 €
Montaje componentes+Pruebas +Transporte (por mar)	2.89 €	2.11 €	1.92 €
<b>Coste total</b>	<b>14,33 €</b>	<b>11,42 €</b>	<b>10,21 €</b>

**Tabla 3.3** Presupuestos de producción de Solectron con transporte por aire

Estas son las condiciones especiales requeridas por Solectron, aquí presentamos un resumen de su proposición:

- Coste de material → Proporcionado por el cliente. Si se desea que Solectron se encargue de su adquisición se deberán pagar unos costes de adquisición pero con la posible mejora de sus precios.
- Componentes → Han de ser suministrados en embalajes estándar (Chip, SOT, SOIC, SOJ, Axial y Radial componentes en Tape & Reel.)
- Condiciones de pago → Máximo de 30 días después del pedido.
- Costes/beneficios → Ambas partes se responsabilizan de los posibles cambios en el presupuesto debidos a aumento de producción o aumento de coste de material.
- Proceso de producción → Kitting → Printing (T) → Placement → (B) → Placement → Reflow → Depanel → Assembly → Function Test → Shipping
- Garantía → 12 meses de garantía de mano de obra.

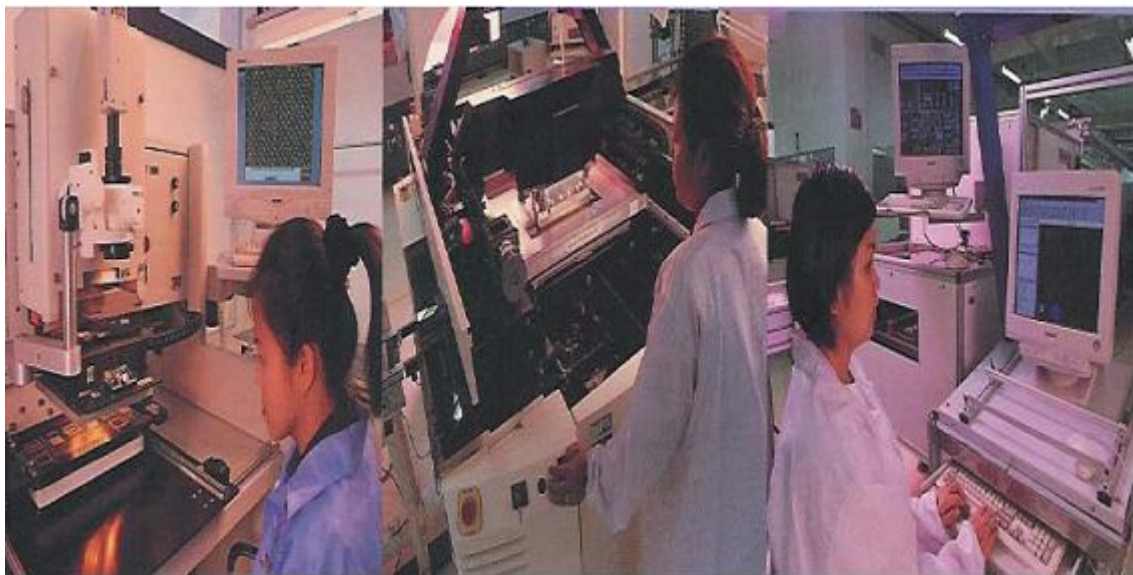
### 3.3.3. Presupuesto de producción en Beyonics

Beyonics Technology, fundada en 1981, es un proveedora de servicios de manufacturación a empresas de dispositivos médicos, componentes electrónicos de comunicaciones en general y especializada en producción de maquinaria de precisión de discos duros y de la industria de la automoción. Los posibles servicios contratables de esta empresa van desde impresión y ensamblaje de circuitos integrados con sus correspondientes pruebas de funcionamiento, hasta la inyección y montaje de plásticos junto con el embalaje y la distribución del producto final.



Entre sus clientes más destacados se encuentran Agilent Technologies, LG Electronics, Motorola, Delphi, HP, Samsung o IBM, entre otros, por lo que se podría decir que se trata también de una empresa líder en el sector de la producción de módulos electrónicos.

En la figura 3.3 podemos observar una parte de sus líneas de ensamblaje e impresión de placas integradas.



**Fig. 3.3** Detalle de las estaciones BGA, de impresión de PCB de inspección óptica del ensamblaje en Beyonics

Así pues, el presupuesto estimado que podríamos obtener de Beyonics para la producción a gran escala del módulo ZigBee se parecería bastante a los datos mostrados a continuación en la tabla 3.4.

<b>Presupuesto Beyonics Módulo ZigBee</b>			
Cantidad/año	Pre-producción (<1000 Prototipos)	10000	100000
Coste componentes	10,46 €	8,94 €	7,96 €
Circuito impreso (PCB)	0,43 €	0,42 €	0,405 €
Montaje componentes	0,9	0,895	0,89 €
Pruebas funcionales +Transporte(por mar)	0,3 €	0,295 €	0,285 €
<b>Coste total</b>	<b>12,09 €</b>	<b>10,55 €</b>	<b>9,54 €</b>

	Coste configuración del proceso	Coste equipamiento específico	Coste inicial total
<b>Módulo ZigBee (Costes iniciales)</b>	9000 €	800 €	<b>9800 €</b>

**Tabla 3.4** Presupuestos de producción

Las condiciones especiales requeridas por Beyonics se resumen en las siguientes:

- Coste de material → Proporcionado por el cliente.
- Condiciones de pago → Máximo de 30 días después del pedido.
- Calidad producto → A ser discutida junto con mejoras en coste.
- Costes/beneficios → Ambas partes se responsabilizan de los posibles cambios en el presupuesto debidos a aumento de producción o aumento de coste de material.
- Garantía → 12 meses de garantía de mano de obra.

