

Is Cognitive Radio an Opportunity to Improve the Performance of the IEEE 802.15.4 in Mobile *e-Health* Scenarios?

E. Calixto-Sánchez, MA. Cosío-León, R. Buenrostro-Mariscal, J. Nieto-Hipólito, *Member, IEEE*
and A. Martínez-Vargas

Abstract—In the last decade, the number of wireless devices in the 2.4 GHz band has grown rapidly, such as WiFi, Bluetooth, ZigBee and IEEE 802.15.4. This scenario increases the probability of spectrum saturation. The implementation of the Cognitive Radio proposes an alternative to reuse spectrum, in order to guarantee a peaceful coexistence with the other technologies operating in the same frequency band. The contribution of this paper can be listed as follows: i) Proposes a study to verify the performance of the IEEE 802.15.4 standard in mobile *e-Health* scenarios and its capacity with multiple mobile source nodes in the network to evaluate its capacities to support Cognitive Radio directives, through an *OMNeT++* simulation and a testbed of physical embedded devices, results from both studies show a high correlation. The novelty of this study is the introduction of mobile nodes (which simulate mobile patients inside one hop Wireless Sensor Networks topology). ii) Results show that in the best case a 14.5% of packet lost by collisions was obtained with five mobile source nodes, which is 13.5% greater than the 1% allowed by the standard. In addition, the percentage of packets lost by the backoff algorithm has an important increase from eight up to ten mobile source nodes, demonstrating the impact of the number of nodes has on the performance of the network. iii) Concluding, the implementation of Cognitive Radio will improve the performance in IEEE 802.15.4 Wireless Sensor Networks, through dynamic multichannel operation avoiding the spectrum saturation problem.

Index Terms—IEEE 802.15.4, Cognitive Radio, IoT, e-Health.

I. INTRODUCCIÓN

EL paradigma del Internet de las Cosas (IoT – Internet of Things), establece que todo dispositivo físico tendrá su correspondiente dispositivo virtual, y más aún, cada dispositivo recolectará información de diversa índole, la cual se analizará mediante aplicaciones y a cambio se generaran recomendaciones [1], [2]. Este escenario plantea altos volúmenes de tráfico de datos y una gran densidad de nodos. El cuidado de la salud, promete ser uno de los desarrollos con mayor crecimiento económico bajo el concepto del IoT a finales

del año 2020 [3], debido a la gran cantidad de servicios que pueden ser habilitados. Los escenarios de aplicación de este tipo de servicios son múltiples, variando desde el cuidado preventivo en hogares de ancianos hasta pre-diagnósticos remotos en casos de emergencia [4].

Las redes inalámbricas de sensores (WSN – Wireless Sensor Networks), son una alternativa para la implementación de aplicaciones de adquisición de datos descritas en el paradigma del IoT [5]. Estas ofrecen diversas ventajas sobre la comunicación cableada, como la movilidad de los dispositivos y menores requerimientos de infraestructura [6]. Sin embargo las WSN en la banda de 2.4 GHz, son altamente propensas a interferencias; debido al aumento de la cantidad de dispositivos que operan en la misma banda y que tienden a saturar esa parte del espectro, además, al volumen de datos que son capaces de generar y a las técnicas de transmisión de los mismos [7]. La congestión del espectro en la banda de 2.4 GHz es un problema abierto en la investigación en éste tipo de redes, con el claro objetivo de mejorar la coexistencia de las WSN con otros sistemas inalámbricos, manteniendo los requerimientos de Calidad de Servicio (QoS – Quality of Service) definidos por las aplicaciones, y un número elevado de dispositivos como se propone en el *paradigma del IoT*.

Es necesario considerar también los requerimientos de 5G [8], columna vertebral del IoT, que implican a una gran cantidad de redes inalámbricas de diferentes tecnologías y así como una alta densidad de nodos operando en diferentes bandas de frecuencia; por lo tanto, realizar un buen manejo del espectro electromagnético en todas las subredes que lo componen, toma un papel fundamental para el desarrollo de aplicaciones bajo este contexto [9]. El manejo eficiente del espectro toma mayor importancia cuando se plantean aplicaciones IoT para el cuidado de la salud, debido a que errores en la transmisión de datos críticos pueden ocasionar un mal diagnóstico de los pacientes y poner en riesgo su salud.

Una alternativa de solución a la interferencia generada por la densidad de dispositivos en una red, es realizar un cambio de punto de acceso (AP – Access Point) cuando la calidad del enlace es deficiente [10], proceso denominado como *handoff*. Trabajos recientes [11], [12] han demostrado que realizar el proceso de *handoff* en WSN con capacidades computacionales, energéticas y de memoria reducidas, impacta de forma importante en el funcionamiento y la duración de las baterías de los nodos que la componen [13]. El principal problema del *handoff* se debe a que sus procesos ocasionan

E. P. Calixto-Sánchez, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, Baja California, México (e-mail: ecalixto@uabc.edu.mx).

