

# Evaluación de Parámetros Adecuados para una Red Inalámbrica de Sensores

Guillermo Reggiani, Guillermo Friedrich y Sergio Pellegrino

Grupo SITIC – Universidad Tecnológica Nacional – FRBB  
{gfried, gheggiani, spellegri}@frbb.utn.edu.ar

**Resumen.** En este trabajo se presenta un análisis de funcionamiento de una red de sensores inalámbricos (WSN) basada en el estándar IEEE 802.15.4, a fin de evaluar el impacto de tener que atravesar nodos enrutadores en el camino hacia el nodo final o receptor. Esto continúa trabajos previos en los que se evaluó el desempeño de este tipo de redes en escenarios de aplicación típicos. Las WSN vienen teniendo un importante crecimiento en los últimos años, en aplicaciones de domótica, automatización industrial, control y monitoreo del medio ambiente, robótica, telemedicina, etc., motivando esto a realizar diversos estudios tendientes a obtener el mejor rendimiento de la red. Para los ensayos se utilizaron módulos CC2538EM de Texas Instruments. Los parámetros evaluados fueron el tiempo de transmisión, el tamaño del paquete y la tasa de envío, a fin de determinar las condiciones más adecuadas de operación.

**Palabras Claves:** LR-WPAN; 802.15.4; CC2538EM; tiempo de transmisión.

## 1 Introducción

Las redes de sensores inalámbricas (WSN: Wireless Sensors Networks) han tenido un rol preponderante en estos últimos años. Hoy en día tienen aplicación en áreas tales como domótica, automatización industrial, control y monitoreo del medio ambiente, robótica, telemedicina, entre otras, y por tal motivo han conducido a realizar diversos estudios tendientes a obtener su mejor rendimiento. El estándar IEEE 802.15.4 [1] define las especificaciones de capa física (PHY) y la subcapa de control de acceso al medio (MAC) para redes inalámbricas de área personal con baja tasa de transferencia (LR-WPAN). El comité IEEE 802.15.4 y la ZigBee Alliance [2] trabajaron en conjunto y desarrollaron la tecnología conocida comercialmente como ZigBee. ZigBee se apoya en las capas MAC y PHY de 802.15.4 para implementar las capas de enrutamiento y aplicación, correspondientes a las capas 3 y 7, respectivamente, del modelo OSI.

Las principales características de un LR-WPAN son la facilidad de instalación, transferencia de datos confiable, operación de corto alcance, bajo costo y una razonable duración de la batería, con un protocolo simple y flexible.

El presente trabajo es una continuación de [3] y tiene como objetivo ensayar una red de sensores en donde ciertos nodos actúan como enrutadores, retransmitiendo paquetes hacia el receptor final. Se evaluaron parámetros tales como el tiempo de

transmisión, el tamaño de paquetes y la tasa de envío. Se efectuaron los ensayos en escenarios similares a los que, típicamente, se pueden encontrar en las aplicaciones mencionadas al comienzo de esta sección.

El resto del trabajo está organizado de la siguiente manera: en la segunda sección se describen aspectos generales del estándar 802.15.4, en la tercera sección se mencionan trabajos relacionados, en la cuarta sección se muestran los ensayos realizados y en la quinta sección las conclusiones y lineamientos para futuros trabajos.

## 2 Estándar 802.15.4 (LR-WPAN)

El estándar IEEE 802.15.4 [1] define las especificaciones para las capas PHY y MAC para redes de tipo LR-WPAN. Una LR-WPAN es una red de comunicaciones simple y de bajo costo que brinda conectividad inalámbrica con potencia limitada, para aplicaciones que tienen bajos requerimientos de performance.

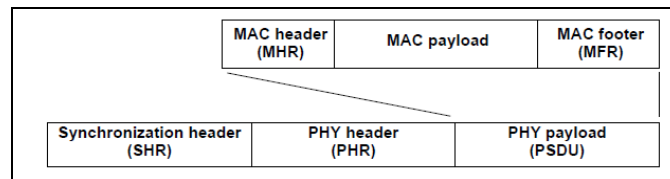
El estándar define distintas formas de operación de capa física en una variedad de bandas de frecuencia.

