



Evaluación experimental del protocolo IEEE 802.15.4 TSCH en una red 6TiSCH

Carlos M. García Algora, Vitalio Alfonso Reguera, Kris Steenhaut

RESUMEN / ABSTRACT

El modo Salto de Canal por Ranuras de Tiempo (TSCH¹) para control de acceso al medio (MAC) en el estándar IEEE 802.15.4 ha sido designado como el protocolo MAC estándar para redes de baja potencia con pérdidas (LLN), un componente clave en la denominada Internet de las Cosas (IoT). Su flexibilidad hace del modo TSCH un candidato promisorio para el futuro de la capa MAC en LLN. Por tanto, es indispensable evaluar su desempeño bajo diferentes condiciones de carga de tráfico con el fin de trazar guías para su empleo y configuración en diferentes aplicaciones de IoT. En este artículo, se presenta una evaluación experimental del desempeño de TSCH basada en simulaciones en el simulador en Java de ContikiOS (COOJA). La evaluación se realiza utilizando diferentes valores de carga de tráfico en una configuración típica de LLN; y el desempeño del protocolo es evaluado en términos de razón de entrega de paquetes (PDR), demora extremo a extremo y consumo de energía. Los resultados muestran que TSCH se desempeña mejor en condiciones de tráfico medias que con baja y alta carga de tráfico.

Palabras claves: Evaluación, TSCH, IoT, LLN, desempeño, MAC

The Time-Slotted Channel Hopping (TSCH) mode for medium access control (MAC) included in the standard IEEE 802.15.4 has been designed as the multichannel MAC protocol for Low-power and lossy networks (LLNs), a key component of the Internet of Things (IoT). Its flexibility makes the TSCH mode a very promising candidate for the future of the MAC layer in LLNs. As such, its performance under different conditions must be assessed, so that accurate guidelines for its application can be drawn. In this paper, we present an experimental evaluation of the protocol based on simulations on ContikiOS Java Simulator (COOJA). The experimental setup is based on the 6TiSCH architecture for LLNs. Results show that TSCH performs better under conditions of medium traffic load than under low or high traffic load.

Keywords: Evaluation, TSCH, IoT, LLN, performance, MAC

Experimental evaluation of IEEE 802.15.4 TSCH on a 6TiSCH network

1.- INTRODUCCIÓN

La realización práctica de la Internet de las Cosas (IoT) está indispensablemente ligada a las redes de baja potencia y con pérdidas (LLN), las cuales están compuestas por numerosos dispositivos de gama baja interconectados a través de transceptores half-dúplex de baja potencia, usando baterías como su fuente de alimentación. Además, se supone que las LLNs sean desplegadas como redes ad hoc auto-configurables que funcionen por largos períodos de tiempo (varios meses, al menos) sin intervención humana directa. Con el objetivo de cubrir amplias áreas de despliegue con radios de baja potencia, las LLN necesitan utilizar comunicaciones multi-salto. Todas estas características hacen que la eficiencia energética y la adaptabilidad sean preocupaciones fundamentales en LLNs.

El conjunto creciente de aplicaciones de LLNs incluye monitoreo ambiental, control industrial, seguridad y vigilancia, monitoreo de salud, casa/edificios/ciudades inteligentes, agricultura de precisión y muchas otras. Estas aplicaciones

¹ Todas las siglas utilizadas en este artículo provienen del idioma inglés.

conducen a un amplio espectro de requerimientos para las LLNs; desde tasas de transmisión de datos altas para sistemas críticos de vigilancia hasta las bajísimas tasas requeridas por aplicaciones de agricultura de precisión. Además, según la especificación para capa física (PHY) del estándar IEEE 802.15.4 (1), la mayoría de las LLNs operan en la banda de 2.4 GHz, en la cual tienen que coexistir con otros sistemas compuestos por dispositivos con potencia de radio y demandas de tráfico superior, y otros dispositivos que contaminan el espectro, como los hornos de microondas, por solo citar un ejemplo. Por tanto, las LLN tienen que ser robustas ante interferencia y ruido.

Debido a que la interfaz de radio es el componente que más energía consume en un nodo LLN, estos dispositivos utilizan una técnica de ahorro de energía llamada ciclo útil de radio (RDC) (2). Esta técnica consiste en mantener el radio apagado durante la mayor parte del tiempo (más del 90% del tiempo) y encenderlo periódicamente para chequear si hay paquetes pendientes y para transmitir paquetes. El empleo de RDC impone el uso de protocolos de control de acceso al medio (MAC) que sean eficientes en el empleo de la interfaz de radio y, a la vez, mantengan un desempeño aceptable en términos de tasa de transmisión de datos y demora.

