

# Protocolo MAC aplicado a 802.15.4 eficiente en el consumo de energía

## 802.15.4 MAC protocol applied to efficient energy consumption

Juan Miguel Hernández Ontiveros<sup>1</sup>, Everardo Inzunza González<sup>2</sup>, Jesús Everardo Olguín Tizado<sup>3</sup>, Jana Juracy Soares López<sup>4</sup>, Pablo Andrés Rousseau Figueroa<sup>5</sup> y Claudia Camargo Wilson<sup>6</sup>.

### RESUMEN

Este trabajo se enfoca al problema de encontrar un protocolo de acceso al medio para que los nodos de un mismo grupo puedan comunicarse eficientemente dentro de la ventana de actividad que les corresponde. De esta manera, los nodos ahorran energía mediante el apagado de su subsistema de comunicaciones durante el tiempo en que no tienen que intercambiar información. El objetivo principal de este trabajo es el de que los nodos se enfoquen principalmente en la eficiencia de energía y la entrega de paquetes que toman en cuenta requerimientos de calidad de servicio, comparando su rendimiento contra un protocolo llamado SMAC; los parámetros comparados son: el tiempo que duran dormidos los nodos, su consumo de energía y su retardo promedio. La realización de este trabajo se hizo con la herramienta de simulación OPNET Modeler versión 11.5.A PL3, de la compañía OPNET Technologies Inc. Esta técnica mejora ampliamente el desempeño "PCF + Dormir" propuesto en este trabajo, al anterior, nombrado SMAC.

**Palabras clave:** redes inalámbricas de sensores (WSN), protocolos de control de acceso al medio (MAC), calidad de servicio (QoS), uso eficiente de energía.

### ABSTRACT

This work focused on the problem of finding a suitable medium access control protocol so that the nodes of a given cluster could communicate efficiently within their respective activity window. The nodes thus saved energy by turning off their transceivers during the time that they did not have to exchange information. This work's main objective was to ensure that the nodes were mainly focused on energy efficiency and delivering packages, taking quality of service (QoS) requirements into account and comparing their performance to an existing protocol called sensor medium access control (S-MAC). The parameters being compared were the time that the nodes were asleep, energy consumption and average delay. This work was completed by using the OPNET simulator tool (OPNET Modeler, version 11.5.A PL3, OPNET Technologies Company Inc). This approach greatly improved the "PCF + Sleep" performance proposed in this work over the earlier S-MAC.

**Keywords:** wireless sensor networks (WSN), medium access control (MAC) protocol, quality of service (QoS), energy efficiency.

Recibido: febrero 27 de 2009

Aceptado: marzo 19 de 2010

### Introducción

Una red inalámbrica de sensores (WSN) (IEEE, 2003) es una red de área local inalámbrica autoconfigurable (WLAN) (IEEE, 1999) a través de la cual las terminales equipadas con un tipo de sensor transmiten los parámetros medidos a un conjunto predeterminado de receptores de información.

Dado que la tecnología de WSN se desarrolla hacia tasas más altas de transmisión, tiene sentido pensar en el sensado y la transmisión de información en tiempo real, como audio y video. Estas aplica-

ciones necesitan que el sistema sea capaz de ofrecer garantías de calidad de servicio (QoS).

Artículos publicados en este tema incluyen la propuesta de asignación de recursos y métodos de calendarización para las WLAN basadas en OFDM (Zhang, 2006), compromisos entre la eficiencia en la velocidad y un eficiente uso de la energía en los protocolos MAC (Fawal, 2005), un método de traspaso rápido entre la WLAN y una red IP móvil basada en el conocimiento de la topología (Ye, 2002), un método para investigar el impacto de la capa física en la capa MAC en cuanto a la QoS que ofrece en la entrega de paquetes (Song, 2005), entre otros. Finalmente, Tseng (2005) describe

<sup>1</sup>Ingeniero electrónico. M.Sc., en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. Profesor de carrera asociado C, Facultad de Ingeniería y Negocios San Quintín, Universidad Autónoma de Baja California, México. [juan\\_miguel@uabc.edu.mx](mailto:juan_miguel@uabc.edu.mx)