### 3.3.4. Presupuesto de producción en Fymelec

Del mismo modo que el resto de empresas, Fymelec es un fabricante y mayorista de componentes electrónicos dedicado también a la producción a gran escala, la diferencia en este caso se trata de su localización, ya que es una empresa situada en Toledo (España), con las facilidades que eso conlleva en lo que supone al transporte, aunque teniendo en cuenta que no consta de medios técnicos tan avanzados como los vistos en las tres empresas anteriores, lo que supondría un riesgo en calidad y posible defectos de fabricación.

En la tabla 3.5 podemos observar la propuesta de presupuesto de Fymelec.

<b>Presupuesto Fymelec Módulo ZigBee</b>			
Cantidad/año	Pre-producción (<1000 Prototipos)	10000	100000
Coste componentes	10,46 €	8,94 €	7,96 €
Circuito impreso (PCB)	1,66 €	1,64 €	1,55 €
Montaje componentes	2,76 €	2,16 €	1,97 €
Pruebas funcionales +Transporte(mar/tierra)	1,05 €	1,05 €	1 €
<b>Coste total</b>	<b>15,93 €</b>	<b>13,79 €</b>	<b>12,48 €</b>



	Programación de máquinas	Preparación circuitos impresos	Pantalla de serigrafía	Coste inicial total
<b>Módulo ZigBee (Costes iniciales)</b>	260 €	1567,47 €	800 €	<b>2627.47 €</b>

**Tabla 3.5** Presupuestos de producción

Las condiciones impuestas por Fymelec son las siguientes:

- Precio → Incluidos los gastos de recogida de componentes y envío de producto.
- Coste de material → Proporcionado por el cliente.
- Condiciones de pago → El pago se fija como aplazado a 60 días realizándose facturas parciales los días 10 y 25 de cada mes.

### 3.3.5. Presupuesto de producción en Beru

Al igual que Fymelec, Beru se trata de una empresa con sede en territorio nacional, con lo que eso conllevará en costes y en posible calidad de producto.

El presupuesto obtenido de Beru es el siguiente que se muestra en la tabla 3.6

<b>Presupuesto Beru Módulo ZigBee</b>			
Cantidad/año	Pre-producción (<1000 Prototipos)	10000	100000
Coste componentes	10,46 €	8,94 €	7,96 €
Circuito impreso (PCB)	3.46 €	2.81 €	2.46 €
Montaje componentes+Pruebas +Transporte(mar/tierra)	9.26 €	8.9 €	8.76 €
<b>Coste total</b>	<b>23,18 €</b>	<b>20,65 €</b>	<b>19,18 €</b>

	<b>Coste inicial total</b>
<b>Módulo ZigBee (Costes iniciales)</b>	<b>1375 €</b>

**Tabla 3.6** Presupuestos de producción

Las condiciones impuestas por Beru se resumen en las siguientes:

- Componentes → Exclusiva competencia del cliente.
- Pruebas funcionales → Según indicaciones cliente.
- Plazo entrega → 8 semanas desde la fecha de pedido.
- Forma de pago → Máximo de 90 días después del pedido

### 3.4. Resumen propuestas

En este apartado compararemos los cinco propuestas intentando sacar conclusiones de cual de las opciones sería la más apropiada. Si nos fijamos un momento en el Anexo C veremos una comparativa de todos los presupuestos resumidos.

De esta forma podemos observar como ya anticipábamos que si lo que deseamos es una producción pequeña de módulos, de menos de 1000 unidades, puede salir a cuenta el hecho de contratar los procesos a empresas españolas como Beru o Fymelec ya que como se ve en la tabla del anexo el precio medio de la unidad teniendo en cuenta los gastos iniciales de producción, es bastante competitivo en comparación con el resto de empresas. Pero no cabe duda que si lo que se desea es una producción importante de cara a comercializar el módulo, hay que rendirse ante la superioridad de precios de las factorías asiáticas como Beyonics o Solectron. Se podría decir que en especial esta última es la que mejor precio ofrece para producciones altas, podría llegarse a construir el módulo con un precio base de unos 9 euros, (o unos 10 si se desea transporte urgente por aire) dato que esta muy cerca de los precios que los fabricantes esperan barajar para módulos ZigBee cuando esta tecnología acabe de explotar. De la misma forma Beyonics es la otra posibilidad con un coste muy semejante al de Solectron.

A partir de este momento lo único que quedaría abierto es una posible negociación con la empresa para que fuera ella la responsable de los componentes y conseguir prácticamente con toda seguridad unos precios de componentes más ajustados.

