

Oportunidades de despliegue para redes radio cognitivas de acceso dinámico al espectro en diversos escenarios realistas

Miguel López Benítez y Fernando Casadevall

Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones
Universidad Politécnica de Cataluña
Barcelona
[miguel.lopez, ferranc]@tsc.upc.edu

Abstract — El concepto de red radio cognitiva (*cognitive radio*) ha surgido muy recientemente como una prometedora respuesta a los problemas existentes entre la creciente demanda de espectro y su actual infrautilización, constituyendo así una esperanzadora solución a la denominada escasez del espectro radioeléctrico. La idea básica de este innovador paradigma consiste en permitir un acceso temporal y oportunista al espectro por parte de usuarios sin licencia, siempre y cuando éste no esté siendo utilizado por los usuarios legítimos con licencia y ello no conlleve niveles de interferencia inaceptables sobre dichos usuarios. Si bien resulta conceptualmente sencillo, en la práctica este principio de operación conlleva un conjunto de dificultades técnicas que todavía necesitan soluciones completamente satisfactorias. El desarrollo de soluciones útiles en el ámbito práctico requiere de estudios de ocupación espectral en escenarios realistas que proporcionen la información necesaria para que las soluciones desarrolladas den una respuesta satisfactoria a las situaciones planteadas en el mundo real. En este contexto, la presente comunicación presenta y analiza los resultados obtenidos en una campaña de medidas realizada en diversos escenarios realistas de interés práctico.

I. INTRODUCCIÓN

La incansable proliferación de nuevas tecnologías radio, servicios y operadores durante los últimos años ha dado lugar a la rápida asignación y consecuente agotamiento de las bandas de frecuencia consideradas de interés práctico para las comunicaciones radio. No obstante, estudios recientes realizados de manera independiente en diversas localizaciones geográficas alrededor de todo el mundo [1]–[5] han demostrado que el uso del espectro no es homogéneo ni tampoco eficiente. Mientras ciertas bandas se encuentran congestionadas y sometidas a un uso intensivo, otras regiones del espectro se hallan infrautilizadas y, en algunos casos, completamente desocupadas. En este contexto surgió el concepto de red radio cognitiva (*Cognitive Radio*, CR) o de acceso dinámico al espectro (*Dynamic Spectrum Access*, DSA) como una prometedora solución a los conflictos existentes entre la creciente demanda de espectro y su actual infrautilización. La idea básica en que se sustenta este tipo de redes consiste en permitir que ciertos usuarios sin licencia, denominados *usuarios secundarios* o *red secundaria*, puedan acceder a ciertas bandas de radio frecuencia de manera temporal y oportunista siempre y cuando dichas bandas no se encuentren utilizadas por los usuarios legítimos con licencia, denominados *usuarios primarios* o *red primaria*, y las transmisiones secundarias no impliquen la generación de niveles de interferencia perjudiciales o intolerables sobre la red primaria. Este paradigma promete importantes mejoras en cuanto a eficiencia del uso espectral y, si bien resulta conceptualmente sencillo, en el ámbito práctico conlleva un conjunto de dificultades técnicas que todavía requieren de soluciones completamente satisfactorias. No obstante, antes de investigar las implicaciones técnicas de este tipo de redes de comunicaciones, resulta ineludible acometer estudios de ocupación espectral en ámbitos realistas de interés práctico que proporcionen la información necesaria para un próspero desarrollo práctico de las soluciones tecnológicas requeridas. En este contexto, la presente comunicación presenta y analiza los resultados obtenidos en una campaña de medidas realizadas en diversos escenarios realistas de interés práctico así como las implicaciones prácticas derivadas de ellos.

II. EVALUACIÓN DEL NIVEL DE OCUPACIÓN ESPECTRAL

La medición de la actividad de redes reales proporciona una importante fuente de información acerca del nivel de ocupación espectral y, por lo tanto, constituye un paso clave hacia una comprensión realista de la utilización del espectro. Uno de los más importantes usos de las medidas espectrales será no sólo el de convencer a los organismos reguladores de la necesidad de nuevas políticas de acceso dinámico al espectro sino también el de servir de apoyo para la toma de decisiones que permitan mejorar el uso de los actualmente infrautilizados recursos espectrales. Desde un punto de vista tecnológico, las medidas espectrales resultan útiles a la hora de detectar aquellas bandas que se hallan sometidas a un bajo nivel de utilización (o a un uso intenso), evaluando y caracterizando de esta manera la disponibilidad de recursos espectrales infrautilizados en términos de frecuencia, tiempo y espacio. Esta información resulta de gran valor práctico a la hora de identificar aquellas bandas de radiofrecuencia que, por sus características de ocupación, podrían resultar en principio más adecuadas e interesantes para el futuro despliegue de las redes CR/DSA, así como de sus correspondientes patrones de ocupación, número y ubicación de los transmisores de cada banda y otros diversos parámetros de interés. Aunque existen algunos estudios previos en este campo, el trabajo realizado hasta la fecha todavía puede considerarse como claramente insuficiente.

