

# Diseño de un nodo con arquitectura abierta para aplicaciones con redes inalámbricas de sensores (CRTECMOTE)

Fecha de recepción: 23/04/2010

Fecha de aceptación: 27/09/2010

Johan Carvajal Godínez<sup>1</sup>  
Freddy Araya Rodríguez<sup>2</sup>  
Alfonso Navarro Garro<sup>3</sup>  
Daniel Pérez Murillo<sup>4</sup>  
Cristian Moreira Segura<sup>5</sup>  
Mauricio Estrada Ugalde<sup>6</sup>  
Jorge Herrera Murillo<sup>7</sup>

## Palabras clave

WSN, nodo sensorial, mote, redes inalámbricas de sensores, microcontroladores (MCU), 802.15.4, MIPS.

## Resumen

Durante la última década las redes inalámbricas de sensores (WSN) para la protección del medio ambiente surgen como área de investigación y desarrollo gracias a los avances en la microelectrónica, la ingeniería de computadoras y las ciencias de los materiales.

Aspectos relevantes que han determinado el interés en esta área de investigación son, entre otros, la capacidad de mitigar el impacto al ambiente por consecuencia de actividades productivas, especialmente agrícolas, mediante la monitorización y control de variables de entrada para dicho proceso.

Este artículo trata sobre la metodología con la cual se aborda el diseño, la optimización y la puesta en marcha de una infraestructura electrónica que funcione como herramienta para la adquisición de datos y tratamiento de información para la generación de modelos descriptivos que

1. Profesor/Investigador. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [johcarvajal@itcr.ac.cr](mailto:johcarvajal@itcr.ac.cr) Teléfono: 2550-9171.
2. Profesor/Investigador. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [faraya@itcr.ac.cr](mailto:faraya@itcr.ac.cr) Teléfono: 2401-3140.
3. Profesor/Investigador. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [alnavarro@itcr.ac.cr](mailto:alnavarro@itcr.ac.cr) Teléfono: 2550-2532.
4. Profesor/Investigador. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [dperez@itcr.ac.cr](mailto:dperez@itcr.ac.cr) Teléfono: 2401-3016.
5. Profesor/Investigador. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Correo electrónico: [cmoreira@itcr.ac.cr](mailto:cmoreira@itcr.ac.cr) Teléfono: 2401-3060.
6. Profesor/Investigador. Universidad Estatal a Distancia. Costa Rica. Correo electrónico: [mestrada@uned.ac.cr](mailto:mestrada@uned.ac.cr) Teléfono: 2460-1318.
7. Profesor/Investigador. Universidad Nacional. Heredia, Costa Rica. Correo electrónico: [jherrer@una.ac.cr](mailto:jherrer@una.ac.cr) Teléfono: 2277-3292.

*Se puede afirmar que una red inalámbrica de sensores es un sistema de procesamiento distribuido; sin embargo, el nivel de confiabilidad con respecto a los sistemas de procesamiento convencionales es menor, debido a que la alta probabilidad de ausencia de energía para operación hace que los nodos de la red se desconecten o no se encuentren disponibles en todo momento.*

permitan atacar aquellos fenómenos que tienen mayor incidencia en la degradación de los recursos naturales que rodean las zonas geográficas productivas.

El resultado obtenido mediante la investigación llevada a cabo fue el diseño de un nodo para red inalámbrica de sensores especializados en adquisición y procesamiento de datos, así como la selección de la arquitectura de red y las tecnologías de comunicación con las que se planea implementar la conexión de los nodos con un sistema central de adquisición y almacenamiento de la información (sumidero).

El artículo concluye con la justificación del diseño de la red, cuya topología jerárquica se adapta a las necesidades de cobertura geográfica, costo de la infraestructura y capacidad de escalamiento de la red inalámbrica de sensores.

### Key words

WSN, sensorial node, mote, wireless sensor networks, Multipoint Control Unit (MCU), 802.15.4, MIPS.

