

Ocupación espectral de la banda ISM de 2.4 GHz para aplicaciones de radio cognoscitivo

Miguel Ángel Díaz Ibarra

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Av. Salvador Nava Mtz. s/n, C.P. 78290, San Luis Potosí, Teléfono: (444) 826-2486
madiazibarra@gmail.com

Marco Aurelio Cárdenas Juárez

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Av. Salvador Nava Mtz. s/n, C.P. 78290, San Luis Potosí, Teléfono: (444) 826-2486
mcardenas@fc.uaslp.mx

Ulises Pineda Rico

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Av. Salvador Nava Mtz. s/n, C.P. 78290, San Luis Potosí, Teléfono: (444) 826-2486
u_pineda@fc.uaslp.mx

Enrique Stevens Navarro

Universidad Autónoma de San Luis Potosí,
Av. Salvador Nava Mtz. s/n, C.P. 78290, San Luis Potosí, Teléfono: (444) 826-2486
estevens@fc.uaslp.mx

Resumen

La tecnología de radio cognoscitivo representa una prometedora solución al problema de escasez de espectro electromagnético, dado que una gran parte del espectro asignado se utiliza de forma esporádica, existiendo una subutilización del mismo. En la banda industrial, científica y médica (ISM, por sus siglas en inglés) de 2.4 GHz, varias campañas de mediciones se han realizado para determinar la ocupación real del espectro. En este trabajo se describe una metodología para obtener la ocupación espectral de la banda ISM de 2.4 GHz, en las instalaciones de la Facultad de Ciencias

en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Se presentan los resultados de la densidad espectral de potencia y el ciclo de trabajo. Estos resultados indican claramente que la utilización del espectro es baja, a pesar de que muchas tecnologías de comunicación inalámbrica comparten este recurso.

Palabras Claves: banda ISM, ciclo de trabajo, ocupación espectral, radio cognoscitivo.

1. Introducción

En las últimas décadas, las telecomunicaciones han evolucionado considerablemente. Particularmente, las comunicaciones inalámbricas han revolucionado la forma de comunicarnos; pues en la actualidad existen complicados sistemas de comunicación personal que demandan cada vez mayores recursos en términos de espectro electromagnético (o simplemente espectro). De hecho, el número de aplicaciones y servicios con tecnología inalámbrica se ha incrementado de tal forma que en la actualidad ha provocado que el espectro electromagnético se encuentre saturado. Lo anterior en parte es consecuencia de que el espectro es regulado por las autoridades gubernamentales como el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) en el caso de México. A través de subastas, el IFT expide licencias (o concesiones) a determinados usuarios (usuarios primarios) para que puedan operar en una banda de frecuencias en específico de manera exclusiva; debiendo asignarse diferentes bandas para los distintos usuarios. Sin embargo, estudios recientes han demostrado que esta modalidad de asignación del espectro ha sido ineficiente, pues su ocupación varía entre 15% y 85% del tiempo [1]. Por lo tanto, es necesario implementar técnicas que consideren una utilización más eficiente del espectro. En este sentido, la tecnología de radio cognoscitivo (RC) permite usar eficientemente el espectro electromagnético a través del acceso oportunista (o dinámico) de usuarios sin licencia (secundarios) a bandas de frecuencia licenciadas.

La banda industrial, científica y médica (ISM, por sus siglas en inglés) está reservada a nivel internacional para uso libre, donde muchas tecnologías de comunicación inalámbrica confluyen para compartir el recurso. Por ejemplo, las redes de área local

inalámbrica (WLAN, por sus siglas en inglés), Bluetooth, ZigBee, entre otras; como se ilustra en la Figura 1. Cabe destacar, que las WLANs se rigen con base en los estándares de comunicación IEEE 802.11b/g/n, Bluetooth en el estándar IEEE 802.15.1 y ZigBee en el estándar IEEE 802.15.4 [2, 4]. Dado el número de tecnologías y usuarios que comparten esta porción de espectro, resulta interesante conocer la ocupación espectral real de la banda ISM en distintos escenarios para implementar mecanismos que posibiliten un acceso más eficiente a esta banda libre.

Generalmente, las mediciones para determinar la ocupación espectral de una banda de frecuencia, involucran la recolección y procesamiento de datos provenientes del espectro (por ejemplo, la densidad espectral de potencia) para su correspondiente caracterización estadística. En la literatura, previamente se han reportado algunos estudios de medición en la banda ISM. En [2] se proponen métricas usadas para cuantificar la interferencia Wi-Fi, la ocupación, congestión y detección de porciones de espectro no utilizadas. En [3] se propone e implementa un algoritmo de selección dinámica de canal para una red de celdas Wi-Fi sectorizadas y se proponen técnicas de radio cognoscitivo para monitorear e identificar fuentes de interferencia Wi-Fi. Una campaña de medición de ocupación de la banda ISM en un hospital se presenta en [4], en donde se resalta la importancia que ejerce en los resultados de las mediciones las interferencias electromagnéticas provenientes de equipo médico especializado y se propone un algoritmo para diferenciar las distintas señales. En este trabajo, se presenta un estudio de la ocupación espectral del rango de frecuencias de 2.401 GHz a 2.499 GHz de la banda ISM en un escenario con una alta densidad de usuarios de las distintas tecnologías y en particular, en los canales 1, 6, 11 y 14 del estándar IEEE 802.11b/g/n que no se encuentran traslapados para evitar interferencias de canales adyacentes. Cabe mencionar que el estándar IEEE 802.11n es el de mejorar el caudal eficaz de los dos estándares previos IEEE 802.11b/g. Los resultados cuantifican la ocupación espectral de la banda ISM de 2.4 GHz y revelan su subutilización, a pesar de la popularidad de la misma por ser de uso libre.

El presente artículo está estructurado como sigue. En la sección 2 se presenta la metodología: equipo y mediciones, procesamiento, cálculo del umbral y ciclo de trabajo. En la sección 3 se muestran los resultados de la ocupación espectral de la banda ISM. La discusión de los resultados y su posible aplicación se muestra en la sección 4. Finalmente, las conclusiones son presentadas en la sección 5.

