

Arquitectura de Radios *Wake-up* para redes de sensores inalámbricas basada en FPGA.

Victor Rosello, Jorge Portilla, Teresa Riesgo
Centro de Electronica Industrial, Universidad Politecnica de Madrid
Email: { victor.rosello, jorge.portilla, teresa.riesgo }@upm.es

Abstract—En este artículo se muestra la implementación de una *Wake-up radio* para nodos de redes de sensores inalámbricas basada en FPGAs de ultra bajo consumo. El objetivo principal es evaluar la utilización de dispositivos de lógica programable para realizar el procesamiento de los mensajes y explotar su velocidad de, flexibilidad y bajo consumo comparado con las implementaciones más tradicionales basadas en ASIC o microcontroladores.

Keywords—Redes de sensores inalámbricas, *wake-up radio*, FPGA.

I. INTRODUCCIÓN

El número de aplicaciones para redes de sensores inalámbricas (WSN, por sus siglas en inglés), continúa incrementándose año tras año. Algunas de las aplicaciones más extendidas son las que demandan ultra bajo consumo [1] para conseguir tiempos de funcionamiento más elevados y reducir el mantenimiento (cambio de nodos y/o baterías). Para conseguir esta bajo consumo estas aplicaciones suelen utilizar ciclos de trabajo muy reducidos (1%) y tratan de minimizar el número de bits que se envían a la red (<1 bit/s). Siguiendo un ciclo de funcionamiento típico de, despierta, mide, almacena y duerme, donde el 99% del tiempo el nodo está en un estado de hibernación.

Para maximizar el tiempo de vida de los nodos en este tipo de aplicaciones es necesario mejorar la eficiencia de todo el nodo. El mayor consumo energético de una aplicación de redes de sensores se debe a las comunicaciones, además, en muchas ocasiones esta energía se malgasta manteniendo un nodo despierto a la espera de recibir algún tipo de mensaje (un módulo de comunicaciones típico de redes de sensores gasta la misma energía en modo emisor que en modo receptor). Por este motivo existen múltiples mecanismos para mejorar la eficiencia energética de las comunicaciones para redes de sensores inalámbricas[2].

En el estado del arte existen múltiples protocolos de comunicaciones eficientes desde el punto de vista energético. Para aplicaciones de redes de sensores dicha eficiencia energética se consigue principalmente controlando el acceso de los nodos al canal de comunicaciones. Existen dos grandes grupos de protocolos de comunicaciones para aplicaciones de bajo consumo, síncronos basados en TDMA de sus siglas en inglés *Time Domain Multiple Access* y pseudo-ásincronos basados en CSMA (del inglés *Carrier Sense Multiple Access*) con bajo ciclo de trabajo.

Las comunicaciones basadas en TDMA son, teóricamente, las más eficientes dado que reducen al mínimo el número de

nodos activos simultáneamente y optimizan el tiempo que los nodos deben permanecer activos para comunicarse. Las comunicaciones basadas en TDMA necesitan precisos mecanismos de sincronización entre nodos para garantizar que existe una ventana de tiempo en la que dos nodos vecinos van a poder comunicarse sin problemas.

Este método de control de las comunicaciones también presenta importantes inconvenientes, se incrementa la cantidad de mensajes de control necesarios para la sincronización de los nodos, limitan la flexibilidad de la red de sensores (movilidad, topología) y, en general, presentan problemas para su uso en entornos dinámicos. Estos problemas vienen causados por la relativa rigidez que impone la sincronización, ya que un pequeño cambio en la red, como por ejemplo, que un nodo deje de estar disponible temporalmente, conlleva una nueva sincronización de los nodos lo que significa un tráfico intenso de mensajes de control. Este tráfico no solo tiene impacto en el consumo energético, también requiere interrumpir la aplicación que están ejecutando los nodos mientras se vuelven a sincronizar los nodos y, dependiendo del tamaño de la red, este tiempo puede ser considerable. En [3][4][5] se describen en profundidad algunas de los trabajos más relevantes de aplicaciones basadas en comunicaciones TDMA para redes de sensores inalámbricas.

