



Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería

ISSN: 0718-3291

facing@uta.cl

Universidad de Tarapacá

Chile

Cortés C., Albeiro; Peña T., Néstor; Labrador, Miguel
Diseño cross-layer para transmisión de datos escalares y/o contenidos multimedia en
tiempo real en redes inalámbricas de sensores

Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, vol. 24, núm. 1, enero, 2016, pp. 18-32
Universidad de Tarapacá
Arica, Chile

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=77243535003>

- ▶ Cómo citar el artículo
- ▶ Número completo
- ▶ Más información del artículo
- ▶ Página de la revista en redalyc.org

Diseño *cross-layer* para transmisión de datos escalares y/o contenidos multimedia en tiempo real en redes inalámbricas de sensores

Cross-layer design for real-time scalar and multimedia contents transmission in wireless sensor networks

Albeiro Cortés C.¹ Néstor Peña T.² Miguel Labrador³

Recibido 30 de abril de 2014, aceptado 2 de abril de 2015

Received: April 30, 2014 Accepted: April 2, 2015

RESUMEN

En aplicaciones de redes inalámbricas de sensores los eventos ocurren con baja frecuencia, debido a esto el diseño de los protocolos se ha enfocado principalmente en ahorrar energía. En consecuencia, aunque estos protocolos son energéticamente eficientes, limitan el uso de las redes inalámbricas de sensores a aplicaciones donde el tiempo de respuesta y el ancho de banda no son importantes. En este artículo se propone el protocolo LEMR-multichannel (*Latency, Energy, MAC and Routing*, por sus siglas en inglés). LEMR-multichannel es un protocolo de comunicación basado en un diseño multicapa (*cross-layer design*), el cual involucra las capas física, de acceso al medio y de red, y que no solamente preserva la eficiencia energética de los protocolos actuales sino que también coordina la transferencia de paquetes desde la fuente hasta el destino de forma tal, que el desempeño de la red en términos de ancho de banda, retardo y variabilidad del retardo es mejorado considerablemente. La superioridad de LEMR en términos de estas variables es demostrada al ser comparado con otros protocolos bien conocidos (*TMAC* y *YMAC*), a través de varios experimentos de simulación.

Palabras clave: Redes inalámbricas de sensores, energía, retardo, variación de retardo, caudal, acceso al medio, enrutamiento, multimedia.

ABSTRACT

*In wireless sensor networks applications, events occur occasionally; therefore, the design of protocols has been focused on saving energy mainly. As consequence of this protocol design strategy most of these energy-efficient protocols limit the use of wireless sensor networks to those applications where a fast response time and the bandwidth are not important. This paper proposes the LEMR-multichannel protocol (*Latency, Energy, MAC and Routing*, for its acronym in English). LEMR-multichannel is a communication protocol based on a multilayer design which involves the physical, medium access and network layer, which not only preserves the energy efficiency of current protocols but also coordinates the transfer of packets from source to destination in such a way that the network performance in terms of bandwidth, delay and jitter is improved significantly. The LEMR-multichannel superiority in terms of these variables is shown when it is compared with other well-known protocols (*TMAC* and *YMAC*), through several simulation experiments.*

Keywords: Wireless sensor networks, energy, latency, jitter, throughput, routing, multimedia.

¹ Facultad de Ingeniería. Universidad Surcolombiana. Calle 1 Av. Pastrana Borrero. Neiva Colombia. E-mail: albecor@usco.edu.co

² Facultad de Ingeniería. Universidad de los Andes. Carrera 1Este N° 19^a-40. Bogotá, Colombia. E-mail: npena@uniandes.edu.co

³ Departamento de Ciencias de la Computación e Ingeniería. University of South Florida. 4202 East Av. Fowler ENB 118, Tampa, Florida 33620. EE.UU. E-mail: mlabrador@usf.edu

INTRODUCCIÓN

Nuevas aplicaciones para redes inalámbricas de sensores-RIS, las cuales incluyen contenidos multimedia, tales como video vigilancia y control de procesos industriales, entre otras han sido visualizadas recientemente [1-2]. En estas aplicaciones, sensores escalares tales como sensores de luz o movimiento podrían ser usados para detectar e identificar la posición de los eventos y al mismo tiempo activar otros sensores para proveer contenido multimedia adicional [3-4]. Las RIS que incluyen sensores multimedia son denominadas redes inalámbricas de sensores multimedia - RISM [1]. Estas nuevas aplicaciones imponen nuevos retos en el diseño de los algoritmos y protocolos de comunicación.

En el soporte de aplicaciones multimedia, la capacidad de transmisión de los actuales nodos sensores se ha convertido en la principal limitación. El radio transmisor Cc2420 con una capacidad de transmisión de 250 kbps es el más usado actualmente [5]. Sin embargo, su capacidad se ve severamente afectada por el tamaño de la red, los patrones de tráfico, la interacción local entre los nodos y el tamaño de los paquetes. Como resultado, la capacidad percibida por las aplicaciones es reducida a una pequeña fracción de la capacidad total de los radios transmisores. Adicionalmente, los protocolos diseñados para RIS, apagan los radios transmisores durante mucho tiempo para así ahorrar energía, reduciendo la utilización del canal e incrementando el retardo [6-10]. Por lo tanto, es necesario investigar nuevas estrategias para lograr mejor desempeño en la red en términos de caudal, pero adicionalmente manteniendo bajo retardo y bajo consumo de energía.

Con el objetivo de mejorar el desempeño de las RIS en términos de las variables ya mencionadas, en este artículo se propone LEMR-multichannel, un protocolo de comunicación basado en un diseño mult capas (*cross-layer design*) involucrando las capas física, MAC y la capa de red, el cual no solamente preserva la eficiencia energética de las alternativas actuales, sino que también coordina la transferencia de paquetes desde la fuente hasta el destino en forma tal que el retardo y la variación son mejorados considerablemente⁴. Como contribución

principal en este artículo se presentan también todos los aspectos de diseño y matemáticos que llevaron a concebir el protocolo; además de la comparación con un nuevo protocolo, lo cual no fue reportado en las publicaciones parciales [11-14].

ESTADO DEL ARTE

Muchos protocolos para RIS han sido diseñados teniendo como meta principal ahorrar energía, éstos atacan los problemas de escucha ociosa (*idle listening*), sobre escucha (*overhearing*) y encabezamientos (*overhead*). Por ejemplo, protocolos de acceso al medio tales como S-MAC [7], TMAC [6], SCP-MAC [10] y YMAC [15], dividen el tiempo en períodos de dos intervalos, uno de escucha para transmitir y recibir datos, y otro para dormir, en el cual los radio transmisores son apagados para ahorrar energía. S-MAC establece un ciclo útil fijo donde desperdicia energía durante los períodos con poco tráfico. El protocolo TMAC fue propuesto para superar algunos de los problemas relacionados con los ciclos útiles de duración fija. En TMAC cuando un nodo detecta actividad en el canal durante su periodo de escucha, éste permanece escuchando el canal por un periodo de tiempo corto, a la espera de un posible intercambio de paquetes con algún vecino. Como resultado de esta estrategia TMAC puede manejar ráfagas de tráfico de manera más eficiente que S-MAC, sin requerir consumo adicional de energía. SCP-MAC utiliza una técnica conocida como escucha de baja potencia o LPL (*low power listening*). LPL ha demostrado que mitiga considerablemente el problema de escucha ociosa (*idle listening*). YMAC es un protocolo de acceso al medio a través de múltiples canales de frecuencia, el cual para mitigar el problema de escucha ociosa y ahorrar energía utiliza también LPL. En YMAC el tiempo es dividido en ciclos y cada ciclo es subdividido en ranuras. LEMR-multichannel también usa múltiples canales de frecuencia para así incrementar el caudal de la red. El protocolo ataca problemas de interferencia típicos de las redes inalámbricas e incluye un nuevo mecanismo de acceso al medio con ciclo útil dinámico, eficiente energéticamente. La superioridad de LEMR-multichannel en términos de caudal, retardo, variación de retardo y consumo de energía es demostrada cuando es comparado con otros protocolos adaptativos bien conocidos.

