

Nodo para redes de sensores basado en el estándar IEEE 802.15.4

Gustavo J. González[†], Favio R. Masson[†] y Pablo S. Mandolesi^{†‡}

[†]Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras Universidad Nacional del Sur,
Av Alem 1253, 8000, Bahía Blanca, Argentina

[‡]Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Bs. As. CIC
ggonzalez@uns.edu.ar - fmasson@uns.edu.ar - pmandolesi@uns.edu.ar

Resumen—El bajo consumo de energía es una característica fundamental de los nodos de una red de sensores. Gran parte de esta se consume en la transmisión y recepción de mensajes de RF. Este trabajo presenta el desarrollo de un nodo para redes de sensores basado en el estándar IEEE 802.15.4 que permite concretar este objetivo con el uso de una capa física y de un protocolo de acceso al medio que evitan retransmisiones o pérdidas de información.

Palabras Clave— Red de sensores, ZigBee

I. INTRODUCCIÓN

Una red inalámbrica de sensores consiste en un conjunto de dispositivos autónomos (nodos) que monitorean conjuntamente condiciones físicas o ambientales, como temperatura, presión, sonido, vibración, movimiento, etc., estando los mismos distribuidos sobre un área determinada. La información obtenida por un nodo, es luego acondicionada y procesada para obtener una estimación de la variable de interés. Una red es un sistema que permite un flujo de información entre varios dispositivos, en nuestro caso, dichos dispositivos son los nodos y el medio por el cual los datos viajan es el aire.

La característica más importante de ésta forma de sensado es la capacidad de formar fácilmente una red inalámbrica de información distribuida donde un sistema cableado sería altamente costoso o inviable, por ello la manera en que opera esta red es un punto muy importante en el desarrollo de los nodos y optimizar su funcionamiento en cuanto al consumo de energía es lo que motivó el desarrollo de un nodo basado en un nuevo estándar para comunicaciones inalámbricas llamado IEEE 802.15.4 (ZigBee)

Hasta diciembre del año 2004, cuando se ratificaron las especificaciones del protocolo ZigBee, existían sólo dos tipos de estándares para comunicaciones inalámbricas: WLAN y protocolos propietarios. El primero estaba dedicado a transmisión de datos de gran ancho de banda, pero no se adaptaba a las necesidades de las redes de sensores, que no utilizan una alta tasa de transferencia de datos, aunque sí es crítico que el consumo de energía sea bajo. El inconveniente que poseen los protocolos propietarios es que no son

compatibles entre sí, lo que compromete seriamente la interoperatividad de los sistemas.

ZigBee fue el primer protocolo inalámbrico desarrollado enteramente para cumplir con necesidades que son en gran parte equivalentes a las de redes de sensores y el control de dispositivos. Entre sus principales ventajas podemos encontrar:

- Bajo consumo.
- Simplicidad de implementación.
- Alta densidad de nodos por red.
- Protocolo simple.

Otro aspecto no menor es que el estándar ZigBee implementa el control de acceso al medio (MAC), lo que permite desarrollos rápidos y robustos.

En este trabajo se presentan los detalles y motivación para el desarrollo de un nodo para redes de sensores basados en el estándar ZigBee. Al momento de diseñar el nodo se contemplaron dos arquitecturas: Un procesador central con un transceiver o un sistem-on-chip (SoC), en el que ambos dispositivos se encuentran integrados juntos.

En la sección II se presenta el protocolo ZigBee, en la sección III, el nodo desarrollado (CPSBee), en la sección IV se mostrarán las mediciones y resultados experimentales y en la sección V se darán las conclusiones.

II. PROTOCOLO ZIGBEE

Ya que el protocolo ZigBee fue el motivador de nuestro prototipo, se dará una breve introducción al mismo.

Según el modelo OSI de la ISO, el protocolo ZigBee está implementado en cuatro capas, las dos capas inferiores están definidas en la norma IEEE 802.15.4, que son la capa física (PHY) y la capa de acceso al medio (MAC). En los niveles superiores tenemos la capa de Red y Soporte de Aplicación (APS) y por último la capa de objeto definido ZigBee (ZDO) con el perfil de aplicación definido por el usuario. En la Fig. 1 se puede observar un diagrama de las diferentes capas.

