

# Evaluación de protocolos de comunicación para redes de sensores inalámbricas de tiempo-real

Jazmín A. Jiménez Contreras, Arnoldo Díaz-Ramírez, Verónica Quintero Rosas y Claudia Martínez Castillo

Departamento de Sistemas y Computación

Instituto Tecnológico de Mexicali

Av. Tecnológico s/n Col. Elías Calles

Mexicali, B.C., México 21376

jajc\_1815@hotmail.com, {adiaz, veronicaquintero, claudiamartinez}@itmexicali.edu.mx

**Resumen**—Las redes de sensores inalámbricas, o WSNs por sus siglas en inglés, han sido tema de intensa investigación recientemente. Los avances en el campo de la tecnología de sistemas micro-electro-mecánicos ha permitido la existencia de sensores de tamaño reducido, que aumentan el abanico de aplicaciones de las WSNs. Una de las áreas que mas interés ha despertado es la del uso de redes de sensores inalámbricas para aplicaciones de tiempo-real. En ellas, los paquetes deben ser entregados al nodo destino antes de un plazo previamente establecido, ya que de otra manera las consecuencias pueden ser catastróficas. En este artículo, se evalúa el desempeño de algunos de los mas importantes protocolos de comunicación para redes de sensores, cuando son utilizados en aplicaciones de tiempo-real. Se presenta el resultado de los experimentos de simulación de algunos protocolos de las capas de acceso al medio y red, considerando diversos escenarios.

**Términos índice**—Redes de sensores de tiempo-real, protocolos de comunicación, B-MAC, CSMA/CA

## I. INTRODUCCIÓN

Las redes de sensores inalámbricas, o WSNs (*Wireless Sensor Networks*), están formadas por pequeños nodos que contienen uno o varios sensores. Los nodos de la WSN, llamados *moten*, tienen capacidades de cómputo limitados, y debido a que generalmente su fuente de energía es una batería, también tienen limitaciones energéticas. Los avances en el campo de la tecnología de sistemas micro-electro-mecánicos o MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) han propiciado el desarrollo de sensores de tamaño reducido, lo que ha permitido que las WSNs sean utilizadas en un gran número de aplicaciones.

En una red de sensores pueden existir cientos de nodos distribuidos a lo largo de un área de interés. Cada nodo de la red recolecta información de algunos factores ambientales como temperatura, humedad, vibraciones del suelo, etc. A su vez, los nodos sensores pueden enviar la información capturada a un nodo especial denominado dren o *sink*, con mayores capacidades de procesamiento. Debido a que el *sink* puede estar fuera del alcance del radio de transmisión del nodo, pueden utilizarse los nodos vecinos como encaminadores para conseguir que el mensaje llegue a su destino, utilizando la comunicación multi-salto. Existen una gran variedad de aplicaciones que hacen uso de las redes de sensores inalámbricas, entre ellas, la monitorización de un área para la prevención de desastres naturales, el rastreo de animales en su hábitat,

el cuidado de pacientes, entre otras. En algunas de éstas aplicaciones los paquetes deben ser recibidos por el *sink* antes de un plazo predefinido, ya que de no ser así los resultados pueden ser catastróficos. Los sistemas *ciber-físicos* son un buen ejemplo de aplicaciones de éste tipo. Sin embargo, se sabe que el problema de planificación (esto es, determinar si los mensajes llegarán antes de su plazo) en una WSN de tiempo-real crítico (*hard real-time*) es de tipo *NP-hard*, por lo que no existe una forma cerrada para resolverlo [10]. El diseño de una red de sensores con estas características puede representar una tarea compleja. Pero por otra parte, existen una gran cantidad de aplicaciones de tiempo-real blando (*soft real-time*), en las que el sistema debe entregar los mensajes lo mas cerca posible a su plazo, y en los que un pequeño retraso puede ser tolerable (i.e., unos cuantos segundos). Un sistema basado en una WSN para detectar *tsunamis* es un ejemplo de una aplicación de éste tipo. El diseño de una aplicación de tiempo-real blando es una tarea menos compleja, pero es necesario el uso de protocolos de comunicación que tengan un buen desempeño considerando las restricciones temporales del sistema.