Las características de las LLN y los requerimientos impuestos por sus aplicaciones han provocado la creación de nuevos protocolos MAC específicos para LLN. Los protocolos diseñados para redes ad hoc inalámbricas, y redes inalámbricas en general, no son adecuados para LLN porque la mayoría de ellos asume la existencia de transceptores full-dúplex o varias interfaces de radio, y no tienen en cuenta el empleo de RDC. La multitud de protocolos MAC propuestos para LLN va desde protocolos asíncronos de un solo canal hasta protocolos multicanal híbridos que combinan el empleo de múltiples frecuencias con esquemas de división de tiempo, incluyendo todas las combinaciones entre estos dos extremos.

Las comunicaciones multicanal en redes inalámbricas ofrecen un grupo de ventajas potenciales. Además del obvio incremento en la capacidad de la red, comunicaciones simultáneas en canales diferentes disminuyen la contención por el medio y, por tanto, pueden mejorar el desempeño de la red, por ejemplo en términos de tasas de transmisión de datos y demora. Por tanto, la evolución de los protocolos MAC multicanal para LLN (3) ha conducido a la inclusión en 2012 del protocolo MAC de Salto de Canal por Ranuras de Tiempo (TSCH) como enmienda IEEE 802.15.4e del estándar para las capas PHY y MAC de redes inalámbricas de área personal (WPAN), que incluye las LLN como uno de sus objetivos de estandarización. Esta enmienda ha sido incluida en la versión más reciente del estándar publicada en 2015 (1). Por otra parte, la arquitectura 6TiSCH (4), propuesta por la Fuerza de Trabajo para Ingeniería de Internet (IETF) como la pila de protocolos estandarizada para LLN, está basada en TSCH para la capa MAC y en IEEE 802.15.4 PHY para la capa física.

2.- TRABAJO RELACIONADO

Para aplicar y configurar TSCH apropiadamente es indispensable evaluar su desempeño ante diferentes condiciones dentro de la red. Con este objetivo se han publicado varios trabajos de investigación en los últimos años (5–11). Los trabajos presentados en (5) y (6) proponen modelos teóricos basados en cadenas de Markov, los cuáles son validados a través de experimentos simulados y reales. Los resultados muestran la validez de sus resultados pero solo son aplicables a enlaces TSCH compartidos.

El análisis de una red TSCH publicado en (7) muestra la inestabilidad de los enlaces con nodos que están a más de 5 metros entre sí, así como el efecto negativo de la presencia de sistemas IEEE 802.11 (WiFi) en el desempeño de redes IEEE 802.15.4. Los autores de (9) evalúan el desempeño de TSCH en términos de demora pero la eficiencia energética y la confiabilidad de la red no son incluidas en el análisis. En (8) se presenta una evaluación comprehensiva de TSCH orientada a ambientes de oficina con presencia de redes WiFi. Una comparación de desempeño de TSCH y EM-MAC, un protocolo MAC multicanal para LLN basado en contención, es presentada en (11); pero no se incluyen intervalos de confianza para la validez estadística de los resultados.

En este artículo se presenta una evaluación experimental de TSCH basada en simulaciones extensivas bajo diferentes cargas de tráfico en una red LLN mediana. La configuración de protocolos utilizada en esta evaluación utiliza la arquitectura 6TiSCH propuesta por la IETF, incluyendo el protocolo de datagramas de usuario (UDP) en la capa de transporte, direccionamiento IPv6 y el protocolo de ruteo IPv6 para LLN (RPL) (12) en la capa de red, la capa de adaptación 6LoWPAN (13), TSCH en la capa MAC, e IEEE 802.15.4 PHY en la capa física. El desempeño es evaluado en términos de razón de entrega exitosa de paquetes (PDR), demora extremo-a-extremo y consumo de energía.

3.- CONTEXTO

3.1.-IEEE 802.15.4 TSCH

El diseño de TSCH es heredado de WirelessHART e ISA 100.11a. TSCH construye una red en malla sincronizada globalmente. Esta sincronización es iniciada desde el coordinador de la red y se extiende jerárquicamente a todos los nodos

de la red siguiendo una estructura de Grafo Dirigido Acíclico (DAG). Los nodos utilizan a sus padres como fuentes de sincronismo y lo actualizan cada vez que reciben una trama de datos o un reconocimiento (ACK) desde su padre. Los nodos se unen a la red a partir de la recepción de un *beacon* mejorado (EB, del inglés *enhanced beacon*) desde otro nodo. Inicialmente, el único nodo que envía EB es el coordinador de la red.

TSCH divide el tiempo en ranuras, las cuales son agrupadas en tramas de ranuras que se repiten periódicamente en el tiempo. Cada ranura de tiempo tiene una duración suficiente para acomodar la transmisión de una trama y su ACK correspondiente, incluyendo el tiempo necesario para cifrar/descifrar la trama si se emplea seguridad. Esta duración depende de la implementación y suele ser de 10-15ms. Las ranuras pueden ser compartidas o dedicadas. La comunicación en ranuras compartidas sigue un esquema Acceso Múltiple por Detección de Portadora y Prevención de Colisiones (CSMA-CA), mientras las ranuras dedicadas establecen un enlace unidireccional entre dos nodos y solamente el nodo fuente de ese enlace puede transmitir durante esa ranura. En un enlace dedicado se pueden establecer más de un nodo receptor, por ejemplo para enviar paquetes de *broadcast* usando una sola transmisión de la trama.