MA. Cosío-León, Universidad Politécnica de Pachuca (UPP), Zempoala, Hidalgo, México (e-mail: ma.cosio.leon@upp.edu.mx).

R. Buenrostro-Mariscal, Universidad de Colima (U de C), Colima, Colima, México (e-mail: raymundo@uacol.mx).

J. I. Nieto-Hipólito, Universidad Autónoma de Baja California (UABC), Ensenada, Baja California, México (e-mail: jnieto@uabc.edu.mx).

A. Martínez-Vargas, Universidad Politécnica de Pachuca (UPP), Zempoala, Hidalgo, México (e-mail: anabel.martinez@upp.edu.mx).

Esta investigación fue apoyada por el posgrado MyDCI (UABC-FIAD), el cual se encuentra en el padrón de excelencia del CONACyT.

alta latencia y sobre-encabezado (overhead); ya que durante el procedimiento de traspaso puede originarse un retraso de 0.08466 segundos en promedio, sólo en la conexión de un AP a otro [13]. Además, cuando el nodo no es capaz de realizar el proceso de *handoff*, inicia el proceso de reconexión inicial, el cual origina un retraso promedio de 2.662 segundos, debido al proceso de búsqueda de un nuevo AP [13], [14].

Adicional al retraso, se genera un aumento en los paquetes de control. En el peor de los casos la saturación de la capacidad de la red, por el aumento de tráfico y la desactivación de la misma debido al agotamiento de la batería en el nodo. Esta problemática se evidencia en la Sección IV relacionada con la experimentación de este trabajo.

En esta investigación al realizar la exploración del estado del arte, se encontraron tres condiciones preponderantes: i) El análisis del desempeño del estándar IEEE 802.15.4 que se realiza de manera matemática; ii) Investigaciones recientes (ver [15] y [16]), demuestran el beneficio de implementar Radio Cognitivo (CR - Cognitive Radio) en redes inalámbricas, sin garantizar su funcionamiento con el estándar IEEE 802.15.4; finalmente, se encontró que iii) La mayoría de las investigaciones descritas en la Sección II ([15], [16], [17], [18] y [19]), no consideran en sus estudios el ancho de banda de la señal de información a transmitir en Herz (Hz) o Bits por Segundo (bps), denominados caracterización de la saturación de la red por el tipo de tráfico.

Con base en lo anterior, antes de realizar una propuesta de implementación del CR en las WSN IEEE 802.15.4, es necesario conocer el desempeño del estándar en escenarios móviles de *e-Health*. Por lo tanto, el presente artículo tiene como objetivo evidenciar el nivel de la problemática a causa de la saturación del espectro en las WSN IEEE 802.15.4. Lo anterior se realiza al ejecutar experimentos centrados en determinar el porcentaje de paquetes perdidos y el retardo de los paquetes en dichas redes, dado diferentes fuentes de tráfico asociadas a mediciones de variables fisiológicas, densidades de nodos y movilidad de los mismos, detalles de estos pueden ser vistos en la Sección V.

El resto del artículo está organizado de la siguiente forma. La Sección II presenta una descripción de los trabajos relacionados publicados en la literatura. El estudio propuesto para determinar el impacto de la cantidad de nodos en el desempeño las WSN IEEE 802.15.4, se describe en la Sección III. En la Sección IV se describen los escenarios de experimentación. En la Sección V, Discusión, se presenta un análisis completo del estudio de los escenarios implementados. Las conclusiones se presentan en la Sección VI. Por último, la Sección VII muestra el trabajo futuro.

II. TRABAJOS RELACIONADOS

Diversos estudios de las capacidades del estándar IEEE 802.15.4 han sido conducidos en varios trabajos de investigación, con el fin de conocer su desempeño y recabar datos que permitan mejorar la eficiencia de su uso.

Los autores en [1] y [20] proponen un análisis matemático en conjunto con una simulación para verificar el desempeño del estándar IEEE 802.15.4 en el modo non beacon-enabled,

con el fin de generar una aproximación estadística del tráfico generado por los nodos fuente. Estos trabajos, realzan la importancia de caracterizar las fuentes de tráfico analizadas para garantizar las capacidades de la red a implementar, sin embargo, asumen condiciones ideales que físicamente es imposible garantizar.

En [17], [18] y [19] realizan un análisis matemático y una simulación del desempeño del modo beacon-enabled de IEEE 802.15.4, todos están centrados en maximizar la eficiencia energética de los nodos que componen a la red y la tasa promedio de paquetes entregados con éxito (TH - Throughput). En los tres casos, los resultados del análisis matemático y la simulación difieren; pero coinciden en que el mejor desempeño se obtiene cuando solo existe un nodo fuente y un coordinador obteniendo un TH aproximado de 38 Kbps. Afirman también que este modo de operación del estándar es mejor en comparación con el non beacon-enabled [21], debido a que el acceso al espectro basado en contención, es un medio eficaz para las WSN a pequeña escala; sin embargo, para redes a gran escala, sin una coordinación eficiente los canales no pueden ser utilizados de forma adecuada. Lo anterior no es posible asegurarlo, ya que en estos trabajos no se realizó una comparación de ambos modos.