La capa física fue diseñada para permitir un bajo costo de producción, así como también altos niveles de integración. Puede funcionar en dos bandas ISM: 2,4GHz y 868/915MHz. La utilización de una modulación de espectro disperso de secuencia directa

(DSSS), posibilita implementaciones simples con dispositivos de bajo costo.

Por su parte la capa MAC permite que la red de datos adopte diferentes topologías, lo que aumenta la capacidad de adaptación a diferentes circunstancias. Está prevista la implementación de dos tipos de dispositivos: de funcionalidad completa (FFD) y de funcionalidad reducida (RFD), que permiten bajar el costo de las redes. El manejo de potencia es muy simple, sólo posee tres estados: transmisión / recepción y "sleep", liberando a la aplicación de realizar un complejo control de los mismos.

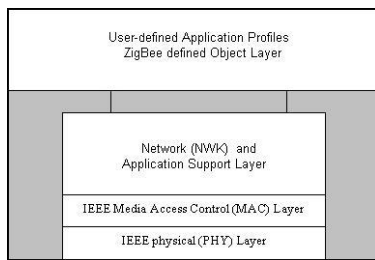


Fig 1. Protocolo ZigBee, según el modelo OSI [IEEE std 802.15.4]

La capa MAC puede operar con gran cantidad de dispositivos sin necesidad de demorar las transmisiones, pudiendo también cubrir un área importante sin necesidad de potentes transmisores, lo que permite ahorrar la tan preciada energía.

Las capas superiores del protocolo ZigBee se encargan de las operaciones relacionadas con el funcionamiento de la red, es decir, los pedidos de asociación, de descubrimiento (identificar los dispositivos que se encuentran en el área), la naturaleza del dispositivo (coordinador / FFD o RFD), establecimiento de una topología, etc.

Dependiendo de los requerimientos de la aplicación, la red puede operar en dos topologías: estrella y peer to peer, ambas mostradas en la Fig 2.

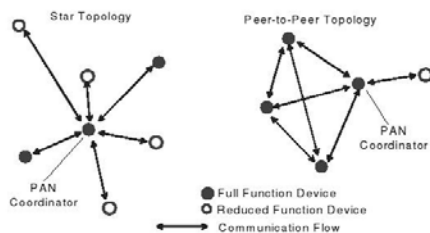


Fig 2. Topologías de red [IEEE std 802.15.4].

En la topología estrella la comunicación se establece entre los dispositivos y un nodo central, el controlador PAN (Personal Area Network). Un dispositivo típicamente tiene asociada una aplicación, la cual es el punto de inicio o final de toda comunicación de red. El controlador PAN también tiene una aplicación específica, pero esta se utiliza para inicializar, terminar, o rutear una comunicación alrededor de la red. Todos los dispositivos que operan en la red tendrán una

dirección única extendida de 64 bits. Esta dirección puede utilizarse para una comunicación directa dentro de la PAN, o puede ser cambiada por una dirección corta dada por el coordinador PAN. Este debe estar conectado a una fuente de alimentación principal, mientras que los demás dispositivos pueden tomar su energía de baterías. Las aplicaciones que utilizan este tipo de red son: automatización hogareña, periféricos de PCs, juguetes y juegos y dispositivos personales de cuidado de la salud.

La topología peer-to-peer también utiliza un coordinador PAN, sin embargo a diferencia de la estrella, ésta permite comunicar un dispositivo con cualquier otro, siempre y cuando cada uno esté en el rango del otro. Ésta topología permite la formación de redes más complejas como la malla (mesh en el estándar). Aplicaciones como control y monitoreo industrial, redes inalámbricas de sensores, agricultura de inteligencia y seguridad podrían beneficiarse con una red peer-to-peer. Éstas redes pueden ser auto-organizadas y pueden permitir múltiples saltos para rutear mensajes, esta funcionalidad puede agregarse en la capa de red, la cual no forma parte del estándar IEEE 802.15.4.

