

Análisis del rendimiento de redes basadas en el estándar IEEE 802.15.4

Performance analysis of networks based on IEEE 802.15.4 standard

RAFAEL DAVID LINERO-RAMOS

Ingeniero Electrónico

Joven Investigador e Innovador de Colciencias

Grupo de Investigación en Desarrollo Electrónico y Aplicaciones Móviles GIDEAM

Universidad del Magdalena

ing.rafael.linero@ingenieros.com

Santa Marta, Colombia

LUIS LEONARDO CAMARGO-ARIZA

Magíster en Ingeniería Electrónica

Docente Tiempo Completo del Programa de Ingeniería Electrónica

Grupo de Investigación en Desarrollo Electrónico y Aplicaciones Móviles GIDEAM

Universidad del Magdalena

lcamargoa@unimagdalena.edu.co

Santa Marta, Colombia

BYRON MEDINA-DELGADO

Magíster en Ingeniería Electrónica

Docente Tiempo Completo del Programa de Ingeniería Electrónica

Grupo de Investigación y Desarrollo en Telecomunicaciones GIDT

Universidad Francisco de Paula Santander

byronmedina@ufps.edu.co

Cúcuta, Colombia

Fecha de recibido: 17/07/2014

Fecha de aceptado: 26/01/2015

Forma de citar: LINERO,Rafael, CAMARGO, Luis y MEDINA, Byron. Análisis del rendimiento de redes basadas en el estándar IEEE 802.15.4. Rev.UIS.Ingenierías, 2015, vol.14,1,n2,p.p 71- 79.

RESUMEN

El artículo presenta un análisis del rendimiento en redes inalámbricas soportadas en el estándar IEEE 802.15.4, el estudio es basado en las medidas del tiempo de latencia, tomado en diferentes topologías de redes en la banda de frecuencia de 2400 MHz, en un ambiente edificado. Este análisis sigue los conceptos de tiempo de espera: en la interfaz serial, en la capa MAC, en la capa física y debido a la influencia de otras estaciones en un entorno equiprobable. Finalmente, se proponen modelos estadísticos del comportamiento del tráfico, estos modelos pueden ser utilizados para determinar el número máximo de dispositivos y de enrutadores que se deben conectar a una red sin afectar las exigencias del tráfico, brindando una herramienta para dimensionar y planificar redes basadas en esta tecnología.

PALABRAS CLAVES: Telecomunicaciones, Modelos, ZigBee, Tráfico de Datos.

ABSTRACT

We present a performance analysis supported by IEEE 802.15.4 standard for wireless networks. The analysis was performed in different network topologies in the frequency band of 2400 MHz for indoor environments, taking into account latency measurements. Our approach considers the timeout in: the serial interface, the MAC layer, the physical layer and the influence of other workstations that have the same probabilities of network access. Finally, we propose statistical models of traffic behavior; these models can be used to determine the maximum amount of devices and routers that must be connected to the network without affecting traffic demands. Our methodology represents a tool to size and plan networks based on IEEE 802.15.4 standard.

KEYWORDS: Telecommunications, Models, ZigBee, Traffic Data.

1. INTRODUCCIÓN

Las redes inalámbricas basadas en el estándar IEEE 802.15.4, son ampliamente utilizadas en redes de sensores por sus características: baja velocidad de transferencia de datos, requerimientos de baja potencia y baja complejidad en la comunicación por radio frecuencia. Estas redes son utilizadas en aplicaciones industriales, domóticas y médicas, por ser de fácil implementación (Gómez et al. 2010).

Por la baja capacidad en la velocidad de transferencia de estas redes, es necesario un análisis de rendimiento (Caprile, 2009), para cumplir las exigencias del tráfico ocasionado por un gran número de sensores y garantizar la confiabilidad de la red.

El rendimiento de una red es el tráfico ofrecido, definido por el tamaño de los bytes de carga útil que se transmiten sobre el tiempo de espera (Astaiza et al. 2013), éste determina la cantidad de información que es posible enviar en un tiempo determinado (Piyare, Lee, 2013). El análisis de rendimiento es usado para dimensionar y planificar la red, determinando el número máximo de dispositivos conectados a ésta y, garantizando la velocidad de transferencia de información requerida en el servicio (Gowrishankar et al. 2008).

El estándar IEEE 802.15.4 define la capa física (Physical Layers, PHY) y la capa de control de acceso al medio (Medium Access Control, MAC); la capa física define las frecuencias de operación utilizadas en los enlaces radioeléctricos y los mecanismos de control de bajo nivel y, la capa MAC maneja el acceso al canal de radio físico (IEEE Std 802.15.4-2011, 2011).