En las aplicaciones basadas en comunicaciones pseudo-ásincronas permanecen en modo de bajo consumo la mayoría del tiempo, y se despiertan de forma periódica para escuchar si algún nodo de su entorno tiene algún mensaje para él. Un nodo puede activarse en cualquier momento forma independiente y enviar un mensaje solicitando enlace con un nodo en concreto, dicho nodo retransmitirá el mismo mensaje hasta que el destinatario se despierte y conteste afirmativamente, creándose el enlace entre ambos nodos.

Este tipo de comunicaciones son las más habituales en aplicaciones de bajo consumo dado su robustez y capacidad de adaptación a los entornos dinámicos donde habitualmente se despliegan las redes de sensores. Los principales puntos débiles de los mecanismos pseudo-ásincronos es la latencia que introduce en aplicaciones con ciclo de trabajo muy pequeño y que no elimina completamente el gasto de energía de los nodos activos cuando no hay transmisiones activas ya que los nodos se activan periódicamente. Por lo tanto es necesario un equilibrio entre la latencia que se introduce y el periodo de activación de los nodos. Algunos ejemplos de este tipo de protocolos son [6],[7],[8] y [9], entre otros

Para evitar los problemas de sincronización de los protocolos síncronos y reducir la latencia de los pseudo-

asíncronos se propone utilizar comunicaciones asíncronas o bajo demanda en las aplicaciones de bajo consumo.

En aplicaciones con comunicaciones bajo demanda el dispositivo de comunicaciones de los nodos permanece apagado a no ser que algún nodo vecino necesite comunicarse. Cuando un nodo necesita comunicarse con otro envía un mensaje al nodo destino para que active su radio. Para que los nodos puedan detectar estos mensajes (denominados mensajes *wake-up*) se tiene que dotar a los nodos de una radio auxiliar de ultra bajo consumo, denominada *wake-up radio* (WuR). Este dispositivo auxiliar es utilizado para comunicaciones simples y de baja tasa de datos, normalmente se utilizan comandos simples y la dirección del nodo al que van dirigidos si fuera necesario.

Este artículo se centra en este tipo de comunicaciones. A continuación se realizara una descripción más profunda de las comunicaciones bajo demanda y las *wake-up radio*. Como aportación principal de este trabajo se propone una arquitectura de procesamiento para comunicaciones bajo demanda basada en dispositivos de lógica programable (FPGA) de ultra bajo consumo.

II. COMUNICACIONES BAJO DEMANDA Y WAKE-UP RADIOS

Las comunicaciones bajo demanda llegan a las redes de sensores inalámbricas con el objetivo principal de minimizar el gasto energético en comunicaciones sin un incremento drástico de la latencia

Los objetivos principales de un sistema basado en *wake-up radio* fueron definidos en [10], en dicho artículo los autores definen los principales requisitos de una *wake-up radio* para nodos de redes de sensores:

- Bajo consumo, el dispositivo para la *wake-up radio* debe tener un consumo energético que suponga un bajo porcentaje del consumo total del nodo en *stand-by*.
- Alta sensibilidad, la radio debe garantizar que no se pierden mensajes,
- Resistencia frente a interferencias, un nodo no debe despertarse por falsos mensajes.
- Rapidez, un nodo que recibe un mensaje *wake-up* debe activarse de forma rápida de forma que se minimice el impacto en la latencia de las comunicaciones.

El bajo consumo es un requisito indispensable para una *wake-up radio*. De hecho una *wake-up radio* ideal sería completamente pasiva, obteniendo toda la energía necesaria para procesar el mensaje de las propias ondas de radio, como una RFID pasiva pero en la actualidad no es factible una radio con estas características, principalmente por que para poder obtener la energía de la onda de radio, el emisor debe usar mucha energía para poder alcanzar un distancia aceptable.