⁴ Resultados preliminares de este trabajo fueron publicados en [11-14].

MÁXIMA CAPACIDAD DE CAUDAL EN REDES INALÁMBRICAS MULTI-SALTOS

En una red inalámbrica de múltiples saltos los paquetes viajan desde la fuente hasta el destino a través de una cadena de nodos intermedios como se muestra en la Figura 1. El caudal experimentado por un flujo de paquetes dependerá del estado de los nodos que conforman la cadena (es decir, la cantidad de paquetes en las colas esperando para ser servidos) y la probabilidad de inyección exitosa de paquetes en el canal. La probabilidad de inyectar un paquete exitosamente en el canal depende de la cantidad de nodos dentro del rango de interferencia, las probabilidades de requerimiento del canal de dichos nodos y la estrategia de acceso al medio utilizada. La condición necesaria para que un flujo en una red inalámbrica de múltiples saltos experimente el mayor caudal posible, es que todos los nodos que conforman la cadena entre la fuente y el destino estén libres de interferencia por parte de los demás nodos. Esto es, que aquellos nodos dentro del rango de interferencia, que no pertenecen a la cadena estén en silencio. Esta situación se puede representar a través de una red lineal donde los nodos están sometidos solamente a la interferencia generada por los demás nodos que conforman la cadena.

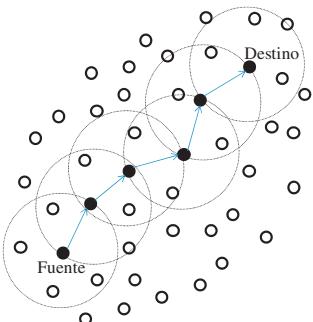


Figura 1. Red inalámbrica de múltiples saltos.

Considérese una red lineal, como se muestra en la Figura 2. Asúmase que un flujo de paquetes debe ser transmitido desde el nodo A hasta el nodo J. Además, que las distancias entre los nodos son iguales para todos los casos y cada uno transmite paquetes sólo a su vecino inmediato ubicado a su lado derecho, el cual está dentro de su rango de transmisión. Por simplicidad, asúmase también que la relación entre el rango de interferencia, I_R y el rango de transmisión, T_R , es: $I_R = nT_R$, donde n es un entero.

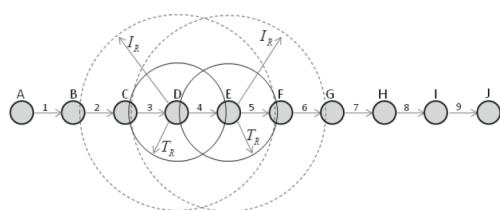


Figura 2. Red lineal.

Si $n=1$, se puede observar en la Figura 2 que el enlace 1 no puede ser usado al mismo tiempo con el enlace 2 porque el nodo B no puede recibir y transmitir simultáneamente. El enlace 3 no puede ser usado simultáneamente con el enlace 1 o con el enlace 2 porque la comunicación entre el nodo A y el nodo B será interferida y además el nodo C no puede recibir y transmitir simultáneamente. No obstante, los enlaces 1 y 4 si pueden ser usados simultáneamente, dado que no se interfieren entre sí. Esto significa que la máxima utilización del canal para este escenario será igual a $\frac{1}{n+2}$ o $\frac{1}{(I_R+2)} \cdot \frac{1}{T_R}$, es decir $\frac{1}{3}$. De la misma forma, si $n=2$, los enlaces 1, 2, 3 y 4 no podrían ser usados simultáneamente y la máxima utilización del canal se reduciría a $\frac{1}{4}$.

En esta misma figura puede observarse también que si el número de nodos N es menor que $n+2$, todos ellos estarán dentro del rango de interferencia de cada uno. Por lo tanto, debido a que en este caso existirán $N-1$ enlaces compartiendo el canal, donde sólo uno puede usarse simultáneamente, entonces la máxima utilización del canal será $\frac{1}{N-1}$. Este

grupo de enlaces, para los cuales sólo uno de ellos puede ser usado simultáneamente es definido en [16] como un *canal espacial*.

Se puede obtener mejor desempeño en términos de caudal a través de la coordinación en la inyección de paquetes en el canal con el objetivo de evitar que dos o más enlaces sean usados simultáneamente dentro de un canal espacial. Para lograr esto, los protocolos de acceso al medio deben coordinar los nodos desde la fuente hasta el destino en forma tal que todos inyecten el siguiente paquete exactamente cuando el anterior abandone el área de interferencia del próximo salto. Cada paquete debe ser inyectado cuando el anterior abandone el canal espacial, es

decir cuando el anterior esté $n+2$ saltos más adelante. Bajo estas condiciones el máximo caudal puede ser calculado como:

$$C_{max} = \begin{cases} \frac{B}{T_R + 2}, & N \geq \frac{I_R}{T_R} + 2 \\ \frac{B}{N-1}, & N < \frac{I_R}{T_R} + 2 \end{cases} \quad (1)$$

Donde, B es velocidad de transmisión de los radiotransmisores y N es el número de nodos que conforman la ruta de transmisión de los paquetes. Dado que en redes inalámbricas de sensores los radiotransmisores deben ser apagados por largos períodos de tiempo para ahorrar energía, la utilización del canal se ve reducida y el máximo caudal esperado estará dado por

$$C_{max} = \begin{cases} \frac{B'}{T_R + 2}, & N \geq \frac{I_R}{T_R} + 2 \\ \frac{B'}{N-1}, & N < \frac{I_R}{T_R} + 2 \end{cases} \quad (2)$$

Donde, $B' = B * D$

$D < 1$, es el ciclo útil. El caudal máximo alcanzable estará limitado entonces por la velocidad de transmisión de los radiotransmisores, la relación $\frac{I_R}{T_R}$ y la longitud de la ruta.

RESULTADOS NUMÉRICOS

Con el objetivo de verificar el resultado anterior se implementó una red lineal de 11 nodos y 10 saltos en el simulador Qualnet® 4.0 [17]. Se empleó tráfico CBR (*Constant Bit Rate*: por sus siglas en inglés) de tal forma que el nodo 1, la fuente, enviará paquetes de tamaño fijo (paquetes de 128 bytes y paquetes de 256 bytes) al nodo 11, el destino, a diferente intervalo de tiempo entre arribo de paquetes (10, 20, ..., 150 ms). Se ajustó B a 250 kbps y un encabezado de 44 bytes fue adicionado a

cada paquete, $\frac{I_R}{T_R} = 3$ y los nodos fueron separados

físicamente en forma tal que cada uno pudiera

enviar paquetes solamente a su vecino inmediato. Una versión sencilla del protocolo CSMA incluida en el simulador Qualnet® 4.0 fue usada como estrategia de acceso al medio. La Figura 3 muestra los resultados de las simulaciones. Como se esperaba, cada una de las curvas presentadas en la Figura 3 presenta un máximo global. Dado que $n = 3$, la mejor utilización del canal que se puede lograr es $\frac{1}{n+2} = \frac{1}{5}$, y de acuerdo con la ecuación (1) el máximo

caudal esperado es $C_{max} = 50$ kbps. Para lograr el máximo caudal la fuente debe inyectar cada paquete inmediatamente cuando el anterior esté 5 saltos más adelante. Como el tiempo necesario para transmitir un paquete es 5,504 ms y 9,6 ms para paquetes de 128 bytes y 256 bytes respectivamente, el tiempo entre paquetes inyectados esperado para lograr el máximo caudal estará alrededor de $(n+2)*5,504 = 27,52$ ms y $(n+2)*9,6 = 48$ ms, respectivamente. Estos resultados numéricos se ajustan muy bien a los resultados de las simulaciones mostrados en la Figura 3. La razón por la que el máximo caudal presentado en las dos curvas está por debajo de C_{max} es debida a los encabezados, al tamaño de los paquetes y las ineficiencias inherentes al protocolo CSMA.