Dentro de los requerimientos de la capa física se encuentran: la asignación de canales, estructura de las tramas y funciones de adecuación para la difusión y

modulación. Para la banda de operación de 2,4 GHz, el estándar define una conversión de bits a símbolos y de símbolos a chip, con una secuencia binaria cíclica la cual es modulada utilizando O-QPSK con pulso seno de media onda, 4 bits representan un símbolo, que es convertido a 32 chip, la velocidad de chip nominal es de 2,0 Mchip/s, y es 32 veces la velocidad de símbolo, 62,5 ksymbol/s, estableciendo una tasa de bits de 250 kbits/s. El máximo tiempo de espera en la capa física estará definido por el tamaño en bytes de la unidad de datos de protocolo de la capa física (PPDU), convertidos a bits y divididos entre la tasa de bits (IEEE Std 802.15.4-2011, 2011).

La capa MAC utiliza el algoritmo CSMA – CA (Acceso múltiple por detección de portadora con evasión de colisiones) para la transmisión de datos, este algoritmo puede ser ranurado si se envía beacon como habilitador y no ranurado si se accede de forma aleatoria; en ambos casos utiliza períodos de tiempo de retroceso $aUnitBackoffPeriod$ alineando las ranuras de la supertrama a enviar, el número máximo de $aUnitBackoffPeriod$ antes de declarar fallo en el acceso al canal está definido por $macMaxCSMABackoffs$, y el número de períodos de retroceso que un dispositivo debe esperar antes de intentar evaluar un canal depende de forma exponencial del $macMinBE$. Los parámetros anteriores determinan el máximo tiempo de espera en la capa MAC para el envío de una trama, según la ecuación 1 (IEEE Std 802.15.4-2011, 2011).

$$t_{MAC} = \left(\left(\sum_{k=0}^{m-1} 2^{macMinBE+k} \right) + (2^{macMinBE} - 1) \right) * aUnitBackoffPeriod \quad (1)$$

El tiempo total de espera utilizado para analizar el rendimiento, es el tiempo requerido para enviar una trama de datos, y equivale a sumar el tiempo máximo de espera en la capa física y la capa MAC.

Algunas investigaciones en el tema se encuentran registradas en artículos científicos, en donde se muestra el análisis matemático o simulaciones del rendimiento de redes IEEE 802.15.4, unos relacionando el consumo medio de energía y la tasa de error de bit (Bougard et al. 2005), otros analizan diferentes tamaños de ventanas de tiempo de guarda (GTS) (Timmons, Scanlon, 2004), otros analizan la latencia y la energía con diferentes cantidades de tráfico de fondo (Lu et al. 2004), y otros modelan algunos mecanismos de CSMA-CA (Kohvakka et al. 2010), entre otros.

En este artículo se evalúa el rendimiento en distintas topologías de redes de prueba, realizando medidas del tiempo de envío y del tiempo de recibido de información entre dispositivos, variando el tamaño de carga útil del mensaje, con el objetivo de modelar el comportamiento real del tráfico en redes inalámbricas IEEE 802.15.4. Estos modelos se fundamentan en el análisis estadístico de las medidas tomadas y en el tiempo de espera para la transferencia de una trama propuesto en el estándar.

2. METODOLOGÍA

Para evaluar el rendimiento de las distintas topologías de redes se empleó la siguiente metodología.

Las redes de sensores de prueba a 2400 MHz se conformaron con dispositivos XBee Series 2 modelo XB24-B del fabricante Digi International; estos dispositivos utilizan la tecnología ZigBee que es basada en el estándar para redes inalámbricas IEEE 802.15.4 (ZigBee, 2014). Estos dispositivos se configuraron por medio del software X-CTU Versión 5.1.4.1 (Digi, 2008) del mismo fabricante, a través de una tarjeta de interfaz XBee Explorer conectada por cable USB (Universal Serial Bus) a un computador.

Las topologías de redes implementadas en el experimento son: punto a punto, punto a multipunto y redes con múltiples número de saltos (ns), como se muestra en la figura 1, en donde C, E y R representan XBee configurados como coordinador, dispositivo final y enrutador, respectivamente.

Se realizaron medidas del tiempo de latencia en estas redes, utilizando el software Docklight Versión 2.0.5 de Flachmann y Heggelbacher (2013). Este software captura la fecha y hora a la cual se envían y reciben datos por un puerto COM del computador. Los puertos COM son utilizados para conectar el computador y los dispositivos XBee transmisores y receptores a través de tarjetas XBee Explorer.