En este contexto, el Grupo de Comunicaciones Radio de la Universidad Politécnica de Cataluña está actualmente llevando a cabo una ambiciosa campaña de medidas espectrales, cubriendo el rango de frecuencias desde 75 hasta 7075 MHz en escenarios tanto interiores como exteriores y en diversas localizaciones urbanas, sub-urbanas y rurales de Barcelona y alrededores. Según nuestra información, esta campaña de medidas constituye una iniciativa pionera en el contexto de la tecnología CR/DSA dentro del ámbito geográfico abarcado por la regulación establecida en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) [6]. En las siguientes secciones se presentan algunos de los resultados obtenidos en diversas ubicaciones dentro de un escenario urbano, los cuales demuestran la existencia de una significativa cantidad de espectro disponible para el potencial despliegue de redes CR/DSA.

A. Equipo y Metodología de Evaluación

La figura 1 (esquema general de medida) y la figura 2 (fotografías del montaje de laboratorio) muestran el equipo de medida empleado en este estudio. El diseño se compone de dos antenas de tipo discono de banda ancha utilizadas para cubrir los rangos de frecuencia 75-3000 MHz y 3000-7075 MHz, un conmutador electromecánico empleado para seleccionar el rango de medida deseado, un filtro elimina banda para suprimir las señales de la banda de Frecuencia Modulada (FM)¹ así como filtros paso bajo y paso alto para eliminar señales fuera de la banda bajo medida, un pre-amplificador de bajo ruido y ganancia intermedia para compensar las pérdidas de los componentes pasivos así como para incrementar la sensibilidad total del sistema y con ello la capacidad para detectar señales débiles, y un analizador espectral de alto rendimiento para capturar la actividad espectral observada.

Existen importantes aspectos metodológicos que es necesario tener en cuenta de manera especialmente cuidadosa a la hora de evaluar el nivel de ocupación del espectro, desde el propio diseño del sistema de medida y sus capacidades de detección (sensibilidad del sistema, margen dinámico libre de espurios, etc.) hasta los parámetros de configuración del analizador espectral y los algoritmos empleados en *software* para post-procesar los datos capturados y extraer el nivel de ocupación de cada banda. Tal y como queda patente en el estudio realizado en [7], la omisión de estos aspectos o el empleo de procedimientos inadecuados pueden dar lugar a importantes errores en el cálculo del nivel de ocupación espectral. Desafortunadamente, estos aspectos han sido habitualmente ignorados en trabajos previos y en aquellos donde se han considerado han sido tenidos en cuenta de manera insuficiente o superficial. Aunque por falta de espacio no se discutirán aquí en detalle, merece la pena señalar que dichos aspectos han sido cuidadosamente tenidos en cuenta en el presente estudio a la hora de diseñar el sistema de medida, seleccionar los diversos parámetros de configuración del analizador y post-procesar los datos capturados. Para más información, el lector puede encontrar todos los detalles en la referencia [7].