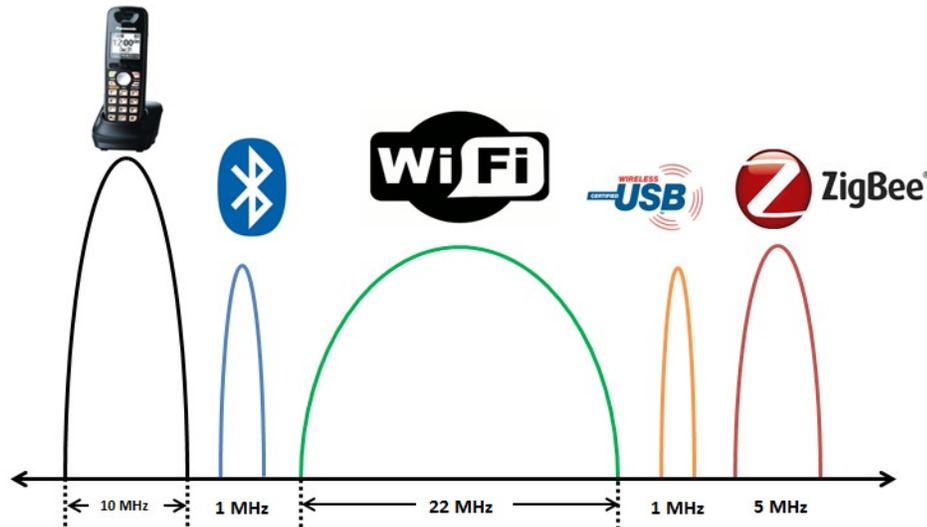


Fig. 1. Tecnologías inalámbricas que operan en la banda ISM.

2. Metodología

Para realizar la campaña de medición, en este estudio se considera un punto de observación en uno de los laboratorios de la Facultad de Ciencias en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la cual cuenta con acceso inalámbrico a Internet vía Wi-Fi y es de uso libre por profesores y alumnos. Se cuenta con una población de alrededor de 300 usuarios y la medición se realiza durante 4 días, en un día laboral normal. Las coordenadas son las siguientes: 22° 08' 21.1" latitud y 101° 00' 53.0" longitud. Asimismo, la percepción de espectro se lleva a cabo mediante un instrumento analizador de espectro de alto desempeño. Una vez concluida la campaña de medición, se realiza un procesamiento de los datos recabados en Matlab. Posteriormente se calcula el umbral con el que se compara la PSD recibida utilizando el criterio de probabilidad de falsa alarma (P_{FA}) y se obtiene el ciclo de trabajo de cada medición,

correspondiente a los canales 1, 6, 11 y 14 del estándar IEEE 802.11b/g/n. Cabe destacar, que la contribución de este artículo está en la metodología para obtener la ocupación espectral y no en los resultados obtenidos para este caso específico.

2.1. Equipo y mediciones

Para llevar a cabo el estudio de la ocupación espectral en la banda ISM, se utiliza el equipo FieldFox N9913A de 4 GHz de la marca Keysight Technologies [5] en modo de analizador de espectro (SA, por sus siglas en inglés), conectado a una computadora vía Ethernet. Se implementa una secuencia de comandos en Matlab, el cual se ejecuta como programa de captura de interfaz: que permite la comunicación de datos entre el SA y la computadora en tiempo real, dentro de los parámetros de configuración se define el intervalo de grabación y tiempo.

El software *Command Expert* se utiliza para realizar algunas pruebas y probar los comandos que se utilizan en la creación del programa de captura de interfaz. El SA es conectado con una antena omnidireccional de una ganancia de 9 dBi que opera en la banda de 2.4 GHz. El esquema que se emplea para la recolección de las mediciones es mostrado en la Figura 2 y los parámetros de configuración del SA son mostrados en la Tabla 1, donde el ancho de banda de resolución define la selectividad del analizador para señales de idéntica amplitud.



Fig. 2. Esquema para la recolección de las mediciones.

Nombre del parámetro	Valor
Rango de frecuencia 1	2401 MHz – 2427 MHz
Rango de frecuencia 2	2426 MHz – 2452 MHz
Rango de frecuencia 3	2451 MHz – 2477 MHz
Rango de frecuencia 3	2473 MHz – 2499 MHz
Ancho de banda de resolución	30 KHz
Span	26 MHz
Puntos de barrido	401
Duración de la medición	1 día (24 horas)

Tabla 1. Parámetros de configuración.

2.2. Procesamiento

Para recolectar la información del espectro, la banda ISM se divide en cuatro segmentos. Esto se hace para determinar la ocupación espectral de las bandas de frecuencias que corresponden al canal 1 (2401 - 2423 MHz), canal 6 (2426 - 2448 MHz), canal 11 (2451 - 2473 MHz) y canal 14 (2473 - 2495 MHz) del estándar IEEE 802,11b/g/n. Para cada segmento, las mediciones de la densidad espectral de potencia (PSD, por sus siglas en inglés) se llevan a cabo durante 24 horas de actividad. Por lo tanto, la campaña de medición de la banda ISM se lleva a cabo durante un período total de 4 días. El span del SA se establece en 26 MHz cada día. Así que el primer día, la frecuencia de comienzo se establece en 2401 MHz y la frecuencia final se establece en 2427 MHz. El segundo día, el rango del span es de 2426 MHz a 2452 MHz. Para el tercer día de las mediciones la duración es seleccionada de 2451-2477 MHz. Por último, el rango del span se establece 2473-2499 MHz del cuarto día. Luego, para cada segundo, se recolectan un total de 401 muestras de la PSD, que es el número total de puntos de frecuencia en el rango de frecuencias seleccionado. El programa de captura de interfaz es el responsable de recopilar y guardar la información del espectro en un archivo .mat para cada segundo de las mediciones de la PSD en dBm. Por lo tanto, el número total de vectores de 401 muestras se procesan utilizando Matlab. Cabe

mencionar que se consideraron 24 horas debido a que los usuarios pueden utilizar la tecnología Wi-Fi en cualquier hora del día. Además, con esta información recabada se puede obtener la ocupación espectral en horario pico, por ejemplo de 8:00 h a 16:00 h.