La capa IEEE 802.15.4 MAC es suficientemente flexible como para soportar diferentes tipos de tráfico. Cada uno de ellos requiere diferentes atributos. Para datos periódicos, cuando las aplicaciones establecen la tasa de transferencia (p/e sensores), se utiliza un sistema de balizado (beaconing en el estándar), donde el dispositivo "despierta" para el período de baliza (beacon en el estándar), revisa si existen mensajes y vuelve a "dormir". En aplicaciones de datos intermitentes la tasa es definida por la aplicación o por otro estímulo (p/e una llave de luz), el tráfico puede operarse aplicando un sistema libre de baliza o utilizar un modo desconectado. En este modo, el dispositivo solo se conecta a la red cuando necesita comunicarse, ahorrando energía de manera significativa. Por último, para datos repetitivos de baja latencia (p/e mouse), la MAC aplica la opción de intervalo de tiempo garantizado, este método de QoS otorga a cada nodo una duración específica de tiempo en cada super-trama, libre de disputas por el medio con otros nodos y de baja latencia.

El modo baliza se utiliza cuando el coordinador se alimenta de baterías y así provee un máximo ahorro de energía, mientras que el modo no-baliza se utiliza cuando la alimentación del nodo coordinador posee una fuente poderosa de energía. En el modo baliza, cada dispositivo espera por la trama baliza del coordinador, que se transmite periódicamente. Durante este período, se enciende y busca los mensajes destinados a él o transmite los datos que tiene almacenados. Si el mensaje esta completo el coordinador establece el tiempo para la próxima baliza y ambos, el coordinador y los dispositivos, entran en modo "sleep". Mientras se utiliza el modo baliza, todos los dispositivos en la red saben cuando comunicarse con los demás. Necesariamente los circuitos deben ser bastante precisos, o "despertarse" un

tiempo antes de la baliza, para asegurarse de no perderlo. En la figura 3 se ilustra el tráfico de tramas en este modo.

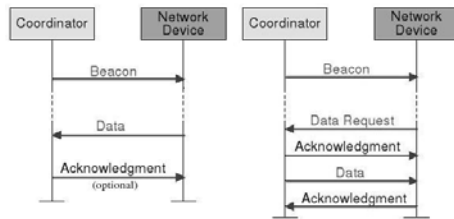


Fig 3. Tráfico en modo baliza [IEEE std 802.15.4].

En el modo no-baliza, los dispositivos permanecen casi todo el tiempo “dormidos”. Estos, “despiertan” en períodos aleatorios y confirman su presencia en la red. Los nodos transmiten al receptor de coordinador, que siempre se encuentra en modo de espera. En el caso de que el nodo encuentre el canal ocupado, desafortunadamente perderá la transmisión. La figura 4 muestra el intercambio de tramas para este caso.

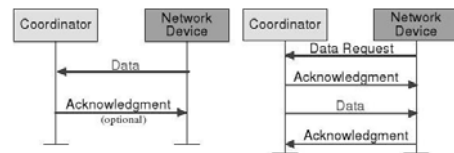


Fig 4. Tráfico en modo no baliza [IEEE std 802.15.4].

III. NODO CPSBEE.

Como se ha mencionado en la Introducción, un SoC (en nuestro caso el CC2430), constituye una interesante opción de diseño. Posee un transceiver, el CC2420, un procesador basado en una arquitectura 8051, hasta 128KB de memoria flash y 8KB de RAM, dos USARTs, temporizador “watchdog” y un ADS de hasta 8 entradas de configurable resolución; para más detalle ver [Datasheet Chipcon CC2430]. Este SoC aunque anunciado por la empresa desarrolladora, no está disponible comercialmente, por lo que el desarrollo del nodo se hizo con el transceiver y el microcontrolador separados. Con el SoC se logran dispositivos de menor consumo y tamaño, acostada de una menor capacidad de procesamiento cuando se lo compara con la segunda alternativa.

El nodo ZigBee CPSBee (Fig. 5) es un diseño evolutivo basado en un nodo anteriormente desarrollado en el Departamento de Ingeniería Eléctrica y Computadoras de la Universidad Nacional del Sur, llamado CPS433, que utiliza los canales de la banda ISM de 433MHz y un protocolo MAC propietario.

Se eligió CPS433 como punto de partida, dado su avanzado estado de desarrollo, pues este diseño cuenta con la interfaz de programación y de esta manera se obtiene una plataforma de desarrollo en redes de sensores que brinda diferentes opciones compatibles, es

decir, se logra que una misma aplicación sea cargada con el mismo hardware en el CPS433 o el CPSBee.



Fig. 5. Fotografía del nodo CPSBee.