## CAPÍTULO 4. PRUEBAS FUNCIONALES DE LOS MÓDULOS

### 4.1. Descripción aplicación “RangeTest”

Para llevar a cabo las pruebas funcionales del módulo dispondremos de una aplicación llamada *RangeTest* que ha sido diseñada específicamente para hacer pruebas de RF de los módulos. Con esta aplicación se pueden hacer pruebas de rango, que son básicamente las que utilizaremos nosotros, de medidas de RSSI, así como modos especiales de transmisión requeridos para las certificaciones FCC y CE, todo esto mediante el Hyperterminal de Windows. Esta aplicación puede servir para tener un nodo transmitiendo todo el tiempo y uno o más nodos recibiendo lo que el primero envía. Se consigue así una forma sencilla de probar en lo que a Radio Frecuencia se refiere, las características de rango de los módulos diseñados, así como la tasa de error en función de la distancia.

### 4.2. Descripción de las pruebas a realizar

Para llevar a cabo estas pruebas definiremos 3 escenarios diferentes de operación: el primer escenario se tratará de medir el rango máximo de los módulos en campo abierto con todas las antenas de las que disponemos, así como su orientación óptima. El segundo escenario tratará de comprobar la distancia cubierta por el módulo desde dentro de la universidad hasta el lago. Por último se intentará realizar un estudio de interiores en los despachos de la universidad, para esto se estudiará cuantos puntos de acceso serían necesarios para cubrir la zona.

Hay que decir que para estas medidas se dispondrá de diferentes tipos de antenas que se usarán dependiendo de la propia prueba, en primer lugar la antena SMD integrada en el módulo, en segundo lugar unas antenas de tipo monopolo omnidireccionales, y por último y para lograr mayores rangos, dos antenas de tipo superdirectivas conectadas a los módulos mediante conectores SMA de 12 y 26 dBi de ganancia respectivamente.

### 4.3. Resultados de las pruebas

#### 4.3.1. Escenario 1: Rango en exteriores

Como se explicaba anteriormente, la primera prueba consiste en situarnos en campo abierto y encontrar la mejor orientación de cada tipo de antena para observar su alcance máximo. Para esto nos situaremos con dos portátiles en los que a uno de ellos conectaremos mediante el puerto serie uno

de los módulos que estará transmitiendo constantemente, en este módulo se usará siempre la antena SMD integrada. El otro módulo conectado a otro portátil será el que reciba los datos y con el que se probarán todas las antenas para encontrar su orientación óptima.

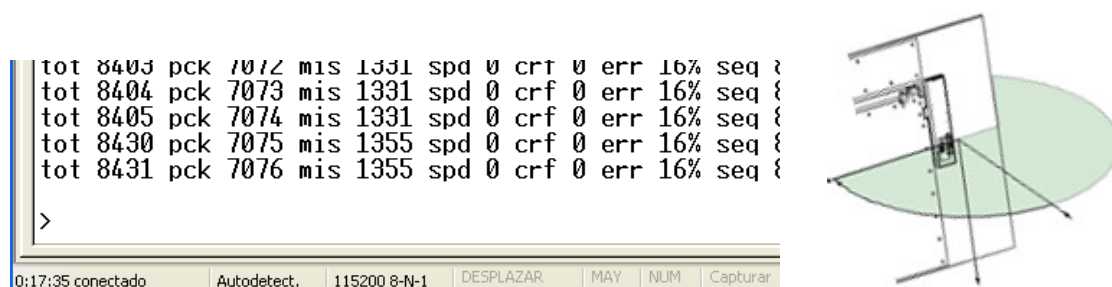
Hay que comentar que debido a tratarse de un sistema digital, los datos transmitidos pasan de ser recibidos a perderse en cuestión de muy pocos metros. El terminal nos refleja los paquetes perdidos que después son retransmitidos y recibidos correctamente, pero el problema viene con los paquetes perdidos que no se reciben tampoco de ninguna retransmisión y por tanto no son reflejados en el Hyperterminal. Por lo tanto es difícil dar un porcentaje concreto de error de paquetes a partir del cual se considere correcta la recepción o no.

De todas formas hemos intentado seguir un criterio por el cual hemos acercado los módulos unos metros después de que el terminal dejara de notificar los paquetes recibidos o retransmitidos, en esta situación se ha conseguido estabilizar las tasas de error en un intervalo aproximado del 20 al 30%, cifras que debido a la posibilidad de retransmisión de paquetes nos parecen bastante adecuadas para caracterizar el alcance de las antenas.

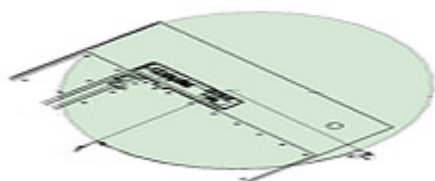
Así pues pasamos ya a la descripción de cada antena por separado.

#### 4.3.1.1. Caracterización Antena SMD

La primera prueba realizada ha sido la de probar el alcance de los módulos con antena SMD, en este sentido nos vimos bastante sorprendidos al ver el gran alcance en línea recta de los módulos. La orientación óptima de las antenas es situándolas verticales respecto al suelo como se observa en la figura 4.1 con la que se consigue una distancia de unos 150 metros con un error del 16%. Por otra parte el peor caso nos lo encontramos con la antena tumbada (figura 4.2) con la que se cubre una distancia de unos 80 metros.