Un protocolo de comunicación define un conjunto de reglas para que los mensajes enviados por un nodo emisor sean recibidos por el nodo destino. En una red de computadoras, los protocolos de comunicación se organizan en capas. Las dos capas que mas influyen en el tiempo en que un mensaje es recibido son las capas de acceso al medio (MAC) y red. En la primera, se definen reglas para determinar cuál nodo tiene acceso al medio compartido (cobre, fibra óptica o aire). En la segunda, debe definirse la ruta que un mensaje debe seguir para llegar a su destino, en caso de que éste se encuentre fuera del alcance de transmisión del nodo emisor. En el caso de las redes inalámbricas de sensores de tiempo-real, los protocolos utilizados en las capas MAC y de red son muy importantes, ya que deben garantizar la entrega de paquetes antes de su plazo. Debido a que se han propuesto una gran cantidad de protocolos de comunicación para WSNs, es importante conocer cuáles de ellos son mas adecuados para aplicaciones de tiempo-real.

En este artículo se presentan los resultados de un estudio comparativo del desempeño de algunos de los mas importantes protocolos de comunicación de las capas MAC y red, y que pudieran ser utilizados en WSNs para aplicaciones de tiempo-real. En particular, se evalúan los protocolos CSMA/CA y B-

MAC de la capa de acceso al medio, y los protocolos AODV, DYMO, OLSR y DSDV de la capa de red. A pesar de que estos protocolos no han sido definidos para aplicaciones de tiempo-real, es interesante conocer cuál es su desempeño en función de métricas relacionadas con el tiempo de entrega de mensajes, de tal manera que puedan considerarse en el caso de que una tecnología de red específica no tenga implementados protocolos de tiempo-real y si alguno de los protocolos que se estudian en este trabajo, y que están disponibles en estándares de comunicación y redes de sensores inalámbricas comerciales.

Este artículo está organizado de la siguiente manera: en la Sección II se discute el trabajo relacionado. En la Sección III se presentan brevemente los conceptos fundamentales sobre redes inalámbricas de sensores de tiempo-real. Posteriormente, en la Sección IV se explican algunos de los protocolos más importantes para WSNs de las capas MAC y red. La Sección V está dedicada a presentar los escenarios utilizados en los experimentos de simulación. En la Sección VI, se discuten los resultados obtenidos de los experimentos de simulación. Finalmente, las conclusiones y trabajo futuro se presentan en la Sección VII.

## II. TRABAJO RELACIONADO

En [4], Li *et al.* presentan un resumen de una gran cantidad de protocolos de comunicación para redes de sensores de tiempo-real, y se establece que para la capa MAC, el protocolo B-MAC es el más conveniente en aplicaciones en las que el tiempo es importante. Sin embargo, no se presenta algún estudio comparativo de su desempeño. Chaari y Kamoun en [2] presentan un análisis comparativo de protocolos de nivel MAC para WSNs, pero no estudian protocolos de nivel de red. En [8], Singh y Biswas presenta una comparación entre protocolos MAC basados en contienda, evaluando la métrica de consumo de energía.

Por otra parte, se han publicado evaluaciones de los protocolos de encaminamiento. Por ejemplo, Sivakumar *et al.* en [9], presentan los resultados de una comparación de protocolos a nivel red donde evalúa métricas de latencia, paquetes perdidos, otros, con la finalidad de conocer cuál protocolo se comporta mejor ante el envío de paquetes. Pero no evalúan el impacto de los protocolos de la capa MAC en el análisis. En el presente artículo se realiza la evaluación de protocolos de comunicación a nivel MAC y red, de tal manera que pueda conocerse cuál combinación de protocolos presenta mejor desempeño considerando métricas relacionadas con el tiempo.

## III. REDES DE SENSORES INALÁMBRICA DE TIEMPO-REAL

Como se ha mencionado, en una red de sensores inalámbrica de tiempo-real los mensajes deben llegar al sink antes de su plazo. Dos objetivos destacan particularmente en el diseño de este tipo de redes:

- Acotar el retardo de envío de mensajes: es un requerimiento principal en redes de sensores de tiempo-real, ya que, si los paquetes llegan después del plazo determinado puede provocar serios daños en el sistema.

- Uso eficiente de la energía: es otro requerimiento importante, debido a que de este depende el tiempo de vida del nodo sensor.

En las WSNs de tiempo-real blando no es importante acotar el retardo en el envío de paquetes, pero sí es importante conocer si el retardo existente es tolerable para la aplicación. Por lo tanto, algunas de las métricas para evaluar el desempeño de una WSN de tiempo-real blando son:

- *Latencia*: es el tiempo que tardan en llegar los paquetes del nodo origen al nodo destino.
- *Throughput*: se refiere a la fracción de la capacidad del canal empleado en la transmisión de datos. El establecimiento de clusters mejora el desempeño de esta métrica.
- *Congestión de tráfico*: se refiere a que varios mensajes han sido enviados en un mismo lapso de tiempo, lo que puede provocar que los paquetes no lleguen a su destino.