Por otro lado, el CPS433 es un nodo con un transceiver que sólo implementa la capa física de transmisión con modulación FSK. Eso implica que toda la estructura de la red y el protocolo de comunicación incluyendo el control de acceso al medio, deben ser desarrollados. Por este motivo, se decidió hacer una evolución de este nodo hacia uno que tuviera estas capacidades implementadas en el transceiver y ZigBee es una tecnología madura con chips disponibles en el mercado que además son compatibles con los desarrollos ya hechos.

El desarrollo del prototipo consistió en adaptar un transceiver que implemente el protocolo ZigBee, en nuestro caso es un chip de Chipcon, el CC2420, a la placa del desarrollo anterior, el CPS433. Esta tarea requirió de algunas modificaciones, pues los canales de comunicación entre los dispositivos de la placa son diferentes. Se conservó el microcontrolador, fabricado por Atmel, el ATmega 128L. En el diseño anterior de la placa se previó la incorporación de un reloj de tiempo real, que puede utilizarse para alguna aplicación específica, un sensor de temperatura, un chip que provee un número de identificación único, que permite individualizar un dispositivo dentro de una cadena de producción, y una memoria flash externa. Por ahora, en la etapa experimental, estos dispositivos no están instalados.

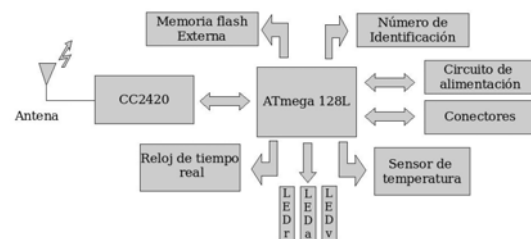


Fig 6. Diagrama en bloques del nodo CPSBee.

Debe notarse que la funcionalidad del dispositivo no ha cambiado en lo que respecta a su capacidad de sensado o procesamiento, de acuerdo con el objetivo de lograr una plataforma de desarrollo compatible. Lo que sí se modifica es el desempeño en lo que concierne a la transmisión de los datos, es decir, el nodo tiene más

ancho de banda, menor consumo y un protocolo MAC muy robusto. Con el fin de ilustrar de qué manera interactúan los bloques se muestra a continuación, en la fig. 6, un diagrama en bloques del nodo diseñado.

A. Descripción de los bloques funcionales. El Transceiver

Como hemos mencionado el transceiver es un chip de la empresa Chipcon, el CC2420, el cual implementa el protocolo de comunicación ZigBee (IEEE 802.15.4), en la banda ISM de 2,4GHz, con un ancho de banda de 250Kbps, 1mW de potencia de transmisión y una sensibilidad de -95dBm. Pero además de estas características generales este chip tiene una amplia funcionalidad, que nos ha permitido por ejemplo, cambiar el circuito con el que contaba el CPS433 para el monitoreo de la batería, por una consulta de un registro interno que contiene el estado de la misma. También se pone a disposición del usuario la potencia de la señal recibida (RSSI), que a su vez se agrega en la trama de comunicación entre el microcontrolador y el transceiver. De manera similar, en un registro se indica si la potencia recibida supera un umbral programado. Además el transceiver calcula un valor de correlación promedio de los 8 primeros símbolos que siguen al SFD (start of frame delimiter), este valor de 7 bits puede ser visto como una medición de la tasa de error de chip, aunque el CC2420 no realice decisión de chip. Este parámetro también se agrega en la trama de comunicación entre el microcontrolador y el transceiver si es requerido. El valor de correlación puede utilizarse solo o con RSSI para calcular el indicador de calidad del enlace (LQI). La frecuencia de operación al igual que la potencia de transmisión son establecidas por software, programando registros determinados. La frecuencia puede ser programada con 1MHz de resolución. IEEE 802.15.4 establece 16 canales (del 11 al 26) en la banda de 2,4 GHz. La potencia puede ser configurada desde aproximadamente -24dBm hasta 0 dBm en ocho pasos. El CC2420, posee dos buffers, uno de transmisión, TXFIFO, y otro de recepción, RXFIFO, a los que se accede por medio de dos registros. Para más información ver [Datasheet Chipcon CC2420].

Se ha utilizado el regulador de voltaje interno con el que cuenta el chip, este acepta una tensión no regulada de 2,1 a 3,6 V y provee un nivel regulado de 1,8 V, con el que opera el chip. Para otras aplicaciones en donde ya se disponga de un nivel regulado de 1.6 a 2V, podría no utilizarse esta opción.