2.3. Cálculo del umbral

Un parámetro importante para determinar la ocupación espectral de una banda de frecuencias, es la selección del umbral con el que se compara la PSD recibida, dado que con base en éste se determina si una banda de frecuencias está ocupada o no en determinado tiempo. Por ejemplo al elegir un umbral demasiado alto, la ocupación espectral estará siendo subestimada debido a la gran cantidad de detecciones perdidas. Por otra parte al elegir un umbral demasiado bajo, el resultado obtenido sería una sobrestimación causado por las muestras de la PSD del ruido que se encuentren por encima del umbral. El método más simple para determinar el umbral, es mediante el análisis empírico, se basa en el conocimiento de las propiedades del ruido, el cual puede ser fácilmente medido, remplazando la antena con una carga acoplada [6].

De este modo, la medición de la PSD del ruido de fondo se realiza de la siguiente manera. Se recopilan las mediciones de la PSD del ruido, se remplaza la antena por una carga de 50 ohms, la elección de esta se debe a que es la impedancia característica del equipo [7]. Para la primera medición, la frecuencia de comienzo se establece en 2401 MHz y la frecuencia final se establece en 2427 MHz. La segunda medición, el rango del span es de 2426 MHz a 2452 MHz. Para la tercera medición la duración es seleccionada de 2451-2477 MHz. Por último, el rango del span se establece 2473-2499 MHz. Por lo tanto, se realizan cuatro mediciones, cada una con duración de 20 minutos, capturando muestras cada segundo, teniendo un total de 1200 vectores de muestras. Posteriormente la información es procesada en Matlab. Sin embargo, es importante señalar que se consideraron 20 minutos de duración debido a que solo se mide la PSD del ruido de fondo del instrumento.

Una posibilidad simple para la selección del umbral, sería elegir el máximo nivel de la PSD del ruido $X_{max}(f)$, medido en cada punto de frecuencia f , el cual es obtenido de la siguiente manera:

$$\lambda(f) = X_{max}(f). \quad (1)$$

donde $\lambda(f)$ es el umbral de decisión.

A este método se le conoce como el criterio del máximo nivel de la PSD del ruido, de esta manera la ocupación espectral nunca es sobrestimada. Sin embargo la ocupación podría ser subestimada debido a las muestras de señales débiles que se encuentran por debajo del valor máximo nivel de PSD del ruido. Una alternativa a este problema, es fijar un umbral m -dBm encima del promedio de la PSD del ruido X_{prom} como sigue:

$$\lambda(f) = X_{prom} + m, \quad (2)$$

donde m representa una cantidad constante el cual es sumado al valor promedio de la PSD de nivel del ruido por ejemplo, $m = 6$ dBm o $m = 10$ dBm. Este método se le conoce como criterio de m -dBm. La principal desventaja de este método es que la varianza del ruido y el valor máximo nivel de la PSD del ruido $X_{max}(f)$ pueden variar en cada banda, en función de varios parámetros de configuración del analizador de espectro, por ejemplo el rango de frecuencia, etc. Por lo tanto, un umbral m -dBm constante en todo el rango de medición no puede ser apropiado.

Una solución diferente a los métodos anteriores para resolver este inconveniente es el criterio de probabilidad de falsa alarma (P_{FA}). En una red de radio cognoscitivo, la P_{FA} es la probabilidad de decidir que una banda de frecuencia determinada está siendo ocupada cuando en realidad está desocupada. Este evento puede ser causado por fuertes muestras de la PSD del ruido junto con umbrales de decisión bajos. Entonces para un umbral óptimo en cada punto de frecuencia medido, el criterio consiste en fijar $P_{FA} = \alpha$ de tal manera que solo una fracción mínima de muestras de potencia de ruido se encuentre por encima del umbral, como se muestra a continuación [6]:

$$\lambda(f) = F_{x(f)}^{-1}(1 - P_{FA}), \quad (3)$$

donde $F_{x(f)}^{-1}(\cdot)$ representa la inversa de la función de distribución acumulada (CDF, por sus siglas en inglés) de la PSD del ruido $F_{x(f)}(\cdot)$. Por lo tanto en este trabajo el umbral es elegido utilizando el criterio de $P_{FA} = 1\%$ para la ocupación espectral de la banda ISM. En cada punto de frecuencia f se calcula de manera empírica la CDF en un intervalo de tiempo $T_{span} = 20$ minutos (1200 muestras), como se muestra en la Figura 3. Este enfoque es un punto intermedio entre el criterio de máximo nivel de potencia del ruido y el criterio de m -dBm, como se muestra en la Figura 4. Donde la ocupación espectral podría nunca ser sobrestimada, y en cambio al elegir el criterio m -dBm la ocupación espectral podría ser significativamente sobrestimada o subestimada. El máximo error de sobrestimación para el criterio P_{FA} ocurre para un valor P_{FA} .

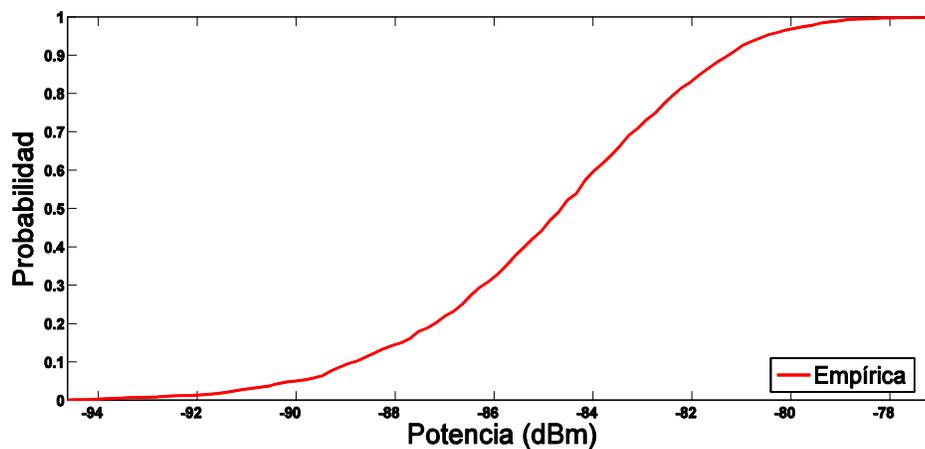


Fig. 3. Función de distribución acumulada de la PSD del ruido.