**Fig. 4.1** Orientación óptima



**Fig. 4.2** Peor caso de orientación

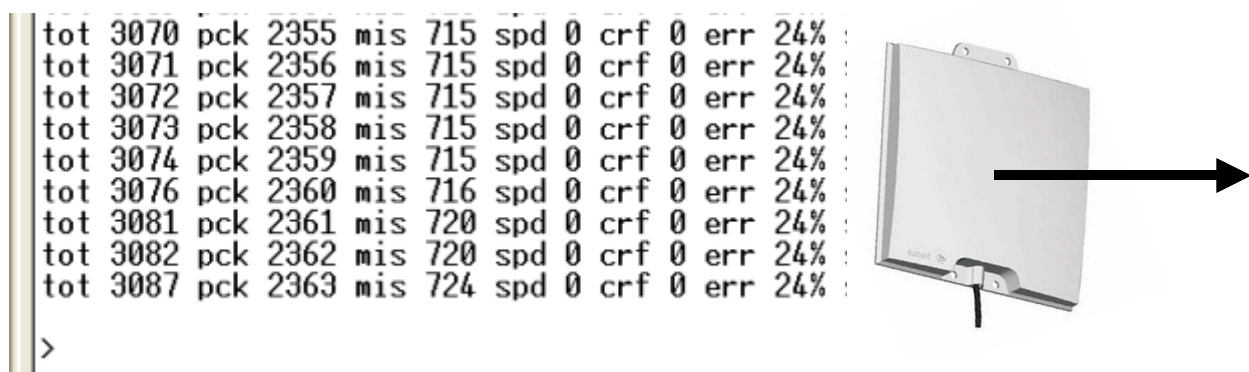
#### 4.3.1.2. Caracterización Monopolo 3,2dBi / Monopolo 5dBi

Pasamos ahora al caso de los monopolos, como era de esperar la orientación óptima de este tipo de antena es de pie, es decir verticales respecto a la horizontal. Lo que ya no era de esperar es que con ambas se consiguen rangos inferiores a los logrados con la antena SMD, con la primera de ellas de 3,2dBi se lograron rangos de unos 65 metros mientras que con la de 5dBi aproximadamente unos 85 metros. Esto es lo que parece sorprender a primera impresión ya que son distancias bastante inferiores a las cubiertas con las SMD, estas pérdidas podrían estar causadas en gran medida a posibles pérdidas de paso en el conector SMA, debido a desadaptación de impedancias o quizás al cable conector que muestra una sección muy pequeña, todo esto podría compensar el uso de antenas integradas antes que monopolos de ganancias relativamente pequeñas.

#### 4.3.1.3. Caracterización Fractus Superdirectiva 12dBi / Superdirectiva 26dBi

En los dos casos que describimos a continuación con las antenas superdirectivas no nos encontramos con los problemas presentados con los monopolos ya que en este caso disponemos de ganancias más altas capaces de salvar posibles pérdidas en el conector. En primer caso observamos que la mejor orientación tanto de la de 12 como de la de 26dBi es la que se muestra en la figura 4.3. En este caso la distancia cubierta por la primera es de unos 180 metros mientras que en el caso de la de 26dBi la distancia aumenta bastante hasta los 330 metros.

Lógicamente, debido al recubrimiento metálico que ambas tiene en su parte posterior, la peor orientación de este tipo de antenas es precisamente la de la cara metálica. De todas formas observamos que en un caso intermedio, es decir situando las antenas a 45° de su posición óptimas, logramos salvar unos 40 metros con la de 12dBi y unos 130 metros con la de 26dBi.



**Fig. 4.3** Orientación óptima superdirectivas

En la tabla 4.1 podemos observar un resumen de las distancias cubiertas con las antenas en su mejor y peor orientación. Estos datos nos servirán para las mediciones que realizaremos en los siguientes apartados.

Antena	Distancia Orientación Óptima	Distancia en su peor orientación
SMD	150	80
Monopolo 3,2dBi	65	30
Monopolo 5dBi	85	45
Superdirectiva 12dBi	180	40
Superdirectiva 26dBi	330	130

**Tabla 4.1** Caracterización antenas

En la siguiente figura podemos observar las distancias cubiertas por las antenas en su mejor caso.



**Fig. 4.4** Distancias cubiertas en campo abierto

#### 4.3.2. Escenario 2: Rango de interior hacia el exterior

En esta prueba se intentará simular una posible aplicación del módulo como podría ser la de transmisor de mediciones en el lago. Para este caso situaremos el receptor en el laboratorio 123 por una parte, y en uno de los despachos de la esquina del edificio por otra parte, para encarar hacia dos puntos posibles del lago.



La primera medición que se observa en la figura 4.5 resultó ser muy satisfactoria como era de esperar. Situamos un emisor con la antena superdirectiva de 26dBi en el laboratorio 123 y un receptor con antena SMD en el lago, debido a que existe línea de visión directa el porcentaje de paquetes perdidos es prácticamente nulo.