Con fin de mejorar el desempeño del estándar IEEE 802.15.4 en redes a gran escala, en [15] proponen implementar CR, para hacer uso oportunista del espectro y con esto facilitar la asignación dinámica de los recursos. Utilizando el modo beacon-enabled realizan el sensado del canal modificando la parte final de la supertrama, con la cual calculan que tan saturado está el canal en el que se desea transmitir y si es necesario o no realizar un cambio de canal. Del mismo modo en [16] emplean un mecanismo de CR para WSN para ambientes de hospital, en el cual las categorías de usuario primario (PU - Primary User) y usuario secundario (SU - Secondary User) son asignadas de acuerdo a la prioridad que tenga la variable fisiológica que se desea transmitir y con esto garantizar los requerimientos de QoS para este tipo de aplicaciones. Sin embargo, esta última propuesta, no especifica ningún estándar para implementar la WSN, por lo que no es posible asegurar que dicho mecanismo pueda ser incrustado en redes WSN que usen el estándar IEEE 802.15.4.

Es importante notar que a excepción del trabajo descrito en [16] ninguno de los análisis de desempeño mencionados fue implementado de forma real en *testbed* y todo se considera mediante modelos matemáticos. A pesar de la gran ventaja que da el conocer el comportamiento del estándar IEEE 802.15.4 mediante modelos matemáticos, los resultados mostrados pueden no ser lo más cercanos a la realidad, debido a que hay algunas consideraciones que se asumen como ideales, y otras no se incluyen en el modelo estudiado. Otra característica importante de los trabajos citados es que en ninguno considera la movilidad; además, solo en [1] y [20] se toma en cuenta la caracterización de las fuentes de tráfico. Con respecto a las investigaciones que proponen implementar CR ([15] y [16]), como alternativa de solución para mejorar el desempeño del estándar IEEE 802.15.4 en ambientes densos, muestran una ventaja en comparación con los análisis de desempeño convencionales, sin embargo, como

ya se mencionó, no hay evidencias que permitan vislumbrar que éstas propuestas puedan ser implementadas de forma real. Por ello, este trabajo propone analizar el desempeño de IEEE 802.15.4 considerando los siguientes parámetros: movilidad, densidad de nodos y tráfico *e-Health*. Estos tres parámetros se evaluaron mediante una simulación y en un *testbed* con dispositivos físicos, que para nuestro conocimiento no han sido evaluados de manera conjunta en la literatura revisada. La evaluación del desempeño de una topología de red de un salto involucrando estos tres parámetros, permiten conocer el desempeño real y el nivel de la problemática de la saturación del espectro en la operación de las redes WSN.

III. ESTUDIO PROPUESTO

El estudio propuesto integra dos casos: el primero, corresponde al estudio de la capacidad de generación de paquetes de los nodos fuente, con la intención de conocer la tasa máxima de transmisión de los nodos en la red asociada a un tipo específico de tráfico, el generado por escenarios de *e-Health*; dato que es utilizado para configurar el segundo caso de estudio con datos acordes a escenarios reales, por lo que se usó la información en [22] para definir diferentes fuentes de tráfico. La configuración de la red en este primer caso, se compone de dos nodos conectados punto a punto (ver Fig. 1): un SINK y un nodo fuente, este último genera paquetes con distintas tasas de transmisión, dependiendo de la fuente de tráfico seleccionada, en este primer caso no se considera movilidad.

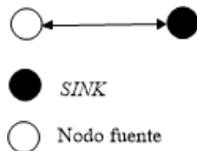


Fig. 1. Configuración del escenario del primer caso de estudio.

La obtención de la tasa máxima de transmisión asociada a las diferentes fuentes de tráfico, se realizó en dos ambientes: i) *Testbed* con dispositivos físicos, y ii) Mediante software de simulación de redes; lo anterior con la intención de conocer la factibilidad de asociar los resultados del estudio en el simulador a aplicaciones en ambientes reales en las conclusiones de este trabajo.

El segundo caso de estudio corresponde a la evaluación del efecto de la densidad y la movilidad de los nodos en el desempeño de una WSN IEEE 802.15.4; el experimento consistió en modificar de forma creciente, el número de nodos que coexisten en el mismo canal o espectro de frecuencia. Este escenario se compone de nodos móviles (simulando personas u objetos que se desplazan a diferentes velocidades), generando redes tipo estrella.

La topología de red de este caso, está compuesta por 2 tipos de nodos: fuente y SINK (o coordinadores). Los primeros son nodos móviles que recolectan señales de interés para transmitirla a los coordinadores. Por su parte, los coordinadores son nodos fijos encargados de formar las topologías de red, enviando mensajes tipo broadcast a los dispositivos finales

en su área de cobertura, con el fin de realizar el proceso de conexión.