Se especifican diferentes tipos de dispositivos que pueden participar en una red 802.15.4: dispositivo de función completa (FFD) y dispositivo de función reducida (RFD). El FFD tiene tres modos de operación: Coordinador PAN, Coordinador y dispositivo. Un FFD puede dialogar con otros FFD y/o RFD. Un RFD solo puede hacerlo con un FFD.

Un RFD está orientado a aplicaciones extremadamente simples, como un interruptor de luz o un sensor infrarrojo pasivo, que requieren transmitir pequeñas cantidades de datos, y puede asociarse con un único FFD a la vez. En consecuencia, un RFD se puede implementar usando un mínimo de recursos y memoria.

Dependiendo de los requerimientos de la aplicación, el estándar tiene previstas dos topologías para su operación: punto a punto y estrella.

En la Fig. 1 se muestra la estructura de trama de 802.15.4.



**Fig. 1.** Estructura de trama de 802.15.4

El estándar define cuatro tipos de estructuras de trama:

- Trama Beacon
- Trama de datos
- Trama de reconocimiento
- Trama de comandos MAC

IEEE 802.15.4 emplea dos tipos de mecanismos de control de acceso al medio: CSMA/CA y ALOHA. El primero consiste en esperar hasta que el canal esté libre para transmitir, según un procedimiento orientado a intentar evitar la ocurrencia de colisiones; mientras tanto, el segundo transmite sin verificar si el medio ya está ocupado por una transmisión iniciada previamente. Este segundo mecanismo, más simple, es factible de ser utilizado en redes compuestas por pocos nodos y/o con bajas tasas de envío, donde las probabilidades de colisionar sean muy reducidas.

### **3 Trabajos Relacionados**

En [4] se presenta un sistema de monitoreo basado en una WSN ZigBee, destinado a la medición de la concentración de compuestos orgánicos volátiles (VOCs). Consiste en un gateway, una estación base, un sensor y un módulo ZigBee. El software se encarga de la adquisición de datos, procesamiento y transmisión, y las estrategias para la conservación de energía del sistema completo. La red consiste de dispositivos finales equipados con sensores específicos, routers que propagan la red a grandes distancias y un coordinador que se comunica con el server. El diseño está basado en un microcontrolador ATmega16 y un módulo ZigBee Atmel RF230, que procesan y comunican los datos con bajo consumo de energía. Los resultados mostraron que esta WSN es apta para monitorear concentraciones de VOCs con alto nivel de precisión y puede ser usada para implementar el monitoreo en forma automática.

En [5] se presenta la introducción a un sistema para monitoreo del entorno del agua basado en ZigBee. Se describe la arquitectura del hardware y el software de la WSN. La aplicación de una WSN para el dominio del agua tiene gran potencial para el monitoreo de variables en lagos y entornos marinos. Una WSN de este tipo permitiría monitorear variables tales como temperatura, presión, conductividad y PH entre otras.

En [6] se presenta un diseño mejorado de una WSN ZigBee, donde el coordinador sólo se encarga de cumplir con esa función dentro de la red, dejando el resto de las tareas a otro procesador. Con esto se obtiene una mejor respuesta para un sistema de tiempo real, menor pérdida de paquetes y mayor estabilidad. El módulo ZigBee utilizado fue el CC2430 de Texas Instruments. La conexión entre el coordinador y el procesador es a través de una interfaz RS232.

En [7] se analiza la topología de red, tipos de dispositivos y la arquitectura del protocolo ZigBee. Se utilizó para los ensayos el módulo CC2530 de Texas Instruments y el protocolo Z-Stack. Se evaluó la distancia y la cantidad de paquetes perdidos. Con el uso de este hardware se obtuvieron comunicaciones de buena calidad a mayores distancias.

En [8] se describe una WSN ZigBee realizada con módulos CC2530, equipada con un sensor de temperatura DS18B20 y un indicador de calidad de la señal, para verificar el funcionamiento del sistema. El nodo se compuso de procesador, módulo de RF, sensor, módulo de potencia, switches, leds e interfaces. Para el sistema de comunicaciones se utiliza la pila de protocolos Z-Stack, constituido por las capas PHY y MAC definidas en IEEE 802.15.4 y el framework provisto por ZigBee Alliance para las capas de Red y Aplicación. El escenario planteado fue de un nodo con sensor de temperatura y cinco nodos operando como routers. Además de

monitorear la temperatura también se evaluó la calidad del enlace con el indicador LQI. El LQI es proporcional a la energía de RF del dispositivo sensor. Se pudo observar que los obstáculos influyen significativamente en la comunicación.