### Abstract

Wireless sensor networks to protect environment emerge as a research and development area during the last decade due to the advances in microelectronics, computer engineering and materials science. Some determinant aspects to this research trend have to do with the capacity to mitigate the impact of productive activities in the environment, specially agriculture, trough monitoring and control of input variables in such process.

This article is about the methodology that states this design, optimization and the implementation of an electronic infrastructure that serves as a tool to acquiring data, processing information and the generation of descriptive models to attack the phenomena which have greater

impact on the degradation of natural resources around the geographical areas of production.

The obtained results from the research was to develop a network made for wireless sensor networks that specializes in data acquisition and processing as well as the selection of the network architecture and communication technologies with which it is planned to implement the connection of nodes with a central system of procurement and storage of information.

The article concludes with the justification of network design which hierarchical topology adapts to the needs of geographic coverage, cost of infrastructure and capacity scaling for wireless sensor network.

### Introducción

Las redes inalámbricas de sensores han sido ampliamente definidas como una tecnología emergente del siglo XXI [1] y su espectro de aplicación aumenta conforme avanzan las tecnologías de microfabricación de circuitos integrados y sistemas micro-electromecánicos (MEMS). Esta tecnología ofrece una amplia gama de posibilidades para la implementación de aplicaciones que operen en ambientes con restricción en la cantidad de energía disponible, o ambientes de difícil acceso.

Se puede afirmar que una red inalámbrica de sensores es un sistema de procesamiento distribuido; sin embargo, el nivel de confiabilidad con respecto a los sistemas de procesamiento convencionales es menor, debido a que la alta probabilidad de ausencia de energía para operación hace que los nodos de la red se desconecten o no se encuentren disponibles en todo momento [2].

Este artículo aborda los detalles en el diseño del *hardware* requerido para la implementación de un nodo para una red inalámbrica de sensores, considerando

como aspectos clave la eficiencia en el uso de la energía, escalabilidad de la red y la capacidad computacional que permita operaciones básicas de procesamiento digital de señales (DSP), así como la implementación de un sistema operativo de tiempo real que flexibilice el proceso de administración de los recursos del nodo.

## Arquitectura de CRTECMOTE

El desarrollo del *hardware* requerido para implementar un nodo para una red inalámbrica de sensores responde a las necesidades de la aplicación como tal. Dado que se pretende el desarrollo de un *hardware* genérico, se realizó un estudio previo de las condiciones en las que iban a operar los nodos de la red, con el fin de optimizar su implementación en cuanto a consumo de energía y el diseño de la topología de red por utilizar.

El diseño del nodo CRTECMOTE sigue un esquema de arquitectura canónica [3] donde se pueden reconocer cuatro subsistemas básicos: (i) bloque computacional (MCU), (ii) un bloque de comunicaciones que utiliza los estándares 802.15.4 y GPRS, (iii) un bloque de sensado con la circuitería de acondicionamiento de señal y acople eléctrico para los sensores y, finalmente, (iv) un bloque encargado de suplir la energía que consume el nodo.

Seguidamente, se tratará con detalle la implementación de cada uno de los bloques y las consideraciones que se tomaron en cuenta para realizar el diseño del nodo. La

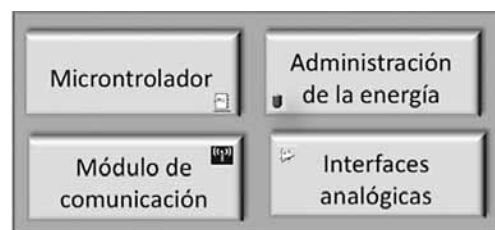


Figura 1. Bloques requeridos en un nodo de sensado.

figura 1 muestra la integración de bloques del nodo.

## Unidad de procesamiento (MCU)

El primer elemento que se analizó fue el bloque computacional, para el cual se requería que el sistema de procesamiento tuviera tres características principales: capacidad de ejecución de un sistema operativo de tiempo real, capacidad para ejecución de algoritmos básicos de procesamiento digital de señales y un set de instrucciones con capacidad de manejo del consumo de potencia que permita apagar el bloque computacional cuando no se esté utilizando.