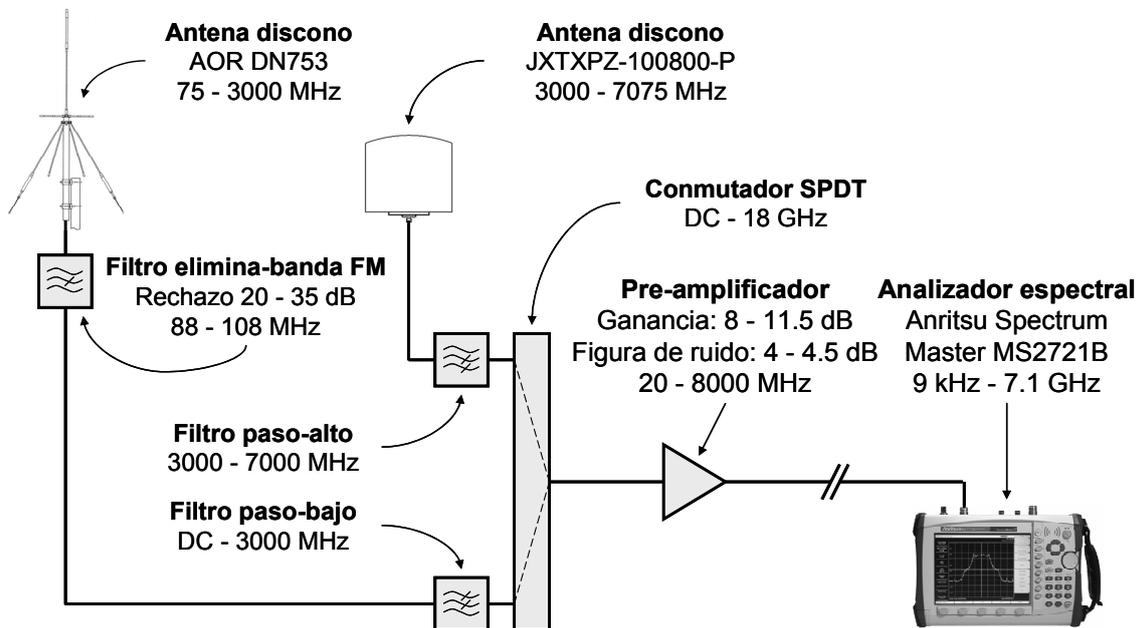


Fig. 1 Equipo de medida empleado en este estudio: esquema general.

¹ La habitualmente elevada potencia de transmisión de las estaciones de difusión de audio FM suele generar problemas de saturación y no linealidades, dando lugar a la aparición de espurios en el espectro de las señales recibidas en otras bandas de frecuencia próximas a la de FM. Dado el bajo interés potencial de la banda FM para aplicaciones CR (elevadas potencias de transmisión en canales adyacentes y reducidos anchos de banda disponibles), se decidió emplear un filtro para atenuar la banda de FM, mejorando así las prestaciones de detección en otras bandas cercanas.

