

Análisis de desempeño de protocolos MAC para Redes Inalámbricas de Sensores

Luis García-Morales, Antonio Guerrero-Ibáñez y Carlos Flores-Cortés

Universidad de Colima, Facultad de Telemática, Av. Universidad #333,
28040 Colima, México

{lgmorales, antonio_guerrero, cfcortes}@ucol.mx

(Paper received on June 30, 2013, accepted on August 15, 2013)

Abstract. Las redes inalámbricas de sensores (WSN) han evolucionado en los últimos años. Sin embargo, la clave para el éxito de comunicación radica en el protocolo de la capa MAC que se utilice en las WSN. En este trabajo se evalúan dos de los protocolos de esta capa que se utilizan como base para el diseño de propuestas de nuevos protocolos MAC. Los resultados muestran el rendimiento de éstos dentro de escenarios de redes WSN fijas y móviles. Además marcan la pauta para identificar las limitantes de estos protocolos y que sirvan de base para la creación de un nuevo protocolo para la aplicación de WSN en entornos de monitoreo de variables marinas.

Keywords: WSN, T-MAC, S-MAC, protocolo MAC, consumo energético.

1 · Introducción

En las últimas décadas los sistemas de comunicaciones modernos han comenzado a explotar las capacidades únicas de las tecnologías inalámbricas. Estas tecnologías inalámbricas han abierto las puertas a tecnologías novedosas que hacen a las comunicaciones inalámbricas una primera opción para un amplio rango de aplicaciones dentro de una gran variedad de dominios. Dentro de una gran variedad de sistemas inalámbricos, una nueva tecnología ha captado la atención de los investigadores y desarrolladores de aplicaciones: las redes inalámbricas de sensores o WSN (por sus siglas en inglés – *Wireless Sensor Networks*). WSN es una red inalámbrica formada de dispositivos autónomos distribuidos espacialmente que trabajando de forma colaborativa monitorean condiciones ambientales o físicas, como por ejemplo: temperatura, sonido, vibraciones, presión, contaminación, en diferentes locaciones [1].

Uno de los entornos que se ha convertido en un área de interés científico desde hace varios años es la monitorización de las zonas marinas costeras. El interés radica en que estas zonas son vulnerables a la influencia de la actividad humana con el desarrollo industrial, turístico y urbanístico.

Como parte de los esfuerzos se ha visualizado la necesidad de crear los sistemas de observación costeros (SOC), tanto *in situ* como remotos con el objetivo de realizar los estudios de monitoreo [2].

Este nuevo entorno plantea nuevos retos distintos a los que surgen en otros ambientes, como el impacto del medio marino en la conectividad inalámbrica de los nodos, ya que el movimiento de éstos causado por las mareas, olas, corrientes, etc. representa un serio problema que afecta gravemente la calidad de la comunicación dentro de la WSN. Aunado a esto, realizar pruebas en entornos reales, para un escenario que incluya decenas o incluso centenas de nodos, se vuelve un proceso significativamente más demandante, tanto en tiempo como en presupuesto, en comparación con llevar a cabo simulaciones, las cuales proveen una manera más fácil y relativamente rápida de evaluar las propuestas [3].

Una de las claves para el éxito de estas redes es el control que se tenga en la capa de acceso al medio o MAC. Un protocolo MAC sirve de soporte para los protocolos de más alto nivel. Los protocolos de esta capa afectan directamente la disipación de energía, además de que son clave para especificar la latencia y el nivel de seguridad del sistema entre otras cosas.

En este trabajo se realiza el análisis de desempeño de dos de los protocolos de la capa MAC definidos para redes WSN. La evaluación se lleva a cabo a través del uso de simulaciones utilizando la herramienta Castalia, la cual es un simulador de WSN de código libre que sirve para validar algoritmos de alto nivel antes de adentrarse a plataformas específicas de sensores [4]. Esta herramienta se ejecuta como módulo adicional sobre el simulador Omnet++. Las métricas que se evalúan son el impacto de cada protocolo en relación al consumo de energía, el porcentaje de paquetes perdidos y la cantidad de paquetes recibidos por un nodo *SINK* en la red, según las topologías planteadas.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección dos se explica en forma general los protocolos MAC que se evaluarán. La sección tres describe el escenario y los casos de estudio que se utilizarán en la evaluación. Los resultados de la evaluación se discuten en la sección cuatro de este artículo. Finalmente, este artículo termina con una discusión sobre las conclusiones y el trabajo futuro a desarrollar.