En [9] se implementa un algoritmo que modifica ciertos parámetros de la capa MAC, mejorando la confiabilidad de la transmisión en una WSN ZigBee. El Algoritmo ADAPT (ADaptive Access Parameter Tuning) ajusta dinámicamente los parámetros MAC, basándose en el nivel deseado de confiabilidad y las condiciones actuales de operación experimentadas por el nodo. Los parámetros que se evaluaron fueron la tasa de paquetes entregados (rendimiento) y el consumo de energía. Se efectuaron diversos análisis. En primera instancia se comparó el desempeño de la red ZigBee con el uso de los protocolos de enrutamiento AODV y DSDV. Luego se comparó una red sin agrupar nodos y otra con nodos agrupados. A continuación se evaluó la red usando AODV pero con distintos tiempos de simulación. Por último se analizó el rendimiento de la red usando el algoritmo ADapt propuesto.

En [10] se presentan dos modificaciones sobre el modo MAC LLDN definido por el estándar 802.15.4e. La primera permite obtener un tiempo de configuración más reducido y predecible y el segundo se centra en el peor caso de latencia para tráfico de alta prioridad. Se comparó con el estándar LLDN a través de simulaciones por el método Monte Carlo y también analíticamente. Los resultados obtenidos mostraron que las modificaciones a la norma permitieron lograr un aumento del determinismo en el estado de configuración y una más baja latencia para el peor caso en el estado activo. Esto conduce a un uso más seguro de la WSN para aplicaciones del entorno industrial.

En [11] se presenta un algoritmo de encaminamiento jerárquico denominado Cluditem, implementado en la capa de red, integrado con los niveles inferiores del estándar IEEE 802.15.4, sobre un nodo CC2530. Cluditem está basado en clusters y realiza adquisición de datos en forma periódica, enviando información a la estación base en cada período de medición (T). El funcionamiento de Cluditem se divide en tres fases bien diferenciadas. La primera se ocupa del establecimiento del árbol de encaminamiento, la segunda se encarga del envío de datos al sink y durante la tercera los dispositivos permanecen en estado de bajo consumo (sleep).

En [12] se presenta un estudio de las tecnologías usadas en WSN, principales aplicaciones y estándares, características de diseño y evolución. En particular se analizaron aplicaciones de monitoreo del medio ambiente y se puso énfasis en el estándar IEEE 802.15.4 con el objetivo de ayudar a los diseñadores en la elección de la tecnología más apropiada.

Se espera que ZigBee tenga un gran crecimiento en sistemas de monitoreo médico, por las ventajas que representa su bajo costo, potencia de señal segura y fácil implementación. Sin embargo, en transmisión de datos intensivos el coordinador de una red ZigBee puede ser un cuello de botella y hacer una transmisión poco confiable para datos críticos. En [13] se propone un método CTD (Coordinator Traffic Diffusion) el cual redirecciona el tráfico excesivo desde el coordinador al sink. El diseño del CTD fue probado en una plataforma ZigBee CC2530 y simulado en ns2.

Los resultados experimentales demostraron que CTD puede asistir a los routers en la entrega de muestras de datos de un ECG (electrocardiograma) en tiempo real de manera satisfactoria con la mejor tasa de transmisión de 24 kb/s. Este desempeño no puede ser logrado por un diseño de ZigBee original.

En [14] se ve otro caso de uso intensivo de la WSN para enviar muestras de datos analógicos. En este caso se trata de un dispositivo que mide vibraciones mecánicas en una máquina y transmite las muestras correspondientes a la computadora encargada del correspondiente registro y procesamiento. El sensor utilizado tiene un ancho de banda de 264 Hz, y fue muestreado con una tasa de 1 kHz, con 16 bits. La carga impuesta a la red es baja, de aproximadamente 16 kbps. Sin embargo, los autores señalan la conveniencia de utilizar sensores de más ancho de banda, proponiendo uno de 10 kHz de ancho de banda. En tal caso, la tasa de transferencia requerida sería de 320 kbps, lo que obligaría a utilizar algún esquema de compresión que permita reducir la carga a la mitad