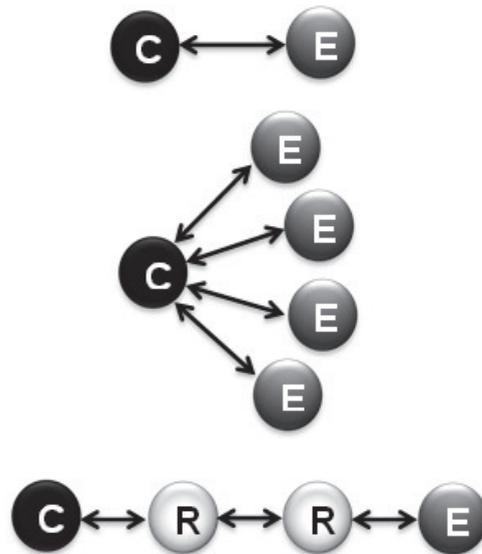


Figura 1. Topología de redes implementadas

El rendimiento de la red es cuantificado usando la velocidad de transmisión de datos R , que se estima a partir del número de bits enviados por el puerto dividido entre la diferencia del tiempo de envío (COM Tx) y el tiempo de recibido (COM Rx) en segundos, según la ecuación 2.

$$R = \frac{\text{Número de Bits}}{\text{Tiempo de latencia}} \quad (2)$$

Las medidas de tiempo se tomaron en cada red con dispositivos separados a 1 metro de distancia y configurando la velocidad de transferencia de la interfaz serial a: 9600, 38400 y 115200 bits por segundo; variando en cada velocidad el tamaño de los paquetes enviados desde 10 bytes hasta 80 bytes con incremento de 10 bytes, sin superar la carga útil soportada por los módulos XBee serie 2 que es de 84 bytes (Digi, 2010).

Para cada variación de las variables independientes, velocidad de transferencia de la interfaz serial y tamaño de los paquetes enviados, se tomaron 10 medidas del tiempo de envío y de recepción de paquetes para calcular el rendimiento.

En las redes punto a multipunto el rendimiento se midió en el coordinador, calculando el tiempo de envío de los paquetes de datos desde uno de los dispositivos finales hasta éste, mientras que los demás dispositivos finales enviaban paquetes de datos periódicamente cada 3 segundos hacia el coordinador, simulando un tráfico constante.

En la red con los enrutadores se midió el rendimiento en el dispositivo final, calculando el tiempo de envío de los paquetes de datos desde el coordinador hasta el dispositivo final.

Con los datos obtenidos en las medidas de tiempo de latencia se procedió a modelar el rendimiento para las distintas topologías de redes, utilizando el software de análisis estadístico y predictivo Statistica de StatSoft (2013). Inicialmente se agruparon los tiempos medidos por el tamaño de paquete enviado y se halló la media de éstos, para determinar un modelo del tiempo de latencia requerido para el envío de información. Este modelo se calculó en función de la velocidad de transferencia de interfaz serial (RS) a través de regresiones simples, ver tabla 1.

Tabla 1. Modelos del tiempo de latencia en función de la velocidad de transferencia de la interfaz serial

Payload	Modelo del tiempo de latencia $T = K_1 + K_2 (RS) + K_3 (RS^2)$
10	$T = 0,038 - 3,392 \times 10^{-7} RS + 2,384 \times 10^{-12} RS^2$
20	$T = 0,058 - 1,043 \times 10^{-6} RS + 6,535 \times 10^{-12} RS^2$
30	$T = 0,067 - 1,177 \times 10^{-6} RS + 7,152 \times 10^{-12} RS^2$
40	$T = 0,0821 - 1,67 \times 10^{-6} RS + 1,019 \times 10^{-11} RS^2$
50	$T = 0,098 - 1,949 \times 10^{-6} RS + 1,167 \times 10^{-11} RS^2$
60	$T = 0,1113 - 2,353 \times 10^{-6} RS + 1,43 \times 10^{-11} RS^2$
70	$T = 0,128 - 2,819 \times 10^{-6} RS + 1,751 \times 10^{-11} RS^2$
80	$T = 0,137 - 2,921 \times 10^{-6} RS + 1,817 \times 10^{-11} RS^2$

Después de obtener estos modelos se procedió a calcular cada una de sus constantes en función del tamaño del paquete enviado (Payload), a través de regresiones simples teniendo como resultados las expresiones de la tabla 2.

Tabla 2. Constantes K en función del tamaño del paquete enviado

Modelo del tiempo de latencia $T = K_1 + K_2 (RS) + K_3 (RS^2)$
$K_1 = 0,0262 + 0,0014 (Payload)$
$K_2 = -1,624 \times 10^{-7} - 3,618 \times 10^{-8} (Payload)$
$K_3 = 9,0273 \times 10^{-13} - 2,241 \times 10^{-13} (Payload)$

Finalmente se obtuvo un modelo del tiempo de latencia requerido para el envío de información, en función del tamaño de los paquetes enviados y de la velocidad de transferencia de la interfaz serial. Modelo que se representa en la ecuación 3.