Por lo tanto, en lugar de radios pasivas, se utilizan radios de ultra bajo consumo. Como regla de diseño, se recomienda mantener el consumo energético un orden de magnitud por debajo del consumo del nodo en *stand-by*, esto es, por debajo del micro-watio.

Para lograr el mínimo consumo energético se suelen utilizar modulaciones simples, OOK y PWM (de las siglas en ingles *On-Off Keying* y *Pulse Width Modulation*, respectivamente) que no requieren un *hardware* complejo para su demodulación. Esto limita la velocidad de las comunicaciones, pero teniendo en cuenta que los mensajes deben ser simples y cortos, la velocidad no es una requisito importante en el diseño de una *wake-up radio*.

Con respecto a las sensibilidad, se debe llegar a un equilibrio entre complejidad del *hardware* y el rango de las comunicaciones. La simplicidad es un requisito indispensable para reducir el número de componentes activos que van a incrementar el consumo energético. La sensibilidad se fija por el rango necesario, este puede variar dependiendo de la aplicación, que puede ir desde menos de un metro en aplicaciones de *wearable sensor networks*, hasta la decena de metros aplicaciones típicas como por ejemplo recolección de datos.

Para que un nodo se active solo cuando el mensaje va dirigido a él se añade la dirección del nodo destinatario en el mensaje *wake-up* de esta manera solo cuando el mensaje contenga la dirección del nodo este pasara al modo activo.

Para reducir la latencia tanto el hardware de la radio como las características de los mensajes han de tenerse en cuenta. Tanto la cantidad de mensajes, como la longitud, así como el rendimiento del hardware utilizado son factores a tener en cuenta.

A. Trabajo relacionado

En los últimos años se han publicado gran número de trabajos relacionados con la implementación de radios *wake-up* en redes de sensores inalámbricas. Estos trabajos cubren desde el diseño de ASICs para receptores de ultra bajo consumo, receptores pasivos, protocolos de comunicaciones hasta circuitos basado en infrarrojos o señales acústicas. En [11] y [12] se presentan diferentes alternativas para el diseño de *wake-up radios*.

Este trabajo se centra en un sistema con un transceptor dedicado que funciona en una frecuencia diferente a del canal principal, y que se basa en componentes comerciales y que cuenta con una unidad de procesamiento independiente del microcontrolador principal para la decodificación y la generación de mensajes *wake-up*.

A continuación se resumen algunos de los trabajos relacionados más representativos.

En [13], Langedoen et al, proponen una *wake-up radio* para la plataforma T-Node, en la banda de 868 MHz. En este trabajo se utiliza la misma banda tanto para la radio principal como para la radio *wake-up*. Para la decodificación de los mensajes utilizan hardware dedicado, un microcontrolador de bajo consumo (PIC12F683). La solución propuesta tiene un alcance de dos metros, pero con un consumo demasiado elevado debido al microcontrolador seleccionado.

En [14] Ansari et al, los autores presentan un circuito que puede ser usado como un periférico en el plataforma TelosB. Su propuesta utiliza un canal separado para la *wake-up radio* utilizando el microcontrolador del nodo para la generación y el

procesamiento de los mensajes *wake-up*. La radio utiliza como emisor un transceptor de bajo consumo de Texas Instruments con un amplificador para incrementar el alcance y como receptor un seguidor de envolvente y un comparador para digitalizar la señal de radio.

En nuestro trabajo nos proponemos utilizar FPGAs de ultra bajo consumo para realizar todo el procesamiento necesario para generar y decodificar los mensajes de la *wake-up radio*. Con el objetivo de explotar la velocidad de procesamiento y de activación para reducir la latencia de la comunicaciones

Al final del documento, en la tabla II se resumen las principales características de estos trabajos así como de otras soluciones representativas.