## **4 Ensayos Realizados**

En [3] se realizaron ensayos con el fin de determinar la zona óptima de trabajo de una red 802.15.4. El análisis se llevó a cabo teniendo en cuenta las potenciales aplicaciones de una red de este tipo, diferenciando dos posibles escenarios:

- Uno para aplicaciones que utilizan la red para transportar comandos y respuestas y/o lecturas de sensores de variables relativamente lentas, que implican el envío de pequeños paquetes, con una cierta frecuencia de transmisión.
- Otro para aquellas aplicaciones que hacen un uso intensivo de la red para el transporte de volúmenes de datos, incluso con restricciones temporales.

El objetivo fue obtener la máxima tasa de transferencia de datos, medida en kbps, para una tasa de pérdida de paquetes que resulte aceptable para una determinada aplicación.

Los distintos ensayos han sido realizados en ambientes sin ruido ni interferencias en el canal utilizado. Los dispositivos empleados [15] fueron tres placas de evaluación SmartRF06, cada una de ellas equipada con un módulo CC2538 y un dongle USB CC2531, utilizado como sniffer. El método MAC usado fue CSMA/CA.

En los dos ensayos planteados se evaluó:

- Porcentaje de paquetes recibidos, para un nodo transmisor y un receptor.
- Porcentaje de paquetes recibidos, para dos transmisores y un receptor.

A partir de los mismos también se obtuvieron tasa efectiva de bits recibida por el receptor, medida en kbps para uno y dos transmisores como así también la tasa de pares comando-respuesta por segundo que es posible transferir por esta red, en función de la tasa de envío de paquetes por segundo y la probabilidad de pérdida de paquetes asociada.

### **4.1 Porcentaje de paquetes recibidos, para un nodo transmisor y un receptor.**

El objetivo de este ensayo ha sido obtener un marco de referencia en cuanto a las prestaciones máximas que sería posible obtener de esta red. Se ha realizado transmitiendo paquetes con 20, 50 y 100 bytes de carga (más 11 bytes adicionales del encapsulado de 802.15.4), con tasas de envío de entre 10 y 1000 paquetes/s. Se utilizó

CSMA/CA para controlar el acceso al medio y hubo un sólo nodo transmitiendo hacia un único receptor. Los resultados de este ensayo se presentan en la Fig. 2.

Es posible observar que, independientemente del tamaño de las tramas, el límite práctico de trabajo para un único nodo transmisor está alrededor de los 200 paquetes por segundo. En el caso de enviar paquetes con 100 bytes de carga útil, la tasa de transferencia alcanzada es de aproximadamente 160 kbps.

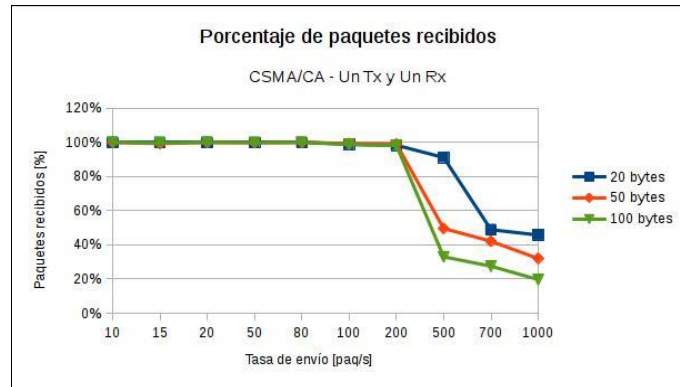


Fig. 2. Porcentaje de paquetes recibidos, para un único transmisor, usando CSMA/CA

#### 4.2 Ensayos con dos transmisores y un receptor.

En este otro ensayo se plantea una situación más frecuente en las WSN, como es la competencia entre dos o más nodos por el uso del medio. Los ensayos fueron realizados utilizando dos nodos transmisores y un receptor.

En la Fig. 3 se presentan los resultados obtenidos, en términos del porcentaje de paquetes recibidos con respecto al total enviado por los dos transmisores. Se enviaron paquetes con 20, 50 y 100 bytes de carga útil, y tasas de envío de entre 10 y 1000 paq/s.