Al diseñar una red de sensores de tiempo-real, deben considerarse estas métricas al seleccionar los protocolos de comunicación que serán utilizados.

## IV. PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN

Como se mencionó anteriormente, un protocolo de comunicación es un conjunto de reglas a seguir con el fin de mantener comunicación entre dos puntos. Los protocolos del nivel MAC deciden quién hará uso del canal compartido, mientras que los de nivel de red determinan la ruta más corta hacia el nodo destino. Ambos niveles colaboran para establecer una comunicación entre un grupo de nodos.

La subcapa de acceso al medio o MAC (*Media Access Control*) es la encargada de asignar el canal a un dispositivo que desee hacer uso del medio de transmisión compartido, con el fin de evitar colisiones y establecer la entrega de paquetes de manera exitosa. Para lograrlo, el nivel MAC puede asignar el canal de manera estática o dinámica.

- Asignación dinámica: también conocida como basada en contienda, y es aquella en la que varios nodos compiten por tener acceso a un mismo canal.
- Asignación estática: también llamada libre de contienda, es aquella donde los emisores no tienen que competir por utilizar el canal, es decir, todos los que deseen transmitir podrán hacerlo de manera organizada. Para ello, hay dos formas de hacerlo:

*FDMA (Frequency Division Multiple Access)*: divide el canal en varios sub-canales de frecuencia, permitiendo a los múltiples nodos transmitir simultáneamente. Una vez asignado un sub-canal específico, la estación podrá utilizarlo durante todo el período de transmisión.

*TDMA (Time Division Multiple Access)*: permite a varios emisores compartir el mismo canal dividiendo la señal en *slots* o ranuras de tiempo. Una ranura de tiempo es el intervalo de tiempo necesario para la *transmisión* de datos entre un emisor y un receptor.

De entre la gran cantidad de protocolos MAC definidos a la fecha, dos destacan particularmente: CSMA/CA y B-MAC, los cuáles son descritos a continuación.

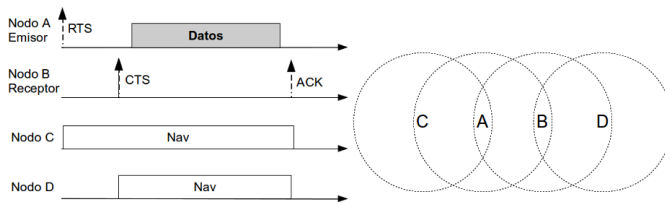


Figura 1. Ejemplo protocolo CSMA/CA

CSMA/CA (Carrier Sense Multiple Access/Collision Avoidance): Este es un protocolo de contienda. El protocolo CSMA/CA se basa principalmente en que cada nodo que desee transmitir primero escuche el canal y verifique si alguien está haciendo uso de él con la finalidad de evitar colisiones. En la Fig. 1, observamos un ejemplo del funcionamiento básico de CSMA/CA. Tenemos que, el nodo A desea transmitir a nodo B, después de verificar que el canal esté libre el nodo A envía el mensaje de *RTS* (*Request to Send*) provocando que el nodo C automáticamente se coloque en modo de espera, debido a que se encuentra al alcance del nodo A. Cuando el nodo B responde con el mensaje de *CTS* (*Clear to Send*), esto ocasiona que el nodo D inicie su tiempo de espera. Una vez que el nodo A recibe el *CTS* inicia el envío de la trama. Cuando nodo B termina de recibir la trama, envía el mensaje *ACK* (*Acknowledgement*) de confirmación. En caso que el canal este ocupado el nodo espera un tiempo aleatorio antes de intentar transmitir otra vez.