Una planificación (del inglés *schedule*) establece el propósito de cada ranura: transmitir, recibir o dormir. Cada ranura de tiempo dentro de una trama de ranuras se identifica por su desplazamiento de ranura (posición de la ranura dentro de la trama de ranuras) y su desplazamiento de canal (determina la frecuencia que se utiliza en la comunicación). TSCH implementa una estrategia de salto de frecuencia usando el desplazamiento de canal de la ranura y un número absoluto de ranura (ASN), un contador con el número de ranuras que ha ocurrida desde el inicio de la red hasta el presente, según se muestra la ecuación 1.

$$f_{ch} = F([(ASN + ch_{offset}) \bmod n_{ch}]) \quad (1)$$

Por ejemplo, en la Figura 1, la ranura con desplazamiento 3 dentro de la trama de ranuras (señalada con color naranja), tiene un desplazamiento de canal $ch_{offset} = 1$. Durante el ciclo k -ésimo de la trama de ranuras, la ranura activa ocurre en el $ASN = 4$. Si el número total de canales $n_{ch} = 16$ y la función $F(x) = x + 11$, la frecuencia a utilizar se calcula empleando la ecuación 1, del siguiente modo:

$$\begin{aligned} f_{ch} &= F([4 + 1] \bmod 16) \\ f_{ch} &= F(5) = 11 + 5 = 16 \\ f_{ch} &= 16 \end{aligned}$$

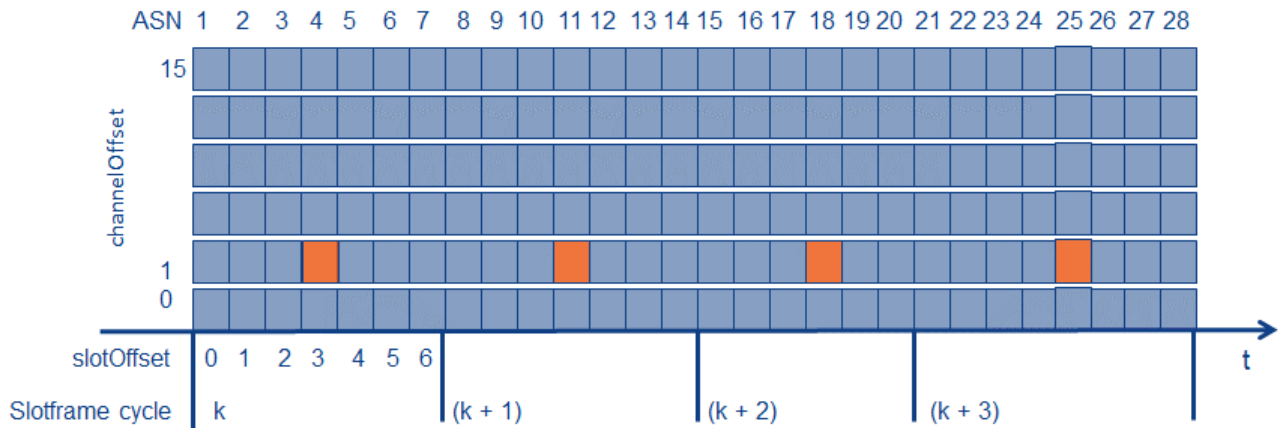


Figura 1
Ejemplo de estructura de una planificación en TSCH

Análogamente, el canal utilizado en la siguiente ocurrencia de la ranura, o sea durante el ciclo $(k+1)$ -ésimo de la trama de ranuras, sería el 23, y así sucesivamente. El resultado de esta estrategia es que intercambios de paquetes sucesivos entre los mismos nodos se realizan en frecuencias diferentes. En caso que una transmisión falle, por ejemplo debido a interferencia externa o el desvanecimiento multi-trayecto, la retransmisión ocurre en una frecuencia diferente, usualmente con mayor probabilidad de éxito que si se usara la misma frecuencia otra vez.

La construcción y el mantenimiento de la planificación en una red TSCH están fuera del alcance de los estándares establecidos. IETF 6TiSCH (ver siguiente sección) propone dos opciones para ello: (1) centralizadamente, como WirelessHART e ISA 100.11a, los cuales computan las rutas basados en estadísticas de los enlaces e información de tráfico recolectada desde la red; (2) de manera distribuida. En los últimos años se han propuesto varios algoritmos para construir y mantener la planificación en una red TSCH. Los trabajos presentados en (14–16) destacan como buenas alternativas para

ello. No obstante, las funcionalidades de Scheduling Function 0 (SF0) (15) todavía son demasiado básicas y no responden a los requerimientos reales de una LLN. Scheduling Function 1 (SF1) propone un acercamiento centralizado, lo cual entra en contradicción con la naturaleza ad hoc y de autoconfiguración de las LLNs. Orchestra (16) crea una planificación básica que los nodos pueden construir y mantener de manera autónoma, basándose solamente en el conocimiento local de su vecindad. En la sección 3.3 se brinda una breve descripción de Orchestra.