Comparando con los resultados del ensayo anterior, se puede observar que la performance ha sufrido una cierta reducción. Si en aquel caso se podía llegar a una tasa de 200 paq/s con una probabilidad de pérdida de paquetes del 1%, en este otro caso se ve que es esperable alcanzar una tasa de envío de 100 paq/s por cada nodo (que equivale a una tasa agregada de 200 paq/s), pero con una probabilidad de pérdida de paquetes de entre 4% y 6%.

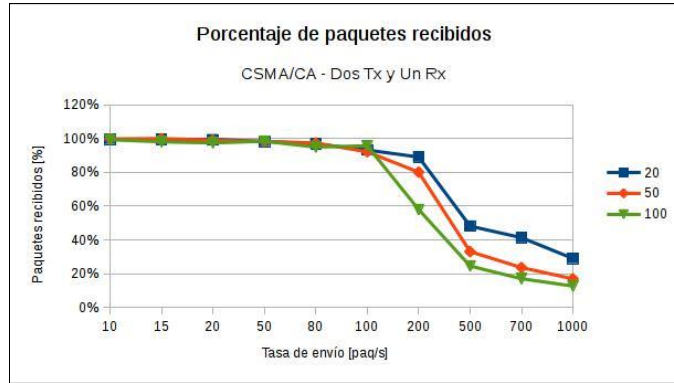


Fig. 3. Porcentaje de paquetes recibidos, para dos transmisores y un receptor

#### 4.3 Tasa efectiva de transferencia para uno y dos transmisores.

Otros resultados, basados en valores obtenidos de los mismos ensayos ya mencionados, corresponden a la tasa efectiva de bits recibida por el receptor medida en kbps, que se pueden observar en la Fig. 4.

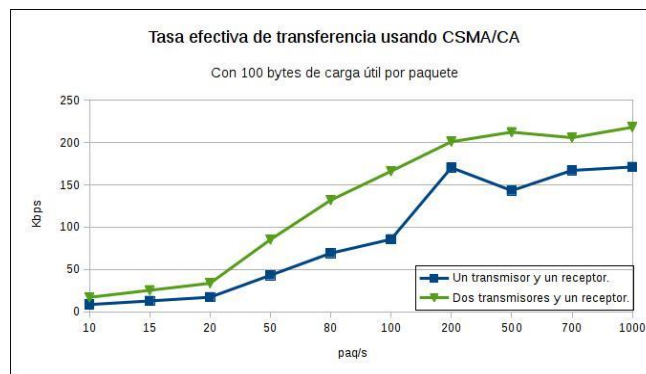
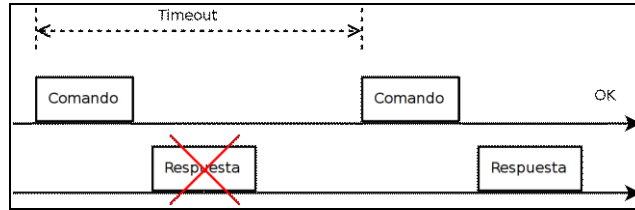


Fig. 4. Porcentaje de paquetes recibidos, para dos transmisores y un receptor.

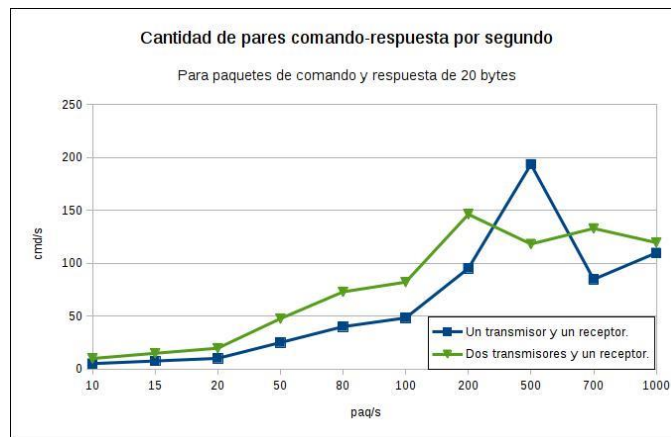
#### 4.4 Desempeño de la red para envío de comandos y respuestas, en función de la pérdida de paquetes.