Rafael David Linero-Ramos, Luis Leonardo Camargo-Ariza,
Byron Medina-Delgado

$$T = 0,0262 + 0,0014 (Payload) - 1,624 \times 10^{-7} (RS) - 3,618 \times 10^{-8} (Payload) (RS) + 9,0273 \times 10^{-13} (RS^2) + 2,2415 \times 10^{-13} (Payload)(RS^2) \quad (3)$$

Este modelo es utilizado para calcular el rendimiento siguiendo la ecuación 2.

3. RESULTADOS

Los modelos obtenidos en función de la velocidad de transferencia de la interfaz serial (RS), el tamaño del paquete de datos (Payload) y la topología de red implementada son: la ecuación 4 para la red punto a punto, la ecuación 5 para la red punto a multipunto y la ecuación 6 para la red con enrutadores.

$$R = \frac{8 \times (Payload)}{0,0262 + 0,0014 (Payload) - 1,624 \times 10^{-7} (RS) - 3,618 \times 10^{-8} (Payload) (RS) + 9,0273 \times 10^{-13} (RS^2) + 2,2415 \times 10^{-13} (Payload) (RS^2)} \quad (4)$$

$$R = \frac{8 \times (Payload)}{\left[\begin{array}{l} 0,0262 + 0,0014 (Payload) \\ - 1,624 \times 10^{-7} (RS) \\ - 3,618 \times 10^{-8} (Payload) (RS) \\ + 9,0273 \times 10^{-13} (RS^2) + \\ 2,2415 \times 10^{-13} (Payload) (RS^2) \end{array} \right]} + t_{est} \quad (5)$$

$$R = \frac{8 \times (Payload)}{\left[\begin{array}{l} 0,0262 + 0,0014 (Payload) \\ - 1,624 \times 10^{-7} (RS) \\ - 3,618 \times 10^{-8} (Payload) (RS) \\ + 9,0273 \times 10^{-13} (RS^2) + \\ 2,2415 \times 10^{-13} (Payload) (RS^2) \end{array} \right]} \times n_s \quad (6)$$

En el modelo para redes punto a multipunto se incluye la variable test, que es el tiempo de latencia debido a la influencia de otras estaciones en un entorno equiprobable y, depende del tiempo de servicio (h) y del tráfico ofrecido (A) (Bougard, B. et al., 2005); ésta es calculada de acuerdo con las ecuaciones 7, 8 y 9.

$$t_{est} = \frac{A \times h}{2 \times (1-A)} \quad (7)$$

$$h = \frac{\text{bits por mensaje}}{\text{bits por segundo}} \quad (8)$$

$$= \frac{(\text{Payload} + 31) \times 8}{250.000}$$

$$A = h \times \# \text{ deEstaciones} \times f_{\text{mensaje}} \quad (9)$$

En el modelo para redes con enrutadores se incluye el factor n_s , que representa el número de saltos existentes en la red para que la información llegue desde el transmisor hasta el receptor.

Los modelos se comparan con las medidas obtenidas en el experimento y con un modelo de rendimiento basado en los tiempos de espera en: la interfaz serial (t_{RS}), la capa MAC (t_{MAC}) y la capa física (t_{PHY}), siguiendo el estándar IEEE 802.15.4. Estos tiempos son calculados utilizando las ecuaciones 10 y 11.

$$t_{\text{esp}} = \left[2 \times \frac{(\text{Payload} + 31) \times 8}{RS} \right] + \left[\left(\sum_{k=0}^{m-1} 2^{\text{macMinBE} + k} \right) + 2^{\text{macMinBE}} - 1 \right] \times (\text{macMaxCSMABackoffs} - m) \quad (10)$$

$$\left[a\text{UnitBackoffPeriod} \right] + \left[\frac{(\text{Payload} + 31) \times 8}{250.000} \right]$$

$$R = \frac{8 \times (\text{Payload})}{t_{\text{esp}}} \quad (11)$$

Se asignan los valores por defecto a $\text{macMinBE} = 3$ y $\text{macMaxCSMABackoffs} = 4$; $m = \min(\text{macMaxBE} - \text{macMinBE}; \text{macMaxCSMABackoffs}) = 2$; y $a\text{UnitBackoffPeriod}$ es igual a un tiempo de duración de 20 símbolos. Para las redes punto a multipunto se adicionó al t_{esp} el test obtenido con la ecuación 7, y para las redes con enrutadores se incluye el factor n_s . Ver ecuaciones 12 y 13.

$$R = \frac{8 \times (\text{Payload})}{t_{\text{esp}} + t_{\text{est}}} \quad (12)$$

$$R = \frac{8 \times (\text{Payload})}{t_{RS} + (t_{MAC} + t_{PHY}) \times n_s} \quad (13)$$

Las siguientes gráficas muestran un comparativo entre las mediciones realizadas, el modelo propuesto estadísticamente y el modelo que utiliza los tiempos establecidos en el estándar.