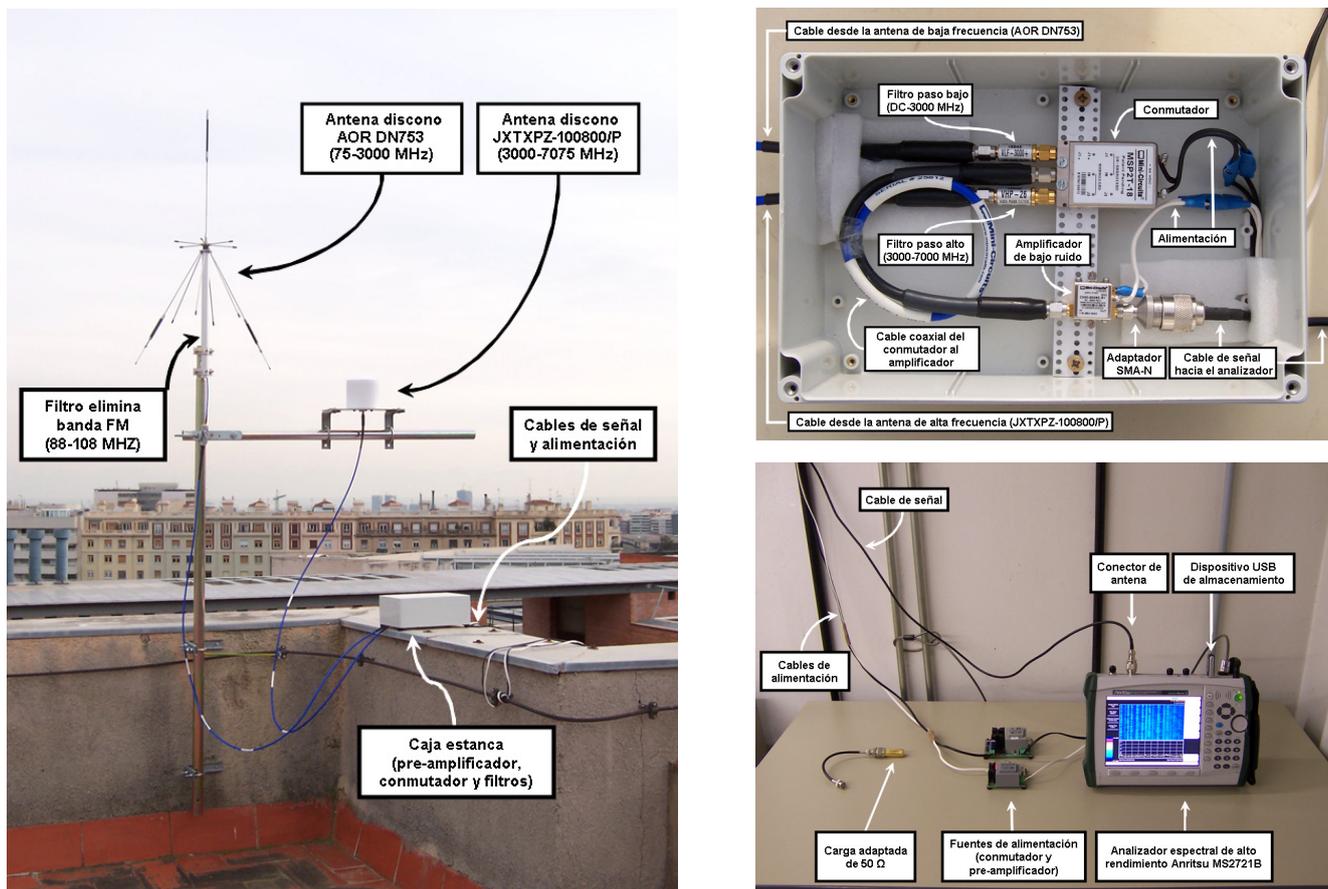


Fig. 2 Equipo de medida empleado en este estudio: Sistema de antena (izquierda), sistema de radio frecuencia (derecha superior) y analizador espectral (derecha inferior).

B. Resultados Generales

A fin de abarcar un amplio abanico de escenarios realistas de aplicación práctica, el equipo de medida se ubicó en diferentes emplazamientos distribuidos por el Campus Norte de la Universidad Politécnica de Cataluña, los cuales se indican en la figura 3. Como punto de referencia se toma la ubicación número 1 de la figura 3, que corresponde al tejado del edificio. Esta ubicación estratégica dispone de visión directa a múltiples transmisores radio ubicados a unos pocos centenares de metros del punto de medida, sin edificios ni otros obstáculos que bloqueen la propagación radio, lo cual nos permitió medir con gran precisión el nivel de actividad espectral de diversas estaciones transmisoras de interés práctico (difusión de televisión y audio, comunicaciones móviles celulares, sistemas PMR, bandas militares, marítimas y aeronáuticas, etcétera).

La tabla I muestra el ciclo de trabajo promedio obtenido para diferentes regiones del espectro considerando como ubicación de medida el punto 1 de la figura 3. Dicho parámetro representa el porcentaje de tiempo que la banda se midió como ocupada durante el periodo de medida (24 horas). Tal y como se puede apreciar, el espectro experimenta un nivel de utilización relativamente moderado por debajo de 1 GHz y bajo entre 1 y 2 GHz, mientras que permanece prácticamente infrautilizado entre 2 y 7 GHz. De hecho, mientras que el ciclo de trabajo promedio entre 75 y 2000 MHz es del 31.02%, el valor de este parámetro entre 2000 y 7075 MHz es de sólo 2.75%. El ciclo de trabajo promedio en el rango de frecuencia total considerado en este trabajo es del 17.78%, lo cual revela la existencia de una significativa cantidad de espectro no utilizado que podría ser potencialmente explotado por una red CR.

Aunque estos resultados indican claramente un bajo nivel de utilización espectral, no proporcionan una idea clara del uso del espectro en diferentes bandas asignadas a diversos servicios específicos. Si bien no resulta posible un análisis detallado banda por banda dadas las limitaciones de espacio, resulta interesante, no obstante, comentar algunos casos particulares de especial interés. A continuación se comentan a modo de ejemplo los resultados obtenidos en las bandas de televisión y comunicaciones móviles celulares (GSM y UMTS). En la banda asignada al servicio de televisión se obtuvo un ciclo de trabajo del 82.08%, uno de los mayores valores observados en este estudio. Este valor indica que aproximadamente la quinta parte de la banda (unos 70 MHz) puede considerarse como desocupada debido a la débil recepción de varios canales provenientes de estaciones de televisión lejanas. Por lo tanto, a pesar de la alta ocupación observada en esta banda, resulta posible identificar la existencia de interesantes oportunidades para un uso secundario del espectro. En el enlace descendente