Otra importante mejora es que este chip utiliza un canal SPI para intercambiar la información de transmisión, recepción e incluso los parámetros de configuración con el microcontrolador. Un canal SPI se utiliza para conectar dos dispositivos, un “master” y un “slave” y consta en general de 3 cables, MISO (master input – slave output), MOSI (master output – slave input) y SCLK (reloj), aunque este chip posee una línea adicional CSn (Chip enable). En este caso el CC2420 es siempre el “slave” mientras que el ATmega 128L es

“master”. Para indicar algunos estados importantes del proceso de comunicación, el chip cuenta con 4 líneas adicionales. Cuando exista uno o más bytes en el buffer de recepción, FIFO estará en un nivel alto. FIFOP tendrá un nivel alto si el número de bytes en buffer de recepción excede un umbral determinado, pero también con la llegada de un nuevo paquete, aunque el umbral no sea superado. El mismo vuelve a cero cuando se lee un dato del buffer. El pin SFD, es alto cuando el campo SFD es completamente transmitido y vuelve a bajar cuando se completa el MPDU o si un underflow es detectado. La señal CCA está basada en la estimación del RSSI y permite la implementación de CSMA-CA especificado en IEEE 802.11.4. El esquema de conexión entre los dos dispositivos es el mostrado en la fig. 7.

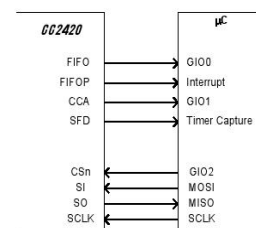


Fig 7. Interfaz transceiver – microcontrolador [Datasheet Chipcon CC2420].

Algunas líneas como FIFO, FIFOP, CCA, SFD y CSn podrían conectarse con los pines del microcontrolador de diversas maneras, en particular, se decidió que el diseño mantenga la compatibilidad con el modelo comercial Mica Z desarrollado en la Universidad de Berkeley. Existen dos líneas más en el canal de comunicación entre ambos dispositivos, pero no forman parte directamente de las operaciones de transmisión y recepción. VREG_EN se utiliza para habilitar el regulador interno, cuando este se utiliza y RESETn es una línea asincrónica para el reseteo del chip.

Una parte importante del diseño es el balun, que se encarga de adaptar la impedancia de salida del transceiver con la de la antena. El diseño de este circuito se realizó siguiendo las sugerencias del fabricante [Development Kit CC2420DK], pues es una parte crítica debido a la alta frecuencia de operación y a que de su buen funcionamiento depende la eficiencia del transceiver. En la figura 8 se muestra una ampliación en la fotografía del nodo, donde se aprecian el transceiver con sus circuitos secundarios.

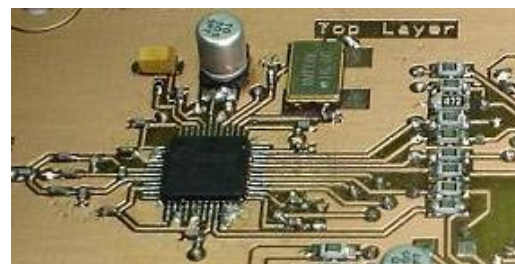


Fig 8. Transceiver CC2420.

El CC2420 utiliza un cristal paralelo externo, con dos capacitores de carga. El valor recomendado de esos capacitores es 27pF, pero al armar el circuito, fue necesario cambiar los valores de los mismos a fin de sintonizar la frecuencia de oscilación dentro de la tolerancia de +/- 40ppm, requerida por el fabricante. El valor requerido, varía con cada diseño, en nuestro prototipo fue de aproximadamente 20 pF.

Este tipo de chips no requiere mucha circuitería externa para su funcionamiento. Solo son necesarios algunos capacitores para filtrar la tensión de alimentación, el cristal y el balun. El conexionado de estos circuitos así como su disposición se tomaron de las recomendaciones del fabricante [Development Kit CC2420DK].