**Fig. 4.5** Interior a exterior con y sin visión directa

La segunda prueba realizada consistió en situar un emisor en el centro de mediciones ya existente en el lago, y el receptor en un despacho con una ventana encarada hacia ese punto. El resultado obtenido aquí fue menos satisfactorio ya que la existencia de un edificio en la línea de visión impidió que llegaran los datos de un punto a otro. Inevitablemente la presencia de edificios es algo que no se puede cambiar y por tanto se han de buscar alternativas. Una posibilidad para poder llegar a ese punto sería la de aprovechar los espacios entre edificios que siempre han de existir, por tanto como se observa en la figura 4.6 se podría aprovechar como emplazamiento para un módulo puente entre el emisor y el receptor las farolas situadas aproximadamente en dichos huecos entre edificios, de este modo para llegar hasta el lago en el momento en que se construyan más edificios y no haya sección alguna de visión directa, se podrían instalar “routers” (módulos que hagan de puente) entre el edificio de la EPSC y el lago, situados en algunas de las farolas. Además se evita así en gran medida la posibilidad de manipulación no deseada de los módulos y nos aseguramos que a pesar de las edificaciones se podría tener comunicación con el lago, y en especial como comentábamos antes con el centro de mediciones.

### 4.3.3. Escenario 3: Rango en interior

Para el desarrollo de las pruebas en interiores se ha supuesto el caso de querer dar cobertura móvil a cualquier punto de la primera planta de despachos del edificio de la EPSC (caso que se podría trasladar fácilmente al resto de plantas). Para esto hemos intentado buscar lugares óptimos donde situar puntos de acceso a partir de los cuales se diera cobertura a módulos ZigBee móviles situados en cualquier lugar del espacio a cubrir y obviamente en cualquier orientación.

Así pues se situaron emisores en varios puntos y se llegó a la conclusión que para llegar a todos los despachos y laboratorios (con las módulos móviles en la peor de sus orientaciones), se deberían situar los puntos de acceso en el pasillo, en concreto sería necesaria la implantación de un punto de acceso por ambiente. Es decir lo correcto sería posicionar un punto de acceso en el techo entre el laboratorio ISILAB y el pasillo de despachos centrales, sólo con este se da cobertura aproximadamente hasta los ascensores por un lado o hasta las escaleras por el otro lado. El segundo y el tercero de los puntos de acceso se deberían situar de igual forma en el techo del descansillo existente en las otras dos zonas de despachos a la derecha e izquierda del laboratorio ISILAB, con estos dos se da cobertura necesaria para todos los despachos.

Son necesarios entonces tres puntos de acceso ya que con dos los despachos más esquinados quedarían a la sombra en lo que a cobertura se refiere.

Para conseguir estos resultados se ha intentado caracterizar tabiques, es decir se comprobó previamente la capacidad de los módulos de atravesar una pared con estanterías metálicas detrás, o atravesar tres tabiques de despachos contiguos. Todas estas pruebas previas resultaron satisfactoriamente con prácticamente nula pérdida de paquetes.

Cabe decir para acabar, que la idea inicial de usar los monopolos para su inserción en los puntos de acceso debido a su omnidireccionalidad, quedó descartada al ver la pérdida de potencia que sufrían en espacio abierto. Por tanto simplemente con las antenas SMD insertadas en la placa sería suficiente para cubrir las zonas descritas con las disposición de puntos de acceso comentada. En la figura 4.7 se puede observar la disposición de los puntos de acceso los cuales se colocarían con la orientación descrita en el apartado 4.3.1, es decir verticales respecto de la horizontal.

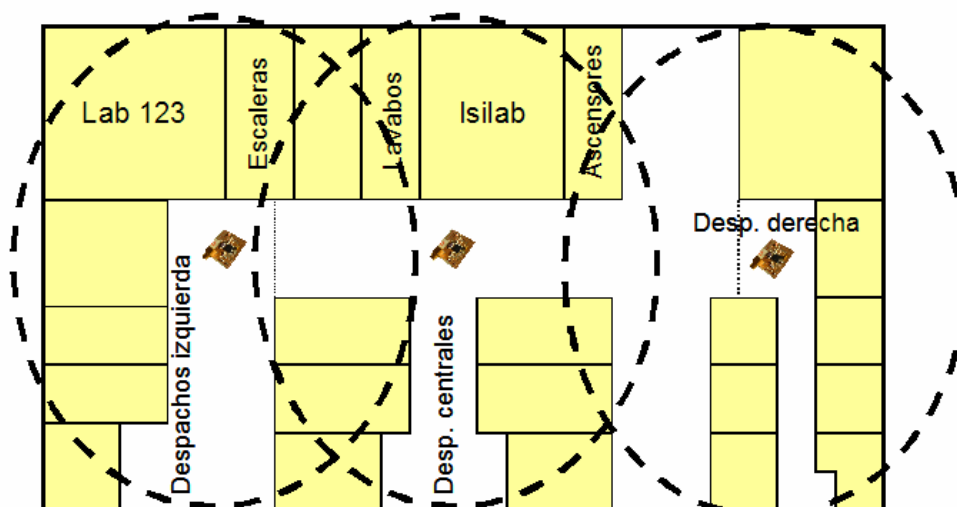


Fig. 4.7 Rango en interiores



## CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

### 5.1. Conclusiones del diseño

La finalidad de este proyecto era la de diseñar, construir y realizar las pruebas pertinentes de un módulo de comunicaciones ZigBee de bajo coste, después de todo el proceso se puede decir que se ha conseguido.