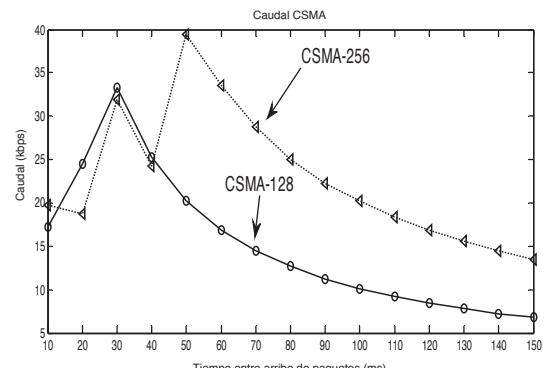


Figura 3. Máximo caudal logrado usando CSMA a diferentes velocidades de inyección.

Nótese que en estas curvas se distinguen dos regiones separadas por el máximo caudal. La primera región que se observa a la izquierda, es la región de inestabilidad, donde el caudal puede presentar máximos y mínimos locales, pero que siempre están por debajo del máximo global. En esta región el caudal obtenido nunca corresponde a la carga ofrecida a la red, al contrario siempre está

por debajo. Esta región también indica congestión, es decir que a la red se le está inyectando más tráfico del que puede soportar y bajo estas condiciones la red intenta más de una transmisión sobre un mismo canal espacial. El objetivo de una inyección coordinada de paquetes es también evitar que los nodos inyecten más paquetes de los que la red puede soportar para no entrar en esta región de inestabilidad. La segunda región, que se observa a la derecha del máximo global, es la región de baja carga, donde el caudal logrado es exactamente igual a la carga ofrecida a la red. En esta región, la carga ofrecida a la red es inferior a su capacidad. Nótese que en esta región el caudal va disminuyendo sólo a medida que la carga disminuye.

EL PROTOCOLO LEMR-multichannel

El protocolo LEMR-multichannel consiste en un diseño *cross-layer* que involucra información de la capa física, un mecanismo de acceso al medio basado en contención y un mecanismo de enruteamiento de paquetes en la capa de red, los cuales trabajan todos juntos para lograr alta confiabilidad, bajo consumo de energía, bajo retardo y baja variación de retardo[12-13]. LEMR-multichannel adopta también tres estrategias importantes y bien conocidas, *Clear Channel Assessment (CCA)*, *Low Power Listening (LPL)* y *Channel Polling*, el cual es un método de sondeo del canal muy eficiente en términos energéticos que involucra la capa física y de acceso al medio [10]. Cuando *Channel Polling* es usado en la capa de acceso al medio, los nodos despiertan periódicamente por un breve intervalo de tiempo para verificar si hay actividad en el canal (sondeo del canal). Con *Channel Polling* se puede lograr un ciclo útil reducido hasta del 1% o menos, disminuyendo de manera considerable el problema de escucha ociosa (*idle listening*) y generando ahorro de energía[10]. LEMR-multichannel también incluye un radiotransmisor Cc2420 y un modelo de consumo de energía en la capa física. La Figura 4 presenta un diagrama de bloques detallado del diseño *cross-layer* de LEMR-multichannel.

LEMR-multichannel adicionalmente reduce el retardo promedio y la variabilidad de éste a través de la coordinación de los nodos, lo cual acelera la transmisión de los paquetes hacia el sumidero. La estrategia usada por LEMR para mejorar el desempeño en términos de estas métricas consiste

en desfasar el intervalo de tiempo utilizado para sondeo (*Channel Polling*) del canal de acuerdo con la distancia desde el nodo hasta el sumidero medida en número de saltos; así, nunca dos o más transmisiones ocurren dentro de un mismo canal espacial.

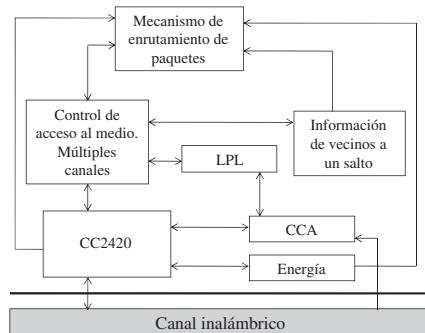


Figura 4. Diseño cross-layer de LEMR-multichannel.
Tomada de [13].

Coordinación de los nodos

La coordinación de los nodos está basada en información sobre la distancia en saltos al sumidero. Para minimizar el retardo de los paquetes destinados al sumidero, aquellos nodos ubicados a n saltos de éste, sondean el canal periódicamente, Δ segundos después de que el canal ha sido sondeado por aquellos nodos que se encuentran ubicados a $(n+1)$ saltos. La Figura 5 muestra la sincronización de la operación de sondeo en una red lineal de cuatro nodos, donde el nodo A es el sumidero, el nodo D es la fuente y los nodos B y C son nodos intermedios. En la Figura, t_0 es un tiempo de referencia. Cuando un nodo tiene datos para transmitir, éste aleatoriamente escoge una ranura dentro de una ventana de contención (*CW*, por sus siglas en inglés) que está ubicada inmediatamente antes del intervalo de sondeo del posible receptor. El nodo transmisor sensa el canal desde el inicio de la ventana de contención hasta la ranura escogida. Si el canal es tomado por otro nodo durante este periodo aleatorio de espera el nodo vuelve a pasar a estado de inactividad e intentará la transmisión del paquete en el próximo ciclo. Si el canal es encontrado libre durante este periodo de tiempo el nodo transmite un preámbulo. La duración del preámbulo es tal que cubre el resto de la ventana de contención más el intervalo de sondeo. Cuando la transmisión del preámbulo termina, la transmisión del paquete inicia. Parte del preámbulo entonces cubrirá el intervalo de sondeo del nodo receptor, lo

cual garantiza que dicho nodo recibirá el paquete. La transmisión del preámbulo también ayuda a superar problemas relacionados con las derivas de los relojes en los radiotransmisores.

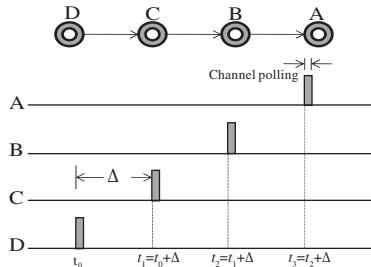


Figura 5. Coordinación para una red lineal con cuatro nodos. Tomada de [11].

La Figura 6 muestra el proceso de transmisión que corresponde a la red lineal mostrada en la Figura 5. En esta Figura se puede observar como los nodos intermedios B y C pueden iniciar la retransmisión de los paquetes inmediatamente después de que son recibidos gracias a la coordinación de los nodos y los períodos de sondeo. Adicionalmente, para mitigar el problema de la interferencia, cuando el nodo transmisor inyecta un paquete en la red, éste debe esperar hasta que el nodo más apartado, dentro del rango de interferencia lo retransmita antes de inyectar el siguiente paquete. De esta manera se evita que múltiples transmisiones tengan lugar dentro de un mismo canal espacial. Como se muestra en la Figura 6, asumiendo $T_R = I_R$, para evitar interferencias el nodo D puede inyectar el segundo paquete después de que el nodo B retransmita el primero, esto es, 3Δ segundos después de que el primer paquete fue inyectado. No obstante, parte de la transmisión desde el nodo B al nodo A coincide con la ventana de contención en el nodo C. Por lo tanto, el tiempo de ciclo (T_{Frame} , frame time) puede ser ajustado como:

$$T_{Frame} \geq 3\Delta - T_{CW} \quad (3)$$

En general, T_{Frame} debe ser

$$T_{Frame} \geq \alpha\Delta - T_{CW} \quad (4)$$

Donde, de acuerdo con los resultados anteriores

$$\alpha = n + 2 = \frac{I_R}{T_R} + 2 \quad (5)$$

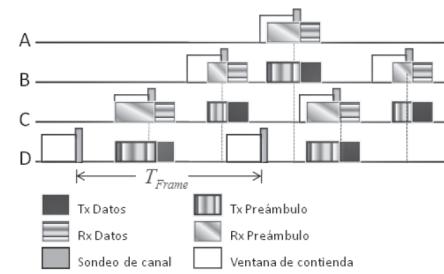


Figura 6. Proceso de transmisión desde el nodo D al A. Adaptada de [11].