B-MAC (Berkeley MAC): Protocolo libre de contienda. El concepto principal de B-MAC propone que cada nodo despierte periódicamente para comprobar actividad en el canal [7]. Un ejemplo entre dos nodos que utilizan el protocolo B-MAC para asignar el canal lo podemos analizar en la Fig. 2. Donde tenemos que ambos nodos despiertan periódicamente en tiempos diferentes, se levantan y escuchan el canal, al no encontrar actividad vuelven a dormir. Después, cuando un nodo desea transmitir en este caso nodo B, este se levanta enviando los mensajes *CCA* (*Clear Channel Assessment*) para notificar al receptor su existencia; en el momento que nodo A se activa, se da cuenta que quieren transmitir con él, por lo que acepta la transmisión e inicia su recibimiento. Una vez que nodo B termina el envío entra en espera del mensaje *ACK*. Ya que finaliza el nodo A la recepción, este envía el mensaje *ACK* y al instante que el emisor recibe el mensaje, los nodos A y B regresan a su estado de inactividad.

La capa de red se encarga de llevar los paquetes desde el origen hasta el destino, por lo que se puede requerir realizar muchos saltos a través de los nodos intermedios. Para lograr la transmisión de los paquetes de un nodo a otro es necesario utilizar protocolos de encaminamiento, los cuales serán los encargados de elegir la ruta más adecuada a través de la red. Algunos de ellos se presentan a continuación.

*OLSR* (*Optimized Link State Routing Protocol*): Este protocolo pertenece a la familia de protocolos proactivos. Como se sabe, los protocolos proactivos tienen la desventaja de que pueden provocar congestión dentro de la red debido al constante envío de mensajes de actualización. Una solución que ofrece OLSR es la selección de nodos *MPR* (*Multipoint*

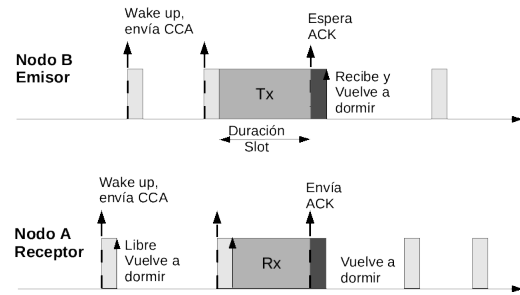


Figura 2. Ejemplo B-MAC

*Relays*) [3], el cual se refiere a que un nodo sea el encargado de retransmitir los mensajes *broadcast*, logrando reducir de manera conveniente el coste de inundación de mensajes en la red.

*DSDV* (*Destination Sequenced Distance Vector Routing*): Es uno de los protocolos más populares en redes *ad hoc*, de las que las WSN son un caso particular. Es también uno de los protocolos proactivos y por consecuencia puede provocar sobrecarga en la red. Por esta razón, se requiere que cada uno de los nodos sea capaz de detectar oportunamente cualquier problema en la red, ya sea por la ausencia de un nodo, o el envío de información a través de bucles.

*AODV* (*Ad hoc On-Demand Distance Vector*): En el protocolo AODV [6] los nodos mantienen una tabla de encaminamiento para los destinos conocidos. AODV pertenece al grupo de protocolos reactivos, ya que requiere descubrir las rutas bajo demanda. Este protocolo implementa el envío de mensajes de *RREQ* y *RREP*, y a su vez, al momento en que un nodo recibe un mensaje de *RREQ*, el nodo activa una ruta inversa hacia el nodo emisor.

*DYMO* (*Dynamic MANET On-Demand*): Es un protocolo reactivo que tiene como antecesor al protocolo AODV y su funcionamiento básico se divide en dos mecanismos, descubrimiento de ruta y mantenimiento de ruta [5]. En el primer caso se explica cómo descubrir una ruta en la red, y en el segundo se expone la manera que tiene el protocolo para detectar rupturas en las rutas, descubriendo otras rutas para llegar al nodo destino.

## V. ESCENARIOS DE SIMULACIÓN

El principal objetivo del análisis comparativo de este trabajo es el de conocer el desempeño de algunos de los protocolos de comunicación utilizados en WSNs, en aplicaciones en las que el tiempo de respuesta es importante. Utilizando simulación, se espera conocer el comportamiento de una red de sensores de tiempo-real y así comprobar que estas redes pueden garantizar un bajo retraso en el envío de paquetes. En primer instancia las medidas a considerar en las evaluaciones estarán enfocadas en el análisis de extremo a extremo, por lo que se pretende estimar las siguientes métricas:

- Porcentaje paquetes eliminados: cuando un paquete se recibe fuera del tiempo permitido este pierde su valor por lo que se cuenta como fallo y es eliminado, por ello, es indispensable establecer que protocolo es más

conveniente para el uso de redes de sensores de tiempo-real. Esta métrica fue valorada en base al total de paquetes que llegaron al nodo destino, contando también los paquetes recibidos fuera de plazo.