Debido a que existen nodos móviles que pueden transitar entre las distintas redes que conforman al escenario, es posible que los nodos móviles experimenten interferencias (causadas por otros dispositivos finales y por nodos de otras tecnologías) que afecten la calidad de la conexión con su coordinador actual. En este caso, para evitar esta interferencia, algunos nodos móviles (por ejemplo, el nodo en color amarillo en la Fig. 2) deban buscar otro nodo coordinador con mejores condiciones, esto activa el mecanismo de transmisión de paquetes de señalización, hasta entrar al área de cobertura del otro coordinador e iniciar el proceso de reconexión que se muestra en la Fig. 2. En la siguiente sección se explican a detalle los escenarios para la *testbed* del primer caso y la configuración de la simulación del segundo caso para evaluar el efecto de la saturación del espectro en las redes IEEE 802.15.4 que componen el estudio.

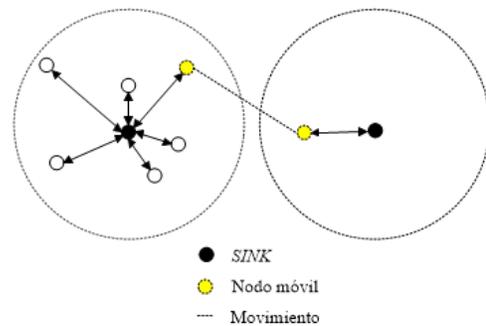


Fig. 2. Proceso de reconexión de un nodo móvil.

IV. EXPERIMENTACIÓN

La ejecución del estudio propuesto en la sección III se implementó en el simulador *OMNeT++ versión 4.6*, el cual es un simulador de redes de eventos discretos y tiene como base de programación el lenguaje C++ en código abierto. La simulación se realizó utilizando el *framework MiXiM*, empleado para el modelado de redes inalámbricas, IEEE 802.15.4.

Para la *testbed* se construyó un nodo formado por 2 placas de hardware, una Unidad de Procesamiento Central (CPU) y un radio transmisor inalámbrico, que cumple con el estándar IEEE 802.15.4 legacy o puro, en la banda de frecuencia 2.4 GHz, y una tasa de transmisión de 250 Kbps. Para el caso del CPU se utilizó el microcontrolador ATMEGA 1284P y para el radio transmisor el empaquetado XbeeS2C; la imagen de un nodo se muestra en la Fig. 3.

A. Escenarios de Experimentación

Tanto para el nodo fuente, como para el nodo SINK se utilizó el mismo hardware, sólo cambia el algoritmo programado en ellos. El primero genera tramas de acuerdo a la configuración de la fuente de tráfico seleccionada, y el segundo registra y contabiliza las tramas recibidas (para la generación de estas estadísticas, el nodo SINK se conectó al puerto serie de un equipo de cómputo).

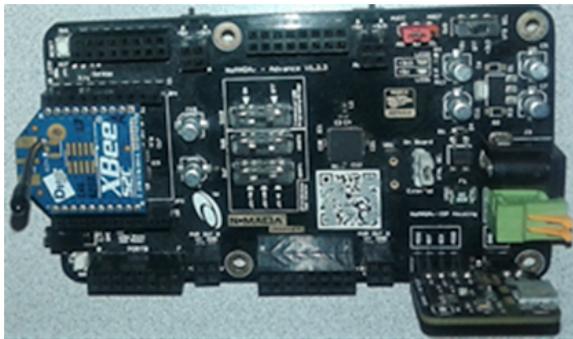


Fig. 3. Nodo utilizado en la red.

Adicional a lo antes mencionado, se colocó un *sniffer* especializado para IEEE 802.14.5 llamado *Ubicua* de la compañía *Ubilogix* [23], para validar que efectivamente el nodo fuente enviará el paquete al medio inalámbrico. Mediante esta solución es posible contabilizar la cantidad de paquetes que efectivamente fueron transmitidos por el nodo fuente y cuantos se perdieron dentro del mismo por desbordamiento de búfer.

El anterior diseño del experimento tiene como fin recolectar estadísticas para medir la QoS de la red en términos del retardo extremo a extremo y el porcentaje de paquetes perdidos.

1) *Primer caso: prueba de la capacidad de generación de paquetes del nodo fuente:* La prueba consiste en verificar la capacidad del estándar IEEE 802.15.4 para transmitir las fuentes de tráfico considerando sólo la capacidad de construcción y transmisión de los paquetes en el nodo fuente. En la Tabla I se muestra la tasa de datos de las variables fisiológicas utilizadas [22], de las cuales, solo el EMG supera la tasa de datos del estándar IEEE 802.15.4 de 250 kbps; por lo que no se consideró en el escenario. Los escenarios se ejecutaron durante un segundo y se componen de un nodo SINK y un nodo fuente situados a 10 metros uno del otro con línea de vista. Este escenario se ejecutó en el simulador y en *testbed* con dispositivos físicos, En la TABLA II se muestra el resumen de los parámetros de la prueba.