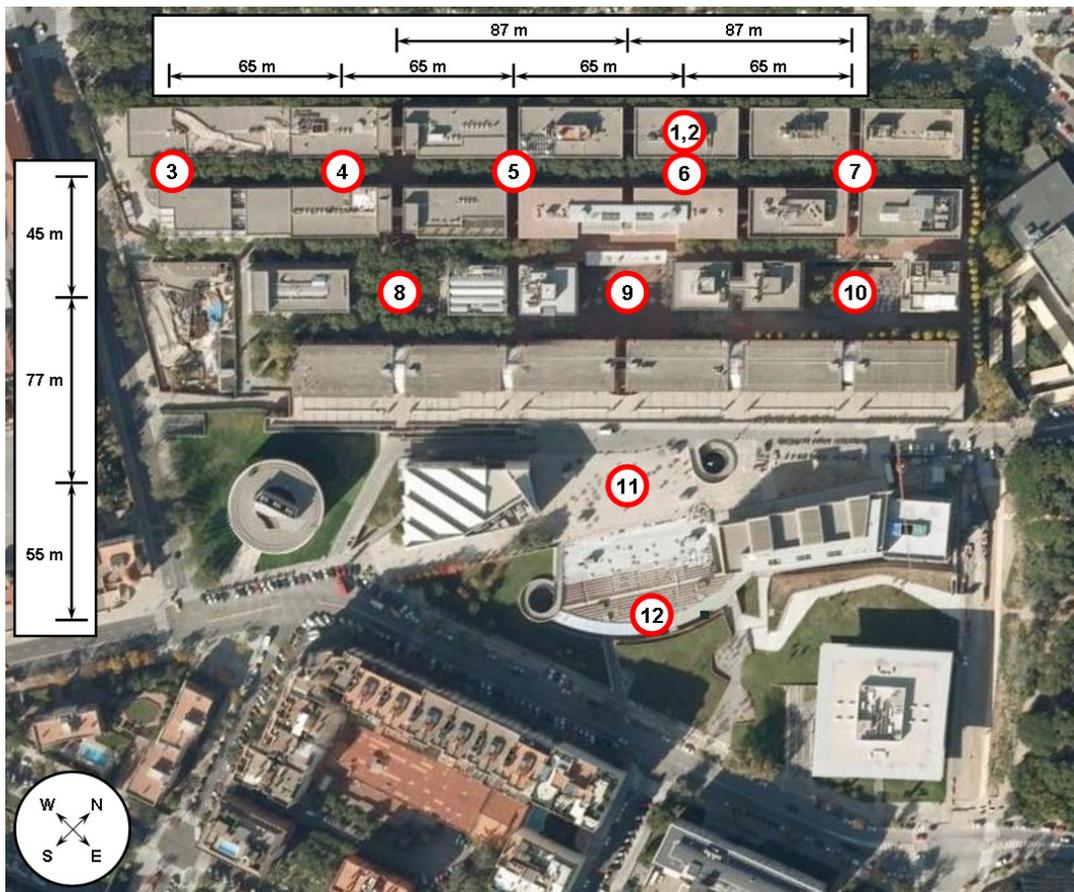


Fig. 3 Escenarios de medida considerados.

TABLA I
ESTADÍSTICAS DE OCUPACIÓN ESPECTRAL PROMEDIO.

Frecuencia (MHz)	Ciclo de trabajo promedio (%)					
	Pos 1	Pos 2	Pos 1	Pos 2	Pos 1	Pos 2
75-1000	42.00	33.70	31.02	21.54	17.78	12.10
1000-2000	13.30	1.94				
2000-3000	3.73	1.63				
3000-4000	4.01	1.44				
4000-5000	1.63	1.09	2.75	1.39		
5000-6000	1.98	1.34				
6000-7075	1.78	1.38				

de diversos sistemas de comunicaciones móviles también se observó un uso bastante intenso del espectro, con ciclos de trabajo del 58.82% para GSM 1800 y 56.93% para UMTS. No obstante, en estas bandas también se observó la existencia de oportunidades, bien por la presencia de patrones de ocupación temporal con menores niveles de utilización durante las horas nocturnas (en el caso GSM 1800) o bien por la presencia de diversos canales no utilizados (en el caso de UMTS). Es interesante señalar que estos tres ejemplos indican que incluso en bandas sometidas a niveles de utilización moderados/altos resulta posible identificar la presencia de interesantes oportunidades de transmisión que podrían ser aprovechadas por redes CR/DSA. A pesar de un uso intenso en algunas bandas particulares, la mayor parte del espectro se encuentra claramente desaprovechado, indicando un uso no homogéneo e ineficiente de los preciados recursos espectrales. Para más información acerca de otras bandas, el lector puede encontrar los detalles del estudio completo en la referencia [5].

C. Dependencia con la Localización Geográfica

La mayor parte de estudios previos de ocupación espectral se basan en medidas en puntos elevados como el considerado en la sección anterior. Este escenario podría no ser representativo de la actividad espectral percibida por usuarios secundarios en otras interesantes situaciones de significado práctico, haciendo por tanto necesario el análisis y la caracterización de la ocupación espectral en otros escenarios. Tomando como punto de referencia los resultados obtenidos en el punto de medida 1 de la figura 3, se presentan y analizan los resultados obtenidos en otras posiciones, concretamente en entornos interiores dentro de edificios (punto 2) y a nivel de suelo en calles estrechas (puntos 3-10) y zonas abiertas (puntos 11-12).