- Porcentaje paquetes recibidos: es importante conocer el número de paquetes que pueden arribar a su destino antes de un plazo dado, de esta manera puede ser un inicio para garantizar que un paquete sea entregado de manera correcta al nodo correspondiente.
- Retraso promedio de los paquetes recibidos: en este caso, se estudia el tiempo promedio en la entrega de los paquetes que abordaron antes del plazo establecido al nodo destino.

Los parámetros de los experimentos de simulación relacionados con el área de evaluación se pueden observar en la Tabla I. Por otra parte, en la Tabla II se muestran el resto de parámetros de los experimentos de simulación.

En una red de sensores es común que se utilice un conjunto de protocolos definidos en algún estándar. En el caso de éste estudio comparativo, se utilizan los parámetros definidos al estándar IEEE 802.15.4, que define un alcance máximo de 75 metros en condiciones óptimas. Sin embargo, cabe señalar que es difícil que se cumpla en situaciones reales, ya que el alcance depende del tipo de radio de comunicación utilizado por los nodos, que por razones de ahorro de energía es habitual que el alcance máximo sea de 10 metros. En el caso de la capa MAC, para las evaluaciones se eligieron los protocolos CSMA/CA y B-MAC. La elección del protocolo CSMA/CA fue debido a que es uno de los más utilizados en redes inalámbricas, ya que está definido en el estándar IEEE 802.15.4. Sin embargo, debido a que es un protocolo con contienda, la detección de un evento de interés por varios motes vecinos pudiera provocar retrasos de dimensión considerable, lo que no es conveniente en aplicaciones de tiempo-real. Por esta razón, se evalúa también el desempeño del protocolo B-MAC, toma en consideración que es un protocolo libre de contienda del tipo mejor esfuerzo (*best effort*). El objetivo de los experimentos de simulación consiste en evaluar si un protocolo libre de contienda muestra un mejor desempeño que un protocolo con contienda, particularmente en las métricas de interés para un sistema de tiempo-real.

Conjunto de parámetros	
Número de nodos	100 y un nodo sink
Tiempo de simulación	600 segundos
Topología	Cuadrícula
Rango de transmisión	10 metros
Área de simulación	110m x 110m

Tabla I  
PARÁMETROS DE ÁREA DE EVALUACIÓN

Para la evaluación de los protocolos a nivel MAC es importante definir el protocolo de encaminamiento a utilizar. Como se mencionó, las WSNs utilizan habitualmente el estándar *ZigBee* en la capa de red, que define el uso del protocolo AODV. Debido a su importancia, en el primer conjunto de experimentos se utilizó este protocolo a nivel red.

Conjunto de parámetros I	
Límite de entrega	2s, 3s, 4s, 5s y 6s
Protocolos MAC	B-MAC y CSMA/CA
Protocolo a nivel red	AODV

Tabla II  
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Por otra parte, también se evaluaron algunos protocolos a nivel de res. Específicamente, se evaluaron dos protocolos proactivos (OLSR y DSDV) y dos reactivos (AODV y DYMO). Estos protocolos fueron evaluados considerando los protocolos CSMA/CA y B-MAC a nivel MAC. Los parámetros utilizados para este conjunto de experimentos se muestran en las Tablas I y III.

Conjunto de parámetros I	
Límite de entrega	2s, 3s, 4s, 5s y 6s
Protocolos MAC	B-MAC y CSMA/CA
Protocolo a nivel red	OLSR, DSDV, AODV y DYMO

Tabla III  
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN

Para desarrollar los experimentos de simulación se utilizó el simulador OMNeT++ 4.3.1 y una herramienta generadora de eventos desarrollado por el Grupo de Redes de Computadores de la Universidad Politécnica de Valencia, España [1]. Se llevaron a cabo 15 simulaciones por cada experimento y se promediaron sus resultados.

## VI. RESULTADOS OBTENIDOS

Las gráficas obtenidas durante el estudio comparativo de protocolos a nivel MAC y nivel red, evaluando las métricas presentadas con anterioridad se muestran a continuación.