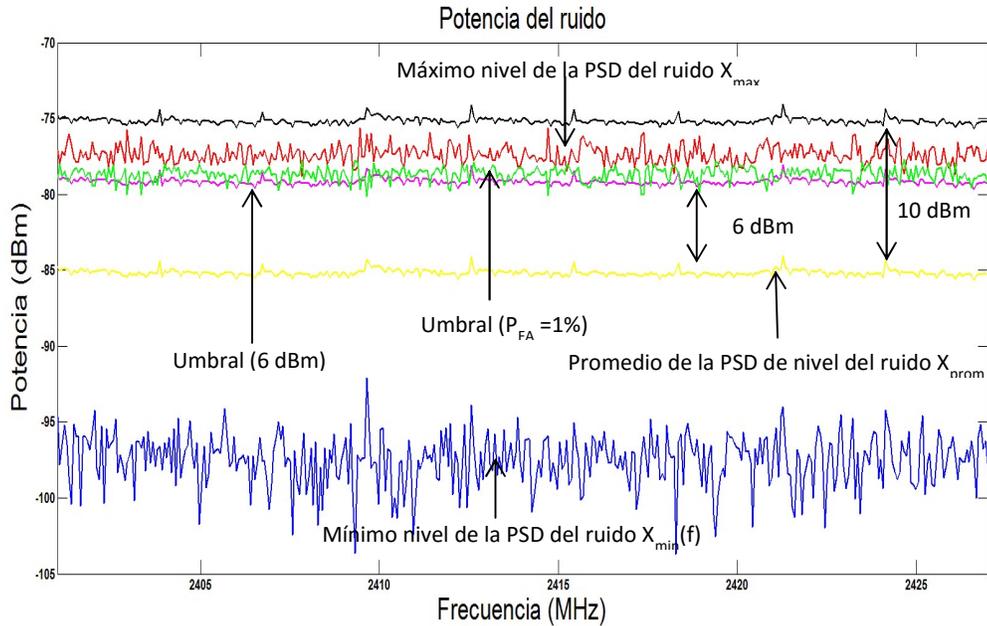


Fig. 4. Diferentes criterios para la selección del umbral.

2.4. Ciclo de trabajo

El ciclo de trabajo se define como la fracción de tiempo donde la señal se encuentra por encima de cierto umbral [8, 9], en otras palabras, es el porcentaje de muestras que se encuentran por encima del umbral o el porcentaje de tiempo que cada frecuencia ha sido declarada ocupada. Para cada punto de frecuencia se calcula el número de puntos temporales que se han detectado como ocupados, y se divide por el número total de puntos capturados. Cuantos más puntos ocupados, mayor será el valor del ciclo de trabajo.

El conjunto de muestras de la PSD que se recolectan por el SA en un intervalo de tiempo $T_{span} = 24$ horas y a lo largo de un intervalo de frecuencia $F_{span} = 401$ puntos, las cuales son representadas por una matriz D de $N_t \times N_f$ como:

$$D = [D(t_i, f_k)], \quad (4)$$

donde cada elemento de la matriz $D(t_i, f_k)$ representa la muestra de la PSD capturada en el instante de tiempo t_i ($i = 1, 2, \dots, N_t$) y en cada punto de frecuencia f_k ($k = 1, 2, \dots, N_f$).

Se define una matriz de ocupación espectral binaria, y es representada por:

$$\mathbf{T} = [T(t_i, f_k)] , \quad (5)$$

donde cada elemento es representado por $T(t_i, f_k) \in \{1,0\}$ y se calcula de la siguiente manera:

$$T(t_i, f_k) = \begin{cases} 1 & \text{si } D(t_i, f_k) \geq \lambda_k \\ 0 & \text{si } D(t_i, f_k) < \lambda_k \end{cases} \quad (6)$$

cada elemento de la matriz representa la presencia de la señal con $T(t_i, f_k) = 1$ o su ausencia de la señal $T(t_i, f_k) = 0$ en un instante de tiempo t_i y punto de frecuencia f_k .

Para cada punto de frecuencia se mide f_k y se calcula el ciclo de trabajo C_k como la fracción de muestras de la PSD que se encuentran encima del umbral de decisión λ_k , por lo tanto son muestras consideradas como canales ocupados:

$$C_k = \frac{1}{N_t} \sum_{i=1}^{N_t} T(t_i, f_k). \quad (7)$$

Para una determinada banda, el ciclo de trabajo medio P se calcula promediando los ciclos de trabajo C_k de todos los N_f puntos medidos de frecuencia que componen esa banda como:

$$P = \frac{1}{N_f} \sum_{k=1}^{N_f} C_k = \frac{1}{N_t} \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_f} T(t_i, f_k). \quad (8)$$

Esta medida representa el grado medio de la utilización del espectro dentro de cierto tiempo (T_{span}) y frecuencia (F_{span}). El ciclo de trabajo es un valor comprendido entre 0 y 1, pero también puede ser representado en porcentaje.

3. Resultados

Las mediciones en la banda ISM se realizan en las frecuencias entre los canales 1, 6, 11 y 14 del estándar IEEE 802.11b/g/n, para evitar los traslapes de frecuencias, por lo que en total hay 4 canales de estudio. Si se usan canales adyacentes, se producen efectos de interferencias por el traslape de las bandas de frecuencia [10, 11]. En las Figuras 5, 7, 9 y 11 es mostrada la PSD máxima, mínima y promedio de los cuatro canales. La PSD máxima se encuentra buscando el valor máximo de potencia medido durante el periodo de 24 horas por cada segundo. Para el caso de la PSD mínima, se utiliza el mismo procedimiento, sin embargo aquí se calcula el valor mínimo. Para la PSD promedio, se calcula la media aritmética con todas las muestras obtenidas por cada frecuencia. En las Figuras 6, 8, 10 y 12 se muestran el ciclo de trabajo de los cuatro canales.