III. IMPLEMENTACION DE RADIOS WAKE-UP

Como se dijo anteriormente, las *wake-up radios* deben ser diseñadas cuidadosamente para lograr cumplir los requisitos de consumo energético, rango y sensibilidad.

Existen diferentes alternativas a la hora de diseñar una *wake-up radio*.

- 1) Utilizar un transceptor externo que haga las veces de modulador y demodulador. Bien diseñando un transceptor específico para la aplicación, en [17] y [18] se presentan trabajos basados en esta alternativa, pero no están disponibles en el mercado. O bien, utilizar un transceptor comercial, aunque en la actualidad el consumo del módulo en el mejor de los casos está en el orden de los mW, y no cumple con las especificaciones requeridas para una *wake-up radio*.
- 2) Utilizar un emisor comercial y un receptor diseñado a medida. En el caso de transceptores *wake-up* esta es la solución más extendida. Con este tipo de soluciones se obtiene el menor consumo dado que como se dijo anteriormente los transceptores disponibles en el mercado tienen un consumo demasiado elevado para una *wake-up radio*. Existen dos tipos de soluciones, basadas en ASICs cuyos resultados están basados principalmente en simulaciones y basados en componentes comerciales, con implementaciones reales pero con un menor rendimiento.

La solución propuesta en este trabajo, consiste en implementar todo el procesado de mensajes (codificación, decodificación, etc.) en un hardware independiente al microcontrolador principal. En nuestra solución planteamos el uso de FPGAs de ultra bajo consume para realizar estas tareas. De esta manera se libera al microcontrolador principal de las tareas relativas a la generación de mensajes *wake-up* y podemos reducir la latencia, dado que las FPGAs utilizadas en este trabajo pueden despertarse en menos de dos microsegundos, comparado con los el tiempo que tarda un microcontrolador en pasar del modo de bajo consumo al modo activo que pueden llegar incluso a los milisegundos.

IV. ARQUITECTURA PROPUESTA

La Figura 1 muestra la arquitectura propuesta. Los elementos principales son.

- Radio principal, utilizada para colas comunicaciones de datos en la red, típicamente están basadas en 802.15.4 o Zigbee.
- Microcontrolador, un microcontrolador de bajo consumo que se utiliza como unidad principal de procesamiento.
- Wake-up radio, basada en un transceptor comercial
- FPGA de bajo consumo, utilizada para el procesamiento de mensajes *wake-up*, también controla la activación y desactivación de la radio principal.

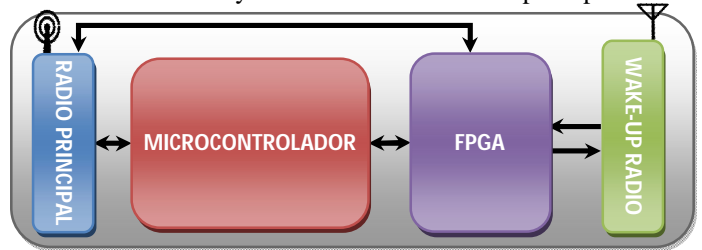


Figura 1: Arquitectura propuesta

A. Wake-up radio

1) Transceptor.

En esta primera etapa del diseño se ha optado por un transceptor comercial completo debido a la simplicidad a la hora de integrarlo con la plataforma Cookies con el objetivo de validar la estrategia de procesamiento de mensajes basadas en FPGA. Debe cumplir los siguientes requisitos básicos.

- Bajo consumo estático
- Modulación OOK o ASK, para facilitar la implementación de un futuro receptor de ultra bajo consumo.

El chip elegido es el TR1001 [14] de *RF Monolithics*. Las características principales de este dispositivo son.

- 0.7 uA en modo de bajo consumo
- 12 mA máximo, cuando transmite.
- 2 mA en modo recepción.
- Soporta modulación OOK y ASK
- Frecuencia de transmisión 868 MHz

B. Actel IGLOO Low power FPGA.

La familia de FPGAs elegida es ACTEL Igloo[16] Actualmente los dispositivos de esta familia presentan el consumo más bajo, además son no-volátiles, lo que es interesante para aplicaciones de bajo consumo ya que no es necesario reprogramarlas cuando se encienden, o vuelven del modo de bajo consumo.

