



UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA
BARCELONATECH



Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la Universidad Politécnica de Cataluña

*(Viability study on cognitive radio networks on the Campus Nord
of the Polytechnic University of Catalonia)*

Tesis de Licenciatura
Presentada a la facultad de
l' Escola Tècnica d'Enginyeria de Telecomunicació de
Barcelona
por
Cristian Sánchez López

En cumplimiento parcial
de los requisitos para el grado de
Ciencias y Tecnologías de la
Telecomunicación

Supervisora: Anna Umbert Juliana
Barcelona, Julio 2016

Abstract

The saturation of the radio spectrum is leading to new scenarios with we must deal which because the radio spectrum is a scarce and limited resource. Currently, it coexists multiple services in the spectrum, each one is different in the way of sending and receiving electromagnetic waves. What is more, different services have limited a number of spectral bands, operating inside channels assigned, using its own coding and modulation methods.

In this project, the viability of possible implementations of Cognitive Radio networks in the Nord campus of the Polytechnic University of Catalonia is analyzed. Initially, measures provided by the spectrum analyzer in the different measurement campaigns were processed and it was verified that the average duty cycle in the frequency range of 75 MHz to 3 GHz was 9.77%, corroborating the low use of radio spectrum. It has been proposed different bands where you can carry out a more efficient use of the spectrum.

Resumen

La congestión y saturación del espectro radioeléctrico está dando lugar a nuevos escenarios con los cuales hay que lidiar puesto que es un bien escaso y de recursos limitados. En la actualidad múltiples servicios conviven dentro del espectro cada uno de ellos se diferencia en el modo de enviar y recibir ondas electromagnéticas, es por ello que cada servicio tiene limitadas un numero de bandas espectrales, operando dentro de los canales asignados utilizando métodos de codificación y modulación propios del servicio.

En el presente proyecto se analiza la viabilidad de posibles implantaciones de redes Radio Cognitivas en el campus Nord de la Universitat Politècnica de Catalunya. Una vez procesadas todas las medidas arrojadas por el analizador de espectro en las diferentes campañas de medición, se pudo comprobar que el ciclo de trabajo promedio en la gama de frecuencias de 75 MHz a 3 GHz es de 9.77 %, lo que indica una infrutilización del espectro radioeléctrico. Esto nos llevara a proponer diferentes bandas donde se puede llevar a cabo un uso más eficiente del espectro.

Resum

La congestió i saturació de l'espectre radioelèctric esta donant lloc a nous escenaris amb els quals cal bregar ja que és un bé escàs i de recursos limitats. En l'actualitat múltiples serveis conviuen dins de l'espectre cada un d'ells es diferencia en la manera d'enviar i rebre ones electromagnètiques, és per això que cada servei té limitades un nombre de bandes espectrals, operant dins dels canals assignats utilitzant mètodes de codificació i modulació propis del servei.

En el present projecte s'analitza la viabilitat de possibles implantacions de xarxes Ràdio Cognitives al Campus Nord de la Universitat Politècnica de Catalunya. Una vegada processades totes les mesures abocades per l'analitzador d'espectre en les diferents campanyes de mesurament, es va poder comprovar que el cicle de treball mitja en la gamma de freqüències de 75 MHz a 3 GHz és de 9.77%, el que indica una infrautilització de l'espectre radioelèctric. Això ens porta a proposar diferents bandes on es pot dur a terme un ús més eficient de l'espectre.

A todas esas personas de las cuales recibo un apoyo incondicional, que me ayuda a superarme día tras día.

Agradecimientos

Me gustaría dedicar unas palabras de agradecimiento a todas aquellas personas que durante todos estos años me han brindado el apoyo para alcanzar las metas que tanto sacrificio me han llevado, ellas son mi verdadera fuente de energía que día a día me hacen conseguir todos mis retos personales.

No desearía dejar de agradecer a nadie que en mayor o menor medida hubiera podido aportar su granito de arena para que este proyecto saliese a luz.

Primeramente de todo agradecer a Anna Umbert, tutora del proyecto, todo el esfuerzo y dedicación que me ha dedicado durante todos estos meses. Todavía recuerdo aquella tarde que nos citamos en su despacho con una vaga idea, y poco a poco fue tomando forma hasta sentar unas bases que permitieron el desarrollo del mismo.

En segundo lugar agradecer a Sergio García su predisposición para ayudarte en cualquier momento y la amabilidad de la que disponía todos los días.

Como no a mi familia, especialmente a mis padres, ellos me lo han enseñado todo en esta vida, y la vida se la debo a ellos. Es por ello que les dedico este gran éxito, y espero que sea el primero de los que quedan por llegar, saben que les estaré eternamente agradecido.