El modelo de la red

La función de coordinación de los nodos clasifica también los nodos vecinos dentro de tres categorías, N_0 , N_1 y N_2 de acuerdo si los nodos están a la misma distancia en saltos, si están un salto más cerca o un salto más alejados del sumidero, respectivamente. Del mismo modo en LEMR-multichannel se establecen tres direcciones diferentes para transmitir datos hacia los nodos vecinos, arriba, abajo y local como se muestra en la Figura 7. La función de coordinación adicionalmente incrementa la probabilidad de acceso al medio y reduce la probabilidad de colisiones debido a que a la hora de transmitir paquetes hacia el sumidero LEMR-multichannel permite que los nodos compitan por el canal únicamente con aquellos nodos que están a la misma distancia en saltos. Debido al proceso de coordinación de los nodos la red queda dividida en varias áreas de acuerdo con la distancia en saltos al sumidero de cada nodo como se muestra en la Figura 8.

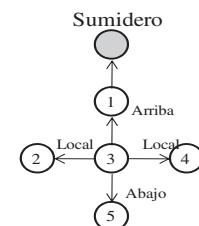


Figura 7. Tres direcciones para transmitir datos.

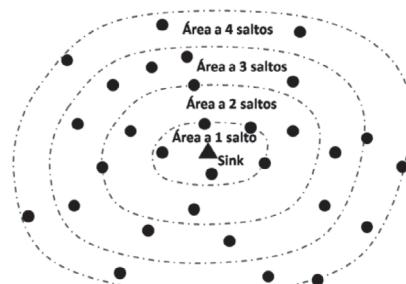


Figura 8. Modelo de la red.

Sincronización

LEMR-multichannel utiliza sincronización local y distribuida. Esto es, el proceso de sincronización inicia en el sumidero pero, cada nodo conserva solamente información local. La operación de sincronización se inicia cuando el nodo sumidero difunde (*broadcast*) un paquete SYNC que contiene su dirección, el tiempo que hace falta para realizar el próximo sondeo del canal y su energía residual. Cuando un nodo dentro de su rango de transmisión recibe el paquete SYNC, éste actualiza su distancia en saltos al sumidero (asume que está a una distancia de un salto desde el sumidero), y guarda el nivel de potencia a la cual el paquete SYNC fue recibido y el nivel de energía residual del transmisor. El nodo receptor difunde un nuevo paquete SYNC con su propia dirección, la dirección del sumidero, la distancia en saltos al sumidero, su energía residual, y el tiempo adicional que le hace falta para realizar su propio sondeo del canal. El nodo que recibe este nuevo paquete SYNC asume que está a una distancia de dos saltos desde el sumidero. De esta manera la información de distancia en saltos al sumidero es propagada a través de la red. Después de que este proceso converge, es repetido tan frecuentemente como sea necesario para capturar los cambios de topología que se puedan presentar en la red. Los paquetes SYNC también incluyen un número de secuencia, escogido por el sumidero para identificar cada proceso de sincronización específico. Cuando un nodo recibe un paquete SYNC, éste compara su número de secuencia con el que tiene guardado, y adapta su tabla (distancia en saltos, potencia recibida, y energía residual) solamente si es un nuevo proceso de sincronización. Dado que en este trabajo se consideró sólo redes estáticas, el parámetro distancia en saltos para el nodo es actualizado si el nuevo valor del parámetro es menor que el que ya está grabado. De otra manera el paquete de sincronización es ignorado. El pseudocódigo del algoritmo de procesamiento del paquete SYNC usado por cada nodo en el proceso de sincronización es mostrado a continuación.

Algorithm1: Proceamiento del paquete SYNC en el protocolo LEMR-multichannel.

- 1: *if newSeqNumber > seqNmrSaved*
- 2: *create a new neighbor entry*
- 3: *newPowerReceived ← powerReceived*
- 4: *newRemaingEnergy ← remainigEnergy*
- 5: *if newHopDistance < hopDistance*

- 6: *hopDistance = newHopDistance*
- 7: *end if*
- 8: *updates neighbor table*
- 9: *broadcast a new SYNC packet*
- 10: *else*
- 11: *discard the SYNC packet*
- 12: *end else*

Enrutamiento

En el diseño de LEMR-multichannel se utiliza información *cross-layer* para llevar a cabo la función de enrutamiento. Una vez que el proceso de sincronización ha finalizado, cada nodo guarda en una tabla su propia distancia en saltos al sumidero, la distancia en saltos al sumidero de todos sus vecinos, el nivel de potencia al cual las señales fueron recibidas en la capa física y la energía residual de cada vecino. Cuando un nodo desea enviar paquetes al sumidero, éste escoge como próximo salto un nodo que esté ubicado un salto más cerca al sumidero. Sin embargo, dado que un nodo podría tener varios vecinos un salto más cerca para escoger, es necesario definir alguna regla para decidir. Con el objetivo de mejorar la confiabilidad del protocolo, LEMR-multichannel escoge el vecino a un salto más cerca del sumidero que maximice la siguiente función de costo para el enlace entre el transmisor y el receptor

$$C_{ij} = c_1 E_j + c_2 RSSI_{ij} \quad (6)$$

Donde, E_j es la energía residual del receptor y $RSSI_{ij}$ es el nivel de potencia medido durante el proceso de sincronización. Las constantes c_1 y c_2 son pesos dados a cada variable de acuerdo con los requerimientos de la aplicación.

Caudal

En redes de sensores los eventos no son frecuentes y la mayor parte de tiempo el tráfico es liviano. Aunque en el Cc2024 el rango de interferencia es dos o tres veces el rango de transmisión, para ahorrar energía en LEMR-multichannel $T_{Frame} = 10\Delta$ o más, lo cual no afecta el retardo. Sin embargo, con aplicaciones multimedia el tráfico es más pesado y como resultado de esto, la red tiende a congestionarse. Para solucionar este problema LEMR-multichannel dinámicamente asigna nuevos periodos de sondeo utilizando diferentes canales de frecuencia, logrando así un mayor caudal. La Figura 9 muestra la estrategia utilizada

en LEMR-multichannel. Con esta estrategia se está permitiendo a los nodos realizar más de una transmisión dentro del mismo canal espacial en forma simultánea, pero cada uno sobre un canal de frecuencia diferente, lo que se traduce en un incremento en el caudal.

En LEMR-multichannel, el máximo número de frecuencias que pueden ser asignadas depende de la longitud del T_{Frame} . El tiempo entre dos períodos de sondeo consecutivos debe ser igual a 2Δ , como se muestra en la Figura 9. En consecuencia, si $T_{Frame} = N\Delta$, el máximo número de frecuencias que puede ser usado es igual a $k = [N/2]$. Donde $[x]$ es la función piso.

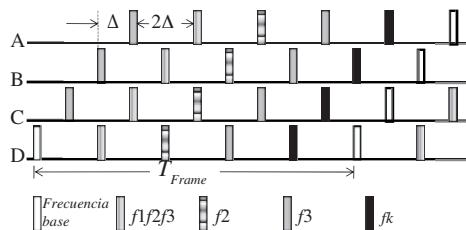


Figura 9. Estrategia de asignación de canales. Adaptada de [13].