El ciclo de trabajo promedio entre el canal 1, 6 y 11 es de 14.31 %, además se puede apreciar que el canal 14 está libre todo el tiempo, tal y como se muestra en la Figura 13, lo anterior revela la existencia de importantes cantidades de espectro sin utilizar. Es decir, estos resultados indican claramente que la utilización del espectro es baja, por lo que se pueden emplear mecanismos para hacer un uso más eficiente del espectro como el propuesto por la tecnología de radio cognoscitivo.

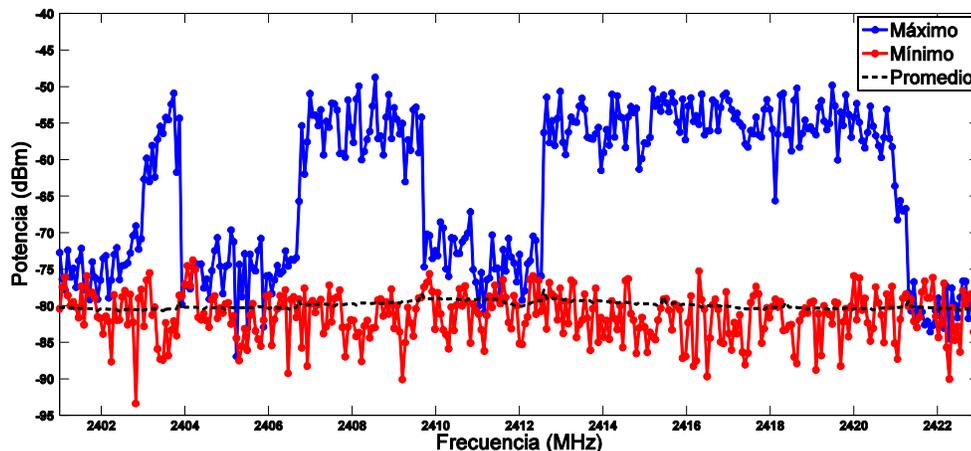


Fig. 5. PSD máxima, mínima, y promedio del canal 1.

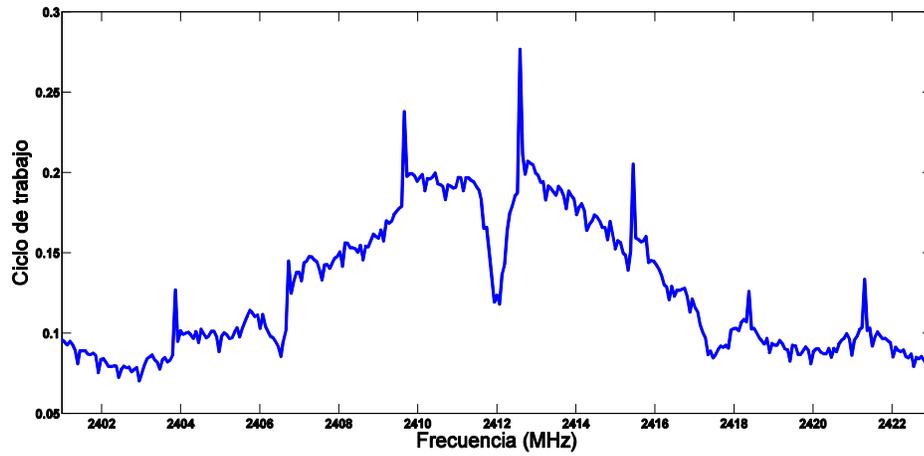


Fig. 6. Ciclo de trabajo del canal 1.

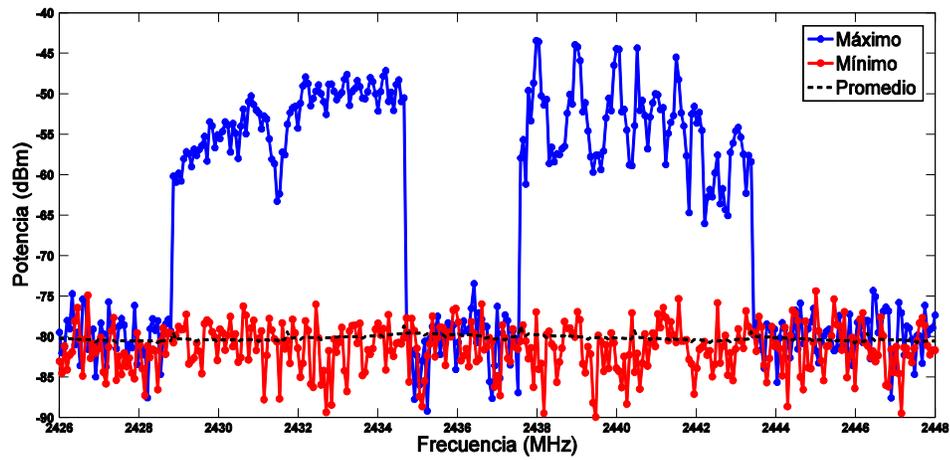


Fig. 7. PSD máxima, mínima, y promedio del canal 6.