Siguiendo con la pequeña de la familia, mi hermana Patricia, visionaria como pocas y un gran pilar.

Por último a mi novia, Dánae, posiblemente la pieza fundamental que hace que toda la maquinaria funcione a la perfección.

En definitiva muchas gracias a todos.

HISTORIAL DE REVISIONES Y REGISTRO DE APROBACIÓN

Revisión	Fecha	Motivo
0	04/05/2016	Creación Documento
1	14/05/2016	Revisión Documento
2	22/05/2016	Revisión Documento
3	15/06/2016	Revisión Documento
4	20/06/2016	Finalización Documento

LISTA DE DISTRIBUCIÓN

Nombre	E-mail
Cristian Sánchez López	cristian.sanchez.telecos@gmail.com
Anna Umbert Juliana	annau@tsc.upc.edu

ESCRITO POR: Cristian Sánchez López		REVISADO Y APROBADO POR: Cristian Sánchez López Anna Umbert Juliana	
Fecha: 04/05/2016		Fecha: 15/06/2016	
Nombre	Cristian Sánchez López	Nombres	Cristian Sánchez López Anna Umbert Juliana
Rol	Autor Proyecto	Rol	Autor Proyecto Supervisor Proyecto

Tabla de Contenidos

Abstract	III
Resumen	IV
Resum	V
Agradecimientos	IX
Tabla de Contenidos.....	XI
Lista de Figuras	XIII
Lista de Tablas	XIV
1. Introducción.....	1
1.1. Antecedentes del Proyecto.....	1
1.2. Descripción y objetivos del proyecto.....	1
1.3. Requisitos y Especificaciones del Proyecto.....	3
1.4. Plan de Trabajo y Time Plan (Diagrama de Gantt)	4
1.5. Incidencias	9
1.6. Modificaciones del Plan de Trabajo	9
2. Estado del Arte	10
2.1. Radio Cognitiva	10
2.2. Similitudes entre la Radio Cognitiva y la Radio Definida por Software.....	11
2.3. Aplicaciones de la Radio Cognitiva.....	11
2.4. Principales Funciones de la Radio Cognitiva	12
2.4.1. Detección de Espectro	14
2.4.2. Gestión del espectro radioeléctrico.....	15
2.4.2.1. Dividendo Digital	16
2.4.3. Movilidad en el Espectro	17
2.4.4. Compartición del espectro	17
3. Equipo de Medidas	18
3.1. Antena AOR DN753	18
3.2. Filtro Elimina Banda	19
3.3. Analizador de Espectro R&S FSL6.....	20
3.4. Cableado.....	22
4. Metodología de medición.....	23
4.1. Estudio número de trazas R&S FSL6	23
4.1.1. 500 trazas	25
4.1.2. 100 primeras trazas.....	26

4.1.3.	250 primeras trazas	26
4.1.4.	100 primeras y 100 últimas trazas	26
4.1.5.	Conclusión	27
4.2.	Measure	27
5.	Campaña de Medidas.....	29
5.1.	Descripción del lugar	29
6.	Procesado de los resultados.....	31
6.1.	Calcular Estadísticas de Ocupación	31
6.2.	Métricas de Ocupación	32
6.3.	Estadísticas de Ocupación del Espectro.....	34
6.4.	Resultados Campañas de Medidas	36
7.	Análisis de los Resultados	37
8.	Presupuesto	44
9.	Impacto Ambiental.....	45
10.	Conclusiones y Líneas de Futuro	46
	Bibliografía:	47
	Glosario	48

Lista de Figuras

Figura 1 - Diagrama de Gantt	8
Figura 2 - Ciclo Cognitivo	12
Figura 3 - Recursos clave para la explotación de Redes Cognitivas.....	15
Figura 4 - Esquema de Trabajo	18
Figura 5 - Antena AOR DN753	19
Figura 6 - Filtro Elimina Banda	19
Figura 7 - Analizador de Espectro R&S FSL6.....	20
Figura 8 - Equipo Mediciones Laboratorio	23
Figura 9 - Medidas Canal TV	24
Figura 10 - Matriz Potencia Canales TV	24
Figura 11 - Umbral de Decisión	25
Figura 12 - Ejemplo Captura Analizador de Espectro	28
Figura 13 - Disposición de los elementos de medidas	29
Figura 14 - Campus Nord (UPC, Barcelona).....	30
Figura 15 - Torre de Collserola	30
Figura 16 - Densidad Espectral de Potencia.....	32
Figura 17 - Ocupación Espectral Temporal.....	33
Figura18 - Ciclo de Trabajo	33
Figura19- Análisis Ocupación 761 - 892 MHz.....	38
Figura 20 - Análisis Ocupación 893 - 1024 MHz	39
Figura21 – Análisis Ocupación 1710 - 1855 MHz	40
Figura 22 - Análisis Ocupación 1855 – 2000 MHz	41
Figura23 - AnálisisOcupación 2000 – 2145 MHz	42
Figura 24 - Análisis Ocupación 2145 – 2290 MHz	42