Ciclo útil adaptativo

Para reducir el consumo de energía, en LEMR-multichannel ha sido introducida la idea de un temporizador de sondeo adaptativo de múltiples canales (*AMCP Timer: Adaptive Multi-channel Polling Timer*). En lugar de sondear cada canal de forma periódica, LEMR-multichannel sondea sólo un canal mientras no haya tráfico en la red, y sondea todos los canales cuando se detecte algún tipo de tráfico. Cuando se detecta tráfico el transmisor pone un bit llamado *MP* (*More Packets*) dentro del encabezado de cada paquete en caso de que existan más paquetes dentro de la cola esperando para ser transmitidos o si el temporizador AMCP del transmisor ya está activado. De esta forma, si T_{CP} es el tiempo de sondeo y k el número de canales de frecuencias utilizadas, entonces cuando no se ha detectado tráfico el ciclo útil será

$$ciclo útil = \frac{T_{CP}}{T_{Frame}} \times 100 \quad (7)$$

De otra forma,

$$ciclo útil = \frac{k \times T_{CP}}{T_{Frame}} \times 100 \quad (8)$$

Todos los nodos inician su operación de sondeo sobre el mismo canal de frecuencia (por ejemplo, la frecuencia base). Cuando un paquete es recibido, ya sea de control o de datos, los nodos activan el *AMCP*, si *MP* está activado, e inician el sondeo sobre todos los canales de frecuencia. Cuando un nodo recibe un paquete y lo retransmite sobre el canal base, el nodo espera más paquetes que serán subsecuentemente enviados sobre los demás canales. Cada vez que un paquete es recibido el *AMCP* es actualizado. Una vez el *AMCP* expira, los nodos vuelven al modo inicial, sondeando únicamente el canal en la frecuencia base. La duración del *AMCP* debe ser ajustada de acuerdo con las características del tráfico.

Asignación de canales

Una ventaja de LEMR-multichannel es que su estrategia de asignación de canales es muy simple. Cuando se ha detectado tráfico, cada nodo sondea periódicamente un canal de frecuencia diferente cada 2Δ , como se muestra en la Figura 9. Las frecuencias son asignadas secuencialmente comenzando con la frecuencia base. Así entonces el primer paquete es enviado usando la frecuencia base, el paquete 2 usando f_1 , el paquete 3 usando f_2 , y así sucesivamente hasta la frecuencia f_k , cuando el ciclo se repite. De este modo, los nodos que están a una distancia de n saltos del sumidero periódicamente sondean el canal un tiempo Δ segundos después de que los nodos que están a $(n+1)$ saltos del sumidero han sondeado el canal sobre la misma frecuencia. Nótese que cada paquete recibido sobre cada frecuencia es inmediatamente retransmitido sobre la misma frecuencia, lo cual minimiza el retardo y el *jitter*.

Cálculo de Δ

La implementación de LEMR-multichannel usa la secuencia de transmisión DATA/ACK, por lo tanto, debe ser calculado ahora como

$$\Delta = T_{tx} + T_S + T_{fcs} + 2T_{proc} + 2T_{prop} \quad (9)$$

Donde, $T_{tx} = T_{pkt} + T_{ACK} + T_{Rx/Tx}$ es el tiempo total necesario para transmitir un paquete, T_{pkt} es el tiempo necesario para transmitir el paquete más grande que la capa física soporta; T_{ACK} es el tiempo de transmisión del paquete ACK; $T_{Rx/Tx}$ es el tiempo necesario para

que el radiotransmisor cambie de modo recepción a modo transmisión y viceversa; $T_S = T_{CW} + T_{CP} + T_{guard}$ es el tiempo de inicio, T_{CW} es la ventana de contienda, T_{CP} es el tiempo de sondeo del canal, T_{guard} es un tiempo de guarda, T_{fcs} es el tiempo empleado para cambiar de un canal de frecuencia a otro; T_{proc} es el tiempo de procesamiento y T_{prop} es el tiempo de propagación. El radiotransmisor Cc2420 toma 300 μs para cambiar de un canal de frecuencia a otro, según experimentos de medición descritos en [18]. La Figura 10 muestra el diagrama de flujo resumiendo toda la operación de LEMR-multichannel.

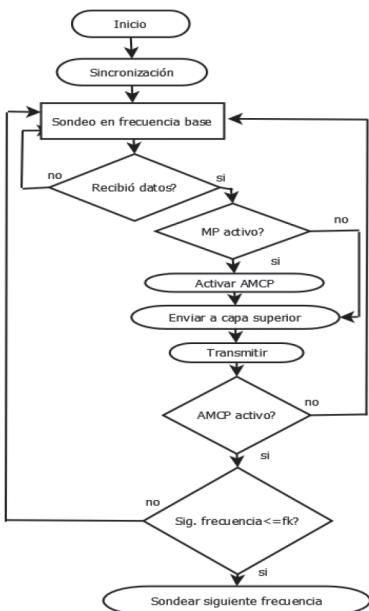


Figura 10. Diagrama de flujo de LEMR-multichannel.

Formato de los paquetes

El protocolo utiliza tres tipos de paquetes de los cuales dos son de control, el paquete SYNC y ACK y otro de datos. La Figura 11 muestra el formato del paquete SYNC. Como muestra la figura cada paquete SYNC tiene un tamaño de 21 bytes y consta de siete campos los cuales se describen a continuación.

- **Type:** Este campo se indica el tipo de paquete. Para este caso el valor debe indicar que el paquete es de tipo SYNC.
- **Sink address:** Este campo indica la dirección del sumidero que inició la sincronización.
- **Source address:** Este campo indica la dirección del nodo que envía el paquete.

- **Hop distance:** Este campo indica la distancia en saltos al sumidero del nodo que envía el paquete.

- **Time next polling:** Este campo indica el tiempo que hace falta para que el nodo que envía el paquete realice el próximo sondeo del canal.

- **Remaining energy:** Este campo indica la energía residual en el nodo que envía el paquete.

- **Sequence number:** Este campo indica el número de secuencia del proceso de sincronización.

La Figura 12 muestra el formato del paquete ACK. Como muestra la figura cada paquete ACK consta de cinco campos los cuales se describen a continuación.

- **Type:** Este campo se indica el tipo de paquete. Para este caso el valor debe indicar que el paquete es de tipo ACK.

- **Source address:** Este campo indica la dirección del nodo que envía el paquete.

- **Destination address:** Este campo indica la dirección del nodo destino.

- **mp:** Este campo indica que el nodo transmisor tiene paquetes en cola para transmitir.

- **crc:** Este campo es utilizado para verificar si el paquete está libre de errores.

La Figura 13 muestra el formato del paquete de datos. Como muestra la figura cada paquete de datos contiene un encabezado de cinco campos después del cual empiezan los datos. A continuación se describen los campos del encabezado de los datos.

- **Type:** Este campo se indica el tipo de paquete, Para este caso el valor debe indicar que el paquete es de tipo DATA.

- **Sourceaddress:** Este campo indica la dirección del nodo que envía el paquete.

- **Destination address:** Este campo indica la dirección del nodo destino.

- **mp:** Este campo indica que el nodo transmisor tiene paquetes en cola para transmitir.

- **crc:** Este campo es utilizado para verificar si el paquete está libre de errores.

1 byte	4 bytes	4 bytes	2 bytes	4 bytes	4 bytes	2 bytes
type	sink address	source address	hop distance	time next polling	remaining energy	sequence number

Figura 11. Formato del paquete SYNC.

1 byte	4 bytes	4 bytes	1 bit	2 bytes
type	source address	destination address	mp	crc

Figura 12. Formato del paquete de control ACK.

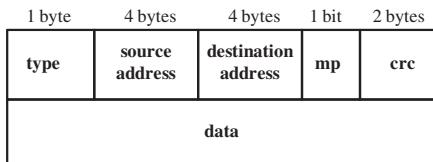


Figura 13. Formato del paquete de datos.

EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO

Organización de la simulación

Con el propósito de evaluar el desempeño de LEMR-multichannel bajo diferentes escenarios y condiciones de red, se desarrollaron modelos de simulación detallados de los protocolos LEMR-multichannel, YMAC [15] y TMAC [6] en el simulador Qualnet®. Los protocolos YMAC y TMAC, fueron escogidos con fines de comparación debido a que son protocolos adaptativos ampliamente conocidos. Para simular la capa física, el radiotransmisor Cc2420 fue modelado de acuerdo con los parámetros presentados en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros de simulación.

Parámetro	Valor
Potencia de transmisión	10 dBm
Sensibilidad	-95 dBm
Umbral de recepción	-77 dBm
Velocidad de transmisión	250 kbps
Consumo de potencia, modo Tx	91,4 mW
Consumo de potencia, modo Rx	59,1 mW
Consumo de potencia, modo inactivo	15 μ W
Máximo tamaño de paquete	128 bytes
c1 and c2	1

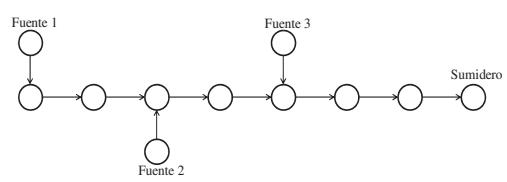
La implementación del protocolo TMAC usa un valor de TA 15 ms (TA determina el tiempo mínimo de escucha ociosa por periodo), una ventana de contención de 10 ms, y un ciclo útil del 10%. La implementación del protocolo YMAC usa cinco canales de frecuencia, el intervalo de sondeo del canal es ajustado a 3 ms, cada ranura de tiempo se ajustó en 15,2 ms y se usaron diez ranuras por ciclo, por lo tanto el ciclo útil es del 3,9%. En la implementación de LEMR-multichannel, Δ es igual a 15,235 ms, el tiempo de ciclo es de 152,35 ms y el intervalo de sondeo es de 3 ms, por lo tanto, el ciclo útil es igual a 1,97%. La implementación de LEMR-multichannel usa cinco canales de frecuencia y el temporizador

AMCP es ajustado a 300 ms. Paquetes de un tamaño máximo igual a 128 bytes son soportados en la capa física. En las simulaciones de los protocolos YMAC y TMAC se utiliza enrutamiento estático, mientras que el enrutamiento con LEMR-multichannel es realizado como se indica en la sección anterior. Por último, el rango de transmisión es ajustado a 100,181 metros y con los parámetros especificados en la Tabla 1, $I_R/T_R = 3$.

Evaluación de desempeño bajo contención con tráfico ligero

Para estudiar el desempeño de los tres protocolos bajo condiciones de contención, se utilizó la red lineal con tres fuentes y un sumidero mostrada en la Figura 14. En las simulaciones cada nodo fuente envía 100 paquetes de 90 bytes hacia el sumidero, con un intervalo de tiempo fijo entre paquetes enviados de 1, 2, 3, ... y 10 s, el cual es un escenario típico en RIS. Los nodos están separados por una distancia de 80 m; por lo tanto, cada nodo puede escuchar solamente a su vecino de al lado o a los vecinos ubicados arriba o abajo, si hay. Cada experimento es repetido 30 veces para recolectar suficientes datos por confianza estadística.

Cada simulación es ejecutada por un tiempo de 3000 s. Las Figuras 15(a), 15(b) y 15(c) muestran el retardo promedio que cada fuente experimenta para los tres protocolos bajo consideración a medida que intervalo entre generación de paquetes es incrementado. De las Figuras se puede observar que el retardo proveído por la función de coordinación de LEMR-multichannel no es sólo el menor, sino que adicionalmente presenta la menor variabilidad en comparación con los protocolos TMAC y YMAC. LEMR-multichannel supera al protocolo TMAC hasta en más de 10 veces para velocidades de transmisión altas y en más de cuatro veces para velocidades de transmisión bajas. También supera al protocolo YMAC en términos de retardo hasta en más de dos veces.

Figura 14. Red lineal con tres fuentes y un sumidero.
Tomada de [11].

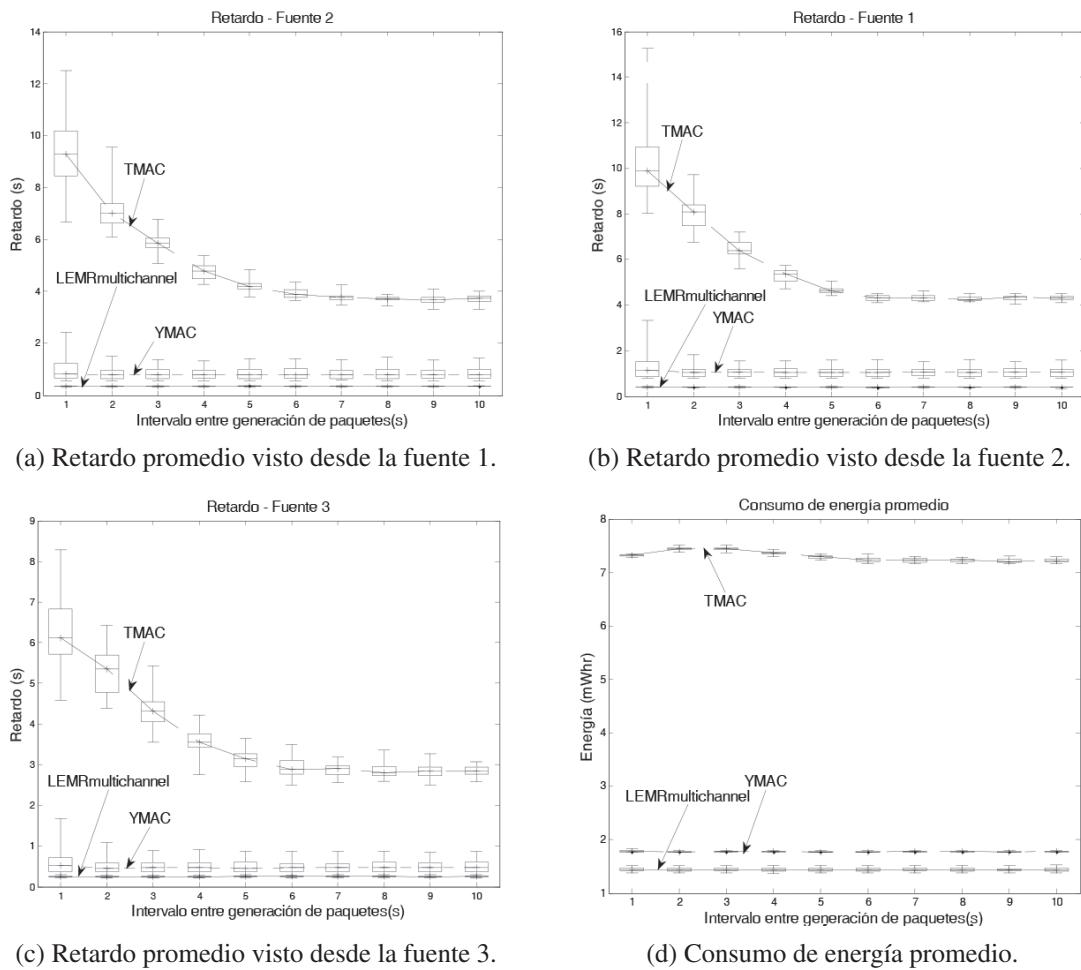


Figura 15. Retardo y consumo de energía promedio los protocolos bajo comparación.