<sup>2</sup>Ingeniero electrónico. M.Sc., en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. Profesor de carrera titular C, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, México. [einzunza@uabc.edu.mx](mailto:einzunza@uabc.edu.mx)

<sup>3</sup>Ingeniero industrial. M.Sc., en Ciencias en Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Sonora, México. Profesor de carrera titular B, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, México. [jeol79@uabc.edu.mx](mailto:jeol79@uabc.edu.mx)

<sup>4</sup>M.Sc., en Ciencias de la Tierra, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California, México. Profesora de carrera titular B, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, México. [juracy@uabc.mx](mailto:juracy@uabc.mx)

<sup>5</sup>Ingeniero civil, M.Sc., en Ingeniería Hidráulica, Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, La Habana, Cuba. Profesor de carrera titular C, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, México. [pablorousseau@uabc.edu.mx](mailto:pablorousseau@uabc.edu.mx)

<sup>6</sup>Ingeniera industrial. México. M.Sc., en Ciencias en Ingeniería Industrial, Instituto Tecnológico de Hermosillo, Sonora, México. Profesor de carrera titular B, Facultad de Ingeniería Ensenada, Universidad Autónoma de Baja California, México. [ccamargo@uabc.edu.mx](mailto:ccamargo@uabc.edu.mx)

un protocolo basado en contienda cuyo principal objetivo es conservar la energía en las redes de sensores. SMAC establece un ciclo de trabajo bajo para la operación de los nodos, además reduce el escuchar inactivamente mediante la desactivación periódica de los nodos, apagando completamente el transmisor/receptor. SMAC utiliza el mismo procedimiento tanto en RTS/CTS/DATA/ACK como en IEEE 802.11.

SMAC es el artículo que motiva la creación de este trabajo, solo que nosotros tomamos en cuenta la calidad de servicio QoS, además de que los nodos tendrán la posibilidad de estar en un modo de baja energía (dormidos) por un tiempo mayor, esto por cuanto un nodo que no tenga qué transmitir se irá a dormir antes que los demás miembros de su agrupamiento, evitando mantener despiertos a nodos innecesariamente y logrando con ello alargar la vida de la red, con lo cual se pretende mejorar los resultados obtenidos en SMAC. Cabe mencionar que se utilizará un simulador de redes llamado OPNET, en el cual se modificó el modelo de procesos de la subcapa MAC del estándar 802.11.

La organización de este trabajo es la siguiente: en la introducción se presenta el trabajo previo de otros autores que han abordado diferentes métodos para el ahorro de energía, posteriormente se muestra el desarrollo de un nuevo modelo propuesto en este trabajo de investigación, en donde se abarca el tema de mandar a dormir a los nodos de una manera más eficiente comparándolo con el llamado SMAC; en la siguiente sección se habla sobre las consideraciones de los parámetros utilizados y, aunado a esto, se explican los resultados obtenidos, en donde las variables medidas son el tiempo dormido del nodo, el consumo de energía y su retardo promedio. Finalmente, se escriben las conclusiones obtenidas y se anexa cuál sería el trabajo futuro deseable para la continuación de la investigación.

### Modelo PCF + DORMIR propuesto

La propuesta de este trabajo está basada en la modificación del protocolo PCF, de manera que le dé oportunidad a los nodos de ir a dormir después de ciertas condiciones, logrando con esto que ahorren energía y tomando en cuenta requerimientos de calidad de servicio.