Lista de Tablas

Tabla 1 - Plan de Trabajo	7
Tabla 2 - Resultados 500 trazas	25
Tabla 3 - Resultados 100 primeras trazas	26
Tabla 4 - Resultados 250 primerastrazas	26
Tabla 5 - Resultados 100 primeras y 100 últimas trazas.....	27
Tabla 6 - Bandas de Estudio.....	31
Tabla 7 - Ciclos de Trabajo Promedio.....	34
Tabla 8 - Ocupación Servicios Espectro Radioeléctrico.....	36

1. Introducción

1.1. Antecedentes del Proyecto

Los sistemas de telecomunicaciones diseñados para transmitir a través del medio radioeléctrico se encuentran con una falta de frecuencias disponibles. La mayoría de las frecuencias han sido asignadas de forma estática y se pueden utilizar únicamente para un solo propósito. Sin embargo numerosas campañas de medidas sobre el uso del espectro radioeléctrico han demostrado que el espectro está en su mayoría infrautilizado. Una solución a este uso ineficiente del espectro radioeléctrico son las redes de radio cognitiva (cognitive radio networks), que permiten un uso dinámico del espectro, reutilizando las frecuencias en desuso con la condición de no interferir a los usuarios legítimos (primarios).

En este marco se plantea estudiar la viabilidad de desplegar redes cognitive radio en el Campus Nord de la UPC.

El proyecto se inicia en Febrero de 2016 y no forma parte de la continuación de ningún otro proyecto anterior, se procederá por parte del alumno a investigar y desarrollar todos los aspectos citados anteriormente, con el fin de lograr los objetivos propuestos.

Las ideas iniciales del proyecto han sido proporcionadas por parte del autor y del supervisor, en reuniones anteriores al inicio del mismo, dando cabida a nuevas ideas y posibles mejoras en el desarrollo de este.

1.2. Descripción y objetivos del proyecto

Este proyecto se lleva a cabo en el grupo de investigación en comunicaciones móviles (GRCM) del departamento de Teoría de la señal y Comunicaciones (TSC) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC) por parte del alumno Cristian Sánchez López y bajo supervisión de la directora del proyecto Anna Umbert Juliana.

El objetivo de este proyecto consiste en identificar los agujeros espectrales (llamados White Space-WS) para su posible uso futuro en sistemas de radio cognitiva.

Para ello se realizaron unas mediciones de ocupación del espectro en la azotea del Edificio D4 de la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC – Campus Nord) dentro de un rango de 75 MHz a 3000 MHz, en los meses de Abril y Mayo de 2016. Posteriormente se procesaron y analizaron las medidas con el fin de evaluar la viabilidad de desplegar redes cognitive radio en este escenario [1].

La Radio Cognitiva es una tecnología que permite a los dispositivos de nuestra red de comunicación saber el estado de los mismos y que se adapten al medio que utilizan, en nuestro caso el espectro radioeléctrico. Valorando las experiencias previas que se observen y adaptándose.

El objetivo es realizar un uso más eficiente del espectro disponible, sin interferir con otros usuarios, y en ningún caso con los usuarios nativos, es decir, los que disponen de licencia para utilizar unas determinadas bandas frecuenciales.

Al mismo tiempo la tecnología de uso secundario requiere un procesado elevado de datos. Es por ello que una de las posibles soluciones es la utilización de una base de datos inteligentes que almacenan información a tiempo real, conservando un histórico de los eventos de los usuarios de su entorno. Estas bases las denominamos con el término de Radio Environment Map (REM) [2]. Se encargan de generar un mapa de ocupación espectral procesando toda la información de la que disponen, de este modo liberamos a los usuarios de la red de esta carga computacional, ya que sus recursos suelen ser más limitados. Los dispositivos simplemente deberán consultar el REM e identificar los posibles White Spaces que hay disponibles.

El espectro radioeléctrico es un bien escaso, y por norma general infrautilizado. En el caso de España, se asignan los derechos exclusivos de explotación a determinados operadores de las diferentes bandas frecuenciales. Estas bandas son las que llamamos licenciadas, por otra parte también tenemos las bandas de uso libre, las no licenciadas. Un ejemplo de estas bandas podrían ser las que utilizamos para el Wi-Fi.