En la Fig. 3 se muestran los resultados obtenidos de las evaluaciones de los protocolos de nivel MAC. Se evaluó el porcentaje de paquetes eliminados una vez que el plazo de entrega se ha vencido. La gráfica superior muestra el comportamiento de los protocolos B-MAC y CSMA/CA, mientras que la gráfica inferior muestra tan sólo el del protocolo B-MAC en un acercamiento. Puede observarse que el protocolo CSMA/CA elimina un gran número de paquetes (aproximadamente el 50 %), mientras que el protocolo B-MAC no sobrepasa el 10 % de paquetes eliminados por no llegar antes del plazo. Además, se observa que a medida que el plazo aumenta, el porcentaje de paquetes rechazados disminuye. Finalmente, se puede observar que el protocolo CSMA/CA mejora su desempeño considerablemente en la medida en que el plazo aumenta, mientras que el B-MAC muestra un comportamiento más estable. Este conjunto de experimentos muestra que el protocolo CSMA/CA tiene un peor desempeño que el protocolo B-MAC, debido a que el primero es un protocolo de contienda. Los resultados obtenidos muestran que cuando el plazo de entrega es pequeño, un protocolo basado en contienda difícilmente puede entregar paquetes antes del plazo.

En la Fig. 4 se muestran los resultados de la evaluación de los protocolos CSMA/CA y B-MAC en función del porcentaje de paquetes recibidos antes del plazo. Estos resultados comprueban los obtenidos en los experimentos anteriores.

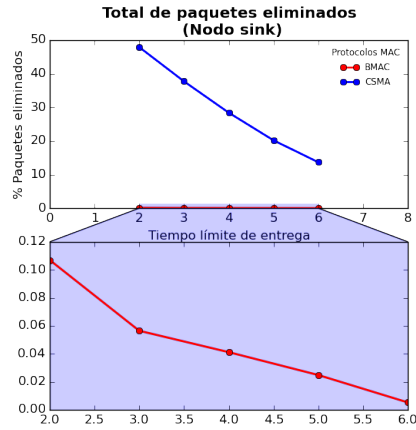


Figura 3. Porcentaje de paquetes eliminados

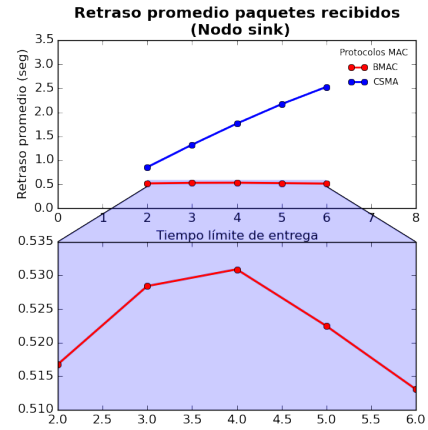


Figura 5. Retraso promedio de los paquetes recibidos a tiempo.

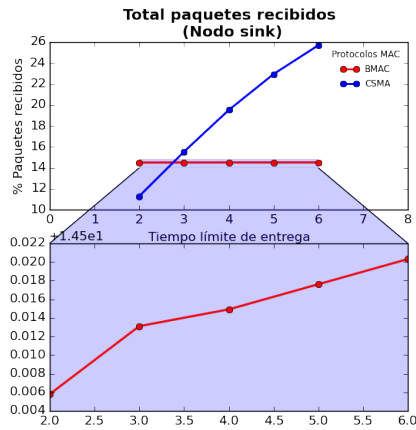


Figura 4. Porcentaje paquetes recibidos antes del plazo determinado

En el siguiente conjunto de experimentos, se evaluó el retraso promedio de paquetes recibidos. En la Fig. 5, se observa el retraso que se obtuvo en la entrega de paquetes, considerando tan sólo los paquetes llegaron antes de su plazo. En de esta evaluación los resultados obtenidos muestran retrasos no mayores a los tres segundos. También se puede notar como el protocolo CSMA/CA aumenta el retraso notablemente en comparación con el protocolo B-MAC, el cual mantiene su retraso promedio con una mínima diferencia en milisegundos. Los resultados muestran que en el protocolo B-MAC, a pesar de cada nodo debe esperar su ranura para poder transmitir, tiene un mejor desempeño que el CSMA/CA, lo que muestra que un protocolo basado en contienda genera mayor retraso si el número de paquetes a enviar es grande, como ocurre en el caso de una aplicación en la que muchos nodos vecinos detectan un evento de interés e intentan enviar mensajes al mismo tiempo. Una aplicación de prevención de desastres tiene estas características, y en este caso minimizar el retraso de notificación puede ser fundamental para salvar vidas.