Respecto a la posición 2 (localización interior), desde un punto de vista cualitativo los resultados obtenidos siguen una tendencia similar a los del punto 1 (ver tabla I), con mayores niveles de ocupación espectral a frecuencias más bajas (en este caso, moderados por debajo de 1 GHz y bajos por encima de 1 GHz). La obtención de ciclos de trabajo más reducidos en entornos interiores puede explicarse por las pérdidas inducidas por la atenuación de las paredes del edificio, lo cual da lugar a niveles de señal más bajos y, por lo tanto, a un menor número de señales primarias detectadas como presentes en las bandas medidas. En principio, un menor ciclo de trabajo indica la existencia de una mayor cantidad de oportunidades para una red secundaria. Sin embargo, este resultado debe interpretarse con cautela, teniendo en cuenta las condiciones particulares de diferentes bandas. Para ello, conviene realizar una distinción tal y como se muestra en la tabla II. Teniendo en cuenta esta clasificación, la figura 4 muestra los resultados obtenidos para diferentes bandas.

TABLA II
CASOS CONSIDERADOS EN LA FIGURA 3.

Caso	Transmisor	Receptor
I	Exterior	Exterior
II	Exterior	Interior
III	Interior	Exterior
IV	Interior	Interior

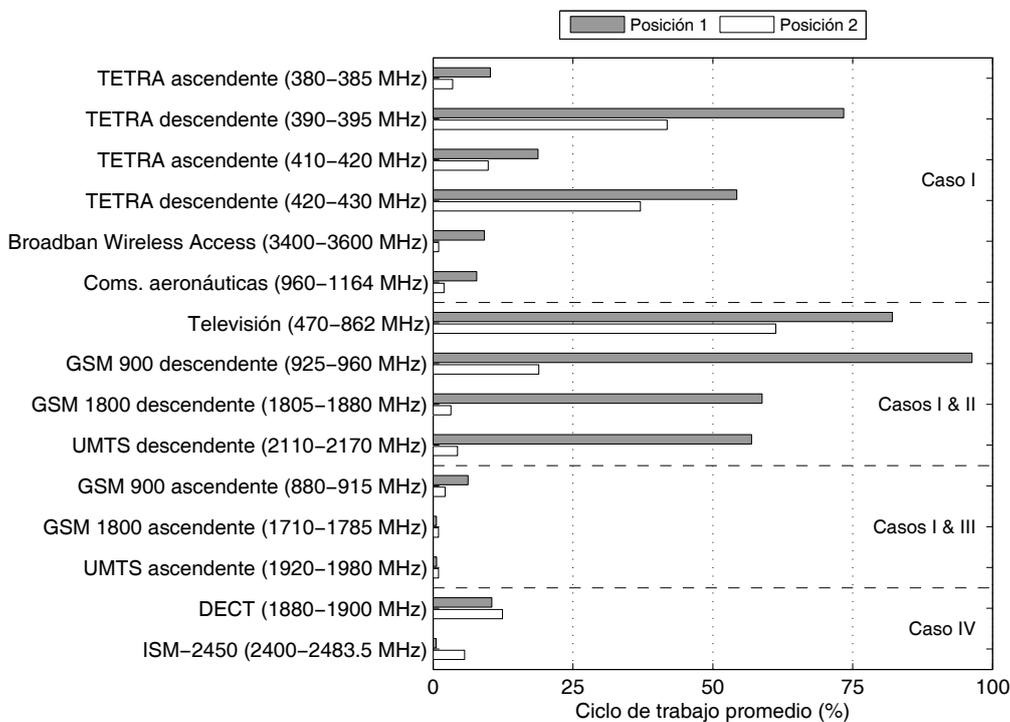


Fig. 4 Ciclo de trabajo promedio en las posiciones 1 y 2.

Para bandas asignadas a sistemas donde los transmisores se encuentran ubicados en emplazamientos exteriores (casos I/II), los ciclos de trabajo observados en entorno interior son en general menores que los observados en entorno exterior, como era de esperar, debido a las pérdidas de penetración en las paredes del edificio. En el caso I (receptores exteriores), las menores tasas de ocupación interior indican la existencia de una mayor cantidad de oportunidades de transmisión para una red secundaria, puesto que un usuario secundario interior transmitiendo en canales detectados como no ocupados no causaría interferencia sobre los receptores primarios, los cuales se hallan en entornos exteriores. Sin embargo, en el caso II (receptores interiores), un ciclo de trabajo menor no implica necesariamente una mayor cantidad de oportunidades de transmisión, ya que transmitir en un canal detectado como libre podía causar potencialmente interferencia a receptores primarios interiores.

Para bandas asignadas a sistemas cuyos transmisores se encuentran ubicados en emplazamientos interiores (casos III/IV), los ciclos de trabajo tienden a ser en general ligeramente superiores en entornos interiores. Siguiendo un argumento similar al anterior, esto indicaría un menor número de oportunidades de transmisión secundaria en el caso IV (sistemas con receptores en emplazamientos interiores), pero no necesariamente en el caso III (sistemas con receptores en emplazamientos exteriores).