2 Descripción de los Protocolos T-MAC y S-MAC

Los protocolos T-MAC (Time-Out MAC) [5] y S-MAC (Sensor-MAC) [6] han sido motivo de investigación como lo muestra la literatura. Estos protocolos se utilizan como base para la creación de nuevos protocolos basados en contención. Por esta razón, como parte del proyecto de investigación que se está desarrollando es necesario entender el funcionamiento de estos protocolos y analizar su desempeño dentro de un ambiente y condiciones similares a las del proyecto. Como las WSN están siendo aplicadas en entornos con condiciones complicadas (como las hay en el nuestro) es necesaria la comparación de esos dos protocolos considerando esas situaciones.

2.1 Protocolo S-MAC

El protocolo S-MAC es un protocolo basado en contención diseñado específicamente para redes WSN. Éste define un método "Listen and Sleep" periódico para evitar los tiempos de escucha "Idle" y reducir el desperdicio de energía (ver fig. 1a). Cada nodo debe seguir un programa *listen and sleep* periódico. Durante la fase *listen* los nodos monitorean la red, si encuentran un *idle*, se comunican con otros nodos. Cuando un ciclo *sleep* se presenta, el nodo tratará de dormir apagando su radio. Con esto se reducen los tiempos de escucha *idle*.

Este protocolo propone una operación *low-duty-cycle* que está enfocada a reducir el consumo de energía. Al ciclo completo del periodo *listen and sleep* se le llama un marco. Durante el tiempo *sleep* el nodo tratará de apagar su radio si es posible, con lo cual se evita un consumo de energía causado por escuchas *idle* en lapsos sobre todo donde la carga de tráfico es ligera. Los nodos en la red se organizan en *cluster* virtuales y comparten un calendarizador de sincronización para los periodos de *listen and sleep*. Como pueden existir diferentes *clusters*, los nodos utilizan un paquete *SYNC* periódico para encontrar a sus vecinos y a este proceso se le denomina *PND* (por sus siglas en inglés -*Periodic Neighbor Discovery*). El protocolo S-MAC esencialmente cambia la energía usada por *throughput* y latencia. El *throughput* se reduce porque solamente la parte *active* del marco se utiliza para comunicación. Por otro lado la latencia se incrementa porque un evento generador de mensaje puede ocurrir durante un tiempo *sleep*.

2.2 Protocolo T-MAC

El protocolo T-MAC es un protocolo hijo del protocolo S-MAC y se desarrolló como una mejora sobre éste. Aunque se puede decir que desde el punto de vista de implementación S-MAC es más sencillo de implementar y se obtienen resultados bastante buenos. Por otro lado, T-MAC utiliza un parámetro denominado *activation time out* que proporciona un ciclo de trabajo flexible ya que el nodo sensor se puede poner en estado dormido si no escucha nada durante el periodo *activation time out*. Esta técnica reduce el ciclo de trabajo si no existen mensajes que escuchar y al mismo tiempo reduce el consumo de energía en los periodos donde se coloca en estado de dormido.

El protocolo T-MAC transmite todos los mensaje en una ráfaga de longitud variable y existe un espacio de tiempo entre ráfagas que se denomina tiempo *sleep/sleep*. Este se utiliza para reducir la escucha *idle*. Un nodo despierta periódicamente para comunicarse con sus vecinos utilizando el esquema RTS/CTS y ACK que proporciona transmisiones confiables y evita colisiones. En este proceso los mensajes se almacenan en un *buffer* y se genera un marco para transmitir los mensajes contenidos durante el tiempo *active*. Este periodo termina cuando no existe ningún evento activo por un periodo de tiempo *TA* por lo tanto el nodo cambia al modo *sleep*. Sin embargo, en periodos de alta carga, los nodos se comunican continuamente sin pasar al estado *sleep* (ver fig. 1b).