3.2.-IETF 6TiSCH

El grupo de trabajo 6TiSCH de la IETF fue creado en 2013 para habilitar el uso de IPv6 sobre TSCH. El mismo cubre aspectos de arquitectura, interfaces y seguridad. El grupo todavía se encuentra activo en el momento de escribir el presente artículo, con un *Request for Comments* (RFC) y un número considerable de borradores de Internet (*Internet-Drafts*). 6TiSCH habilita el control de los nodos y de la planificación a través de una interfaz basada en el Protocolo Restringido de Aplicación (CoAP), construido sobre la Interfaz de Manejo de CoAP (COMI). 6TiSCH define además 6top, una subcapa que habilita la adición/eliminación de ranuras vecino-a-vecino. 6top puede ejecutar una o varias funciones de programación, las cuales definen reglas acerca de cómo y cuándo añadir o eliminar ranuras en cada nodo.

6TiSCH define las interacciones entre los protocolos utilizados en la pila de red de los dispositivos LLN, por ejemplo UDP, IPv6, RPL, 6LoWPAN y TSCH. Además, 6TiSCH define las interacciones entre RPL y TSCH, y asegura un mapeo consistente entre la topología de ruteo de RPL y el grafo de sincronismo jerárquico de TSCH. En la configuración utilizada en la presente evaluación de TSCH, se emplea la arquitectura 6TiSCH desde la capa de transporte hasta la capa física, con la excepción de 6top pues se utiliza Orchestra para crear y mantener la planificación y no se emplea negociación de ranuras entre los nodos más allá de las establecidas por Orchestra.

3.3.-PLANIFICADOR ORCHESTRA

Orchestra crea y mantiene planificaciones TSCH de manera autónoma en los nodos utilizando para ello información de la topología de ruteo creada y mantenida por RPL. Una planificación creada por Orchestra está compuesta por múltiples tramas de ranuras, cada una dedicada para un tipo de tráfico. Por ejemplo, en la planificación mostrada en la Figura 2, la trama de ranuras para tráfico de aplicación está dedicada para la comunicación de datos a nivel de aplicación, la señalización de RPL se intercambia usando la trama de ranuras de RPL, y la trama de ranuras de TSCH se emplea para transmitir los EBs de TSCH que permite que los nodos se asocien a la red TSCH y mantener el sincronismo en el resto de la comunicación. Cuando ocurre solapamiento entre dos o más tramas de ranuras, la planificación de Orchestra selecciona la de mayor prioridad, siendo la prioridad más alta la de la trama de ranuras TSCH y la más baja la correspondiente al tráfico a nivel de aplicación.

La especificación de Orchestra define 4 tipos de ranuras, que van desde ranuras comunes compartidas (CS), con un

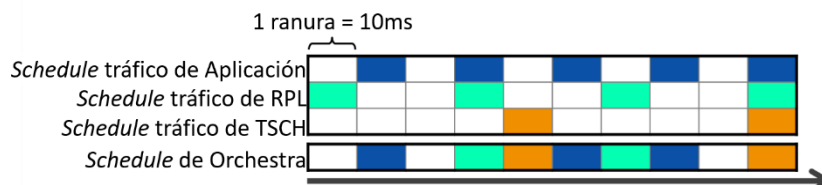


Figura 2
Ejemplo de planificación creada por Orchestra

comportamiento similar a ALOHA ranurado, hasta ranuras dedicadas basadas en el receptor (SBD) a través de las cuales se podría crear acceso al medio totalmente libre de contención. Una planificación de Orchestra está formada por:

- Una ranura común para todos los nodos para señalización de RPL a través de mensajes *broadcast* y *unicast*.
- Una ranura de *broadcast* para EBs de TSCH desde cada padre RPL hacia sus hijos.
- Una ranura dedicada de transmisión de cada nodo hacia su padre preferido RPL.
- Una ranura dedicada de cada padre RPL hacia sus hijos.

Si no es posible ubicar ranuras dedicadas para algún nodo, pueden utilizarse ranuras compartidas en su lugar. La longitud de cada trama de ranuras puede ser configurada en función de la carga de tráfico, demora o consumo de potencia deseados. En la presente investigación se utiliza la implementación y configuración por defecto de Orchestra en el sistema operativo Contiki, el cual está disponible en su repositorio de GitHub. Para más detalles sobre dicha implementación, ver (17).