TABLA I
TASA DE DATOS DE VARIABLES FISIOLÓGICAS [22]

Variable fisiológica	Ancho de Banda (Hz)	muestras por segundo	Resolución (bits)	Tasa de datos (bps)
EMG	0-10,000	50,000	12	600,000
ECG	0.1-250	1250	12	15,000
Glucosa	0-50	100	16	1600
F. Respiratoria	0.1-10	50	16	800
Ritmo cardiaco	0.4-5	25	24	600
Temperatura	0-1	5	16	80

El estándar IEEE 802.15.4 permite utilizar una dirección larga o dirección corta, las cuales generan una sobrecarga de 17 y 9 bytes respectivamente. Esta información se le agrega a la carga útil de cada paquete, la cual para este caso fue establecida en 60 bytes de acuerdo a [24] y [25], en donde

a partir un análisis establecen un tamaño de paquete entre 40 y 60 bytes de datos como el óptimo para aplicaciones de WSN IEEE 802.15.4. Esto es clave, ya que dicho estudio demostró que el tamaño de paquete tiene un efecto directo en la eficiencia de las redes que usan un protocolo de acceso al medio por contienda como el CSMA (CSMA - Carrier Sense Multiple Access) utilizado por el estándar IEEE 802.15.4.

TABLA II
PARÁMETROS GENERALES DE LA PRUEBA

Parámetro	Valor
Nodos en la red	2
Tamaño del paquete	77 y 69 bytes
Distancia entre los nodos de la red	10 m

2) *Segundo caso: escenarios de densidad y movilidad:* Esta parte del estudio, se compone de 72 pruebas en el simulador, teniendo como base un espacio bidimensional de 500×500 metros. Los escenarios están formados por redes de 5 hasta 10 nodos móviles y dos SINK estáticos (Fig. 2). Los nodos móviles comienzan distribuidos aleatoriamente dentro del área de cobertura de un SINK, donde todos los nodos están en el mismo canal de frecuencia y dentro de la misma cobertura, con la intención de propiciar una saturación del espectro de operación de los nodos conectados a cada SINK; y se mueven hacia el área de cobertura del segundo SINK a velocidades que van desde 0.9 a 3.1 m/s con un delta de 0.2 m/s en cada escenario. Cada prueba se detiene cuando el 1% de los nodos se ha conectado al segundo SINK. El resumen de los parámetros de la simulación se muestra en descripción III. En los escenarios antes descritos las métricas de desempeño que se evaluaron fueron:

- Porcentaje de Paquetes Perdidos por Colisiones (PPC);
- Porcentaje de Paquetes Perdidos por Algoritmo de Back-off (PPB) y
- Retardo Extremo a Extremo.

TABLA III
PARÁMETROS GENERALES DE LA SIMULACIÓN

Parámetro	Valor
Nodos móviles	5-10
Tasa de envío	32 paquetes/s
Tamaño del paquete	69 bytes
Velocidad de movimiento	0.9 – 3.1 m/s
Radio de cobertura del sink	100 m

Es importante mencionar que la cantidad mínima de nodos utilizados para este segundo caso de experimentación, se seleccionó en base a las investigaciones revisadas en la sección II, en las que se observa que el porcentaje de paquetes perdidos por la densidad de nodos involucrados se incrementa a partir de 5 nodos móviles hasta en un 15%, por lo que en este segundo caso de experimentación se utilizaron de 5 hasta 10 nodos móviles para comprobar el aumento del porcentaje de paquetes perdidos al incrementar el número de nodos. Con respecto al tráfico utilizado para estos experimentos, es el que corresponde

a las variables fisiológicas empleadas en un escenario de *e-Health* típico (ver TABLA I).

V. DISCUSIÓN

A continuación se muestran los resultados referentes a los dos casos de estudio descritos en la Sección IV.

1) *Primer caso de experimentación:* se pudo verificar la capacidad del estándar IEEE 802.15.4 tanto en las simulaciones como en la parte física, los resultados se pueden observar en la Fig. 4. Durante esta prueba se pudo constatar que tanto en *testbed* como en el simulador, la cantidad de tráfico transmitido y recibido en promedio es idéntico; con lo que es posible concluir que los nodos que componen a las WSN IEEE 802.15.4 son capaces de transmitir las variables fisiológicas seleccionadas. Además, permite validar que los resultados de las simulaciones siguientes puedan ser extrapolados a escenarios reales.