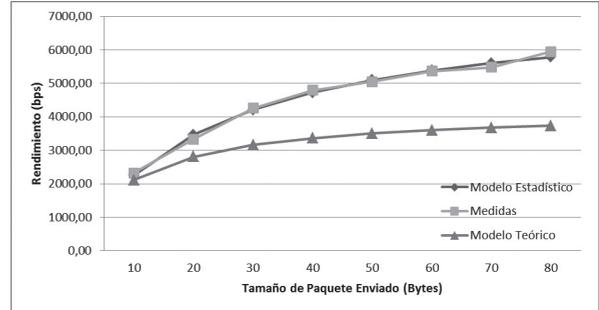


Figura 2. Rendimiento de red punto a punto de XBee Series 2 a 9600 bps

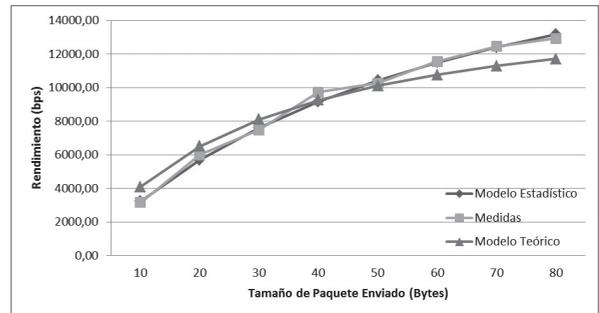


Figura 3. Rendimiento de red punto a punto de XBee Series 2 a 38400 bps

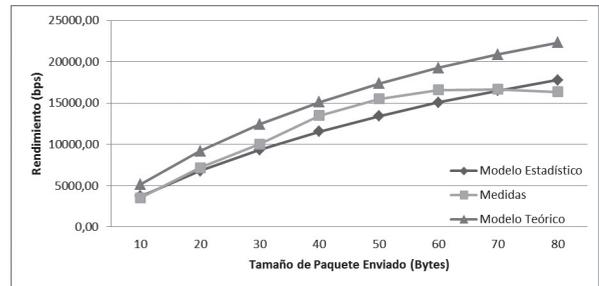


Figura 4. Rendimiento de red punto a punto de XBee Series 2 a 115200 bps

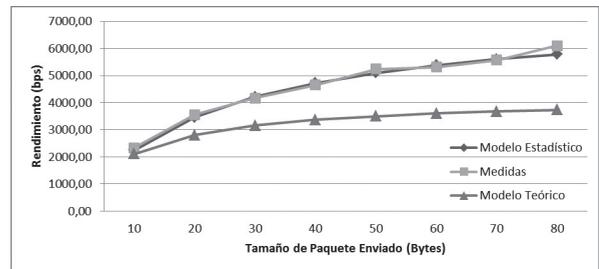


Figura 5. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador - 2 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 9600 bps

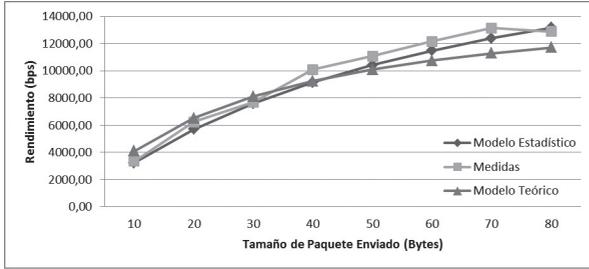


Figura 6. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 2 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 38400 bps

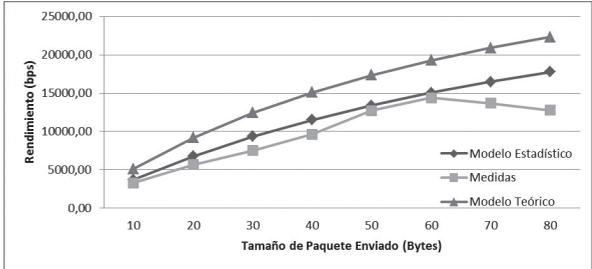


Figura 10. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 3 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 115200 bps

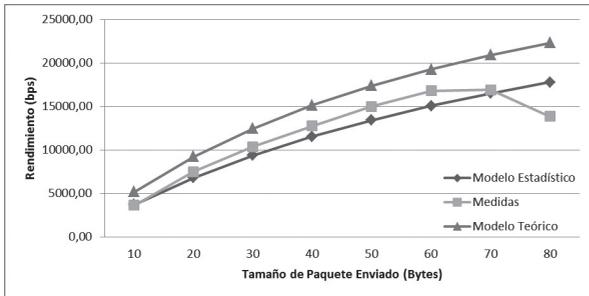


Figura 7. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 2 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 115200 bps