Con estas características se encontraron varios fabricantes de microcontroladores que ofrecían la mayoría de las prestaciones requeridas, pero se optó por evaluar dos opciones, para lo cual se ubicó bibliografía especializada que permitía comparar su desempeño. Estos dos microcontroladores son el ARM CORTEX-M3 (sucesor del ARM7TDMI), manufacturado por Phillips, y el PIC32 de la compañía Microchip, que posee un núcleo de procesamiento MIPS M4K®.

Mediante un estudio realizado por la Berkeley Desing Technology Inc. se comparan el rendimiento, las fortalezas y debilidades de ambos núcleos de procesamiento, analizándolos desde varias perspectivas, pero para la elección del microcontrolador que se utilizará en CRTECMOTE se utilizó un criterio adicional a las tres características deseadas que se listaron anteriormente. Dicho criterio tiene que ver con la selección de un núcleo que presente menor relación de consumo de potencia entre Megahertz (mW/MHz).

En el caso del núcleo ARM CORTEX-M3, se obtuvo una relación de 0.084 mW/MHz, comparado con un menor consumo de 0.066mW/MHz del núcleo

M4K [4]. La comparación anterior se realiza asumiendo una síntesis de los núcleos que sea eficiente en términos de área utilizada para la implementación del núcleo. Por esta razón, se seleccionó un microcontrolador con una implementación de un núcleo M4K® y para la primera versión de CRTECMOTE se descartó la utilización de núcleos ARM.

El microcontrolador utilizado para CRTECMOTE es el PIC32MX460F512L con las siguientes características principales [5]: núcleo de procesamiento MIPS M4K® con 512KB para memoria de programa, 32KB para memoria de datos, frecuencia de operación variable entre 0 y 80 MHz, reloj de tiempo real (RTC), 16 interfaces de conversión de señales analógico a digital (ADC) de 10bits operando a 500ksps, interfaces SPI, I2C, USB, USART, entre otras.

Para realizar la programación del nodo se utilizó un compilador de lenguaje C, para el cual se seleccionó el compilador C32, que se basa en GCC. Otra de las ventajas se identifica a nivel de bibliotecas desarrolladas para tareas de DSP (MIPS DSP), pues permiten la implementación de algoritmos con filtros, correlación, FFT, entre otros. Estas bibliotecas están implementadas en lenguaje C lo cual representa una ganancia en cuanto al tiempo de desarrollo de aplicaciones para el nodo CRTECMOTE.

## Protocolos de comunicación

El nodo CRTECMOTE requiere un mecanismo de comunicación con los otros nodos en la red inalámbrica de sensores. Para ello se analizaron los protocolos de comunicación comúnmente utilizados en otros nodos para redes inalámbricas de sensores.

Uno de los retos principales en el diseño del bloque comunicación de un nodo para una red inalámbrica de sensores es la administración de las colisiones en el

medio de transmisión de la información, debidas a múltiples nodos tratando de utilizar el mismo canal para realizar una transacción de información. [6] Para ello se utilizan protocolos de acceso al medio (MAC), encargados de proveer un mecanismo ordenado y sistemático para el acceso al canal físico de comunicación.

En redes de comunicación celular son ampliamente utilizados los protocolos MAC, que implementan división del tiempo, la frecuencia o código: TDMA, FDMA y CSDMA; [7] sin embargo, debido a las características de instalación, densidad de nodos por área y tipo de tráfico que se presenta en las redes inalámbricas de sensores, se requiere otra metodología de acceso al medio con la finalidad de obtener una utilización eficiente de la energía, ya que junto al bloque de procesamiento, el bloque de comunicación es uno de los dos elementos que consume más potencia dentro de un nodo para una red inalámbrica de sensores.