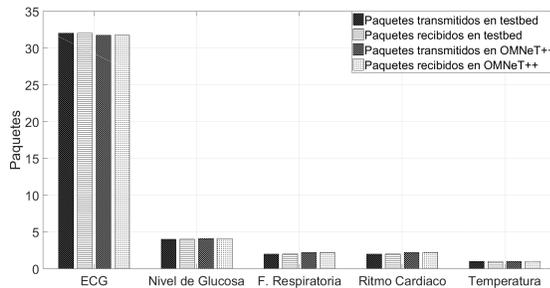


Fig. 4. Paquetes transmitidos y recibidos tanto en OMNeT++ como en *testbed*.

2) *Segundo caso de experimentación:* la Fig. 5 contiene dos gráficas usando sus correspondientes ejes verticales, las cuales muestran el PPC en la línea sólida y al PPB en la línea punteada.

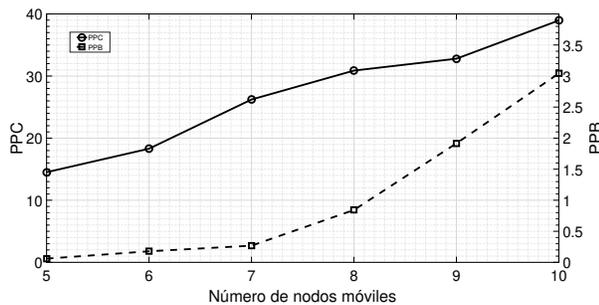


Fig. 5. Porcentaje de paquetes perdidos en el segundo caso.

Se puede ver que conforme se incrementa el número de nodos móviles, el PPC y el PPB aumentan, pero es el primero el que muestra valores críticos. Por ejemplo, el mejor caso se obtuvo con 5 nodos móviles con un PPC de 14.5%, sin embargo, supera con 13.5% la tasa promedio de 1% de paquetes perdidos esperado por el estándar IEEE 802.15.4, cuando el receptor no tiene interferencias [26]. Esto se debe a que se utiliza un método de acceso al medio basado en contención (CSMA). El PPB presenta valores dentro del límite

máximo permitido hasta tener 8 nodos móviles, es a partir de ahí cuando se tiene un incremento importante, alcanzando un valor de 3.04% con 10 nodos móviles.

Al igual que el porcentaje de paquetes perdidos, el retardo sigue la misma tendencia conforme el número de nodos móviles aumenta, pero no es un parámetro crítico para la red, ya que se mantiene por debajo de los 0.25-0.30 segundos, límites permitidos para que una transmisión pueda ser considerada en tiempo real [27] como se muestra en la Fig. 6.

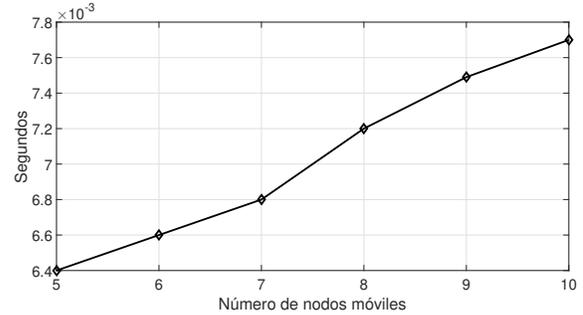


Fig. 6. Retardo extremo a extremo.

A partir de las simulaciones realizadas, se puede notar que para este caso, el rango de velocidades consideradas en la movilidad de los nodos, no influye en el porcentaje de paquetes perdidos ni en el retardo, es decir, dichas métricas siguen las mismas tendencias sin importar la velocidad. Con la realización de este segundo caso es evidente el deterioro de la QoS alcanzado, esto obliga a la necesidad de aprovechar el uso del espectro, y más en redes que operan en monocal (un canal fijo para todos los nodos) como es el caso del IEEE 802.15.4 o la mayoría de las redes WSN. Por los resultados obtenidos en estos estudios, es posible justificar la implementación de CR en las WSN IEEE 802.15.4, para ofrecer una operación dinámica multicanal donde se puedan aprovechar sus 16 canales y evitar la saturación del espectro.

Empleando las bases de CR en este tipo de redes, se propone distribuir de manera equitativa los 16 canales disponibles en el estándar entre los nodos móviles que conforman a la red. Esta distribución puede contar con ciertas restricciones: a) definir usuarios primarios y secundarios, de acuerdo a que variable fisiológica se desea transmitir como proponen en [16]; b) Establecer el umbral de cuándo comenzar a buscar otro SINK, dependiendo de la calidad de la conexión del nodo móvil a su SINK. En esta parte del estudio, se pudo notar que un nodo móvil se desconecta a los -98 dBm del SINK 1 y en -99 dBm se reconecta al SINK 2. Con estos valores es posible definir un umbral y con base a ello tomar la decisión de cambiar de SINK ahorrando tiempo en el proceso de reconexión dentro del mismo canal o en otro.