Por una parte se comenzó barajando la posibilidad de realizar un diseño a partir de la guía de referencia del fabricante del chip, Ember. Sin embargo después de estudiarlo se decidió por realizar un diseño propio, basándonos inevitablemente en las recomendaciones de Ember, pero con sustanciales cambios que en definitiva han hecho que sean dos diseños prácticamente independientes el uno del otro. Para empezar uno de los cambios más importantes fue el de realizar un diseño a dos capas, al contrario que el de Ember que se trataba de un diseño a cuatro capas. Éste ha sido uno de los puntos más importantes en cuanto a la reducción de costes. A partir de aquí se ha intentado reducir costes donde realmente se puede hacer, es decir que en elementos clave del diseño como el balun o los osciladores se ha intentado escoger marcas de confianza como TDK, etc. Hay que decir también que, como ya comentábamos en los capítulos de diseño, nos podemos ahorrar uno de los osciladores, debido al oscilador interno del chip que lo sustituye, y debido a que se trata del oscilador para los tiempos de “sleep” y las aplicaciones de esta placa no trataran de estar el 99% del tiempo dormido como en otras aplicaciones, se puede decir que no tendríamos que tener problemas por este cambio.

Otro punto importante en el desarrollo han sido las constantes modificaciones en el diseño, que aunque parezca que está terminado, siempre hay partes del diseño que se pueden mejorar. Entre otras cosas se realizaron varias propuestas del diseño de la huella de la zona del oscilador, de la zona del balun o los condensadores de desacoplo, entre otras partes. Después de todo el proceso se podría decir que se dispone en estos momentos de un diseño bastante estable y definitivo con unas dimensiones bastante compactas, sí que es verdad que inevitablemente el hecho de que los componentes sean 0603 en su mayoría ha imposibilitado realizar un diseño tan reducido como el de Ember que usa 0402, pero en cualquier caso este ha sido otro punto en el que se ha conseguido reducir costes.

Así pues se ha conseguido cumplir objetivos después de diseñar todo el módulo, construirlo mostrando su funcionamiento y realizar pruebas con módulos comerciales. Las conclusiones de estas las comentamos en el siguiente apartado.

Finalmente y observando las posibles propuestas en empresas que se han estudiado, sería viable llevar este diseño a una hipotética producción con un coste relativamente bajo, con lo que la parte de diseño se ha resuelto de forma satisfactoria.

## 5.2. Posibles utilidades de los módulos

Gracias a las pruebas funcionales realizadas se pueden comentar las conclusiones que se han extraído y por tanto que utilidades podrían tener los módulos.

Primero de todo hay que comentar que la idea inherente a este diseño era la de realizar una interfaz radio para comunicar el edificio de la EPSC con el lago, en concreto con el centro de mediciones situado en su zona este. Pues bien, para cubrir este objetivo se realizaron las pruebas. En primer punto hay que decir que los módulos cubren perfectamente cualquier línea de visión directa entre el edificio EPSC y el lago, el problema viene en que con la construcción de edificios cada vez hay menos líneas de visión, con lo que hay que buscar alternativas. Éstas se encontraron, con la ayuda de un profesor, dándonos cuenta de que en los espacios que hay entre edificios, los cuales siempre estarán ahí a pesar de que se edifique más, podemos tener visión con el lago. Es decir que, como ya se comentaba en el apartado de pruebas, se pueden situar módulos puente en las farolas que hay en esos espacios, para comunicar entre la EPSC y el lago. De esta forma y como ya se ha comentado podríamos tener siempre una comunicación con el centro de mediciones e incluso con otras zonas del lago para comparar mediciones.









Por otra parte y como es lógico en cualquier módulo ZigBee, se ha de pensar su utilidad en interiores, que al fin y al cabo es el campo de aplicación principal que se espera de las tecnologías ZigBee, la domótica. Para esto se ha realizado un pequeño estudio de cobertura en los despachos de la EPSC y como se ve en el apartado de pruebas funcionales se llegó a la conclusión de que con tres coordinadores se podría dar cobertura móvil a objetos o personas en cualquier punto de la primera planta de despachos y laboratorios.

Por último me gustaría añadir lo positivo que llega a resultar un proyecto de este ámbito en lo que a aprendizaje se refiere, ya que se convierte en una automotivación el diseñar algo que luego pueda llevarse a la práctica. Para acabar simplemente comentar el gran crecimiento que están sufriendo las tecnologías inalámbricas como ZigBee en las telecomunicaciones y lo bueno que resulta que tanto empresas como universidades apuesten por ellas porque son posiblemente la mayor base de las telecomunicaciones para el futuro y ciertamente también para el presente.

## CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Rubio Solà, Antonio, *Diseño de circuitos y sistemas integrados*, Politext 90 (año 2000)
- [2] Dorf, Richard C., *Circuitos eléctricos introducción al análisis y diseño* (año 1992)
- [3] “Manual PCAD”, Diseño de esquemáticos y layouts.
- [4] “Designing with a EM250”, Documentación Ember
- [5] “Extending the range of a EM2420”, Documentación Ember
- [6] “EM250 Datasheet”, Documentación Ember
- [7] [www.zigbee.org](http://www.zigbee.org), Recursos pdf de la ZigBee Alliance.
- [8] [www.anadigics.com](http://www.anadigics.com)
- [9] [www.rell.com](http://www.rell.com)
- [10] [www.epic.com.tw](http://www.epic.com.tw)
- [11] [www.rfmd.com](http://www.rfmd.com)
- [12] [www.sige.com](http://www.sige.com)
- [13] [www.bestasic.com](http://www.bestasic.com)
- [14] <http://semiconductors.globalspec.com>
- [15] [www.atmel.com](http://www.atmel.com)
- [16] [www.chipcon.com](http://www.chipcon.com)
- [17] [www.ember.com](http://www.ember.com)
- [18] [www.domotica.net](http://www.domotica.net)
- [19] [www.domodesk.com](http://www.domodesk.com)
- [20] [www.casadomo.net](http://www.casadomo.net)
- [21] [www.telegesis.com](http://www.telegesis.com)

ANEXO A: Comparativa Antenas

GigaAnt									
	Comata	Limata	Mica	Rufa	Impexa	Flavus	Picea	Titanis	
									
Frequency	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz	2,4-2,5GHz
Antenna Type	SMD	SMD	SMD	SMD	SMD	Snap-In	Swivel	Swivel	
Polarization	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear	Linear
Impedance	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm	50 Ohm
Weight (gram)		0,15	0,4	0,1		0,6		7,4	
Peak Gain		-3,7	0,8	4	-1	3,5		4	
		-0,5	2,1	4,1	0,2	4		4,1	
		1,1	2,5	4,4	0,9	4,3		4,4	
Efficiency		50%	70%	66%	50%	62%		80%	
		55%	75%	68%	55%	65%		85%	
		60%	79%	69%	60%	66%		90%	
VSWR		<2:1	1,0:1	1,3:1	1,3:1	1,2:1		1,1:1	
		<2:1	1,5:1	1,5:1	1,5:1	1,5:1		1,2:1	
		<2:1	1,9:1	1,6:1	1,9:1	2,1:1		1,3:1	
Length		12,8	20,5	12,8	6,3	27,3			
Width		3,6	3,6	3,9	3,9	7,9		20	
Height		3,3	1,1	3,3	1,1	9,6		62,5	
Ground		1,2	2	1,2	2				



ANEXO B: Listado de componentes y precios

Item	Component Id.	Qty.	Description	Price <1000 units	Price <10000 units	Price <100000 units
1	U1	1	EM250 Zigbee Module	5.50 €	5.50 €	5.50 €
2	DS1	1	Red Led	0.14 €	0.13 €	0.11 €
3	ANT1	1	Fractus Compact Reach Xtend chip antenna	0.85 €	0.60 €	0.40 €
4	L1	1	INDUCTOR, 4.7nH, +/-0.3NH, WIREWOUND,	0.50 €	0.24 €	0.19 €
5	L2	1	INDUCTOR, 2.7nH, +/- 0.3NH,WIREWOUND,	0.14 €	0.11 €	0.09 €
6	L3	1	INDUCTOR, 1.8nH, +/-5%	0.50 €	0.24 €	0.19 €
7	C1, C2, C15, C16, C18, C12, C13, C14, C17, C19, C20	5	CAPACITOR, 8.2PF, 50V	0.15 €	0.10 €	0.05 €
8		6	CAPACITOR, 10NF, 25V	0.18 €	0.12 €	0.06 €
9	C3, C4, C22	3	CAPACITOR, 1.0PF, 50V	0.09 €	0.06 €	0.03 €
10	C5, C6	2	CAPACITOR, 27PF, 50V	0.10 €	0.02 €	0.01 €
11	C7, C8	2	CAPACITOR, 22PF, 50V	0.02 €	0.02 €	0.01 €
12	C9	1	CAPACITOR, 10UF, 10V, TANTALUM, (SIZE A)	0.03 €	0.02 €	0.02 €
13	C10, C11, C21	2	CAPACITOR, 100NF, 10V	0.06 €	0.04 €	0.02 €
14	R1	1	RESISTOR, 3.3 kOhm, 5%	0.05 €	0.04 €	0.03 €
15	R2	1	RESISTOR, 1 OHM, 5%	0.03 €	0.02 €	0.01 €
16	R3	1	RESISTOR, 169 KOHM, 1%	0.04 €	0.02 €	0.01 €
17	R4, R8	2	RESISTOR, 0 OHM	0.06 €	0.04 €	0.02 €
18	R6	1	RESISTOR, 0 OHM	0.03 €	0.02 €	0.01 €
19	R5	1	RESISTOR, 100 kOhm, 5%	0.05 €	0.04 €	0.03 €
20	R7	1	RESISTOR, 510 Ohm, 5%	0.04 €	0.03 €	0.02 €
21	Y1*	1	Crystal +/- 20ppm tolerance, +/- 50ppm stability, 18pF	1.00 €	0.80 €	0.60 €
22	BLN1*	1	Ceramic Balun	0.90 €	0.74 €	0.55 €
			<b>Total Price</b>	<b>10.46 €</b>	<b>8.94 €</b>	<b>7.96 €</b>