Actualmente las políticas de asignación de bandas frecuenciales son muy estrictas, y no se permite explotar un uso más óptimo del espectro, pese a ser un bien escaso. Muchas de estas bandas licenciadas tienen un uso bajo o nulo, habiendo otras saturadas o muy congestionadas, en momentos particulares o en determinados lugares.

La idea principal es proporcionar a los usuarios la capacidad y conocimiento del estado de la red, de este modo sería capaz de cambiar de banda, descongestionando la que utiliza y mejorando el servicio que proporciona el operador a sus usuarios.

Una asignación del espectro fija no permite a usuarios no autorizados el uso de bandas licenciadas, pese a que estos no produjesen ningún tipo de interferencia. Por esto una forma de optimizar estos recursos es el uso de dispositivos reconfigurables con capacidad cognitiva gestionando el uso de estas bandas, y en todo caso si los usuarios legítimos quisieran hacer uso de ellas saltarían a otras bandas o dejarían de hacerlo en el caso que no hubiera ninguna disponible. Para ello la radio cognitiva realiza escaneos periódicos en busca de agujeros espectrales o White Spaces.

Los principales objetivos del proyecto son:

- Conocimiento en detalle de la tecnología Cognitive Radio y los White Spaces.
- Conocimiento práctico y detallado de un sistema para medir la ocupación del espectro (Analizador de espectros, antena, sistema de control...).
- Adquisición de experiencia en la obtención de medidas del espectro, definición de los parámetros adecuados y análisis de los resultados.
- Analizar la viabilidad del despliegue de posibles redes Cognitive Radio observando los diferentes patrones de uso del espectro con el fin de poder definir políticas de acceso al medio, sin causar interferencias a los usuarios legítimos de las bandas estudiadas.

Propondremos algunas bandas dentro del rango frecuencial de estudio donde se puedan llevar a cabo futuras implantaciones de redes CR. Para habilitar una implantación a gran escala de la Cognitive Radio sería necesario operar bajo diferentes regulaciones de espectro y considerar una amplia gama de escenarios posibles, no podemos basarnos en conclusiones derivadas de estudios puntuales y zonas geográficas concretas, sino realizar estudios espectrales adicionales para poder extraer modelos reales que se puedan llevar a cabo.

La campaña de mediciones nos permitió identificar las bandas del espectro con bajos niveles de ocupación, con el fin de poder llegar a ser explotadas por usuarios secundarios dentro del margen teórico que define la CR. Los resultados nos demostraran que existe una gran cantidad de espectro en desuso e infrautilizado.

1.3. Requisitos y Especificaciones del Proyecto

Requerimientos y especificaciones del proyecto:

- Realización de medidas de la ocupación del espectro radioeléctrico en el Campus Nord por debajo de 3GHz con el analizador de espectros FSL6 de Rohde & Schwarz y análisis de la eficiencia de su uso.
- Creación de diferentes scripts con la herramienta de software Matlab con el fin de lograr la conexión remota con el analizador de espectro y el control de todas sus funcionalidades. A su vez permitir el procesado de todas las medidas arrojadas por el equipo.
- El estudio se focaliza en los siguientes aspectos:
 - Investigación teórica de las asignaciones del espectro y elección de las bandas candidatas.
 - Estudio de los parámetros adecuados en función de la canalización en cada banda.
 - Análisis de indicadores para medirla eficiencia de uso de las diferentes bandas (Duty Cycle, PSD y Ocupación).

1.4. Plan de Trabajo y Time Plan (Diagrama de Gantt)

Paquetes de Trabajo:

Proyecto: Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la UPC	WP ref: WP1	
Componente Principal: Planning	Parte 1 de 6	
Descripción Breve: Establecer las principales bases del proyecto y los diferentes objetivos a lograr mediante reuniones con la profesora que realizara el seguimiento de este.	<i>Fecha prevista inicio:</i> 15/02/2016	
	<i>Fecha prevista fin:</i> 01/03/2016	
Tarea T1: Entrega propuesta proyecto y plan de trabajo.	Entrega: Propuesta y Plan de Trabajo	Fecha: 01/03/2016

Proyecto: Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la UPC	WP ref: WP2	
Componente Principal: Analizador de Espectro (hardware).	Parte 2 de 6	
Descripción Breve: Introducción al analizador de espectro R&S FSL6, familiarizarse con su uso y obtención de datos. Verificar conexiones entre el analizador y el ordenador.	<i>Fecha prevista inicio:</i> 15/02/2016	
	<i>Fecha prevista fin:</i> 14/03/2016	
Tarea T1: Configurar los parámetros principales del analizador de espectro.		
Tarea T2: Realizar medidas en el espectro radioeléctrico, verificando su funcionamiento.		
Tarea T3: Establecer conexión entre el analizador y un ordenador portátil utilizando MATLAB		