TMAC experimenta el mayor retardo debido a que es el más propenso a colisiones, lo cual es debido a tres causas principalmente. Primero que todo, TMAC utiliza solamente un canal de frecuencia, por lo tanto, otros nodos ubicados dentro del rango de interferencia a menudo interfieren con las transmisiones. Segundo, nodos dentro del mismo grupo (*cluster*) están sincronizados para despertar al mismo tiempo, esto significa que al comienzo de cada ciclo todos los nodos con paquetes para enviar, intentan transmitir al mismo tiempo, lo que trae como resultado un incremento en las colisiones. Finalmente, los paquetes deben esperar por largos periodos de tiempo en la cola, lo cual es debido al hecho de que TA es solamente 15 ms y no es suficiente para mantener el nodo fuente despierto cuando el siguiente paquete arribe. El

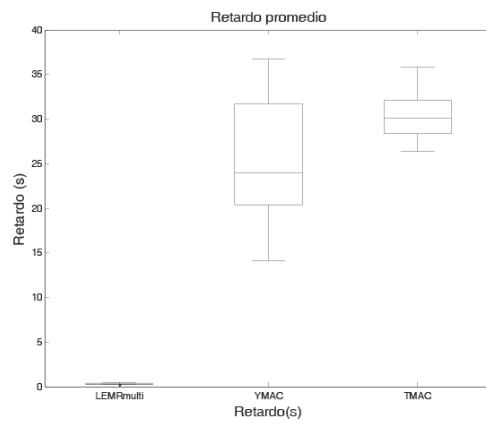
protocolo YMAC utiliza varios canales y es menos propenso a colisiones. Sin embargo, cuando los nodos tienen más de un paquete por transmitir ellos pueden notificar al destino y enviar hasta 4 paquetes más en ráfaga. Después de esto el receptor debe esperar hasta el próximo ciclo para competir por el canal y retransmitir estos paquetes. Esto indica que como resultado, los paquetes deben esperar un largo tiempo en la cola. En contraste, debido a la estrategia de coordinación de LEMR-multichannel, las colisiones y la interferencia son mitigadas y los paquetes son retransmitidos continuamente con muy bajo retardo y variabilidad. La Figura 15(d) muestra el consumo de energía promedio en la red. Una de las principales limitaciones en el protocolo TMAC es nuevamente el desperdicio de energía debido al problema de *idle listening*. Por otro

lado, el corto preámbulo y la estrategia de sondeo del canal, utilizada en LEMR-multichannel y en YMAC, alivia este problema consumiendo ambos protocolos alrededor de siete veces menos energía que TMAC. No obstante, LEMR-multichannel es un poco más eficiente energéticamente que YMAC y esto es debido a que este último sondea el canal por lo menos dos veces durante cada ciclo además de que es más propenso a las colisiones.

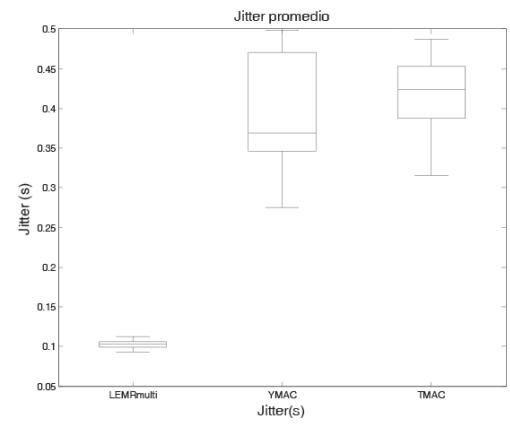
Evaluación de desempeño bajo contención con tráfico multimedia

Para estudiar el desempeño de los tres protocolos en consideración con tráfico multimedia, se utilizó el mismo escenario de la sección anterior. Sin embargo, con el propósito de simular tráfico multimedia, cada nodo fuente genera y envía 200 paquetes de 95 bytes cada uno hacia el nodo sumidero con un

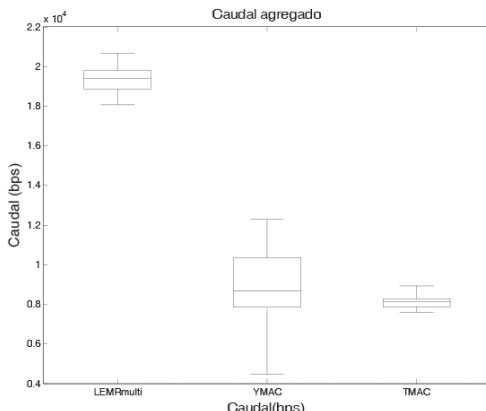
intervalo de tiempo variable (se utilizó tráfico con distribución de *Poisson*) entre paquetes generados con media 0,12 segundos (6,333 kbps cada uno). La Figura 16(a) muestra el retardo promedio logrado por los tres protocolos. LEMR-multichannel, una vez más, presenta no sólo el mejor desempeño en términos de retardo sino también la menor variabilidad de éste, gracias a la estrategia de coordinación de los nodos. El protocolo YMAC presenta mejor retardo promedio que TMAC, pero también la mayor variabilidad. Esto es debido a que cuando un nodo tiene en cola varios paquetes para transmitir, éste puede transmitir en ráfaga hasta cuatro en caso de ganar el canal, pero si falla debe esperar por un ciclo completo para intentarlo nuevamente, así también ocurre en cada uno de los nodos intermedios. Aunque el protocolo TMAC ha sido diseñado para manejar ráfagas de tráfico,



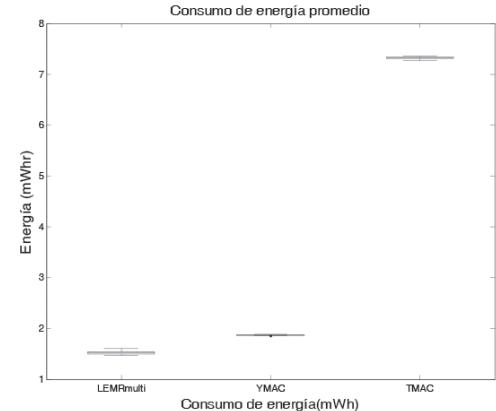
(a) Retardo promedio.



(b) Jitter promedio.



(c) Caudal agregado promedio.



(d) Consumo de energía promedio

Figura 16. Desempeño de los protocolos en consideración.

éste todavía presenta el mayor retardo, lo cual es debido principalmente a las causas discutidas en la sub-sección anterior.

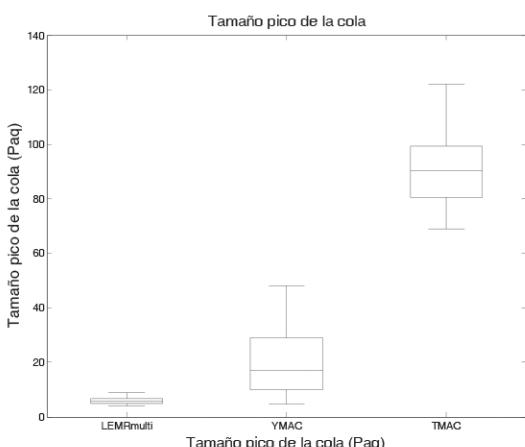
La Figura 16(b) muestra el desempeño en términos de *jitter* para los tres protocolos. LEMR-multichannel presenta el mejor desempeño. También en este caso, el protocolo YMAC muestra mejor desempeño promedio que TMAC, pero una mayor variabilidad. TMAC presenta un *jitter* promedio mayor debido a que es más propenso a las colisiones que YMAC, lo cual es causa de su mayor retardo también. La Figura 16(c) presenta el desempeño en términos de caudal para los tres protocolos y demuestra las ventajas del uso de múltiples canales y de las estrategias de diseño de LEMR-multichannel. La figura muestra como LEMR-multichannel logra más de dos veces el caudal de los otros protocolos. En otras aplicaciones tales como vigilancia, unos pocos *frames/segundo* o solamente imágenes en tiempo real son suficientes para proveer un buen desempeño. Por lo tanto, LEMR-multichannel es adecuado para estos tipos de aplicaciones. Cabe anotar que LEMR-multichannel logró un caudal sobre los 21 kbps con un ciclo útil del 1,97 % y $B = 250$ kbps, lo cual está por encima del caudal esperado de acuerdo con la ecuación (2). La Figura 16(d) muestra el consumo de energía promedio en la red.