Este tipo de FPGAS tiene 5 modos de funcionamiento diferentes.

- 1) Active, este es el modo normal, cuando el hardware dentro de la FPGA está en funcionamiento.
- 2) Static, cuando el reloj principal esta desactivado
 - a) Idle, con el reloj principal apagado. En este modo solo existe consumo estático. En este se modo se puede obtener el tiempo de activación más rápido pero también tiene un consumo mayor. Los posibles bloques combinaciones siguen en funcionamiento. El

consumo depende del consumo estático de la configuración hardware, el voltaje del núcleo utilizado y la corriente del núcleo, que depende principalmente del tamaño del dispositivo.

b) *Flash*Freeze (FF)*, este es un modo de bajo consumo que permite reducir el consumo estático mientras conserva el estado de los registros, el contenido de la SRAM, y los valores de las IOs sin desactivar ninguna de las alimentaciones, entradas o relojes. Este modo puede ser activado de 2 maneras, no-controlado o controlado. En el primero, el modo FF se activa poniendo un '0' lógico en el pin correspondiente la FPGA automáticamente cambia al modo FF. En el controlado también hay que poner un '0' en el mismo pin, pero en este caso un módulo interno espera a que el hardware este en un estado estable antes de pasar al modo de bajo consumo, de esta manera podemos controlar el estado en que se queda el hardware antes de desactivarse, o evitar que se desactive mientras está ejecutando una tarea crítica. En este trabajo se utiliza este modo de bajo consumo.

3) *Sleep*, en este modo se desconectan las fuentes de alimentación del núcleo y de programación, lo que resulta en una desactivación total de la FPGA. El consumo se en este estado es mínimo, debido principalmente a la corriente de fugas. Los valores típicos para la activación y desactivación son t_{sleep} y $t_{wake-up}$ de 50 μs . Aunque también depende del tamaño del dispositivo

V. UNIDAD DE PROCESAMIENTO

En esta sección se describe la arquitectura de procesamiento implementada. También se analizan los diferentes modos de funcionamiento de la FPGA así como las diferentes opciones de implementación para la activación del hardware.

La arquitectura implementada se puede separar en 2 partes principales. El detector de mensajes *wake-up* y la unidad de procesamiento de mensajes. Dependiendo del modo de bajo consumo utilizado el detector de mensajes podrá ser implementado de diferentes maneras y será analizado más adelante pero los bloques de procesamiento son comunes. Estos bloques son:

- Unidad de control, controla el resto bloques de la FPGA así como la activación/desactivación de la radio principal y del transmisor de la radio *wake-up*. Decide la acción a tomar dependiendo del tipo de mensaje recibido y el estado en el que se encuentre el nodo.
- Codificador/Decodificador, implementa un codificador y un decodificador de código Manchester [17]. La utilización de esta técnica permite simplificar la estructura del hardware para decodificación y evita problemas de sincronización aunque aumenta en tiempo de transmisión por bit.
- Interprete de comandos, dependiendo del tipo de comando el tamaño del mensaje cambia, el intérprete

de comandos notifica a la unidad de control cuando ha recibido un mensaje o cuando se ha producido un error en la recepción.

- Control de comunicaciones, controla la activación de la radio principal. En el nodo Cookie esto se hace utilizando la activación por interrupciones externas del módulo de comunicaciones principal. Dependiendo del tipo de mensaje, se genera una interrupción distinta para que el módulo permanezca activo el tiempo necesario para completar la operación.
- Registro de direcciones, contiene la dirección asignada al nodo y la del siguiente nodo a despertar.