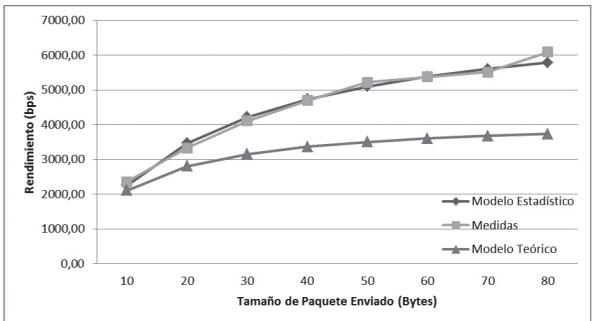


Figura 11. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 4 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 9600 bps

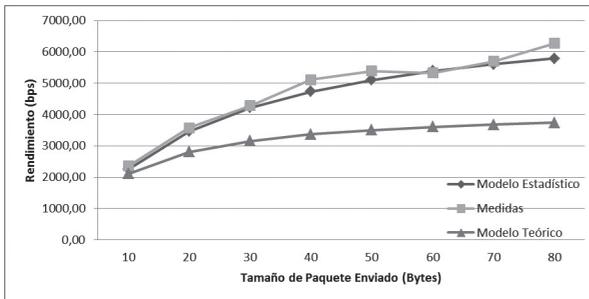


Figura 8. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 3 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 9600 bps

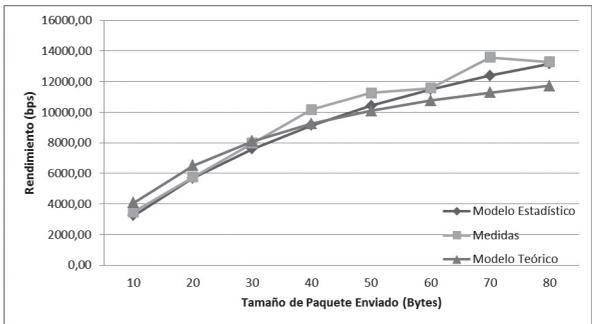


Figura 12. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 4 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 38400 bps

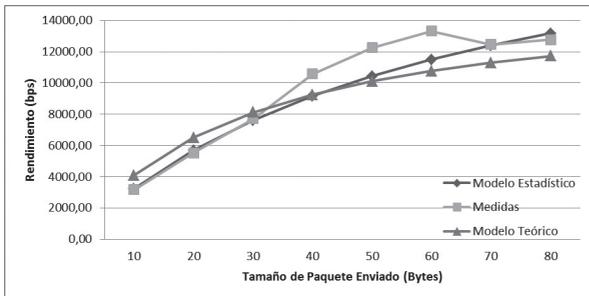


Figura 9. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 3 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 38400 bps

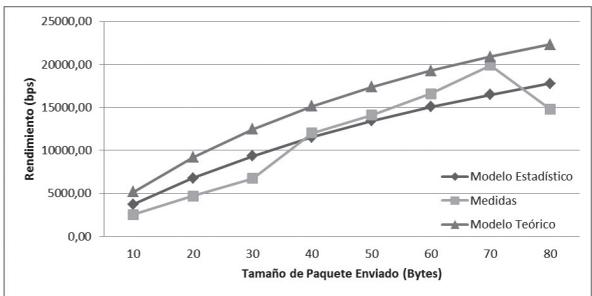


Figura 13. Rendimiento de red punto a multipunto (1 coordinador – 4 dispositivos finales) de XBee Series 2 a 115200 bps

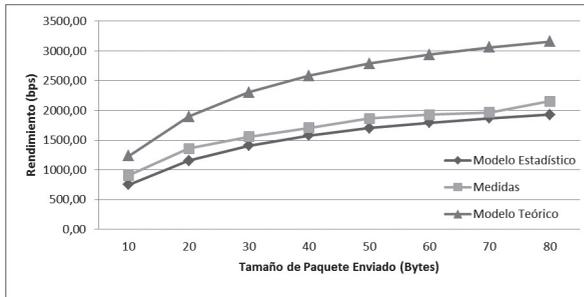


Figura 14. Rendimiento de red de transmisión a través de 2 enrutadores de XBee Series 2 a 9600 bps