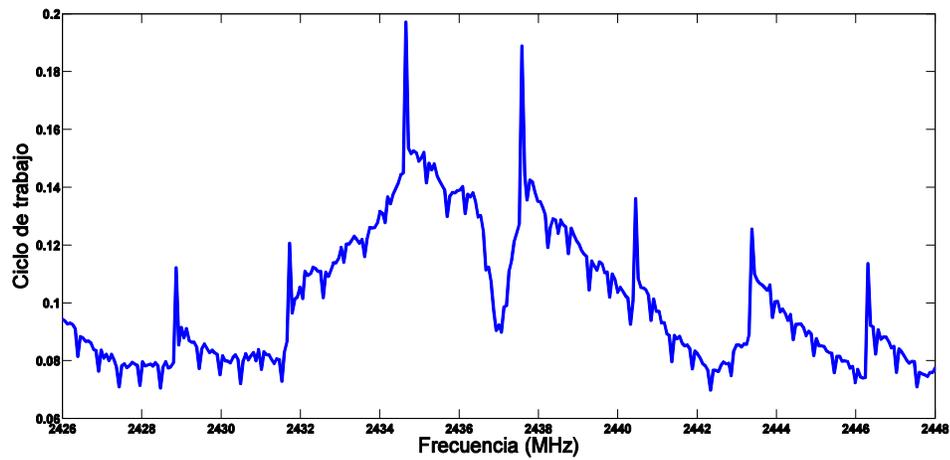


Fig. 8. Ciclo de trabajo del canal 6.

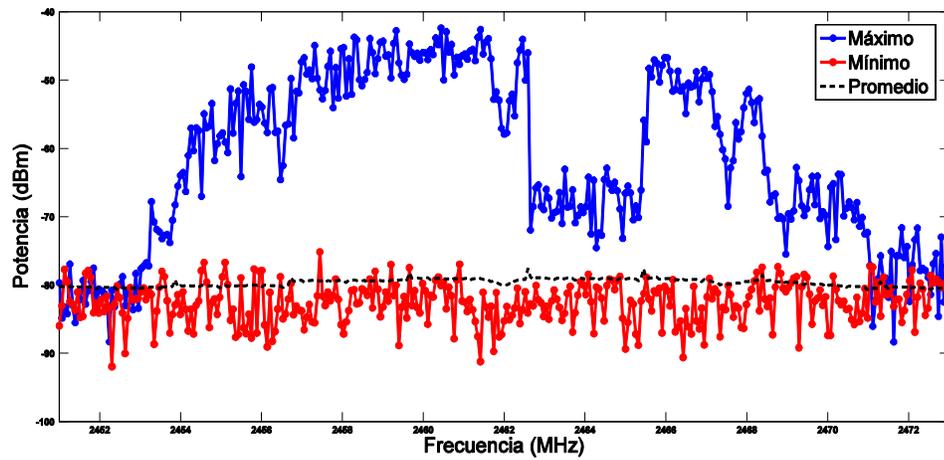


Fig. 9. PSD máxima, mínima, y promedio del canal 11.

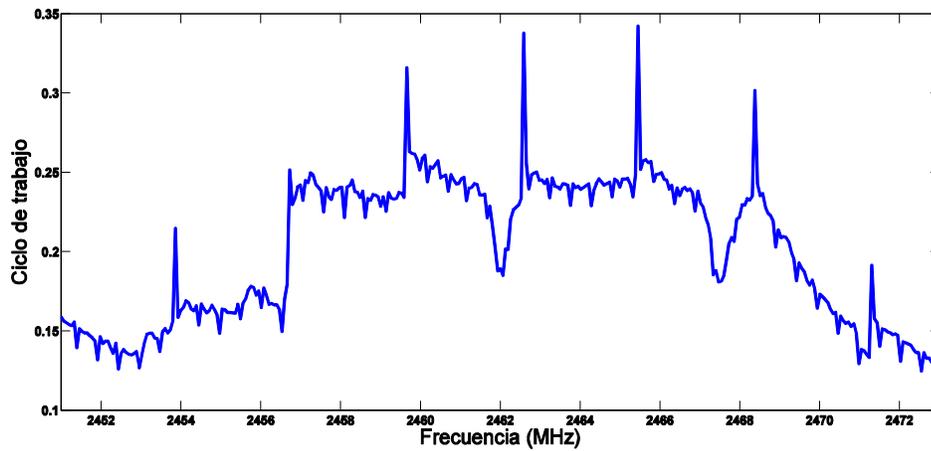


Fig. 10. Ciclo de trabajo del canal 11.

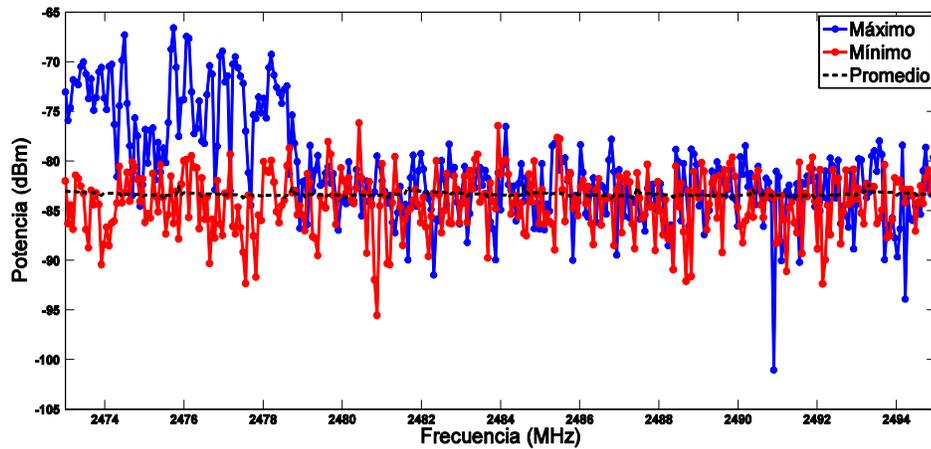


Fig. 11. PSD máxima, mínima, y promedio del canal 14.