En aquellas aplicaciones basadas en el envío de comandos y respuestas, la pérdida de un paquete, ya sea comando o respuesta, obliga a la retransmisión de otro par. Esta situación se puede observar en la Fig. 5.



**Fig. 5.** Retransmisión debida a la pérdida de un paquete.

En la Fig. 6 se presenta la tasa de pares comando-respuesta por segundo que es posible transferir por esta red, en función de la tasa de envío de paquetes por unidad de tiempo y la probabilidad de pérdida de paquetes asociada (Fig. 2 y 3)



**Fig. 6.** Tasa máxima de pares comando-respuesta por segundo, en función de la tasa de envío de paquetes y la probabilidad de pérdida de paquetes asociada.

Cabe tener presente que la tasa de envío (paq/s) indicada en el eje x es por cada transmisor: Por ejemplo: para 100 paq/s y un solo transmisor, con 1% de pérdidas, se puede llegar a 49 pares comando-respuesta por segundo; para dos transmisores, con 9% de pérdidas, se podrán enviar hasta 82 pares comando-respuesta por segundo.

#### 4.5 Ensayo de transmisión de datos entre dos nodos, pasando por un nodo enrutador.

Continuando con los ensayos, y en busca de incorporar otras condiciones típicas de operación, en este ensayo se evaluó la transmisión de datos entre un nodo emisor y otro receptor pasando por un nodo enrutador. El nodo receptor envía una respuesta al emisor por cada paquete recibido, que también debe pasar por el nodo enrutador. La Fig. 7 muestra la topología utilizada en el ensayo.



Se midió el tiempo de ida y vuelta, con paquetes de 50 y 100 bytes de carga útil. Los retardos obtenidos fueron de 5.95 y 9.3 ms, respectivamente. En función de estos tiempos es de esperar una tasa de envío máxima de alrededor de 100 paq/s, lo que se pudo verificar exitosamente, como así también que por encima de esa tasa el rendimiento cae abruptamente, debido a que entran en competencia por el acceso al medio el nodo transmisor y el nodo enrutador, e incluso el nodo destinatario (en función de las distancias entre nodos utilizadas en el ensayo).

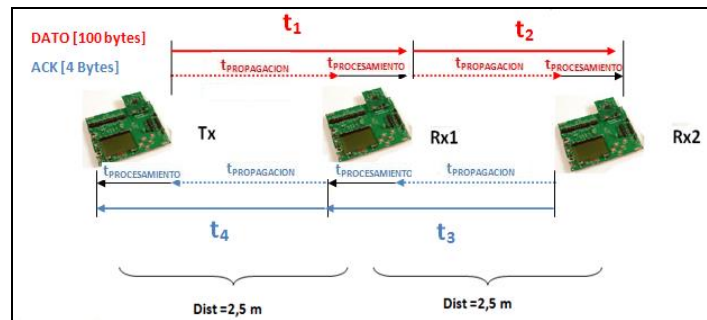


Fig. 7. Topología del ensayo con un nodo intermedio.

Debido a las cortas distancias entre los tres nodos, el protocolo CSMA/CA permite arbitrar el acceso al medio de los tres nodos. En próximos ensayos se adoptarán distancias mayores, a fin de que se pueda poner de manifiesto el efecto cercano-lejano entre los nodos más alejados con respecto al nodo enrutador. Otros ensayos previstos, cuando se adquieran otros dispositivos más, implican adoptar topologías más complejas, conformando una malla o parte de ella.

## 5 Conclusiones

Los ensayos realizados han permitido obtener algunos indicadores del estado de operación de una red 802.15.4, que posibilitan planificar su utilización de manera certera. Sin embargo, está prevista la realización de más ensayos, con topologías más complejas y distintos escenarios, en la medida en que se pueda ampliar la cantidad de dispositivos disponibles para los ensayos.

Para aquellas aplicaciones basadas en el envío de paquetes pequeños, para comando, control y/o mediciones de algunas variables, en las que es deseable una muy baja probabilidad de pérdida de paquetes, se pudo determinar que el punto más conveniente de operación es por debajo de los 200 paquetes por segundo, como total de lo enviado por los distintos nodos. Para un solo nodo transmisor la pérdida de paquetes se ubicó en un 1%, mientras que para dos transmisores la pérdida de paquetes alcanzó el 9%. Cabe efectuar otros ensayos con mayor cantidad de nodos compitiendo para transmitir, a fin de evaluar la degradación del rendimiento de la red.