Al analizar los protocolos, se tomaron en cuenta la manera en que estos manejan las colisiones, el tiempo de escucha inactivo de los nodos y el tiempo de escucha activo de los nodos. Después de listar los tres elementos que podrían causar desperdicio de energía en un protocolo de acceso al medio, cabe recalcar la importancia de la sincronía y uso correcto de la base de tiempo para lograr un uso óptimo de la potencia.

CRTECMOTE fue concebido como un nodo para redes inalámbricas de sensores con características muy variables. En aplicaciones de agricultura de precisión, la densidad de nodos es elevada, mientras que en aplicaciones de monitorización de ríos, la densidad de nodos es baja, por lo que requiere un protocolo de área ancha eficiente o una infraestructura que permita la comunicación entre los distintos conjuntos de nodos a lo largo del río.

*Los nodos de función completa pueden operar en tres modos distintos: como coordinador de la red, como coordinador de una subred y como dispositivo de captura de datos. CRTECMOTE utiliza los tres modos para poder implementar una red inalámbrica de sensores. Se maneja un esquema de direccionamiento de los nodos que permite un acceso al medio ordenado buscando minimizar las colisiones de datos.*

Esta razón motivó que CRTECMOTE tuviera dos tecnologías de comunicación inalámbrica que le permitieran su funcionamiento en ambos esquemas de distribución geográfica de los nodos y, adicionalmente, estuviera optimizado para la implementación de topologías de red jerárquicas con capacidad de interacción, tanto en área local como en área ancha. Para el área local con una alta densidad geográfica de nodos se desarrollaría una interfaz con un protocolo de capa física y acceso al medio optimizado desde la perspectiva de colisiones y tiempos de escucha.

El nodo CRTECMOTE implementa la comunicación de área local utilizando el estándar IEEE 802.15.4. Este protocolo se encarga de la administración de la capa física; y el acceso al medio (MAC) para aplicaciones donde la tasa de transferencia de datos sea baja (hasta cientos de Kbps). Se manejan 27 canales a nivel de capa física, sin embargo, el protocolo no permite la utilización de más de un canal a la vez.

IEEE 802.15.4 es un protocolo híbrido entre los esquemas temporizados y basado en contención, y una de las características principales es que es asimétrico: los nodos dentro de la red pueden tener funciones distintas. Esto lo hace idóneo para implementar una topología de red jerárquica.

A nivel de acceso al medio se distinguen dos tipos de nodos: los nodos con función reducida y los nodos con función completa.

Los nodos de función completa pueden operar en tres modos distintos: como coordinador de la red, como coordinador de una subred y como dispositivo de captura de datos. CRTECMOTE utiliza los tres modos para poder implementar una red inalámbrica de sensores. Se maneja un esquema de direccionamiento de los nodos que permite un acceso al medio ordenado buscando minimizar las colisiones de datos. La implementación de IEEE 802.15.4 para el nodo CRTECMOTE se hace a través

del transceptor MRF24J40 de la compañía Microchip.

Este transceptor, mediante modulación O-QPSK, opera la capa física en los 16 canales del espectro de 2.4 GHz, con un ancho de banda máximo de 250 Kbps [8]. Se puede lograr una red con máximo 1024 nodos, de los cuales solo 1016 serían nodos de captura de información. La primera implementación de topología para redes con nodos CRTECMOTE utiliza la topología de red en estrella; sin embargo, en la segunda fase se implementará capacidad para topología de árbol. Una de las ventajas de utilizar el transceptor MRF24J40 es la disponibilidad de un API con la programación de la pila de protocolo. Esto redujo el tiempo requerido de integración al nodo. La comunicación entre el transceptor MRF24J40 y el MCU PIC32 se hace por el protocolo SPI [9].

En el esquema de topología de red jerárquica se le asigna la prioridad más alta al nodo sumidero, luego a cada coordinador de red (coordinador PAN) y este, bajo la implementación estrella, administra la jerarquía de la red del área local. Un reto surge para determinar la tecnología que sirve como puente entre el coordinador PAN y el nodo sumidero. Se requiere que dicha tecnología minimice la instalación de infraestructura adicional para extender la cobertura de la WSN, esto por una razón fundamental: costo.