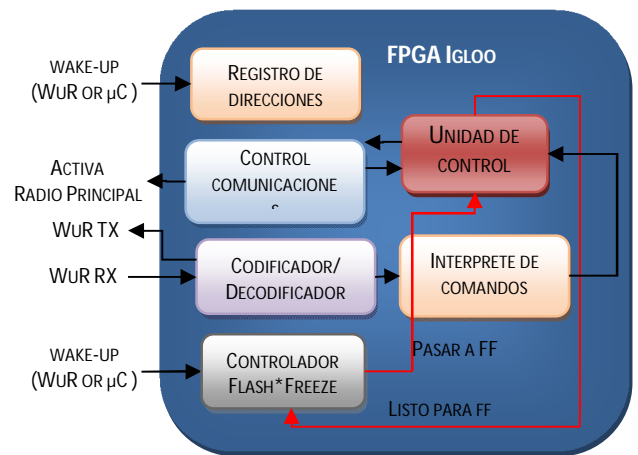


Figura 3: Arquitectura de procesamiento

El sistema implementado solo utiliza dos tipos de comandos. El primero denominado *route2sink* que contiene el identificador del nodo que se quiere despertar, se utiliza para despertar los nodos que forman el camino de entre el origen y el destino. En la implementación actual el destino es fijo, denominado *sink* y los nodos solo almacenan la dirección del siguiente nodo en el camino hasta el *sink*.

El segundo denominado *nwkrRoute*, se utiliza para despertar los nodos en un radio dado para crear una nueva ruta, en caso de que se haya producido un error al intentar enviar un mensaje por el canal principal, este no contiene datos de direccionamiento ya que todos los nodos que lo reciban deben despertarse y reenviarlo hasta que se alcanza el radio determinado.

VI. RESULTADOS EXPERIMENTALES.

Se ha realizado la implementación de la misma arquitectura en un MSP430FG438 de Texas Instruments a 32 KHz y en un AGL250V5 de Actel a 1.2 MHz y se han medido el consumo de ambas plataformas así como el tiempo que tarda el dispositivo en activarse y el tiempo que tarda el dispositivo en conmutar a modo de bajo consumo desde que termina el envío. Los resultados se muestran en la tabla I.

Resaltar que no se pudo usar el modo de menor consumo del microcontrolador dado que no respondía correctamente a la interrupción utilizada para despertar al micro y tuvo que usarse el segundo de los cuatro disponibles lo que impactó negativamente en el consumo del microcontrolador.

TABLA I: MSP430 vs AGL250

	t_{wakeup}	t_{sleep}	I_{on}	I_{sleep}
MSP430	6 μs	37 μs	2,6 mA	1.4 mA
AGL250	380 ns	438 ns	127 μA	50 μA

A la vista de los resultados obtenidos resulta evidente que el hecho de implementar las funciones de procesamiento en un hardware independiente resulta ventajoso ya que no solo nos permite utilizar un modo de bajo consumo más reducido en el microcontrolador si no que este puede permanecer inactivo mientras se procesa información de los mensajes de la *wake-up radio* y al ser capaz de entrar en modo de bajo consumo mucho más rápido nos permite ahorrar aún más energía.

TABLA II: PLATAFORMAS DE WAKE-UP RADIOS

Centro	Cots ¹ /ASIC	Año	Plataforma	Canal WuR	Transceptor completo	Direccionamiento	Distancia (m)	Sensibilidad (dBm)	Consumo	
									Receptor	Nodo Stand-by
Delft University of Technology	CotS	2009	BT-Node	Compartido	Si	Si, HW Separado	3		801 μW	171 μW
Vienna University of Technology	ASIC	2009		Compartido	Solo receptor	NC	--	-57	11 μW	
LRTS Laval University Quebec	ASIC (simulation)	2009		Ambos	Solo receptor	Si, Separado HW	4	-50	18.5 μW	
RWTH Aachen University	CotS	2009	TelosB	Separado	Si	Si, μc principal	3	--	1.2 + 65 μW	120 μW
CEI-UPM	CotS	2011		Separado	Si	Si, HW Separado	--	--	5.6mW + 110 μW	--