En conclusión, empleando CR en WSN IEEE 802.15.4, se prevé que se disminuya la interferencia causada debido a la densidad de nodos y en consecuencia disminuir el porcentaje de paquetes perdidos, el retardo extremo a extremo y el costo del overhead en los eventos de reconexión. Este escenario planteado crea una opción viable para instrumentar WSN en el *paradigma del IoT*, considerando que el hardware estudiado

puede responder a los requerimientos de las fuentes de tráfico.

VI. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó un análisis del desempeño del estándar IEEE 802.15.4 en escenarios móviles y señales *e-Health* con una densidad de nodos por red de 1 a 10 nodos, el cual sirve como referencia para justificar la implementación del CR en éste tipo de escenarios.

Dicho análisis se realizó en test-bed con dispositivos físicos y la herramienta de simulación *OMNeT++*, mediante el *framework MiXiM*. Los resultados obtenidos en el primer caso demostraron la capacidad de los nodos para transmitir las variables fisiológicas seleccionadas, así como la validez de los resultados del simulador, con el fin de extrapolar los resultados a escenarios reales. En el segundo caso, los resultados obtenidos en el PPC de 14.5% permitieron evidenciar el deterioro del QoS de la red, debido a la saturación del espectro en redes monocanal; y como consecuencia, la administración del uso del espectro, es una solución viable para mejorar la interacción de los objetos en el *paradigma IoT*.

VII. TRABAJO FUTURO

Se propone la implementación de CR en WSN IEEE 802.15.4, empleando la herramienta de simulación *OMNeT++*. Esto con la intención de reducir el PPC mostrado en la Sección V, aprovechando todos los canales disponibles en el estándar, mediante la distribución equitativa de los nodos en el espectro. Esto, brindaría al estándar la inteligencia necesaria para el manejo y distribución del espectro, con el fin de reducir la interferencia debida a la densidad de nodos en las WSN IEEE 802.15.4 y a las otras tecnologías presentes en la banda de 2.4 GHz. La implementación antes propuesta, traerá consigo retos en las características necesarias en los coordinadores, respecto al control de la red, retos que será necesario explorar y resolver.

REFERENCIAS

- [1] S. Wijetunge, U. Gunawardana, and R. Liyanapathirana, "Performance analysis of IEEE 802.15.4 MAC protocol with ACK frame transmission," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 69, no. 2, pp. 509–534, 2013.
- [2] F. Tao, Y. Wang, Y. Zuo, H. Yang, and M. Zhang, "Internet of Things in product life-cycle energy management," *J. Ind. Inf. Integr.*, vol. 1, pp. 26–39, 2016.
- [3] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari, and M. Ayyash, "Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 17, no. 4, pp. 2347–2376, 2015.
- [4] Y. Zhang and H. Xiao, "Bluetooth-based sensor networks for remotely monitoring the physiological signals of a patient," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed.*, vol. 13, no. 6, pp. 1040–1048, 2009.
- [5] C. Perera, A. Zaslavsky, P. Christen, and D. Georgakopoulos, "Context Aware Computing for The Internet of Things," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 1, pp. 414–454, 2014.
- [6] S. M. Ghaleb, S. Subramaniam, Z. A. Zukarnain, and A. Muhammed, "Mobility management for IoT: a survey," *EURASIP J. Wirel. Commun. Netw.*, vol. 2016, no. 1, p. 165, 2016.
- [7] L. F. Silva, O. C. Branquinho, and R. M. Assumpção, "Mobility Impact on IEEE 802.15.4 Network through a Simulation Platform," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 9, no. 5, pp. 655–662, 2011.
- [8] M. R. Palattella et al., "Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 3, pp. 510–527, 2016.