Proyecto: Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la UPC	WP ref: WP3	
Componente Principal: MATLAB (software)	Parte 3 de 6	
Descripción Breve: Trabajar la configuración de los diferentes parámetros e interfaces gráficos del analizador de espectro mediante MATLAB.	<i>Fecha prevista inicio:</i> 14/03/2016	
	<i>Fecha prevista fin:</i> 11/04/2016	
Tarea T1: Establecer conexión con el analizador utilizando MATLAB.		
Tarea T2: Configurar los diferentes parámetros del analizador utilizando funciones y librerías.		
Tarea T3: Crear funciones específicas para realizar medidas concretas dentro del espectro radio eléctrico.		

Proyecto: Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la UPC	WP ref: WP4	
Componente Principal: Campaña de medidas	Parte 4 de 6	
Descripción Breve: Definición de las medidas y los diferentes bloques a analizar dentro de las bandas del espectro radioeléctrico. Preparación de medidas y estructuras externas	<i>Fecha prevista inicio:</i> 11/04/2016	
	<i>Fecha prevista fin:</i> 13/05/2014	
Tarea T1: Estudio de los diferentes bloques a analizar dentro de las bandas del espectro radioeléctrico.	Entrega: Revisión Crítica	Fecha: 1/05/2016
Tarea T2: Preparación de medidas, una vez realizado el estudio.		
Tarea T3: Verificar las estructuras externas que utilizaremos y su correcto funcionamiento.		
Tarea T4: Realizar las diferentes medidas dentro del Campus Nord de la UPC.		

Proyecto: Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la UPC	WP ref: WP5	
Componente Principal: Análisis Resultados	Parte 5 de 6	
Descripción Breve: Validación de los resultados obtenidos en la campaña de medidas y análisis de las conclusiones, verificando las bandas propuestas para el estudio de la cognitive radio en el Campus Nord de la UPC	<i>Fecha prevista inicio:</i> 13/05/2016	
	<i>Fecha prevista fin:</i> 06/06/2016	
Tarea T1: Comprobación y análisis de los resultados. Tarea T2: Estudio de los diferentes parámetros en las bandas propuestas (Duty Cycle, PSD,...) Tarea T3: Conclusiones finales de la viabilidad de Redes Cognitivas en el Campus Nord.		

Proyecto: Estudio sobre la viabilidad de redes radio cognitivas en el Campus Nord de la UPC	WP ref: WP6	
Componente Principal: Documento Final	Parte 6 de 6	
Descripción Breve: Redacción y presentación de la memoria final.	<i>Fecha prevista inicio:</i> 15/05/2016	
	<i>Fecha prevista fin:</i> 15/06/2016	
Tarea T1: Redacción memoria final TFG. Tarea T2: Preparación presentación final y defensa de TFG ante el tribunal.	Entrega: Memoria TFG	Fecha: 15/06/2016

			<i>Inicio</i>	<i>Duración (Días)</i>	<i>Fin</i>
WP1	T1	Entrega propuesta proyecto y plan de trabajo	15/02/2016	15	01/03/2016
WP2	T1	Configurar parámetros del analizador de espectro	15/02/2016	7	22/02/2016
WP2	T2	Medidas en el espectro radioeléctrico	22/02/2016	14	07/03/2016
WP2	T3	Conexión entre el analizador y un portátil	07/03/2016	7	14/03/2016
WP3	T1	MATLAB	14/03/2016	7	21/03/2016
WP3	T2	Configurar parámetros analizador	21/03/2016	7	28/04/2016
WP3	T3	Funciones MATLAB	28/03/2016	14	11/04/2016
WP4	T1	Estudio Bloques a analizar	11/04/2016	7	18/04/2016
WP4	T2	Preparación de medidas	18/04/2016	7	23/04/2016
WP4	T3	Estructuras externas	23/04/2016	7	01/05/2016
WP4	T4	Mediciones en el Campus Nord	01/05/2016	7	09/05/2016
WP5	T1	Análisis de los resultados	09/05/2016	7	16/05/2016
WP5	T2	Estudio de los parámetros	16/05/2016	14	29/06/2016
WP5	T3	Conclusiones finales	29/05/2016	7	06/06/2016
WP6	T1	Memoria final TFG	15/05/2016	21	07/06/2016
WP6	T2	Preparación presentación final y defensa de TFG	07/06/2016	17	25/06/2016