1.-CotS: Componentes comerciales, del inglés *Components of the shelf*

VII. REFERENCES

- [1] J. Rabaey, M. J. Ammer, J. L. da Silva, D. Pattel and S. Roundry. "PicoRadio Supports Ad Hoc Ultra-Low Power Wireless Networking". Computer, vol.33, no.7, pp.42-48, July 2000
- [2] G. Anastasi, M. Conti, M. di Franchesco, A. Passarella. "Energy conservation in wireless sensor networks : A survey". Ad Hoc Networks, vol. 7, pp. 537-568, 2009
- [3] L. van Hoesel. and P. HAVINGA. "A light weight medium access protocol (LMAC) for wireless sensor networks". 1st international workshop on networked sensing systems (INSS2004). Tokyo, Japan, 2004.
- [4] V. Rajendran, K. Obraczka and J. Garcia-Luna-Acebes. "Energy-efficient, collision-free medium access control for wireless sensor networks". 1st ACM conference on embedded networked sensor systems (SenSys'03). Los Angeles, CA, USA, November 2003
- [5] S. Coleri-Ergen and P. Varaiya. "PEDAMACS: Power efficient and delay aware medium access protocol for sensor networks" IEEE Transactions on Mobile Computing, vol 5, no 7, pp 920-930. (2006).
- [6] J. Polastre, J. Hill, and D. Culler. "Versatile low power media access for wireless sensor networks". Proceedings of the 2nd international conference on Embedded networked sensor systems (SenSys '04). New York, NY, USA, 95-107.
- [7] W. Ye, j. Heideman and D. Estrin. "An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks". 21st conference of the IEEE computer and communication societies (INFOCOM), vol. 3, pp 1567-1576, New York, NY, USA June 2002.
- [8] T.V. Dam and K. Langedoen. "An adaptive energy efficient MAC protocol for wireless sensor networks". 1st ACM conference on Embedded Networked Sensor Systems (SenSys' 03). Los Angeles, CA, USA, November 2003
- [9] M. Buettner, G. Yee, E. Anderson, R. Han, "X-MAC: A Short Preamble MAC Protocol for Duty-Cycled Wireless Sensor Networks", in Proceedings of the 4th ACM Conference on Embedded Sensor Systems (SenSys), pp. 307 - 320, 2006.
- [10] L. Gu, and J. A. Stankovic. "Radio-Triggered *Wake-up* for Wireless Sensor Networks". Real Time Systems, vol. 29, pp. 157-182, 2005.
- [11] I. Demirkol, C. Ersoy, and E. Onur. "Wake-up Receivers for Wireless Sensor Networks: Benefits and Challenges." IEEE Wireless Communications, pp. 88-96, 2009: .
- [12] P. Le-Huy, and S. Roy. "Low-Power *Wake-up radio* for Wireless Sensor Networks" Mobile Network Applications, vol. 15, no. 2, pp. 226-236, 2010.
- [13] B. van der Doorn, W. Kavelaars, and K. Langendoen. "A prototype low-cost wakeup radio for the 868 MHz band." International Journal on Sensor Networks 5, no.1 , pp 22-32, 2009.
- [14] *TX6001 datasheet*, [online] available: <http://www.rfm.com/products/data/tx6001.pdf>
- [15] J. Ansari, D. Pankin, and P. Mähönen. "Radio-triggered *Wake-ups* with Addressing Capabilities for Extremely low Power Sensor Network Applications". International Journal of Wireless Information Networks vol.16, no. 3,pp. 118-130, 2009.
- [16] Actel Igloo user guide, [online] available: http://www.actel.com/documents/IGLOO_UG.pdf
- [17] A. Artés Rodríguez, F. Pérez González, "Comunicaciones Digitales", Edited by Pearson -España, ISBN: 9788483223482, 2007.