Item	Component Id.	Qty.	Description	Package	Manufacturer Part Number	Manufacturer	Vendor
1	U1	1	EM250 Zigbee Module	L=7mm W=7mm	EM250	Ember	Ember
2	DS1	1	Red Led	1206	Código RS: 444-4791	Infinion	
3	ANT1	1	Fractus Compact Reach Xtend chip antenna	L=7mm W=3mm	FR05-S1-N10-102	Fractus	Richardson Electronics
4	CON1	1	12 Pin Connector				
5	CON3	1	SMA Connector for PCB	L=6.3mm W=6.3mm	R125 428 000 (Código RS: 414-1379)	Radiall	RS
6	L1	1	INDUCTOR 4.7nH +/-0.3nH WIREWOUND	.0603			
7	L2	1	INDUCTOR 2.7nH +/- 0.3nH WIREWOUND	.0603			
8	L3	1	INDUCTOR 1.8nH +/-5%	.0603	3650 0603 1N8 5% (Código RS: 532-2636)	Tyco	RS
9	C1, C2, C15, C16, C18	5	CAPACITOR 8.2PF, 50V	.0603			
10	C12, C13, C14, C17, C19, C20	6	CAPACITOR 10NF, 25V	.0603			
11	C3, C4, C22	3	CAPACITOR 1.0PF, 50V	.0603			
12	C5, C6	2	CAPACITOR 27PF, 50V	.0603			
13	C7, C8	2	CAPACITOR 22PF, 50V	.0603			
14	C9	1	CAPACITOR 10UF, 10V, TANTALUM, (SIZE A)	3216			
15	C10, C11, C21	2	CAPACITOR 100NF, 10V	.0603			
16	R1	1	RESISTOR 3.3 kOhm, 5%	.0603			
17	R2	1	RESISTOR 1 OHM, 5%	.0603			
18	R3	1	RESISTOR 169 KOHM, 1%	.0603			
19	R4, R8	2	RESISTOR 0 OHM	.0603			
20	R6	1	RESISTOR 0 OHM	1206			
21	R5	1	RESISTOR 100 kOhm, 5%	.0603			
22	R7	1	RESISTOR 510 Ohm, 5%	.0603			
23	Y1*	1	Crystal +/- 20ppm tolerance, +/- 50ppm stability, 18pF	L=5mm W=3.2mm	ABM38-24 000MHZ-B2-T (Digkey: 535-9126-1-ND)	Abracon	Digkey
24	BLN1*	1	Ceramic Balun	L=2mm W=1.25mm	HMM1521 (Digkey Part Number: 445-1229-1-ND)	TDK	Digkey

ANEXO C: Comparativa Presupuestos

	Flextronics			Beyonics			Fymelec		
Unidades	1.000,00 €	10.000,00 €	100.000,00 €	1.000,00 €	10.000,00 €	100.000,00 €	1.000,00 €	10.000,00 €	100.000,00 €
BOM	10,46 €	8,94 €	7,96 €	10,46 €	8,94 €	7,96 €	10,46 €	8,94 €	7,96 €
PCB	3,34 €	3,21 €	2,08 €	0,43 €	0,42 €	0,41 €	1,66 €	1,64 €	1,55 €
Assembly+Test +Transport(by Sea)	3,26 €	2,09 €	2,08 €	1,20 €	1,19 €	1,18 €	3,81 €	3,21 €	2,97 €
Total	17,06 €	14,23 €	12,12 €	12,09 €	10,55 €	9,54 €	15,93 €	13,79 €	12,48 €
Coste inicial	5.400,00 €			9.800,00 €			2.627,47 €		
Coste medio/unidad contando gastos iniciales	22,46 €	14,77 €	12,18 €	21,89 €	11,53 €	9,64 €	18,56 €	14,05 €	12,51 €
	Beru			Solectron			Solectron por Aire		
Unidades	1.000,00 €	10.000,00 €	100.000,00 €	1.000,00 €	10.000,00 €	100.000,00 €	1.000,00 €	10.000,00 €	100.000,00 €
BOM	10,46 €	8,94 €	7,96 €	10,46 €	8,94 €	7,96 €	10,46 €	8,94 €	7,96 €
PCB	3,46 €	2,81 €	2,45 €	0,98 €	0,37 €	0,33 €	0,98 €	0,37 €	0,33 €
Assembly+Test +Transport(by Sea)	7,26 €	6,90 €	6,76 €	2,26 €	1,36 €	1,19 €	2,89 €	2,11 €	1,92 €
Total	21,18 €	18,65 €	17,17 €	13,70 €	10,67 €	9,48 €	14,33 €	11,42 €	10,21 €
Coste inicial	1.375,00 €			8.000,00 €			8.000,00 €		
Coste medio/unidad contando gastos iniciales	22,56 €	18,79 €	17,18 €	21,70 €	11,47 €	9,56 €	22,33 €	12,22 €	10,29 €



## ANEXO D: Esquemáticos