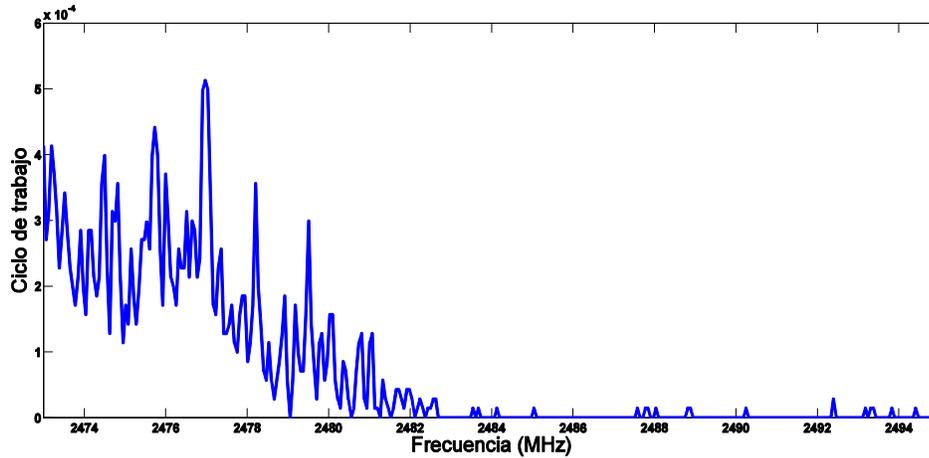


Fig. 12. Ciclo de trabajo del canal 14.

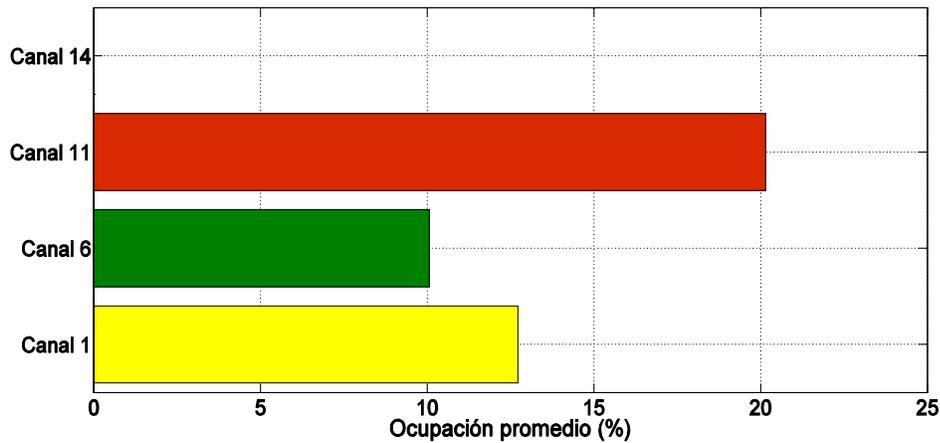


Fig. 13. Comparación de la ocupación de los canales del estándar IEEE 802.11b/g/n.

4. Discusión

El estándar IEEE 802.11b/g/n define 14 canales, de los cuales el 14 es restringido en algunos países, por ejemplo en México y Estados Unidos. Es por esto que en los resultados del canal 14 tiene una fracción de ocupación espectral, la cual es ocasionada por el criterio de probabilidad de falsa alarma, donde su valor es prácticamente cero. En consecuencia solamente se pueden utilizar los canales 1, 6 y 11. De acuerdo a los resultados se puede apreciar que el canal 11 se encuentra con

mayor ocupación espectral, mientras el canal 6 muestra lo contrario. Con base a lo anterior, una de las aplicaciones que se propone, es la comunicación de un vehículo aéreo no tripulado con la estación base, el entorno que se considera, es el interior de una bodega debido a que no hay demasiados obstáculos y el sitio geográfico cuenta con WLANs a su alrededor. Con el objetivo de realizar misiones de reconocimiento, vigilancia y rescate, el VANT está equipado con una cámara para capturar imágenes en tiempo real y posteriormente se transmitan los datos a la estación base, utilizando uno de los canales del estándar IEEE 802.11 b/g/n.

La estación puede, por ejemplo, realizar la reconstrucción tridimensional del entorno mediante las imágenes obtenidas desde el VANT, lo cual puede ser de gran ayuda en situaciones de emergencia. Debido a las interferencias con las WLANs, en ocasiones existe la pérdida de paquetes de datos en el enlace de comunicación. En este sentido es indispensable seleccionar el canal con menor ocupación espectral, con la finalidad de mejorar la tasa de transmisión de datos. Así pues, se propone hacer uso eficiente de los canales Wi-Fi, al aplicar algoritmos de percepción de espectro.

En la Figura 14 se muestra el modelo del sistema para la comunicación de un VANT con la estación base en el enlace de carga útil. La comunicación del VANT opera en la banda ISM de 2.4 GHz, ya que está reservada a nivel internacional para uso libre, por lo tanto, no cuenta con usuarios primarios, por esta razón, a estos los denominamos usuarios pseudo-primarios (UPPs). Cuando el UPP está activo, algunas o todas las bandas de frecuencias están ocupadas. Los usuarios secundarios primero escuchan y luego pueden decidir en utilizar las bandas de frecuencias que se detectan desocupadas. Cabe señalar que para evitar colisiones entre las transmisiones de los usuarios cognoscitivos, el conjunto de las bandas de frecuencias se puede dividir entre los usuarios cognoscitivos potenciales de acuerdo con un mecanismo de programación basado por ejemplo en los resultados de previas decisiones [12].