B. La Placa

Basados en la placa del CPS433, manteniendo su disposición para conservar la compatibilidad de los programadores y utilizando el software de diseño Orcad, se hicieron las modificaciones necesarias para reemplazar el transceiver: se agregó el canal SPI y las 6 líneas de control (FIFO, FIFOP, SCK, CCA, VREG_EN Y RESETn) reemplazando los antiguos canales de comunicación entre el microcontrolador y el transceiver. También tuvieron que modificarse algunas pistas, ya que el diseño original estaba ideado para realizarse con la tecnología "through holes" metalizados, que une las líneas que pasan de una cara de la placa hacia la otra en el proceso de fabricación, mientras que en nuestro caso, dicha unión se realizó manualmente, pues la placa fue fresada en el taller de electrónica del DIEC. El material del cual se realizó la placa es epoxi FR4 doble faz.

C. La Antena

Dado el carácter de prototipo del nodo, no se consideró como importante la forma de la antena, por ello se utilizó para las pruebas una antena monopolo de $\frac{1}{4}$ longitud de onda. A la frecuencia de trabajo de 2,4 GHz la longitud de la antena resulta 2,9 Cm.

D. El Microcontrolador

La innovación de este diseño es el transceiver, que implementa el protocolo ZigBee. Por esta razón se decidió mantener el mismo controlador utilizado en el CPS433 y aprovechar el desarrollo de dispositivos para el mismo, particularmente, los programadores. El microcontrolador ATmega 128L de Atmel es de 8 bits, 16 MIPS a 16MHz, 128kB de memoria flash y 4kB de SRAM, canales PWM y un ADC de 10 bits. Esta unidad de procesamiento, se encarga de ejecutar el programa que describe las operaciones que realiza el nodo y controlar los demás dispositivos de la placa. En particular debe configurar y controlar el CC2420,

accediendo a los registros internos y monitoreando las líneas de control.

E. Otros.

Los LEDs.

Con el fin de indicar el estado de algún proceso que esté llevando a cabo el nodo, se agregaron en el diseño tres LEDs. Estos están conectados directamente al microcontrolador.

El Circuito de Alimentación.

Su función es permitir la conexión de dos tipos de fuentes de alimentación: baterías para su funcionamiento en campo y una tensión regulada p/e para pruebas de laboratorio. Si se conectan baterías, el circuito de alimentación seleccionará esta fuente de energía, pero si se dispone de tensión regulada, el sistema conmuta a ésta automáticamente. Éste sistema también protege al circuito contra el conexionado inverso de los cables de alimentación. El voltaje con el que funciona el nodo es 3 V, para el caso de las baterías o de 3 a 3.6V para el caso de la fuente regulada. En nuestro prototipo este circuito no se ha montado aunque la placa está preparada para su instalación.

Los Conectores.

Los conectores son las vías de comunicación del nodo con el exterior, éstos proveen la interfaz entre el microcontrolador y la PC, a la hora de programar, así como también permiten el conexionado de otros dispositivos como pueden ser los sensores específicos, pudiéndole proveer también, la alimentación. Para mantener la compatibilidad con el diseño anterior y poder utilizar los programadores ya desarrollados, se mantuvieron los mismos conectores, dos "header" de 24 pines hembra.

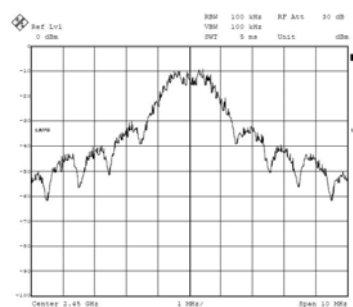


Fig 9. Espectro en frecuencia suministrado por el fabricante [Datasheet Chipcon CC2420].

IV. MEDICIONES Y RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Para realizar las mediciones, se cargo en el nodo prototipo un programa realizado con TinyOS, que envía paquetes hacia otro nodo, en este caso una micaZ, en la que se ha cargado otro programa que recibe los paquetes

y los envía a una PC. Éste ensayo tiene como propósito medir el espectro de potencia de salida del nodo, sus consumos en diferentes estados y evaluar la distancia máxima de transmisión. Luego se realiza el experimento inverso, es decir, se intercambian los programas en los nodos. En este caso la experiencia corrobora el buen funcionamiento de la parte receptora y permite realizar las mediciones de consumo en este estado.

En primer lugar, analizando la forma del espectro tomada con el analizador y comparándola con la proporcionada por el fabricante, puede observarse que ambas son similares. En las fig. 9 y 10 se muestran dichas gráficas.