A partir de los resultados obtenidos anteriormente se puede afirmar que los métodos de detección de señal (*spectrum sensing* en el contexto CR/DSA [8,9]) no resultan suficientes por sí solos para declarar una banda como realmente disponible para acceso secundario. En ciertos casos podría ser necesario emplear algunas estrategias complementarias que proporcionen información adicional como, por ejemplo, monitorizar simultáneamente los enlaces ascendentes y descendentes de sistemas basados en duplexación por frecuencia para garantizar que el canal se puede acceder temporalmente, o técnicas de procesamiento de señal, como la descrita en [5], que permitan identificar el estándar radio presente en una cierta banda antes de decidir si dicha banda puede realmente ser utilizada sin ocasionar interferencia.

Respecto a las posiciones 3-12, la figura 5 muestra los resultados obtenidos para la banda de televisión, la cual resulta de especial interés por haber sido considerada como principal candidata por el primer estándar a nivel internacional para la tecnología CR/DSA [10]. La posición de cada barra en la figura 5 se corresponde con la posición geográfica de cada punto de medida tal y como se muestra en la figura 3. En este caso se muestra el ciclo de trabajo promedio en cada posición tras haberlo normalizado con el valor obtenido en la ubicación 1. Para la mayoría de las bandas medidas en este experimento el ciclo de trabajo promedio normalizado es inferior a uno, lo cual significa que el ciclo de trabajo promedio medido en diferentes posiciones a nivel del suelo es en general menor que en puntos elevados. Esto es consecuencia del bloqueo de la propagación radio ocasionado por edificios y otros obstáculos, lo cual da lugar a un menor nivel de señal recibido a nivel de suelo. Desde un punto de vista práctico, estos resultados indican que un usuario secundario operando a nivel del suelo percibiría una mayor cantidad de oportunidades de transmisión que las predichas por medidas realizadas en puntos elevados. No obstante, es importante subrayar que esto debe interpretarse cuidadosamente, teniendo en cuenta las condiciones particulares de cada banda. Por motivos de espacio, aquí se analiza únicamente el caso correspondiente a la banda de televisión dada su importancia en el contexto de las redes CR/DSA.

Según se aprecia en la figura 5, la actividad detectada es menor en regiones más cerradas. Así, en las posiciones 4 y 6 (interior de calles), donde el bloqueo de los edificios es más intenso, el valor del ciclo de trabajo es menor que en las posiciones 3, 5 y 7, las cuales corresponden a ubicaciones más abiertas (intersección de calles). De manera similar, la posición 9 muestra un ciclo de trabajo menor que las posiciones 8 y 10, lo cual puede atribuirse a que la posición 9 corresponde a una ubicación con una altitud considerablemente menor, lo cual acentúa el bloqueo de edificios cercanos. La obtención de valores más elevados en regiones semiabiertas (posición 11) que en regiones totalmente abiertas (posición 12) podría explicarse por la detección de componentes reflejadas en los edificios circundantes. En cualquier caso, es necesario tener en cuenta que la detección de menores niveles de actividad espectral en regiones más cerradas no implica necesariamente la disponibilidad de mayores oportunidades de transmisión secundaria. De hecho, una señal primaria atenuada podría pasar desapercibida a nivel de calle debido al bloqueo de los edificios, en cuyo caso una transmisión secundaria podría ocasionar un nivel de interferencia excepcionalmente elevado a receptores primarios, que en estas bandas podrían encontrarse en ubicaciones próximas a las de los transmisores secundarios. Estos resultados experimentales subrayan la importancia de la sensibilidad de detección en redes secundarias y sugieren la necesidad de estrategias adicionales como las citadas más arriba.

La principal conclusión derivada de los resultados anteriores es que el nivel de actividad espectral percibido por usuarios secundarios para una determinada banda en entornos urbanos realistas depende fuertemente de la localización de dichos usuarios, con variaciones significativas incluso en áreas tan reducidas como la considerada en este estudio ($\approx 180 \times 260$ m). Esto indica que las conclusiones obtenidas a partir de estudios realizados en zonas elevadas y con visibilidad directa podrían no resultar adecuadas para otros escenarios realistas con usuarios secundarios operando en diversas ubicaciones.

III. CONCLUSIONES

La presente comunicación ha presentado los resultados obtenidos en una campaña de medidas de ocupación espectral en el rango 75–7075 MHz realizada en diversos escenarios realistas de interés práctico. Los resultados obtenidos en los diversos escenarios considerados demuestran que el espectro se halla sometido a un uso claramente disperso e ineficiente, presentando interesantes oportunidades de transmisión incluso en aquellas bandas que se encuentran sometidas a elevados niveles de uso.