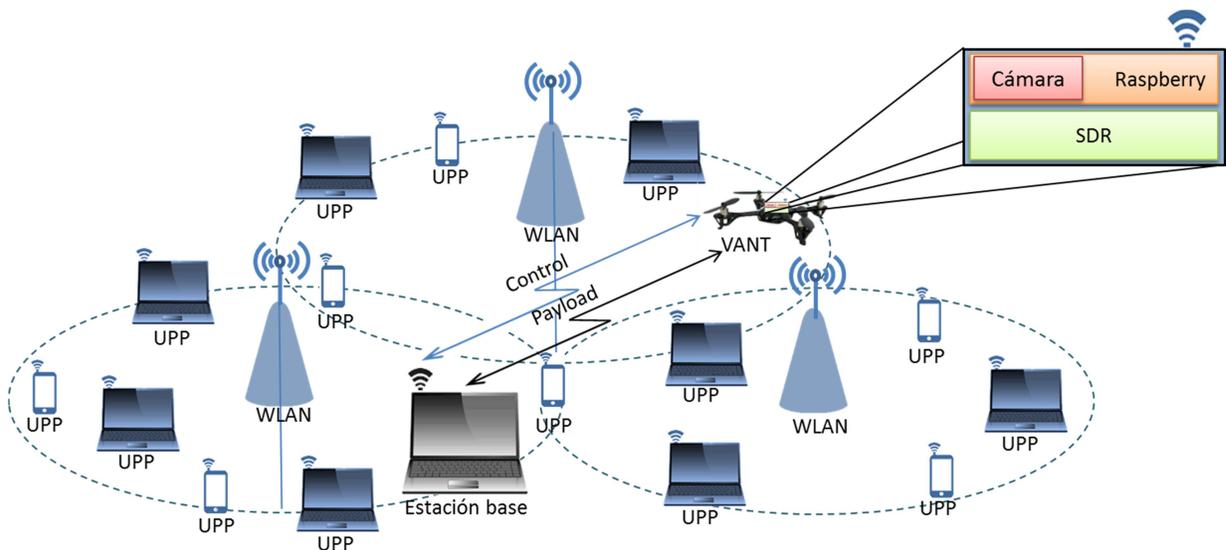


Fig. 14. Modelo del sistema.

Además en la Figura 14 se asume que existen K UPPs, L redes WLAN y dos usuarios cognoscitivos. Cabe mencionar que el VANT tiene integrado una tarjeta Raspberry con módulo Wi-Fi, cámara digital y SDR para percibir la banda ISM, el cual es considerado como usuario cognoscitivo.

5. Conclusiones

En este trabajo, se presentó un estudio de la ocupación espectral de la banda ISM de 2.4 GHz, en una configuración para interiores, en las instalaciones de la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Los resultados presentados en este estudio cuantifican la subutilización del espectro en esta banda, a pesar de que muchas tecnologías de comunicación inalámbrica comparten este recurso. Por lo tanto la tecnología de radio cognoscitivo se plantea como una alternativa factible para la reutilización del espectro electromagnético, accediendo dinámicamente a la banda ISM sin afectar la operación de usuarios pseudo-primarios que utilizan tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, etc. Por lo tanto, en la implementación de tecnologías de radio cognoscitivo en esta banda es necesario obtener la ocupación espectral de esta porción de espectro.

6. Referencias

- [1] I. F. Akyildiz, W.-Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NEXT generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey". Elsevier computer networks journal. Vol. 50. No. 2. Sep. 2006. 2127-2129 pp.
- [2] S. A. Hanna, and J. Sydor, "Spectrum metrics for 2.4 ISM band cognitive radio applications". IEEE 22nd international symposium on personal indoor and mobile radio communications. Sep. 2011. 2344-2348 pp.
- [3] J. Mack, A. Ghasemi, S. Gazor, and J. Sydor, "Dynamic channel selection in cognitive radio wifi networks: An experimental evaluation". IEEE international conference on communications. Jun. 2014. 261-267 pp.
- [4] M. H. Virk, et. Al., "Spectrum occupancy evaluations at 2.35-2.50 GHz ISM band in a hospital environment". Oct. 2014. 39-45 pp.
- [5] Keysight FieldFox Analyzers N9913A. Keysight technologies. 2015.
- [6] M. López-Benítez, F. Casadevall, "Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio". European transactions on telecommunications. Vol. 4. No. 8. Dec. 2010. 680-693 pp.
- [7] Spectrum analysis basics. Agilent technologies. 2013.
- [8] M. Matinmikko, M. Mustonen, H. Sarvanko, M. Hoyhtya, A. Hekkala, A. Mammela, M. Katz and M. Kiviranta, "A motivating overview of cognitive radio: Foundations, regulatory issues and key concepts". First international workshop on cognitive radio and advanced spectrum management. Feb. 2008. 1-5 pp.
- [9] M. López-Benítez, F. Casadevall, "Spectrum occupancy in realistic scenarios and duty cycle model for cognitive radio". Advances in electronics and telecommunications. Vol. 1. Apr. 2010. 26-34 pp.

- [10] R. Ruslan, T. C. Wan, "Cognitive radio-based power adjustment for Wi-Fi". IEEE region 10 conference TENCON 2009-2009. Jan. 2009. 1-5 pp.
- [11] S. A. Hanna, and J. Sydor, "Distributed sensing of spectrum occupancy and interference in outdoor 2.4 GHz Wi-Fi networks". IEEE Global communications conference (GLOBECOM). Dec. 2012. 1453-1459 pp.
- [12] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, Y. Chen, "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework". IEEE journal on selected areas in communications. Vol. 25. Abr. 2007. 589-600 pp.

7. Autores

Miguel Ángel Díaz Ibarra obtuvo el grado de Ingeniero Electrónico con especialidad en Instrumentación y Control por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP) en el año 2013. Actualmente es estudiante de Maestría en Ingeniería Electrónica con especialidad en Telecomunicaciones en la Facultad de Ciencias de la UASLP.

Marco Aurelio Cárdenas Juárez obtuvo el grado de Doctor en Filosofía, especialidad en procesamiento de señales para comunicaciones, por la Universidad de Leeds, Reino Unido, en el año 2012. Actualmente es profesor-investigador en la Facultad de Ciencias de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Sus intereses de investigación están en el área de percepción y decisión de espectro para radio cognoscitivo.

Ulises Pineda Rico obtuvo el grado de Doctor en Ingeniería Eléctrica y Electrónica con especialidad en Telecomunicaciones por la Universidad de Manchester, Reino Unido, en el año 2009. Actualmente es profesor-investigador en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

Enrique Stevens Navarro obtuvo el grado de Doctor en Filosofía en Ingeniería Eléctrica y Computación por la Universidad de Columbia Británica, Canadá, en el año 2008. Actualmente es profesor-investigador en la Universidad Autónoma de San Luis Potosí.

8. Agradecimientos

Este trabajo fue financiado mediante el apoyo 215499 del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí mediante el fondo de apoyo a la investigación (FAI) así como por el programa para el desarrollo profesional docente (PRODEP).