4.- MODELO DE SIMULACIÓN

Las simulaciones se realizan en el simulador en Java de ContikiOS (COOJA) usando Zolertia Z1 como los nodos a emular. Se realizan 50 corridas de cada configuración de carga de tráfico con semillas diferentes para el generador de números aleatorios del simulador. El promedio de las 50 corridas es utilizado como resultado y los intervalos de confianza se muestran en las gráficas de los mismos. La variación de la carga de tráfico dentro de la red se realiza a través de la razón de generación de paquetes (PGR) de los nodos. La aplicación y los protocolos utilizados en la red se muestran en la Tabla 1. Con la aplicación Collect-View los nodos sensores envían periódicamente paquetes al sumidero con información del estado y desempeño de la red, como por ejemplo consumo de energía, métrica de ruteo, distancia del sumidero, utilizando paquetes UDP. El protocolo RPL se configura utilizando la métrica de ruteo basada en el número esperado de retransmisiones (ETX).

Tabla 1
Configuración de protocolos de red

Capa	Configuración
Aplicación	Collect-View
Transporte	UDP (Modelo cliente-servidor)
Red	IPv6, RPL (con ETX), 6LoWPAN
MAC	TSCH/Orchestra
Física	IEEE 802.15.4 (Radio CC2420 de Texas Instruments)

El desempeño de la red es evaluado en términos de razón de entrega exitosa de paquetes (PDR) a nivel de aplicación, demora extremo-a-extremo a nivel de aplicación y eficiencia energética. Esta última es medida utilizando dos métricas:

- RDC% ON: Calculado como el porcentaje del tiempo que el nodo permanece con la interfaz de radio encendida en relación al tiempo total de operación del nodo.
- RDC% Tx+Rx: Calculado como el porcentaje del tiempo que el nodo está transmitiendo o recibiendo en relación al tiempo total de operación del nodo.

En la Tabla 2 se resumen los valores utilizados para otros parámetros de configuración de la simulación. En todos los experimentos se emplean 22 nodos, 21 clientes y 1 servidor (sumidero). La posición de los nodos se muestra en la Figura 3. El modelo de radio utilizado es el de grafo de disco unitario (UDGM), en el cual los nodos dentro del área de transmisión (zona verde en la Figura 3) reciben los paquetes con una probabilidad configurable (1, en la presente investigación) a menos que ocurra una colisión, y los nodos fuera del rango de transmisión pero dentro del rango de interferencia (zona gris en la Figura 3) reciben señal siempre que ocurra una transmisión en esa área pero no pueden recibir el paquete.

Tabla 2
Parámetros de configuración de la simulación

Parámetro	Valor
Área de despliegue	100m x 100m
Cantidad de nodos	22 (21 clientes + 1 servidor)
Radio del área de transmisión	35m
Radio del área de interferencia	45m
Tamaño del paquete	125 bytes
Tiempo de simulación	5400 segundos (1h30m)

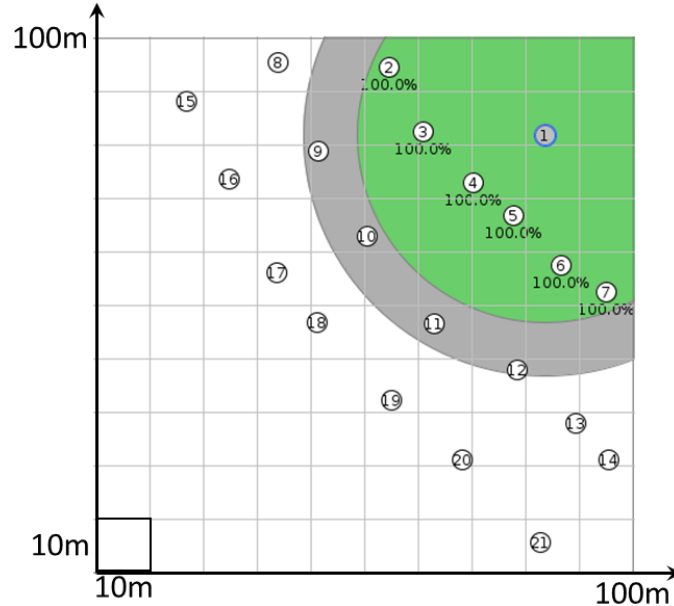


Figura 3
Despliegue de la red LLN para simulación

5.- DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Cuando se varía la carga de tráfico de una red inalámbrica, el resultado esperado es que el desempeño, en cuanto a PDR, demora y eficiencia energética, sea mejor cuanto menor sea la carga de tráfico. Sin embargo, la Figura 4 demuestra que esto no siempre se cumple en una LLN con TSCH y Orchestra. Aunque la diferencia es pequeña, el gráfico en la figura 4a muestra que para $PGR \leq 2 \text{ ppts/min/nodo}$ el PDR a nivel de aplicación (APP) aumenta hasta que alcanza su valor máximo para ese valor de PGR.