Nuestra propuesta de la PCF es llamada PCF + Dormir y las modificaciones que tiene son las siguientes:

1. Lo primero que se modificó: que cada nodo sea encuestado una sola vez.
2. Se agregó un nuevo estado que denominamos *sleep* dentro del modelo de procesos, correspondiente a la subcapa MAC del estándar IEEE 802.11. El estado *sleep* permite que los nodos manden sus radios a dormir para conservar energía. Los nodos, individualmente, controlan su estado de dormir mediante la calendarización apropiada de autointerrupciones de dormir y despertar.
3. Lo siguiente que se tomó en cuenta y se agregó a nuestra propuesta fue la de no volver a encuestar dentro de una ventana de actividad dada a aquellos nodos que explícitamente avisen el no tener datos por transmitir.
4. Acabando un nodo de transmitir, se va a dormir.
5. Si estando en el estado de transmitir se detecta que cuanto resta de la ventana de actividad no es suficiente para transmitir una trama completa, además de apagar su transmisor y receptor, los nodos antes de irse a dormir tendrán que hacer lo que hubieran hecho en caso de ser una transmisión no exitosa, es decir, dejar la

trama en la cola de transmisión y volver a intentarlo después, pero sin incrementar el contador de intentos.

6. Todos los nodos de cada agrupamiento deben estar conscientes del tiempo de despertar y de irse a dormir, de manera que todos los nodos lo primero que hacen al despertarse es activar una auto-interrupción necesaria para irse a dormir a más tardar al final de la ventana, y posteriormente activar la segunda autointerrupción requerida para despertarse en la siguiente supertrama.

7. La PCF + Dormir tiene una función que mide la energía consumida, la cual toma en cuenta aquella que se está consumiendo en los diferentes estados en que puede estar un nodo. Hay tres grupos de estados: *Transmitiendo*. Es cuando el nodo se encuentra en el estado TRANSMIT de *opnet*, transmitiendo alguna trama. *Durmiendo*. Esto sucede cuando el nodo se encuentra en el estado nuevo de SLEEP de *opnet*, y no está transmitiendo ni escuchando el medio. *No transmitiendo*. Este ocurre cuando el nodo no está transmitiendo pero tiene al receptor encendido. Se puede estar aquí si el nodo se encuentra en los estados IDLE, DEFER, BACKOFF, BACKOFF\_NEEDED, FRM\_END, WAIT\_FOR\_RESPONSE y SCAN.

Los valores de la corriente consumida por un nodo durante la transmisión, la recepción, o mientras duerme, se encuentran en la tabla 1 y fueron obtenidos por Brownfield (2006).

Tabla 1. Valores para el cálculo de la corriente consumida.

Promedio de corriente consumida mientras recibe (A)	0.02156
Promedio de corriente consumida mientras transmite (A)	0.0184
Promedio de corriente consumida mientras duerme (A)	0.0000376
Voltaje de la batería usada (V)	3
Energía inicial de un nodo (J)	3240

En el campo de las redes de telecomunicaciones se ha experimentado un crecimiento exponencial en el número de usuarios a nivel mundial, dando lugar a la necesidad de su sofisticación. Por ello se tiene como prioridad disponer de un simulador de red que ofrezca herramientas potentes con el objetivo de crear modelos, simular su operación, así como obtener y analizar sus parámetros de desempeño. OPNET Modeler es capaz de simular una gran variedad de redes. El flujo de mensajes de datos, paquetes perdidos, mensajes de control de flujo, caídas de los enlaces, son algunas de las opciones que nos permite estudiar este simulador, proporcionando a las universidades e ingenieros la forma más efectiva de demostrar los diversos tipos de redes y protocolos.

### Parámetros considerados

Para llevar a cabo el proceso de simulación del sistema implementado a través de OPNET se utilizaron 6 estaciones, 1 es el PC, y las otras 5 son las estaciones normales. El ciclo de trabajo de nuestros nodos es de 15%. La ventana de actividad es de 0,5 segundos y la tasa de transmisión de cada nodo, de 10 kbps.

### Resultados

Se realizaron simulaciones con duración de 1 hora y se obtuvieron gráficas de las 6 estaciones, además del agrupamiento en general; sin embargo, sólo se presentan en este trabajo los resultados obtenidos en el agrupamiento en general en el entendido de que toda la red tuvo comportamiento semejante.