Tabla 1 - Plan de Trabajo

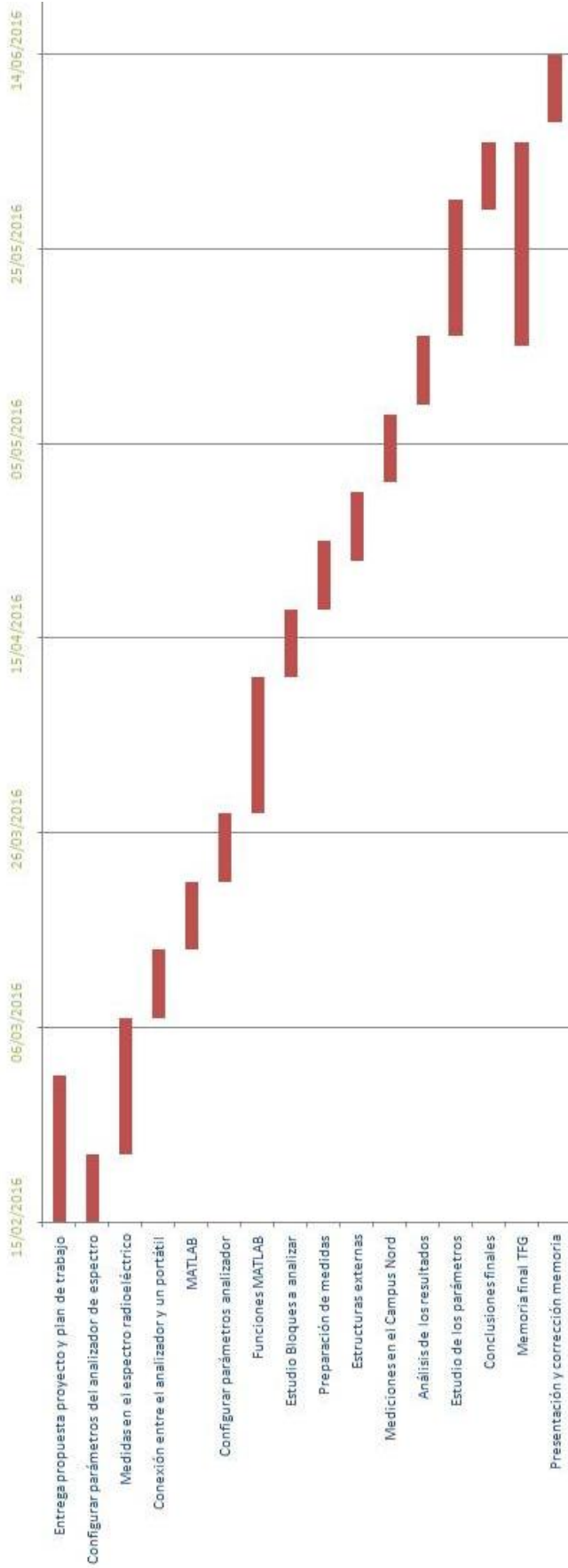


Figura 1 - Diagrama de Gantt

1.5. Incidencias

Inicialmente adquirimos la destreza en el manejo de todos los equipos que utilizamos en el proyecto, el primer gran reto que se nos planteó, era la selección de los parámetros, ya que nos tienen que proporcionar unos resultados los más próximos a la realidad, dentro de las limitaciones que nos podíamos encontrar. Se realizaron múltiples pruebas para observar las variaciones en los resultados con los diferentes parámetros del analizador.

Las principales incidencias que se nos han plantearon fueron la manera de adaptar los scripts para realizar las medidas tal y como deseamos en el estudio propuesto. El objetivo es realizar un estudio exhaustivo fijando unos umbrales de decisión, para asumir si el canal se encuentra ocupado o no. Quizás este sea uno de los pasos más críticos, para ello caracterizamos el ruido interno del analizador de espectro colocando una impedancia de 50Ω a la entrada del analizador de espectro, de esta manera obtuvimos el umbral deseado.

Otro de los aspectos importantes fue realizarlas con buenas condiciones climatológicas, para que de este modo no se vieran afectados los resultados obtenidos.

1.6. Modificaciones del Plan de Trabajo

A priori seguimos el plan de trabajo expuesto, a groso modo continuamos por el mismo camino durante todo el transcurso del proyecto logrando los objetivos que nos fijamos.

Realizamos varias campañas de medidas en la azotea del edificio Campus Nord, investigando el espectro radio eléctrico y las diferentes bandas que encontramos.

Recordamos que nuestro estudio se realiza hasta los 3 GHz, que a su vez corresponde con el máximo teórico que puede medir nuestra antena (Antena AOR DN753), aproximadamente de 75 MHz a 3GHz.