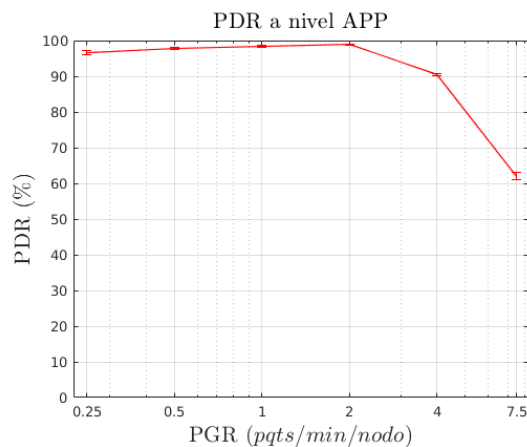


Figura 4
Resultados de razón de entrega exitosa de paquetes (PDR)

La razón para que esto ocurra está en el mecanismo de sincronización del protocolo. Según (1) y (15), TSCH y Orchestra usan las tramas de datos y los ACK para adjuntar la información de sincronismo a los mismos. Cuando la carga de tráfico es baja, las tramas de datos no son intercambiadas con la frecuencia suficiente para mantener la red con la estricta sincronización requerida. Por tanto, ocurren pérdidas de paquetes causadas por nodos que no están correctamente sincronizados con sus padres.

La explicación anterior es confirmada a través de las gráficas de consumo de energía mostradas en las Figura 5. En la Figura 5b puede corroborarse que el porcentaje del tiempo que el nodo permanece transmitiendo o recibiendo aumenta proporcionalmente con la carga de tráfico, un resultado esperado pues el tráfico a cursar se incrementa. Sin embargo, la

Figura 5c muestra que el porcentaje del tiempo que el nodo permanece con el radio encendido (ya sea transmitiendo, recibiendo, o en escucha inactiva) es mayor para cargas de tráfico bajas y altas que para cargas de tráfico medias.

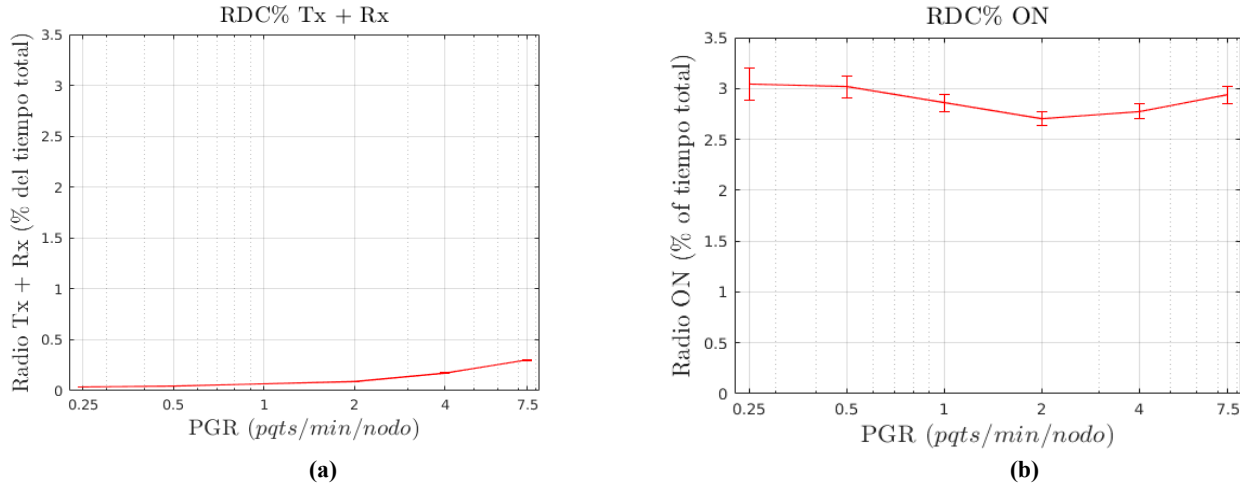


Figura 5

Eficiencia Energética: porcentaje RDC con el radio transmitiendo o recibiendo (5b), porcentaje RDC con el radio encendido (5c)

Siendo un protocolo basado en ranuras de tiempo, el porcentaje del tiempo que el nodo permanece despierto debería ser proporcional a la carga de tráfico, más un mínimo provocado por las ranuras de recepción, en las cuales el nodo se despierta incluso si no existe tráfico que cursar. Por tanto, la degradación de desempeño en términos de eficiencia energética observada para cargas de tráfico bajas solamente puede ser explicada a través del mecanismo de sincronización de TSCH y Orchestra y sus efectos cuando éste no funciona correctamente.