A continuación se muestran, a través de gráficas, los resultados obtenidos de las simulaciones del modelo propuesto llamado PCF + Dormir y del SMAC (Ye, 2002). Dichos resultados son del tiempo dormido, del consumo de energía y del retardo promedio.

### Simulación del tiempo dormido

La figura 1 comprende el tiempo dormido del agrupamiento. En ella se puede apreciar cómo es mayor el tiempo dormido de nuestro modelo propuesto PCF + Dormir que el de SMAC, mientras que en la tabla II se observa el tiempo dormido por nodo.

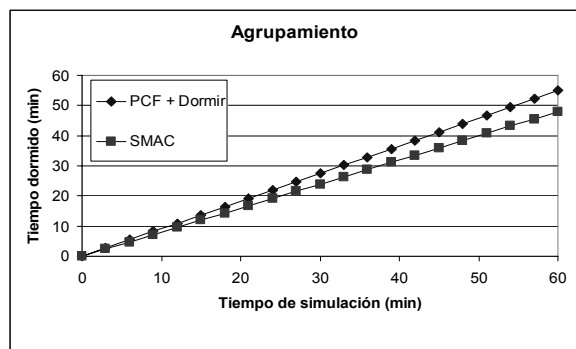


Figura 1. Gráfica del tiempo dormido del agrupamiento.

Tabla 2. Tiempo dormido por nodo del agrupamiento.

	Tiempo dormido (min)	
	PCF + Dormir	SMAC
Nodo 1	58.4067633	49.74625
Nodo 2	56.907002	49.3566667
Nodo 3	55.4074627	49.2575
Nodo 4	53.9080515	49.66125
Nodo 5	52.408839	49.8454167
Nodo PC	52.365396	39.92875

Como puede notarse en la tabla II, el mayor tiempo dormido en todos los nodos, incluyendo el nodo PC, sigue siendo el del modelo PCF + Dormir. Además, se ve claramente cómo es que el nodo PC del modelo propuesto duerme alrededor de 12 minutos más que el nodo del modelo SMAC.

### Simulación del consumo de energía

La figura 2 se refiere al consumo de energía del agrupamiento. En ella se puede apreciar cómo es menor el consumo de energía de nuestro modelo propuesto PCF + Dormir que el de SMAC. En la tabla III se indica el consumo de energía por nodo.

Como puede notarse en la tabla III, el menor consumo de energía en todos los nodos incluyendo el nodo PC, sigue siendo el del modelo PCF + Dormir. Además, se vuelve a mostrar cómo es que el nodo PC del modelo propuesto consume menos de la tercera parte de la energía que el nodo PC del modelo SMAC.

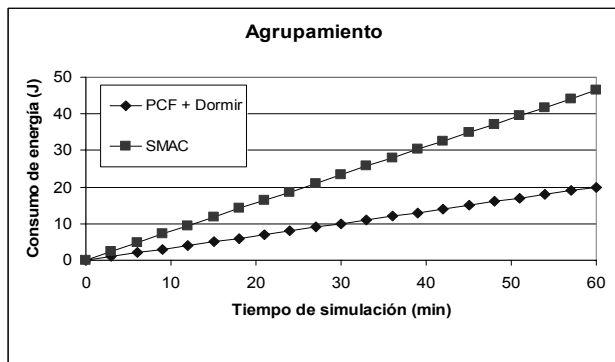


Figura 2. Gráfica del consumo de energía del agrupamiento.

### Simulación del retardo promedio

La figura 3 revela el retardo promedio del agrupamiento. En ella constatamos cómo ambos retardos se mantienen constantes, además el retardo en PCF + Dormir es menor que en SMAC, por lo cual podemos decir que nuestro protocolo es mejor.

Tabla 3. Consumo de energía por nodo del agrupamiento.