2. Estado del Arte

2.1. Radio Cognitiva

La idea de la Radio Cognitiva fue presentada oficialmente por primera vez en el artículo de Joseph Mitola III y Gerald G. Maguire, Jr [3]. La Radio Cognitiva se puede interpretar de diferentes maneras, en sus inicios se pensó como una ampliación de la Radio Definida por Software, también llamada “Radio Cognitiva Completa”.

Las principales definiciones que podemos encontrar sobre la CR son las siguientes:

“La Radio Cognitiva es una forma de comunicación inalámbrica en la que un transmisor inteligente puede detectar los canales de comunicación que se están utilizando y los desocupados, y al instante variar entre ellos. Esto optimiza el uso del espectro radio eléctrico y posibilita la reducción al mínimo de las interferencias entre otros usuarios.”

“La Radio Cognitiva es un paradigma de la comunicación inalámbrica en el cual tanto las redes como los mismos nodos inalámbricos cambian los parámetros particulares de transmisión o de recepción para ejecutar su cometido de forma eficiente sin interferir con los usuarios autorizados (Primarios). Esta alteración de parámetros está basada en la observación de varios factores del entorno interno y externo de la Radio Cognitiva, tales como el espectro de radiofrecuencia, el comportamiento del usuario y el estado de la red, adaptándose a medida que se va procesando toda esta información.”

A continuación veremos los tipos de Radio Cognitiva, dependiendo de las partes disponibles del espectro, distinguiremos dos variantes:

- 1) **Radio Cognitiva de banda bajo licencia:** Cuando la Radio Cognitiva es capaz de usar bandas asignadas a usuarios bajo licencia, además de la utilización de bandas de uso libre. En ningún caso podrá crear interferencias a los usuarios legítimos de estas bandas.
- 2) **Radio Cognitiva de banda de libre acceso:** Cuando la Radio Cognitiva sólo puede utilizar las partes de libre acceso del espectro de radiofrecuencia.

Uno de los mayores problemas es el diseño de dispositivos capaces de implementar algoritmos que intercambien de una manera eficiente toda la información y procesar todos estos datos para mejorar la eficiencia espectral.

2.2. Similitudes entre la Radio Cognitiva y la Radio Definida por Software

La Radio Cognitiva surgió gracias a la Radio Definida por Software, ya que ésta tiene un comportamiento similar, es decir una red inalámbrica totalmente reconfigurable que cambia sus funciones de comunicación dependiendo de las demandas de la red y los usuarios, así mismo una red Radio Cognitiva tiene la capacidad de tomar decisiones por sí misma y adaptarse a nuevos cambios.

Diferentes Organismos Internacionales de Telecomunicaciones, consideran que el espectro de radiofrecuencia está siendo infrautilizado, ya que una atribución del espectro fija provoca que las bandas que rara vez se usan y que están atribuidas a servicios específicos, no puedan ser usadas por usuarios no autorizados, incluso si la transmisión de estos no introduce ninguna interferencia en este servicio previamente desocupado.

Por ejemplo, las bandas de la telefonía móvil se encuentran sobrecargadas en la mayor parte del mundo, en contrapartida encontramos diferentes bandas que no tiene apenas uso dependiendo este fuertemente de algunos parámetros tales como el tiempo, el lugar, la densidad de poblacional, entre otros. Todos estos parámetros son los que la CR analiza con el fin de lograr un uso más eficiente.

En un amplio despliegue de redes secundarias, cada nodo puede ser capaz de descargar actualizaciones de software de nodos vecinos, de este modo colaboran entre sí para compartir recurso.

Una de las principales aplicaciones de la Radio Definida por Software es la autoconfiguración para funcionar en cualquier frecuencia del espectro. Una vez que la Radio Cognitiva localice una frecuencia más adecuada, intentará acceder ya que puede ajustar sus parámetros de señalización tales como su frecuencia, modulación y codificación, de acuerdo a las condiciones del espectro, dando como resultados la mejora de la calidad de la señal y la reducción de los efectos de interferencia.

2.3. Aplicaciones de la Radio Cognitiva

Las comunicaciones inalámbricas implican el acceso y la utilización del espectro de más y más dispositivos, es por ello que la gestión de las mismas es vital para mantener la sostenibilidad y viabilidad de las tecnologías de la telecomunicación.

Básicamente nos encontramos con una radio inteligente capaz de utilizar de manera óptima toda la información que recopila y a su vez interactuar con el medio ambiente que le rodea, empleando el aprendizaje temporal para mejorar la comunicación entre todos los dispositivos.