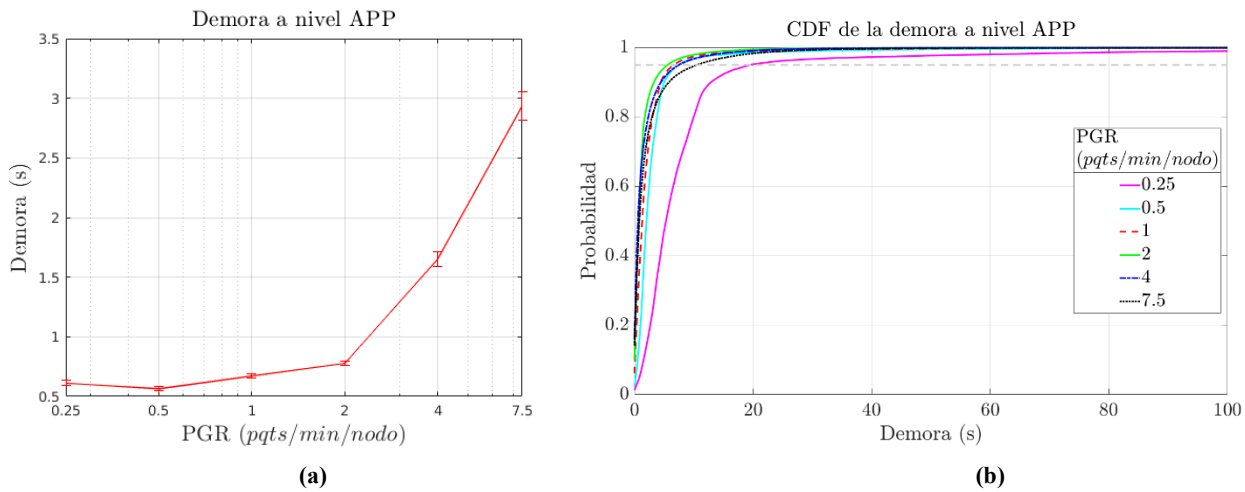


Figura 6

Demora extremo-a-extremo a nivel de aplicación: Demora promedio (6a), Función de distribución acumulativa (CDF) de la demora (6b)

Una de las principales ventajas inherentes a los protocolos MAC basados en ranuras de tiempo es que éstos proporcionan demoras acotadas, siempre y cuando la carga de tráfico no exceda la capacidad de la red. En la Figura 6a se muestra que el desempeño de TSCH/Orchestra en términos de demora se degrada solo ligeramente para $PGR \leq 2$ ppts/min/nodo, lo cual es consistente con el desempeño esperado de un protocolo de tiempo ranurado. El resultado relevante de esta gráfica está en que la demora cuando $PGR = 0.25$ ppts/min/nodo es ligeramente mayor que para $PGR = 0.5$ ppts/min/nodo. Este resultado confirma que la baja frecuencia de envío de tramas de datos por parte de los nodos degrada el sincronismo dentro de la red y, por tanto, las tramas deben esperar a que los nodos transmisores se sincronicen con sus padres. Este comportamiento es más apreciable en la Figura 6b, la cual muestra la función de distribución acumulativa (CDF) de la demora a nivel de aplicación. Nótese que el peor desempeño se obtiene cuando la carga de tráfico de la red es baja, o sea

cuando $PGR = 0.25 \text{ pqts/min/nodo}$ (línea magenta en la Figura 6b). Además, el mejor desempeño se obtiene para un valor de $PGR = 2 \text{ pqts/min/nodo}$ (línea verde en la Figura 6b), lo cual confirma la explicación anterior.

6.- CONCLUSIONES

El modo TSCH del estándar IEEE 802.15.4 para LLN muestra un desempeño estable bajo condiciones de tráfico medias en términos de PDR, eficiencia energética y demora. No obstante, el mecanismo de sincronización de TSCH provoca degradación de desempeño cuando las tramas de datos no se envían con la frecuencia necesaria (al menos 2 pqts/min según los resultados presentados). Una solución potencial podría ser el envío periódico de tramas para sincronismo cuando la razón de generación de tramas de datos no es suficiente. Estas tramas disminuirían la eficiencia del protocolo en cuanto a utilización del ancho de banda disponible pero podría mejorar el desempeño en términos de PDR y demora, así como la eficiencia energética del mismo.

El despliegue de LLNs usando TSCH debe tener en cuenta las demandas de tráfico de la aplicación para la cual será utilizada la red, y configurar la longitud de las ranuras de tramas de acuerdo a la carga de tráfico esperada dentro de la red. Se requieren nuevos algoritmos para crear y mantener planificaciones para TSCH dentro de la arquitectura 6TiSCH que se adapten dinámicamente a las demandas de tráfico de la red.