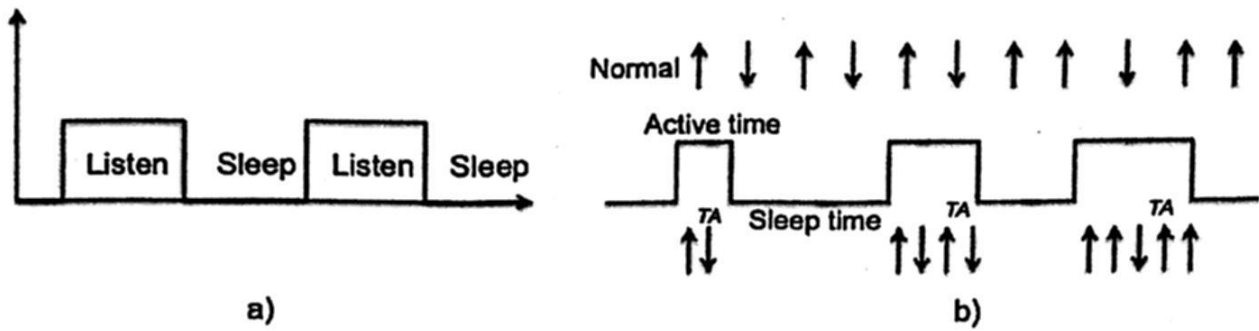


Fig. 1. Representación de funcionamiento de protocolos MAC. a) S-MAC, representando su modo de operación *listen* and *sleep*. b) T-MAC, representando los tiempos *active* y *sleep*, así como el periodo de tiempo *TA*.

3 Casos de estudio

Como parte del estudio, se consideraron dos casos para analizar, en los cuales se hizo la comparativa de ambos protocolos de capa MAC utilizados ampliamente en WSN: S-MAC y T-MAC. A continuación se describe detalladamente cada caso en particular.

3.1 Caso I

Este caso plantea una situación donde todos los nodos que se utilizan dentro del escenario de evaluación tienen un comportamiento estático, es decir, no tienen movilidad. Además todos los nodos tienen que enviar la información recolectada a un punto central, el cual se denomina *SINK*. Un punto relevante que se debe resaltar es que todos los nodos tienen una comunicación directa con el *SINK*, con lo cual es lógico que se produzcan interferencias entre ellos mismos al momento de realizar el proceso de envío/recepción de datos.

3.2 Caso II

En el segundo caso la distribución inicial de los nodos es la misma, sin embargo, la principal variación con respecto al caso anterior es que en éste se añade cierta "movilidad" a los nodos recolectores. Los parámetros generales de la simulación son los indicados en la tabla 1 y la figura 2 describe el movimiento que sigue cada uno de los nodos para este segundo escenario.

Con esta variación se pretende comparar el comportamiento de los protocolos S-MAC y T-MAC, cuando los nodos recolectores presentan algún tipo de movilidad, en cuanto a su desempeño en cuestión de consumo de energía, paquetes perdidos y paquetes recibidos en el *SINK* principalmente.

4 Evaluación y resultados

En esta sección primeramente se explica el escenario de simulación definido para la evaluación de los casos de estudio descritos en la sección anterior. Posteriormente se discuten los resultados obtenidos en la simulación. En este caso se analizan los resultados obtenidos por cada una de las métricas definidas para los casos de estudio y se realiza el comparativo obtenido por cada uno de los protocolos MAC evaluados con el objetivo de poder tomar decisiones sobre el trabajo futuro de este proyecto de investigación.

Para la evaluación de los casos de estudio, se hizo uso del simulador *Castalia*. Este simulador está diseñado especialmente para redes de sensores inalámbricas y utiliza las características de Omnet++ [7]. Omnet++ es una herramienta de simulación de eventos discretos con la filosofía de código abierto. El lenguaje de desarrollo está basado en C++ y además proporciona una interfaz gráfica basada en *Eclipse* [8].

4.1 Escenario de simulación

El escenario de simulación utilizado plantea un entorno conformado por 26 nodos, de los cuales 25 cumplen con la tarea de recolección de datos y 1 nodo actúa como el *SINK* de la red. Las dimensiones del área a simular son: un rectángulo de 4 Km de largo x 2 Km de ancho. La distribución de los nodos en el área descrita se muestra en la figura 2. Para el segundo caso de estudio se definió una movilidad aleatoria con velocidad de 1Km/h.