- [9] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [10] A. Oliveira and T. Vazão, "Low-power and lossy networks under mobility: A survey," *Computer Networks*, 2015.
- [11] Y. Chen, S. Member, C. Hsu, and H. Lee, "An Enhanced Group Mobility Protocol for 6LoWPAN-Based Wireless Body Area Networks," vol. 14, no. 3, pp. 797–807, 2014.
- [12] P. M. Harsha and R. Kanakaraju, "Network Lifetime Enhancement of Clustering Approach Using Handoff Mechanism in WSN," pp. 809–812, 2016.
- [13] R. Buenrostro-Mariscal, M. Cosio-Leon, J. I. Nieto-Hipolito, J. A. Guerrero-Ibanez, M. Vazquez-Briseno, and J. D. D. Sanchez-Lopez, "WSN-HaDaS: A cross-layer handoff management protocol for wireless sensor networks, a practical approach to mobility," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E98B, no. 7, pp. 1333–1344, 2015.
- [14] H. Fotouhi, D. Moreira, and M. Alves, "Ad Hoc Networks mRPL: Boosting mobility in the Internet of Things," *Ad Hoc Networks*, vol. 26, pp. 17–35, 2015.
- [15] C. Wong, "Short Paper: Study on Cognitive Radio in IEEE," *Internet of Things (WF-IoT), 2014 IEEE World Forum on. IEEE*, 2014. pp. 179–180, 2014.
- [16] I. Al Mamoont, S. Baharun, and S. Komaki, "Cognitive Radio Based Hospital," pp. 351–354, 2016.
- [17] Z. Xiao, J. Zhou, J. Yan, C. He, L. Jiang, and N. Trigoni, "Performance evaluation of IEEE 802.15.4 with real time queueing analysis," *Ad Hoc Networks*, vol. 73, pp. 80–94, 2018.
- [18] H. Kurunathan, R. Severino, A. Koubaa, and E. Tovar, "IEEE 802.15.4e in a Nutshell: Survey and Performance Evaluation," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 14, no. 8, 2018.
- [19] W. Du, D. Navarro, and F. Mieleveville, "Performance evaluation of IEEE 802.15.4 sensor networks in industrial applications," *Int. J. Commun. Syst.*, 2015.
- [20] Y. Chen, Z. Wang, and L. Huang, "Performance analysis of a non-beacon enabled IEEE 802.15.4 network with retransmission and ACK mode," *Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, pp. 91–95, 2015.
- [21] M. Khafer, M. Guennoun, and H. T. Mouftah, "A Survey of Beacon-Enabled IEEE 802.15.4 MAC Protocols in Wireless Sensor Networks," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 16, no. 2, pp. 856–876, 2014.
- [22] S. Arnon, D. Bhastekar, D. Kedar, and A. Tauber, "A comparative study of wireless communication network configurations for medical applications," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 10, no. 1, pp. 56–61, 2003.
- [23] U. U. Guide, "Ubiqua User Guide 1 www.ubilogix.com/ubiqua," pp. 1–91.
- [24] H. Cervantes De Avila, J. I. Nieto Hipólito, J. de D. Sánchez López, M. E. Martínez Rosas, and A. Hawa Calvo, "Arquitectura de e-Salud basada en redes inalámbricas de sensores (An *e-Health* architecture based on wireless sensors network)," *DIFU100ci@*, vol. 6, no. 2, pp. 54–61, 2012.
- [25] X. Liang and I. Balasingham, "Performance analysis of the IEEE 802.15.4 based ECG monitoring network," *Proc. 7th IASTED Int. Conf. Wirel. Opt. Commun.*, no. October 2017, pp. 99–104, 2007.
- [26] I. C. Society, "IEEE Standard for Low Rate Wireless Personal Area Networks (WPANs)," vol. 2015, 2015.
- [27] M. O. Farooq and T. Kunz, "Contiki-based IEEE 802.15.4 channel capacity estimation and suitability of its CSMA-CA MAC layer protocol for real-time multimedia applications," *Mob. Inf. Syst.*, vol. 2015, 2015.



Erick Paul Calixto-Sánchez Obtuvo el grado de Maestro en Ciencias en electrónica y telecomunicaciones en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) en el 2015. Actualmente es estudiante de Doctorado en la Universidad Autónoma de Baja California Campus Ensenada, México. Sus áreas de interés son las redes de sensores inalámbricas en el contexto del Internet de las Cosas.



MA Cosío-León realizó estudios de Maestría en Computación con especialidad en Redes y Conectividad por la Universidad de Colima, México. Obtuvo el grado de Doctora en Ciencias por la Universidad Autónoma de Baja California Campus Ensenada, México. Actualmente es investigadora de la Dirección de Investigación Innovación y Posgrado en la Universidad Politécnica de Pachuca. Su interés científico es la algoritmia.



Raymundo Buenrostro-Mariscal Recibió el grado de Doctor en Ciencias por la Universidad Autónoma de Baja California México. Obtuvo el grado de Maestría en Electrónica y Telecomunicaciones en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE), México. Actualmente es Profesor-Investigador de la Facultad de Telemática en la Universidad de Colima. Sus áreas de investigación son: la evaluación del desempeño en sistemas de comunicaciones, las redes inalámbricas de sensores y el Internet de las Cosas.



J. I. Nieto-Hipólito recibió el grado de Doctor en Arquitectura y Tecnologías de Computadora por la Universidad Politécnica de Cataluña. Actualmente es Director de la Facultad de Ingeniería, Arquitectura y Diseño en la Universidad Autónoma de Baja California, en Ensenada, México. Sus áreas de interés son la aplicación de las TICs, en las redes de sensores inalámbricas en el paradigma de IoT para el cuidado de la salud.



Anabel Martínez-Vargas tiene Maestría en Computación con especialidad en Redes y Conectividad por la Universidad de Colima, México. Es Doctora en Ciencias por la Universidad Autónoma de Baja California Campus Mexicali, México. Realizó una estancia posdoctoral en el Centro de Investigación y Desarrollo de Tecnología Digital del Instituto Politécnico Nacional (CITEDI-IPN) en Tijuana, México. Sus líneas de investigación son algoritmos bio-inspirados, radio cognitiva y optimización. Actualmente es profesora investigadora

en la Maestría en Tecnologías de Información y Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Pachuca.