REFERENCIAS

1. IEEE Computer Society. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs). Vol. 2015. 2015.
2. Langendoen K. Medium access control in wireless sensor networks. En: Wu H, Pan Y, editores. Medium Access Control in Wireless Networks, Volume II: Practice and Standards. Nova Science Publishers; 2007.
3. García Algora CM, Alfonso Reguera V, Deligiannis N, Steenhaut K. Review and Classification of Multichannel MAC Protocols for Low-Power and Lossy Networks. IEEE Access. 2017; 5:19536-19561.
4. Thubert P. An Architecture for IPv6 over the TSCH mode of IEEE 802.15.4 [Internet]. Internet Engineering Task Force; 2016. Recuperado a partir de: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6tisch-architecture-10>
5. Chen S, Sun T, Yuan J, Geng X, Li C, Ullah S, et al. Performance Analysis of IEEE 802.15.4e Time Slotted Channel Hopping for Low-Rate Wireless Networks. KSII Trans Internet Inf Syst. IEEE; 2013;7(1):1-21.
6. De Guglielmo D, Al Nahas B, Duquennoy S, Voigt T, Anastasi G. Analysis and Experimental Evaluation of IEEE 802.15.4e TSCH CSMA-CA Algorithm. IEEE Trans Veh Technol. 445 HOES LANE, PISCATAWAY, NJ 08855-4141 USA: IEEE; Febrero de 2017; 66(2):1573-1588.
7. Watteyne T, Adjih C, Vilajosana X. Lessons learned from large-scale dense IEEE802.15.4 connectivity traces. En: Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE). IEEE; 2015. p. 145-150.
8. Vilgelm M, Gürsu M, Zoppi S, Kellerer W. Time Slotted Channel Hopping for smart metering: Measurements and analysis of medium access. En: Proceedings of the 2016 IEEE International Conference on Smart Grid Communications (SmartGridComm). IEEE; 2016. p. 109-115.
9. Juc I, Alphand O, Guizzetti R, Favre M, Duda A. Energy Consumption and Performance of IEEE 802.15.4e TSCH and DSME. En: Proc of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC). Doha, Qatar: IEEE; 2016.
10. Alves RCA, Margi CB. IEEE 802.15.4e TSCH mode performance analysis. En: Proceedings of the 2016 IEEE 13th International Conference on Mobile Ad Hoc and Sensor Systems (MASS 2016). IEEE; 2016. p. 361-362.
11. Garcia Algora CM, Prieto Lopez E, Alfonso Reguera V, Nowé A, Steenhaut K. Poster : Comparative study of EM-MAC and TSCH/Orchestra for IoT. En: 2016 Symposium on Communications and Vehicular Technologies (SCVT). 2016. p. 3-8.
12. Winter T, Thubert P, Brandt A, Hui J, Kelsey R, Levis P, et al. RPL: IPv6 Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks. Internet Eng Task Force RFC6550 [Internet]. 2012. Recuperado a partir de: <http://tools.ietf.org/html/rfc6550>
13. Mulligan G. The 6LoWPAN Architecture. En: Proceedings of the 4th Workshop on Embedded Networked Sensors (EmNets '07). ACM Press; 2007. p. 78-82.

14. Wang Q, Vilajosana X. 6top Protocol (6P) [Internet]. Internet Engineering Task Force; 2016. Recuperado a partir de: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6tisch-6top-protocol-03>
15. Dujovne D, Grieco LA, Palattella MR, Accettura N. 6TiSCH 6top Scheduling Function Zero (SF0) [Internet]. Internet Engineering Task Force; 2016. Recuperado a partir de: <https://tools.ietf.org/html/draft-ietf-6tisch-6top-sf0-02>
16. Duquennoy S, Al Nahas B, Landsiedel O, Watteyne T. Orchestra: Robust Mesh Networks Through Autonomously Scheduled TSCH. En: Proceedings of the 13th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems. New York, New York, USA: ACM Press; 2015. p. 337-350.
17. Duquennoy S, Elsts A, Nahas B Al, Oikonomou G. TSCH and 6TiSCH for Contiki: Challenges, Design and Evaluation. En: Proceedings of the International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (IEEE DCSS 2015). Ottawa, Canada; 2017. p. 31-36.

AUTORES

Carlos M. García Algora, Ing. Telecomunicaciones y Electrónica (Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2011), MSc. Telemática (Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2014), Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba, email: cgalgora@uclv.edu.cu. Principales intereses de investigación: redes inalámbricas de sensores, protocolos de comunicación, y comunicaciones digitales.

Vitalio Alfonso Reguera, Ing. Telecomunicaciones y Electrónica (Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 1995), MSc. Telecomunicaciones (Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2000), Dr. Telecomunicaciones (Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2007), Departamento de Telecomunicaciones y Electrónica, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, Villa Clara, Cuba, email: vitalio@uclv.edu.cu. Principales intereses de investigación: radio cognitiva, protocolos de comunicación, calidad de servicio, y redes inalámbricas.

Kris Steenhaut, MSc. Ciencias de Ingeniería (Vrije Universiteit Brussel, 1984), MSc. Ciencias de la Computación Aplicada (Vrije Universiteit Brussel, 1986), Dr. Ciencias de Ingeniería (Vrije Universiteit Brussel, 1995), Departamento de Electrónica e Informática (ETRO) y Departamento de Tecnología de Ingeniería (INDI), Vrije Universiteit Brussel, Bruselas, Bélgica, email: ksteenha@etrovub.be. Principales intereses de investigación: diseño, implementación y evaluación de protocolos para redes (inalámbricas) de sensores para automatización de edificios, monitoreo ambiental, y redes de distribución inteligentes.



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License