	Consumo de energía (J)	
	PCF + Dormir	SMAC
Nodo 1	6.619353	39.808219
Nodo 2	12.429385	41.349056
Nodo 3	18.238727	41.752225
Nodo 4	24.047533	40.169937
Nodo 5	29.855583	39.448295
Nodo PC	28.797648	76.231106

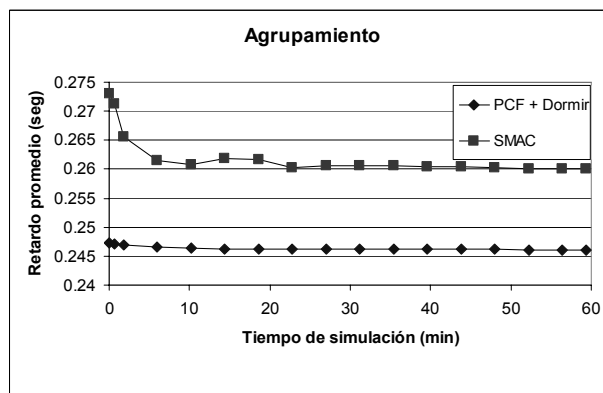


Figura 3. Gráfica del retardo promedio del agrupamiento.

### Conclusiones

El trabajo desarrollado en este artículo fue la implementación de un nuevo esquema de acceso al medio en el que los nodos vecinos que necesitan comunicarse directamente se coordinan de tal manera que ahorran energía mediante el apagado de su subsistema de comunicaciones durante los períodos en los cuales no tienen información por intercambiar. Este mecanismo de acceso al medio está basado en el protocolo PCF (función de coordinación puntual) descrito en el estándar de redes inalámbricas IEEE 802.11. Se tomaron en cuenta también los requerimientos de calidad de servicio en el sentido de que la frecuencia con que se presentan las ventanas de actividad coordinada y el tamaño de las mismas son suficientes para la transmisión oportuna del tráfico que se está generando. Como resultado de nuestro trabajo podemos decir que el nodo que más tiempo permaneció despierto y por lo tanto fue el que consumió mayor energía fue el PC, los demás nodos consumieron menor energía y se fueron desgastando poco a poco. Se concluye también que nuestro modelo propuesto, llamado PCF + Dormir, presenta un considerable ahorro de energía de todos los nodos sobre el modelo SMAC, además de tener menor retardo promedio. Una Investigación futura sobre este trabajo podría ser la implementación del modelo PCF + Dormir dentro de dispositivos reales (*motes*) de manera que se pueda comparar el funcionamiento del protocolo de forma física y simulada. Además se podría investigar sobre la implementación de un protocolo *cross-layer* para el descubrimiento de topología, con selección de ruta y reservación, y mecanismos de control de acceso al medio para una red inalámbrica de sensores, implementando todo esto nuevamente en un dispositivo real (*motes*) de manera física

## Bibliografía

- AENOR IEEE., Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications., ANSI/IEEE Standard 802.11., 1999.
- IEEE, Inc., Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)., IEEE Std. 802.15.4, New York. 2003.
- Brownfield M., Fayez A., Nathaniel D., Wireless Sensor Network Radio Power Management. <http://www.opnet.com>. Consultado en febrero de 2006.
- Fawal A., Le Boudec J., Merz R., Radunovic B., Widmer J. Maggio G., Trade-off Analysis of PHY-Aware MAC in Low-Rate Low-Power UWB Networks., IEEE Communications Magazine, 43 (12), 2005, pp. 147-155.
- Song G, Li Y., Utility-Based Resource Allocation and Scheduling in OFDM-Based Wireless Broadband Networks., IEEE Communications Magazine, 43 (12), 2005, pp. 127-134 p.
- Tseng C., Yen L., Chang C., Hsu, K., Topology-Aided Cross-Layer Fast Handoff Design for IEEE 802.11/Mobile IP Environments., IEEE Communications Magazine, 43 (12), 2005, pp. 156-163.
- Ye W., Heidemann J., Estrin, D., An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks., IEEE INFOCOM, New York City, NY. 3, 2002, pp. 1567-1576.
- Zhang X., Tang J., Chen H., Ci S., Guizani., Cross-layer-based modeling for quality of service guarantees in mobile wireless networks., IEEE Communications Magazine. 44 (1), 2006, pp. 100-106.