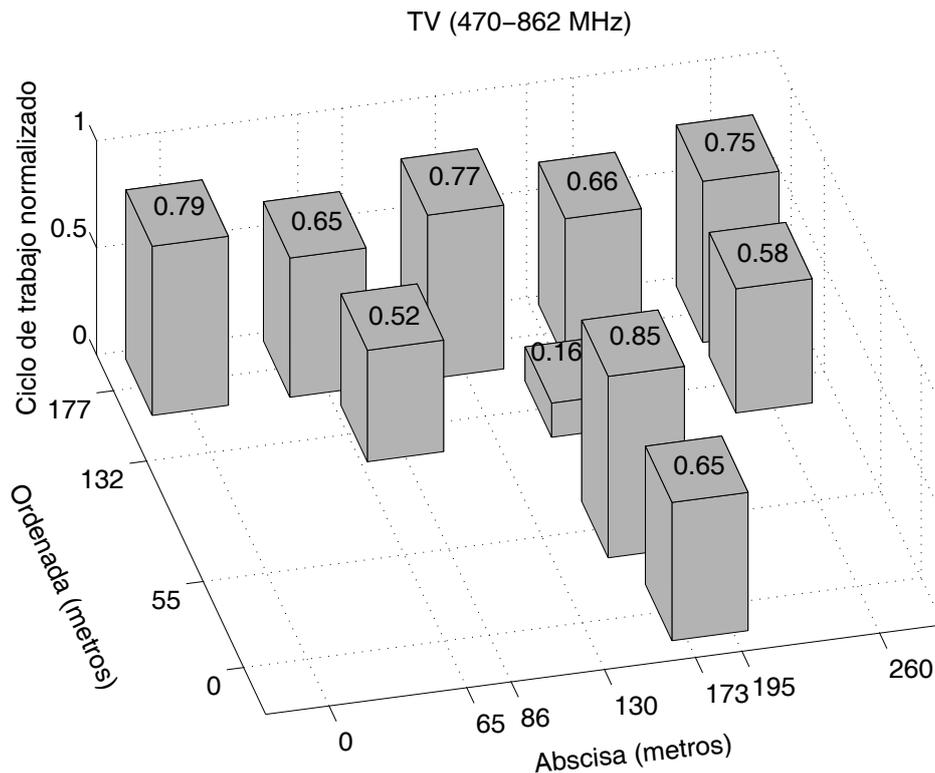


Fig. 5 Ciclo de trabajo normalizado en posiciones 3-12 (TV).

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto COGNOS (Ref. TEC2007-60985) y el programa de Becas FPU (Ref. AP2006-848). Los autores desean expresar su gratitud a Susana Molina Corbacho y Ramsès García Calafi por su valiosa colaboración en la campaña de medidas realizada.

REFERENCIAS

- [1] Shared Spectrum Company, "Spectrum occupancy measurements," Agosto 2005, <http://www.sharespectrum.com/measurements>.
- [2] R. I. C. Chiang, G. B. Rowe, K. W. Sowerby, "A quantitative analysis of spectral occupancy measurements for cognitive radio", IEEE 65th Vehicular Technology Conference (VTC 2007-Spring), Abril 2007, págs. 3016–3020.
- [3] M. Wellens, J. Wu, P. Mähönen, "Evaluation of spectrum occupancy in indoor and outdoor scenario in the context of cognitive radio", Second International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2007), Agosto 2007, 8 págs.
- [4] M. H. Islam y cols., "Spectrum survey in Singapore: Occupancy measurements and analyses", 3rd International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2008), Mayo 2008, 7 págs.
- [5] M. López-Benítez, F. Casadevall, A. Umbert, J. Pérez-Romero, R. Hachemani, J. Palicot, C. Moy, "Spectral occupation measurements and blind standard recognition sensor for cognitive radio networks", 4th International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CrownCom 2009), Junio 2009, 9 págs.
- [6] Secretaría de Estado de Telecomunicaciones y para la Sociedad de la Información (SETSI), "Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF)", Noviembre 2007.
- [7] M. López-Benítez, F. Casadevall, "Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio", 15th European Wireless Conference (EW 2009), Mayo 2009, págs. 199-204.
- [8] T. Yücek, H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," IEEE Communications Surveys and Tutorials, vol. 11, no. 1, pp. 116–130, 2009.
- [9] D. D. Ariananda, M. K. Lakshmanan, H. Nikookar, "A survey on spectrum sensing techniques for cognitive radio," Second International Workshop on Cognitive Radio and Advanced Spectrum Management (CogART 2009), May 2009, pp. 74–79.
- [10] IEEE 802 LAN/MAN Standards Committee 802.22 WG on WRANs (Wireless Regional Area Networks). <http://www.ieee802.org/22/>.