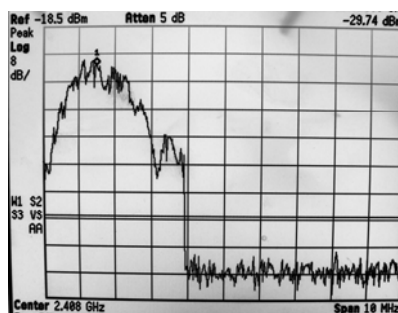


Fig 10. Espectro medido del prototipo.

Como resultado adicional, estos nodos permiten una conectividad de red en malla que abre la posibilidad de extender el alcance de la red más allá del alcance propio del enlace de RF que experimentalmente se midió en 80 metros, en un área urbana, semi-edificada, encontrándose los nodos a 1 m de altura.

Las mediciones de consumo del nodo para diferentes estados se presentan en la tabla 1.

Modo	Consumo [mA]
Transmisión (0 dBm)	23.4
Transmisión (-1 dBm)	22.9
Transmisión (-3 dBm)	22.5
Transmisión (-5 dBm)	22.1
Transmisión (-7 dBm)	21.7
Transmisión (-10 dBm)	21.4
Transmisión (-15 dBm)	20.8
Transmisión (-25 dBm)	20.6
Recepción sin llegada de paquetes	24.5
Recepción con llegada de paquetes	25.1
Sólo el procesador	4

Tabla 1. Consumo del nodo para distintos estados.

V. CONCLUSIONES

Aunque el prototipo no se ha probado dentro de una red, su desempeño en las pruebas fue satisfactorio, alcanzando similar rendimiento que productos comerciales de las mismas características. Estos resultados son alentadores para continuar con el desarrollo de nodos para aplicaciones en redes de sensores o en el control de dispositivos, ahora bajo el estándar ZigBee.

Al momento de comenzar con el diseño, se presentaba como un gran desafío la alta frecuencia de salida del transceiver, ya que la misma hace dificultosa la implementación de los circuitos. Particularmente, los puntos críticos parecían ser: el montaje del integrado, por su diminuto tamaño y el plano de tierra que posee en la parte inferior, el balun y el diseño poco compacto de la placa. Además se dudaba de que el material con el que se realizó la placa, pueda lograr parámetros bajos de elementos parásitos. Pero a la luz de los resultados obtenidos y debido al cuidado en el diseño, es evidente que tales suposiciones no tuvieron un efecto significativo en el desempeño del prototipo.

Habiéndose logrado la funcionalidad del dispositivo, se puede empezar a trabajar en la optimización de sus partes. Un aspecto que puede mejorarse sin dudas es el tamaño, pues en el nodo actualmente realizado, no se tuvo en cuenta este parámetro a la hora de diseñar. Otro ítem descuidado en el prototipo es la antena, por no ser determinante para su funcionamiento, aunque quizá se podrían lograr mejores desempeños con modelos diferentes, adaptados a cada necesidad o ambiente de transmisión.

Una característica importante de los nodos en las redes de sensores es el tamaño y el consumo de energía, pues en muchas aplicaciones esto es crucial, por este motivo una posible proyección a futuro de los nodos ZigBee sería utilizar transceivers SoC, como el CC2430 de Chipcon, los cuales cuentan con un microcontrolador integrado en el mismo encapsulado, que aunque es menos poderoso que el ATmega 128L, posibilita diseños más pequeños y de menor consumo.

REFERENCIAS

- Sebastián Marcelo Armano, *Informe final de carrera, "Nodos para redes de sensores"*, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina (2007).
- Patrick Kinney, "ZigBee Technology: Wireless Control that Simply Works", *Communications Design Conference*, San Jose, California, E.E.U.U, N° de páginas: 20, (2003).
- IEEE std. 802.15.4: *Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)* (2003).
- Chipcon, Datasheet Chipcon CC2420, 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee-ready RF Transceiver, (2006).
- Chipcon, Datasheet Chipcon CC2430, A True System-on-Chip solution for 2.4 GHz IEEE 802.15.4 / ZigBee™, (2006).
- Atmel, Datasheet Atmel Atmega128L, *8-bit Microcontroller with 128K Bytes In System Programmable Flash*, (2004).
- Chipcon, Development Kit CC2420DK, *User Manual rev 1.0*, (2003).