*Resultados obtenidos conjunto II:* En la Fig. 6, se analiza el comportamiento de los protocolos de nivel red AODV, DYMO, OLSR y DSDV. Como es importante conocer el impacto que

tiene los protocolos a nivel MAC en el desempeño de éstos protocolos, fueron evaluados junto con los protocolos B-MAC y CSMA/CA. En el caso de CSMA/CA, se observa como los protocolos proactivos muestran mejor desempeño en el recibimiento de paquetes, destacando el protocolo DSDV. Esto se debe a que cuando los nodos detectan el evento la ruta ya fue descubierta, por lo que solo se envía el paquete. También se puede observar que el protocolo CSMA/CA se adapta bien a los protocolos de encaminamiento en comparación con B-MAC. Sin embargo el protocolo B-MAC se mantiene muy estable en sus resultados por lo que se podría considerar para garantizar que un paquete llegara a tiempo al nodo destino.

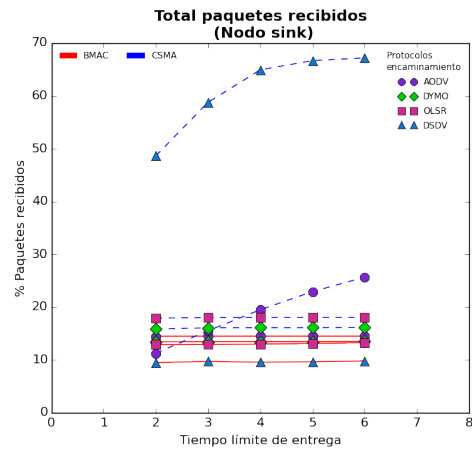


Figura 6. Estudio comparativo de protocolos de comunicación en el total de paquetes recibidos.

Por otra parte tenemos los resultados medidos con respecto al retraso promedio de los paquetes enviados y que fueron recibidos antes de finalizar su plazo. Es fundamental estudiar esta métrica para poder proponer algún conjunto de protocolos que favorezca las redes de sensores de tiempo-real.

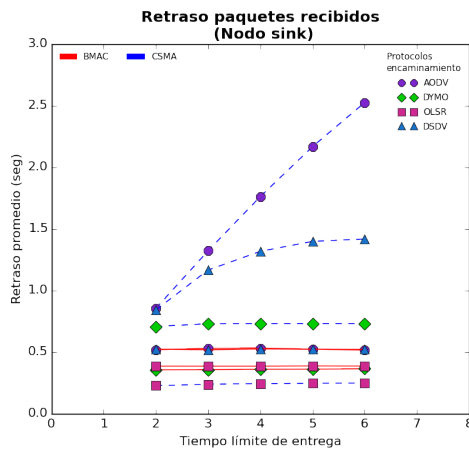


Figura 7. Estudio comparativo de protocolos de comunicación en el retraso de entrega de los paquetes.

En la Fig. 7 contemplamos el retraso obtenido en promedio de los paquetes que llegaron antes de su plazo límite, haciendo uso del protocolo B-MAC y CSMA/CA. En la gráfica se alcanza a percatar que por parte de B-MAC el retraso no es mayor a un segundo e inclusive apenas sobrepasa el medio segundo, mientras que con CSMA/CA la mayoría de los protocolos superan el medio segundo de manera considerable. Además la Fig. 7 nos hace reflexionar sobre qué protocolo puede ser el más conveniente para utilizarse junto con los protocolos MAC. Por parte de B-MAC el que puede ofrecer una buena opción es DYMO a pesar de no ser el protocolo más eficaz en la entrega de paquetes; su mínimo retardo resalta ante los demás protocolos. Por el contrario, para el CSMA/CA el protocolo de mayor eficacia es DSDV debido a que su retraso promedio es menor a los dos segundos aún cuando el retraso permitido es de seis segundos y tomando en cuenta que fue el protocolo que mayor número de paquetes recibió. A su vez en dicha gráfica, se observa como AODV es uno de los protocolos con mayor retraso ya sea en uso de CSMA/CA o B-MAC.

## VII. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de aplicaciones basadas en el uso de redes de sensores inalámbricas en las que el tiempo de respuesta es importante. Cuando los mensajes deben llegar siempre antes de su plazo, es necesario el uso de una WSN de tiempo-real crítico. Por otra parte, cuando la aplicación puede tolerar que en algunas ocasiones los mensajes lleguen con poco retraso, se utiliza una WSN de tiempo-real blando. En este artículo, se evaluaron protocolos de comunicación para redes de sensores de tiempo-real blando, con la finalidad de determinar qué combinación de protocolos a nivel MAC y red tienen un mejor desempeño para entregar mensajes antes de su plazo. Para evaluar el desempeño de los protocolos bajo estudio, se llevaron a cabo experimentos de simulación considerando diversos escenarios.