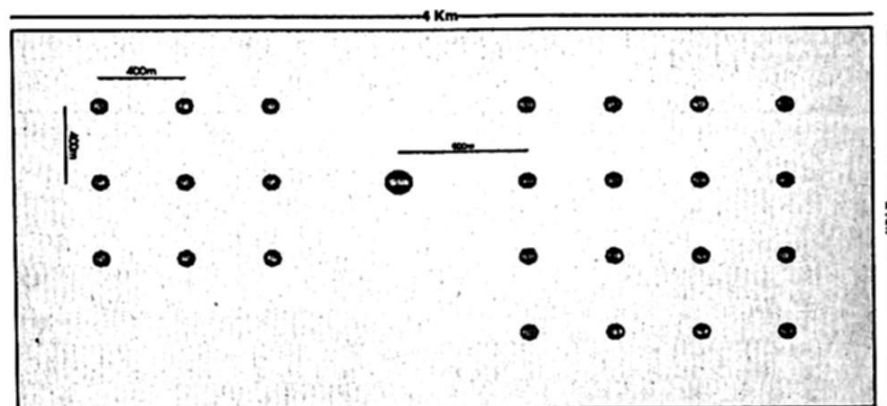


Fig. 2. Representación de la distribución de nodos dentro del escenario de simulación definido para la evaluación de los casos de estudio.

Como interfaz de comunicación se utiliza el radio modelo XBee-PRO 900, el cual es un módulo de RF (radio-frecuencia) embebido de largo alcance (hasta 10 Km en exteriores con antenas de alta ganancia) ideal para aplicaciones que requieran un bajo retardo y alta transferencia de datos, según las especificaciones indicadas en [9]. Los parámetros de configuración utilizados en el módulo de radio en *Castalia* son los indicados en la fuente citada previamente y los parámetros generales de la simulación se muestran en la tabla 1.

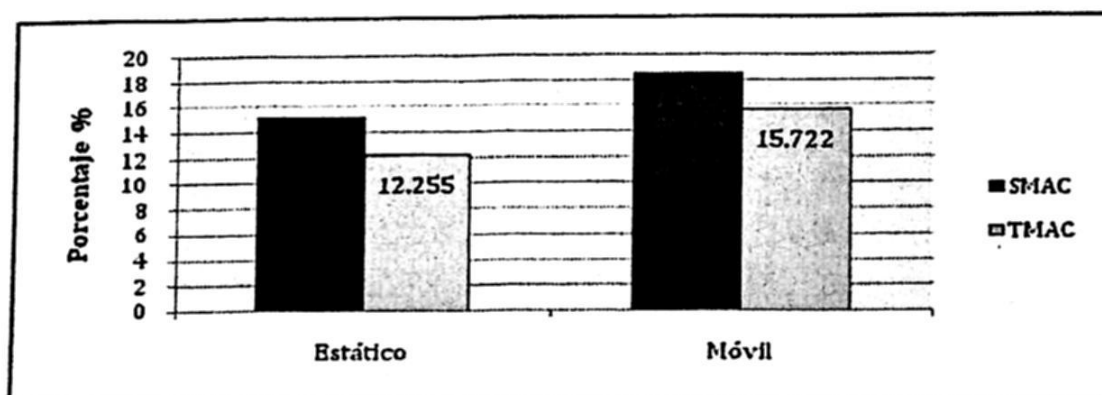
Tabla1. Parámetros generales de configuración utilizados en la simulación de los dos casos de estudio dentro de la herramienta *Castalia*.

Parámetro	Valor
Tiempo de simulación	1000 segundos
Paquetes por segundo	1
No. De nodos	26
Tamaño del paquete	10 bytes
Potencia de transmisión	17dBm
Frecuencia	915MHz
Protocolo MAC	SMAC y TMAC
Tiempo de sincronización MAC	30 seg.
Uso de RTS/CTS	Si
PathLossExponent	2.7
Distancia de referencia	100 m
Tamaño de celda	100m ²

4.2 Evaluación de resultados

A continuación se discuten en forma general los resultados obtenidos mediante las simulaciones realizadas para evaluar los dos casos de estudio descritos en la sección 3.