LEMR-multichannel y YMAC presentan otra vez el mejor desempeño, gracias al corto preámbulo

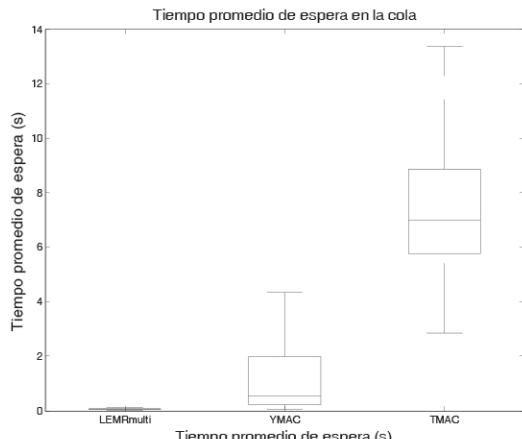
utilizado y la estrategia de sondeo del canal. Por otro lado, otra vez TMAC presenta el peor desempeño debido principalmente al problema del *idle listening*. Finalmente, las Figuras 17(a) y 17(b) muestran el tiempo promedio de espera en la cola y el tamaño pico que alcanzaron las colas de los nodos fuente en los tres protocolos. LEMR-multichannel presenta nuevamente el mejor desempeño. Esto es debido a que la estrategia de coordinación de LEMR-multichannel permite que por cada paquete que los nodos reciban, éstos tengan oportunidad de retransmitirlo inmediatamente. Como resultado, el tiempo promedio de espera en la cola con LEMR-multichannel es bajo, lo que trae también como consecuencia que los nodos experimenten mayor caudal, menor retardo y *jitter*. Esto significa también que LEMR-multichannel necesita menos recursos de memoria para operar. Finalmente, YMAC presenta mejor desempeño que TMAC, debido a que los nodos intermedios en YMAC pueden retransmitir más paquetes por ciclo.

CONCLUSIONES

Este artículo presenta a LEMR-multichannel, un protocolo diseñado para soportar aplicaciones de RISM, en cuyo diseño las principales métricas tenidas en cuenta han sido el retardo, el *jitter*, el caudal y el consumo de energía. LEMR-multichannel logra mejor desempeño en términos de caudal, siendo simultáneamente eficiente en términos de retardo,



(a) Tamaño pico de la cola.



(b) Tiempo de espera en la cola.

Figura 17. Desempeño de los nodos fuente en la cola.

jitter, y consumo de energía en comparación con los protocolos aquí evaluados. El protocolo utiliza dos estrategias para lograr su buen desempeño, una estrategia de coordinación de los nodos y un ciclo útil dinámico. Este trabajo se enfocó principalmente en la búsqueda de soluciones al problema de la interferencia y estrategias para lograr una inyección coordinada de paquetes en el canal de tal forma que el retardo y la variación del retardo sean considerablemente mejorados. Dado que los radiotransmisores permiten el uso de varios canales de frecuencias, se aprovechó esta ventaja para permitir a los nodos realizar más de una transmisión en forma simultánea dentro de un mismo canal espacial, lo que se tradujo en un incremento en el caudal. Los logros obtenidos aquí pueden ser aplicables a otros escenarios ya que el problema del caudal y del retardo se puede mejorar en cualquier tipo de red inalámbrica coordinando la inyección de los paquetes en el canal. Los resultados de las simulaciones también muestran que con un pequeño paquete LEMR-multichannel logra un caudal por encima de 20kbps, suficiente para transmitir imágenes en tiempo real en una red de múltiples saltos. LEMR-multichannel es el primer protocolo *cross-layer*, hasta donde los autores conocen, diseñado para lograr mejor desempeño en términos caudal, retardo, variación de retardo, consumo de energía simultáneamente, con el objetivo de proveer soporte al transporte de contenidos multimedia usando varios canales de frecuencia, como también es el primer protocolo diseñado para soportar contenidos multimedia en RISM utilizando LPL (*Low Power Listening*), lo cual garantiza un bajo consumo de energía.

REFERENCIAS

- [1] I.F. Akyildiz, T. Melodia and K. R. Chowdhury. "A survey on wireless multimedia sensor networks". Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking. Vol. 51 N° 4, pp. 921-960. Marzo 2007. ISSN: 1389-1286.
- [2] S. Misra, M. Reislein and G. Xue. "A survey of multimedia streaming in wireless sensor networks". IEEE Communications Surveys and Tutorials. Vol. 10 N° 4, pp. 18-39. Enero 2009. ISSN: 1553-877X.
- [3] Crossbow Technology. Imote2. 2005. URL: <http://www.xbow.com/>
- [4] L. Shu, Z. Zhou, M. Hauswirth, D. Le Phuoc, P. Yu and L. Zhang. "Transmitting streaming data in wireless multimedia sensor networks with holes". 6th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia. Oulu, Finland. 2007.
- [5] Chipcon. CC2420 datasheet. 2005. URL: <http://www.chipcon.com>
- [6] T.V. Dam and K. Langendoen. "An adaptive energy-efficient mac protocol for wireless sensor networks". 1st International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Los Angeles, USA. 2003.
- [7] W. Ye, J. Heidemann and D. Estrin. "Medium access control with coordinated adaptive sleeping for wireless sensor networks". IEEE/ACM Transactions on Networking. Vol. 12 N° 3, pp. 34-39. 2004.
- [8] J. Polastre, J. Hill and D. Culler. "Versatile low power media access for wireless sensor networks". In Proceedings of the 2nd International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 95-107. 2004.
- [9] M. Buettner, G.V. Yee, E. Anderson and R. Han. "X-mac: A short preamble mac protocol for duty-cycled wireless sensor networks". In Proceedings of the 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems, pp. 307-320. 2006.
- [10] W. Ye, F. Silva and J. Heidemann. "Ultra-low duty cycle mac with scheduled channel polling". 4th International Conference on Embedded Networked Sensor Systems. Boulder. USA. 2006.
- [11] A. Cortes, R. Gamboa, N.M. Peña and M. Labrador. "Low energy and low latency in wireless sensor networks". IEEE International Conference on Communications. Dresden, Alemania. 2009.
- [12] A. Cortes, N.M. Peña and M. Labrador. "Anadaptive multi-channel approach for real-time multimedia wireless sensor networks". IEEE Latin American Conference on Communications. Medellín, Colombia. 2009.
- [13] A. Cortes, N.M. Peña and M. Labrador. "An adaptive multi-channel approach for real-time multimedia wireless sensor networks". IEEE Latin American Transactions. Vol. 8 N° 4, pp. 370-376. Agosto, 2010. ISSN: 1548-0992.

- [14] A. Cortes, N.M. Peña and M. Labrador. “Performance modeling of the LEMR-multichannel Protocol”. IEEE Latin American Conference on Communications. Pará, Brasil. 2011.
- [15] Y. Kim, H. Shin and H. Cha. “Y-MAC: An energy-efficient multi-channel MAC protocol for dense wireless sensor network”. The 2008 International Conference on Information Processing in Sensor Networks. St. Louis, USA. 2008.
- [16] M.A. Alzate, N.M. Pena and M.A. Labrador. “Capacity, bandwidth and available bandwidth concepts for wireless ad hoc networks”. IEEE Military Communications Conference. San Diego, USA. 2008.
- [17] Qualnet. Version 4.0. 2008. URL: <http://www.scalable-networks.com/>
- [18] H.W. So, G. Nguyen and J. Walrand. “Practical synchronization techniques for multi-channel mac”. ACM MobiCom. Los Angeles, USA. 2006.