Los protocolos evaluados a nivel MAC fueron CSMA/CA y B-MAC. El primero es un protocolo de contienda, mientras que el protocolo B-MAC hace uso de *ranuras* de tiempo, lo que permite acotar el tiempo máximo de envío de mensajes, lo que es conveniente cuando muchos nodos vecinos desean

enviar mensajes al mismo tiempo. A pesar de no ser un protocolo estático, B-MAC presentó el mejor desempeño para situaciones donde el tiempo de respuesta es importante.

Por otra parte, los protocolos de encaminamiento AODV, DYMO, OLSR y DSDV fueron evaluados en colaboración con cada uno de los protocolos a nivel MAC. En este caso, los protocolos proactivos mostraron mejores resultados cuando se utilizaron en conjunto con el protocolo CSMA/CA. Por otra parte, con respecto al retraso promedio en la entrega de mensajes, todos los protocolos tuvieron mejor desempeño al utilizar el protocolo B-MAC, a excepción de OLSR, que mostró un muy buen desempeño con ambos protocolos MAC. Con base en los resultados obtenidos, el uso del protocolo B-MAC a nivel MAC mostró un mejor desempeño que el CSMA/CA. En el caso de los protocolos a nivel red, pudo observarse que en términos generales los protocolos proactivos tuvieron mejor desempeño, sobre todo al utilizarlos junto con el protocolo B-MAC.

Como trabajo futuro, se planea evaluar protocolos para WSNs de tiempo-real crítico.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores de éste artículo desean agradecer a los integrantes del Grupo de Redes de Computadores de la Universidad Politécnica de Valencia, España, y particularmente a Carlos T. Calafate y Miguel Báguena, por el apoyo brindado para la realización de este trabajo.

## REFERENCIAS

- [1] C.T. Calafate, C. Lino, J.-C. Cano, and P. Manzoni. Modeling emergency events to evaluate the performance of time-critical wsn. In *Proceedings of the IEEE Symposium on Computers and Communications*, pages 222–228, June 2010.
- [2] Lamia Chaari and Lotfi Kamoun. Wireless sensors networks mac protocols analysis. *Journal of Telecommunications*, 2(1):42–48, April 2010.
- [3] P. Jacquet, P. Muhlethaler, T. Clausen, A. Laouiti, A. Qayyum, and L. Viennot. Optimized link state routing protocol for ad hoc networks. In *Proceedings of the IEEE International Multi Topic Conference*, pages 62–68, 2001.
- [4] Yanjun Li, Chung Shue Chen, Ye qiong Song, and Zhi Wang. Real-time qos support in wireless sensor networks: a survey. In *Proceedings of the 7th IFAC International Conference on Fieldbuses & Networks in Industrial & Embedded Systems*, pages 373–380, 2007.
- [5] Alberto Benito Peral, Javier Sánchez-Moncayo Álvarez, and Mario Morillo Molinuelo. Estudio del rendimiento y la seguridad en redes ad hoc. Technical Report 206, Facultad de Informática Universidad Complutense de Madrid. Sistemas Informáticos Curso 2006-07.
- [6] C. Perkins, E. Belding-Royer, and S. Das. Ad hoc on-demand distance vector (aodv) routing. *Proceedings of the 2nd IEEE Mobile Computing Systems and Applications*, pages 90–100, June 2002.
- [7] Joseph Polastre, Jason Hill, and David Culler. Versatile low power media access for wireless sensor networks. In *Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems*, pages 95–107, 2004.
- [8] Himanshu Singh and Bhaskar Biswas. Comparison of CSMA based MAC protocols of wireless sensor networks. *International Journal of AdHoc Network Systems*, 2(2):1–9, 2012.
- [9] Narendran Sivakumar and Satish Kumar Jaiswal. Comparison of dymo protocol with respect to various quantitative performance metrics. *International Journal of Research in Engineering and Applied Science*, 1(2):71–83, Oct 2009.
- [10] V. Stangaci, D. Pescaru, M.V. Micea, and V. Cretu. Practical aspects regarding implementation of real time wsn applications based on ieee 802.15.4. In *Telecommunications Forum (TELFOR), 2013 21st*, pages 295–298, Nov 2013.