La primera métrica que se discute en ésta sección es el porcentaje de paquetes perdidos, la comparativa de sus resultados se observa en la figura 3. A través de ésta se puede comparar este parámetro utilizando ambos protocolos, resaltando que para T-MAC esta proporción es menor en ambos casos simulados; en S-MAC, se tiene un valor de paquetes perdidos que es mayor en un 3%, aproximadamente, con respecto a T-MAC para ambos casos.

**Fig. 3.** Porcentaje de paquetes perdidos en la WSN para ambos casos de estudio evaluados.

La segunda métrica que se analizó es la cantidad de paquetes recibidos por nodo en el *SINK*. La figura 4 muestra la cantidad de paquetes que llegaron al nodo *SINK*, con referencia al nodo que los envió, durante la simulación. Como se puede observar en la figura, ambos protocolos tuvieron un desempeño similar, sin embargo, el protocolo T-

MAC obtuvo un desempeño mejor en comparación a S-MAC para ambos casos simulados.

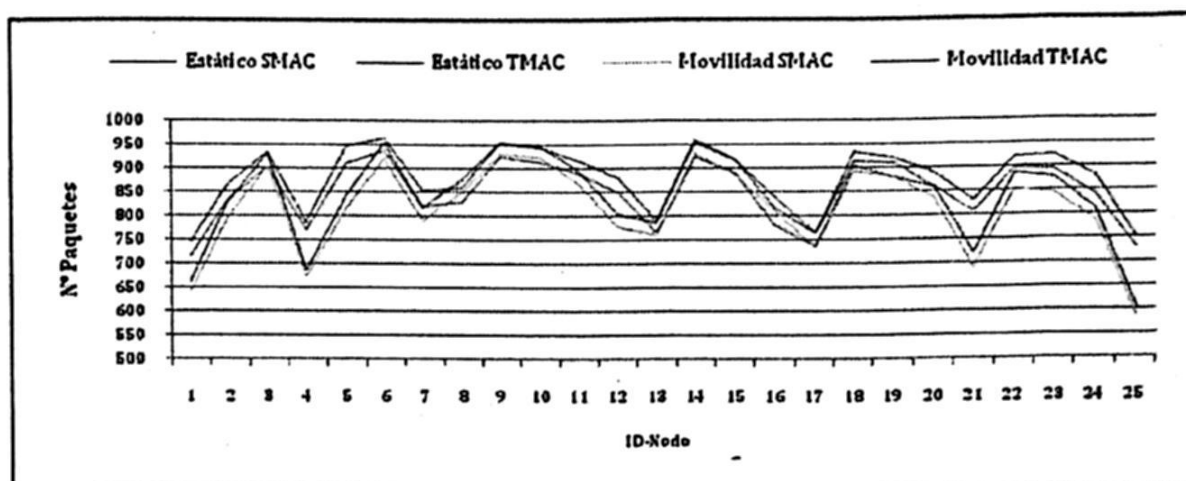


Fig. 4. Cantidad de paquetes recibidos por nodo en el *SINK* para ambos casos de estudio evaluados.

Por último en la figura 5 se observa el consumo de energía, el cual es el parámetro de mayor relevancia para la presente investigación. Se aprecia que con T-MAC se obtiene un mejor rendimiento en cuanto al consumo energético en ambos casos, el cual es cercano al 13% para el caso de los nodos estáticos; mientras que en el escenario con movilidad la ventaja aumenta a un porcentaje cercano al 15%. Esto se debe al funcionamiento en particular de T-MAC, el cual asigna tiempos de espera variables para detectar si el canal inalámbrico se encuentra disponible, adaptándose al estado de la red; a diferencia de S-MAC, en donde estos tiempos son fijos.