Otro caso son las aplicaciones con requerimientos de transmisión intensiva de datos, como por ejemplo las que transmiten muestras de una señal analógica, que deberían hacer uso de paquetes grandes (unos 100 bytes de carga útil). Se ha podido

observar que la zona de operación más conveniente está por debajo de los 200 paquetes por segundo, pudiendo alcanzarse una tasa de transferencia efectiva de entre 160 y 170 kbps. También, para estos casos se propone realizar otros ensayos con mayor cantidad de nodos compitiendo por el acceso al medio, a fin de evaluar la degradación del rendimiento.

Otra línea de trabajo está en el análisis del desempeño de la red desde el punto de vista de los requerimientos de tiempo real, en función de los retardos que se introducen al tener que retransmitir a causa de un paquete perdido, como así también cuando la topología es más compleja y se debe saltar por distintos nodos enrutadores.

## Referencias

1. "IEEE Std 802.15.4; (2011): Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)
2. <http://www.zigbee.org/home.aspx>
3. Friedrich G, Reggiani G, Cofre L, Velazquez G y Moreno W, "Determinación de la zona óptima de trabajo de una red ZigBee", VI Congreso de Microelectrónica Aplicada (UEA) 2015 – La Matanza, Buenos Aires. ISBN: 978-987-3806-24-7
4. Changhai Peng, Kun Qian and Chenyang Wang, "Design and Application of a VOC-Monitoring System Based on a ZigBee Wireless Sensor Network", IEEE Sensors Journal, Vol. 15, No. 4, April 2015
5. LieGuo Wu, Lingcheng Kong and Zhihua Zhang, "Water Environment Monitoring System Based On ZigBee Wireless Sensor Network", Software Engineering and Service Science (ICSESS), 2013 4th IEEE International Conference on
6. Liu Yanfei, Wang Cheng, Qiao Xiaojun, Zhang Yunhe and Yu Chengbo, "An Improved Design of ZigBee Wireless Sensor Network", Computer Science and Information Technology, 2009. ICCSIT 2009. 2nd IEEE International Conference on
7. Jian-Ming Liao, Xue-Qin He, Guo-Ming Lu and Si-Yu Zhan, "The Research and Design of ZigBee Wireless Networking based on CC2530", Wavelet Active Media Technology and Information Processing (ICCWAMTIP), 2013 10th International Computer Conference on.
8. Wangqun Jie, Shiyang Ying, Biaobiao Zhang, Jintian Ma and Hui Wang, "Development of a ZigBee-based wireless sensor network system", 2012 International Conference on Control Engineering and Communication Technology.
9. Sangeetha C P and C. D. Suriyakala, "Performance Analysis of IEEE 802.15.4/ZigBee Sensor Networks using ADAPT Algorithm" 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Communication and Computational Technologies (ICCICCT)
10. Dariz, L., Malaguti, G. and Ruggeri, M., "Performance Analysis of IEEE 802.15.4 real-time Enhancement", Industrial Electronics (ISIE), 2014 IEEE 23rd Intl. Symposium on.
11. Corti R., Belmonte J., Giandoménico E. y Martínez R, "Plataforma software de un nodo sensor basado en el System on Chip CC2530", V Congreso de Microelectrónica Aplicada (UEA) 2014 – Córdoba.
12. C. Buratti et al. (2009, August). An Overview on Wireless Sensor Networks Technology and Evolution, Sensors [Online]. 9 (9) Disponible: <http://www.mdpi.com>
13. Chinyang Henry Tseng, "Coordinator Traffic Diffusion for Data-Intensive Zigbee Transmission in Real-time Electrocardiography Monitoring", IEEE Transactions on Biomedical Engineering, VOL. 60, NO. 12, DECEMBER 2013
14. Banfi D., Friedrich G., Banchieri M. y Baldini P, "Medición de vibraciones mecánicas mediante el uso de acelerómetros MEMS", VI Congreso de Microelectrónica Aplicada, (uEA 2015), La Matanza, Bs. As., 2015.
15. <http://www.ti.com/tool/cc2538dk>