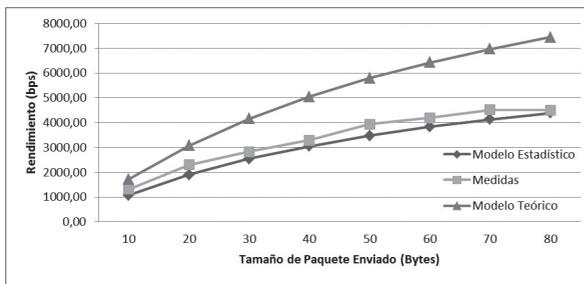


Figura 15. Rendimiento de red de transmisión a través de 2 enrutadores XBee Series 2 a 38400 bps

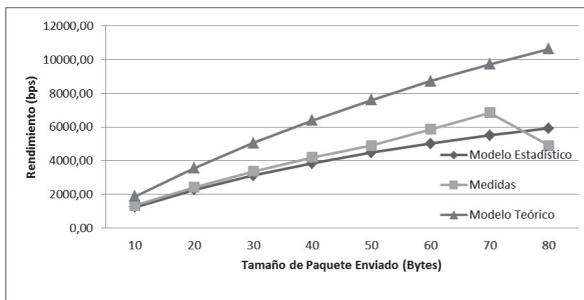


Figura 16. Rendimiento de red de transmisión a través de 2 enrutadores XBee Series 2 a 115200 bps

De acuerdo con la figura 2 hasta la 16, los modelos estadísticos obtenidos tienden a seguir el comportamiento de las medidas tomadas en el laboratorio en todas las topologías de red y en todas las velocidades de la interfaz serial.

El modelo teórico basado en los tiempos de espera, y las medidas tomadas en el escenario de prueba son similares, siguen el comportamiento exponencial de la gráfica, especialmente a la velocidad de transferencia de la interfaz serial de 38400 bps. Para velocidades inferiores, los valores del rendimiento del modelo teórico están por debajo de las medidas y para velocidades superiores están por encima de las medidas.

La ecuación 5 puede ser utilizada para determinar el máximo número de dispositivos conectados a una red,

sin afectar las exigencias del tráfico de los sensores. En la figura 17 se observa el comportamiento del rendimiento en función del número de dispositivos utilizando el modelo obtenido.

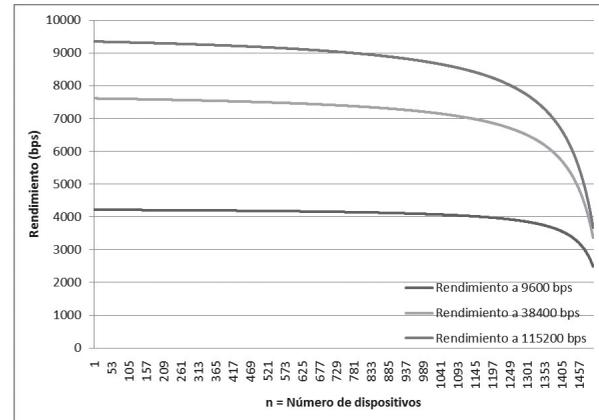


Figura 17. Rendimiento de una red punto a multipunto con n dispositivos y con un Payload de 30 bytes

La ecuación 6 puede ser utilizada para determinar el número máximo de saltos en una red con topología tipo malla, sin afectar las exigencias del tráfico de los sensores. En la figura 18 se observa el comportamiento del rendimiento en función del número de saltos utilizando el modelo obtenido.

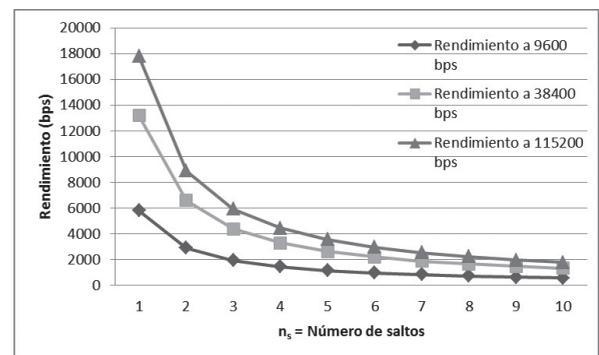


Figura 18. Rendimiento en una red en malla con n_s saltos y con un Payload de 80 bytes

4. CONCLUSIONES

En una red de dispositivos XBee Series 2 la distancia entre dispositivos no afecta el rendimiento de la red; pero el tamaño de los paquetes de datos enviados, la velocidad de transferencia de la interfaz serial y el tipo de red en la que se encuentren, afectan significativamente el rendimiento.

Los modelos estadísticos propuestos son significativos, con un coeficiente de determinación R^2 que varía entre

0,87184259 y 0,99995159 según el tipo de topología implementada y la velocidad de la interfaz serial configurada, sustentando que las variaciones observadas en el rendimiento se deben, a los cambios en el tamaño del paquete enviado y en la velocidad de transferencia de la interfaz serial.