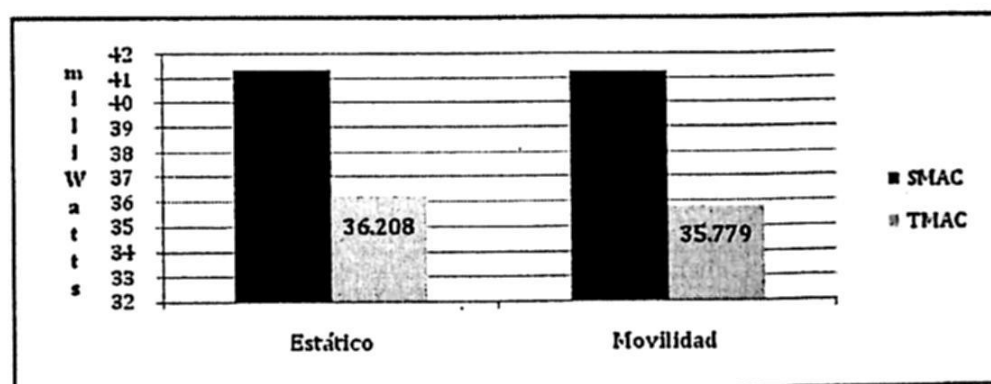


Fig. 6. Consumo promedio de energía por parte de los dos protocolos MAC para cada uno de los casos de estudio evaluados.

A partir de las tres gráficas se puede inferir que utilizando el protocolo T-MAC, se reduce el consumo energético promedio de la WSN, con lo cual se garantiza que los nodos aumentan su tiempo de vida útil, y obtienen un mejor rendimiento en cuanto a paquetes recibidos y perdidos en el *SINK*. Los resultados son coherentes con los obtenidos en [8] con relación a la mejor eficiencia de T-MAC sobre S-MAC. Sin

embargo, en la presente investigación se aporta el análisis de ambos protocolos en un escenario con movilidad, en el cual se demuestra la utilidad de T-MAC en el análisis de corrientes marinas.

Conclusiones

A través del trabajo de investigación realizado se logró comprobar que el protocolo T-MAC ofrece un mejor rendimiento con respecto a S-MAC en redes del tipo WSN, tanto en escenarios con nodos totalmente estáticos como en casos en los que algunos de los nodos son móviles. Esta mejoría obtenida por T-MAC fue con respecto a las variables de interés: paquetes perdidos, paquetes recibidos y consumo de energía (el más importante según el enfoque del proyecto).

Otro aspecto de interés comprobado fue el funcionamiento del radio utilizado para la comunicación inalámbrica en la simulación, ya que debido a las distancias que se pudieran manejar en un entorno real (las cuales se intentaron plasmar en los escenarios definidos), el desempeño mostrado por éste es aceptable para poder iniciar pruebas en campo pues se observó que sí es capaz de cubrir la necesidades de esos requerimientos.

Como punto final es importante mencionar que el presente trabajo marca la pauta a seguir para el desarrollo de un proyecto de mayores dimensiones en el que se busca diseñar una arquitectura completa de WSN para aplicaciones en entornos marinos.

Referencias

1. Raghavendra, C.S., Sivalingam, K.M., Znati, T.: *Wireless Sensor Networks*. Springer, New York (2004).
2. Albarejo Pérez, C.: *Propuesta de una red de sensores inalámbrica para un sistema de observación costero*. Departamento de Tecnologías Electrónica, Universidad Politécnica de Cartagena. Cartagena, Tesis doctoral. (2011).
3. Stetsko, A., Stehlik, M., and Matyas, V.: *Calibrating and Comparing Simulators for Wireless Sensor Networks*. Eighth IEEE International Conference on Mobile Ad-Hoc and Sensor Systems. Pp. 733-738, (2011).
4. Castalia Software: *Castalia, Wireless Sensor Networks Simulator*. [en línea] <http://castalia.research.nicta.com.au/pdfs/Castalia%20-%20User%20Manual.pdf>.
5. Van Dam, T., Langendoen, K.: *An adaptive energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*. ACM International conference on embedded networked sensor systems (SenSys). L.A., CA, (2003).
6. Ye, W., Heidemann, J., Estrin, D.: *An energy-efficient MAC protocol for wireless sensor networks*. INFOCOM 2002. Twenty-First Annual Joint Conferences of the IEEE Computer and Communications Societies. (2002).
7. Omnet++ community, official website. <http://www.omnetpp.org>.
8. Eclipse community official website. <http://www.eclipse.org>
9. Digi: *Digi, your M2M expert. Xbee-Pro 900. Long-range RF connectivity using multipoint protocol*. [en línea]: <http://www.digi.com/products/wireless-wired-embedded-solutions/zigbee-rf-modules/point-multipoint-rfmodules/xbee-pro-900#specs>. (2013).