CRTECMOTE se diseñó con dos interfaces USB y en una de ellas instaló un modem GSM con capacidad para la operación del protocolo GPRS, el cual permite la utilización de la red de telefonía celular para tráfico de datos. Se pueden lograr velocidades hasta de 40 Kbps en un esquema de acceso al medio compartido por múltiples usuarios (coordinadores PAN).

La operación del protocolo GPRS distingue dos tipos de nodos en la red: los denominados nodos de servicio (SGSN), que en el caso de CRTECMOTE van a ser



los nodos coordinador PAN, y el nodo de compuerta (GGSN), que en el caso de la red de sensores será el nodo sumidero. El nodo sumidero se implementará en un punto donde se pueda centralizar la información, organizarla y darle un formato adecuado para la toma de decisiones de acuerdo con cada aplicación.

En síntesis, el nodo CRTECMOTE es capaz de implementar múltiples tecnologías de comunicación que permiten una escalabilidad versátil y una topología de red adaptable a la aplicación específica con la que se utilice el nodo.

### Acople de sensores

Las aplicaciones de monitorización y control de variables para aplicaciones en la protección del medio ambiente requieren que los nodos de recolección de datos tengan la capacidad para lectura y escritura de variables o valores analógicos. Por esta razón se hace importante en el nodo un bloque que administre el acople de sensores para registrar la información. El microcontrolador PIC32 posee un módulo de convertidor de analógico a digital (ADC) con capacidad de muestrear, con una resolución aproximada de 3.223 mV/bit, operando con una tensión eléctrica de 3.3V.

Ahora, muchos de los sensores y transductores que se utilizan en procesos de monitorización de variables ambientales presentan una señal de salida con una corriente de 0-20 mA. La situación anterior implica que se debe utilizar un circuito de acondicionamiento de señal que permita un ajuste de la curva de salida de los sensores al rango de voltaje de entrada aceptado por el microcontrolador PIC32.

CRTECMOTE posee una interfaz de acople para al menos 10 sensores estándar con salida de 0-20 mA, cumpliendo el objetivo de diseño en cuanto a cantidad de sensores por nodo que se planteó como requerida para aplicaciones de protección del medio ambiente.

### Administración de la energía

Una de las principales preocupaciones en el diseño del nodo es el mecanismo suplidor de energía; en este caso, se utilizó una batería convencional de 9V, de la cual, por medio de reguladores de corriente directa LP38369, se derivan las tensiones eléctricas de 3.3V necesarias para la alimentación del nodo.

Adicionalmente, se implementó el *hardware* necesario para alimentación continua del nodo CRTECMOTE.

En una red inalámbrica de sensores implementada con nodos CRTECMOTE se pueden diferenciar dos modos de consumo de energía. El primero, cuando se usa CRTECMOTE como sistema de adquisición de datos donde se utilizan la interfaz de acople con los sensores, y la interfaz de comunicación de área local MIWI™. Para este perfil se optimiza el consumo de potencia evitando que el nodo realice actividades de procesamiento y eliminando la interfaz de comunicación de área ancha GPRS. Este sería un nodo con función reducida. En el perfil descrito anteriormente se minimiza el consumo de energía y se maximiza la duración de la batería que alimenta al nodo.

El segundo perfil de consumo de potencia para CRTECMOTE es cuando se usa el nodo como coordinador. En este perfil, el nodo recibe información por medio de la interfaz 802.15.4 (MIWI™), realiza procesamiento, toma decisiones e interactúa con el nodo sumidero. El segundo perfil maximiza el rendimiento del nodo CRTECMOTE, por lo cual requiere un sistema de alimentación eléctrica continuo. Debido al esquema de instalación de las redes WSN, los nodos CRTECMOTE coordinadores requieren una ubicación con mejores facilidades para la operación, mientras que los nodos recolectores de información operan en un ambiente de restricción de energía. Esa es una de las ventajas funcionales de CRTECMOTE, pues se puede configurar para diferentes modos de operación de

acuerdo con su función dentro de la red inalámbrica de sensores.