Los modelos obtenidos pueden ser utilizados, en redes de sensores basadas en el estándar IEEE 802.15.4, para determinar: el número máximo de dispositivos que se deben conectar en una red punto a punto y, el número máximo de saltos que pueden existir en una red con topología de malla; sin afectar las exigencias del tráfico de los sensores.

Se observó que en una red punto a multipunto a partir de 1000 dispositivos conectados, el rendimiento disminuye significativamente.

El rendimiento en una red punto a punto es superior al obtenido en una red con topología tipo malla, esto debido al número de saltos entre dispositivos necesarios para que la información llegue desde el transmisor hasta el receptor.

Los modelos estadísticos propuestos siguen el comportamiento real del tráfico en redes inalámbricas IEEE 802.15.4, aportando una alternativa para dimensionar y planificar redes basadas en esta tecnología.

5. REFERENCIAS

GÓMEZ, C; PARADELLS, J; CABALLERO, J. *Sensors Everywhere: Wireless Network Technologies and Solutions*. España: Fundación Vodafone España, 2010. 426 p. ISBN: 978-84-934740-5-8.

CAPRILE, S. R. *Equisbí: desarrollo de aplicaciones con comunicación remota basadas en módulos ZigBee y 802.15.4*. 1a ed. Buenos Aires: Gran Aldea Editores – GAE, 2009. 362 p. ISBN: 978-987-1301-17-1.

ASTAIZA, E; BERMÚDEZ, H; MÉNDEZ, D. Selección y validación experimental del modelo teórico bellalta para caracterización de tráfico heterogéneo en redes 802.11 una alternativa para el dimensionamiento de capacidad. *Revista Gerencia Tecnológica Informática*. 2013, vol. 12, pp. 45-56.

PIYARE, R; LEE, S. Performance Analysis of XBee ZB Module Based Wireless Sensor Networks. *International*

Rafael David Linero-Ramos, Luis Leonardo Camargo-Ariza, Byron Medina-Delgado

Journal of Scientific & Engineering Research. 2013, vol. 4, pp. 1615-1621.

GOWRISHANKAR, S. et al. Issues in Wireless Sensor Networks. *World Congress on Engineering*. London, U.K.: Proceedings of the World Congress on Engineering, 2008.

IEEE Standard for Local and metropolitan area networks Part 15.4: Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs), IEEE Std 802.15.4-2011, (2011).

BOUGARD, B. et al. Energy efficiency of IEEE 802.15.4 standard in dense wireless microsensor networks: modeling and improvement perspectives, in Proceedings of Design, automation and test in Europe (DATE'05) (Munich, Germany, March 7-11, 2005). IEEE, 2005, Vol. 1, 196-201.

TIMMONS, N; SCANLON, W. Analysis of the performance of IEEE 802.15.4 for medical sensor body area networking, in Proceedings of the 1st IEEE international conference, on Sensor and ad hoc communications and networks (SECON'04) (Santa Clara, CA, USA, 4-7. October, 2004). IEEE, 2004, 16-24.

LU, G; KRISHNAMACHARI, B; RAGHAVENDRA, C.S., Performance evaluation of the IEEE 802.15.4 MAC for low-rate low-power wireless networks, in Proceedings of the 23rd IEEE international Performance computing and communications conference (IPCCC'04) (Phoenix, AZ, USA, April 15-17, 2004). IEEE, 2004, 701-706.

KOHVAKKA, M. et al. Performance Analysis of IEEE 802.15.4 and ZigBee for Large-Scale Wireless Sensor Network Applications. PE-WASUN'06, October 6, 2006, Torremolinos, Malaga, Spain.

ZigBee Alliance, ZigBee Technology [web en línea]. <[http://www.zigbee.org/About/About Technology/ZigBeeTechnology.aspx](http://www.zigbee.org/About/About_Technology/ZigBeeTechnology.aspx)>. [Consulta: 14-3-2014]

Digi Internacional Inc. *X-CTU*, (Versión 5.1.4.1). [Programa de computador en línea]. 2008. <<http://www.digi.com/>> [Consulta: 13-12-2013].

Flachmann & Heggelbacher. *Docklight*, (Versión 2.0.5). [Programa de computador en línea]. 2013. <<http://www.docklight.de>> [Consulta: 12-11-2013].

Digi Internacional Inc. *XBee*® / *XBee-PRO*® *ZB RF Modules Digi International Inc.* [documento en línea]. 2010. <http://ftp1.digi.com/support/documentation/90000976_P.pdf> [Consulta: 17-3-2014].

StatSoft, Inc. *Statistica (data analysis software system), (Versión 12)*. [Programa de computador en línea]. 2013. <<http://www.statsoft.com.>> [Consulta: 6-9-2013].