## Conclusiones

CRTECMOTE permite la implementación de diferentes topologías de redes inalámbricas de sensores debido a la versatilidad en la selección de operación que posee.

Además, maximiza la utilización de la energía por medio de la selección de un núcleo de procesamiento de última generación.

También implementa protocolos de comunicación que han sido ampliamente probados y utilizados en redes inalámbricas de sensores, lo cual permite confiabilidad en la tecnología utilizada para la transferencia de la información.

Igualmente, ofrece la posibilidad de instalación de al menos diez sensores por nodo, manteniendo un compromiso con el consumo de energía de este. De igual forma, puede operar en dos modos de consumo de energía según la función que realice dentro de la WSN, lo cual brinda versatilidad en aplicaciones que requieran movilidad del nodo.

Asimismo, es un nodo con arquitectura abierta a nivel de *hardware*, lo cual constituye un atractivo para ser utilizado en aplicaciones de investigación científica donde se requiera la implementación de redes inalámbricas de sensores con el menor costo y la mayor versatilidad posible.

Finalmente, es un nodo especializado en aplicaciones de recolección y análisis de datos para protección del medio ambiente que requieran cobertura geográfica extendida o con alta densidad de puntos de medición, pues se puede escalar la cantidad de nodos a prácticamente cualquier tamaño.

## Bibliografía

- [1] Ian F. Akyildiz, Weilian Su, Yogesh Sankarasubramaniam, and Erdal Cayirci, *A Survey on Sensor Networks*, IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 8, pp. 102-114, August 2002.
- [2] Ryo Sugihara and Rajesh K. Gupta, *Programming Models for Sensor Networks: A Survey*. ACM Transactions on Sensor Networks, Vol. 4, No. 2, Article 8, Publication date: March 2008 pp 8:2
- [3] Vijay Raghunathan, Curt Schurgers, Sung Park and Mani B. Srivastava. *Energy efficient design of wireless sensor networks* Wireless sensor networks. ISBN 1-4020-7884-6. 2004. pp 53.
- [4] Berkeley Design Technology Inc. staff, *An independent analysis of the: MIPS Technologies MIPS32® M4K™ synthesizable processor core*. www.BDTI.com , 2007. pp 6
- [5] PIC32MX3XX/4XX Family Data Sheet. Microchip Technologies Corp. 2008. En el sitio www.microchip.com . pp 9
- [6] Ye Wei, Heidemann John, *Medium access control in wireless sensor networks*, Wireless sensor networks. ISBN 1-4020-7884-6. 2004. pp 74.
- [7] T.S.Rappaport. *Wireless communications, principles and practice*. Prentice Hall, 1996.
- [8] Karl, Holger. *Protocols and architectures for wireless sensor networks*. John Wiley and sons Ltd. 2006. pp 140.
- [9] David Flowers and Yifeng Yang. *MiWi™ Wireless Networking Protocol Stack AN1066*, 2007. Microchip Technology Inc.

## Bibliografía consultada

- F. Boekhorst (2002). *Ambient intelligence: The next paradigm for consumer electronics*, Proceedings IEEE ISSCC 2002, San Francisco.
- IEEE 802.15 WPAN™ Task Group 4 (TG4), <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4.html>
- The Zigbee Alliance, <http://www.zigbee.org>
- IEEE 1452.2 (1997). *Standard for a Smart Transducer Interface for Sensors and Actuators - Transducer to Microprocessor Communication Protocols and Transducer Electronic Data Sheet (TEDS) Formats*, IEEE.
- S. Madden (2003). *The Design and Evaluation of a Query processing Architecture for Sensor Networks*, Ph.D. Dissertation, UC Berkeley.
- W. Adije-Winoto, E. Schwartz, H. Balakrishnan, J. Lilley (1999). *The design and implementation of an Intentional Naming System*, in Proceedings of Symposium on Operating Systems Principles, Dec.