La radio tradicional, carece de la inteligencia cognitiva, se utilizan bandas fijas del espectro, para fines particulares y su capacidad se ve limitada.

En las comunicaciones inalámbricas de hoy en día, el poder utilizar las bandas de frecuencia del espectro que no son empleadas de forma continua incrementaría la posibilidad de tener un mayor número de aplicaciones y servicios. La Radio Cognitiva podría emplear bandas de frecuencia del espectro que no son utilizadas, identificándolas y empleándolas a través de una radio inteligente y posteriormente liberándolas cuando sea requerido por los usuarios primarios.

Estos sistemas de uso secundario contarían con las siguientes características, tal y como vemos en la figura 2:

- 1) Conciencia
- 2) Percepción
- 3) Aprendizaje
- 4) Adaptación

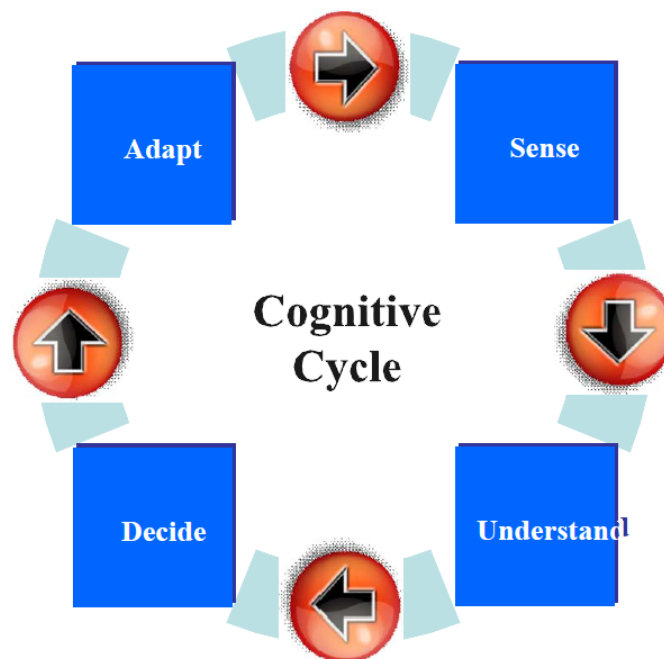


Figura 2 - Ciclo Cognitivo

Las aplicaciones de la Radio Cognitiva pueden clasificarse en términos generales como aquellas que contribuyen a la mejora del rendimiento de los sistemas existentes de comunicaciones inalámbricas, o bien en aquellas en las que puede ser favorable el establecimiento de nuevas comunicaciones inalámbricas.

2.4. Principales Funciones de la Radio Cognitiva

Desde inicios del siglo XX el espectro de frecuencias radioeléctricas es cuidadosamente gestionado por los reguladores gubernamentales de cada país. En respuesta a los recientes avances en las tecnologías de comunicación, porciones del espectro disponible se han abierto para realizar un uso sin licencia. Por otra parte, se han reformado las tradicionales políticas de mando y control de las bandas bajo licencias de uso para la regulación de las mismas cuando estas no están siendo utilizadas por los usuarios legítimos, con el fin que posibles usuarios secundarios en determinados momentos y lugares hagan uso de estas bandas frecuenciales [4].

Este cambio de paradigma puede conducir a una mayor flexibilidad y eficacia de reparto del espectro en un futuro próximo, es difícil de analizar y proporcionar sistemas

de gestión del espectro pero es la base para que los usuarios de estas redes secundarias puedan realizar sus comunicaciones con éxito.

Varios investigadores se basan en la teoría de juegos, que es una herramienta adecuada para la elaboración de modelos estratégicos, los cuales realizan interacciones para tomar decisiones racionales.

Las principales funciones de la Radio Cognitiva pueden resumirse de la siguiente manera:

1) Detección de espectro: Un requisito muy importante para el correcto funcionamiento de la Radio Cognitiva, es la capacidad de detección del espectro no utilizado, empleándolo sin provocar interferencias negativas a los demás usuarios. La mejor manera para encontrar huecos en el espectro (White Spaces), es detectando a los usuarios primarios (legítimos). Las técnicas para detectar el espectro se pueden dividir en tres categorías:

- **Detección de transmisiones.** La Radio Cognitiva debe tener la capacidad de determinar si hay una señal de algún usuario utilizando una parte específica del espectro.
- **Detección cooperativa.** Diferentes usuarios de la Radio Cognitiva puedan intercambian periódicamente información sobre la detección de usuarios principales.
- **Detección basada en interferencias.** Analizamos las posibles interferencias que se puedan crear los usuarios en el espectro.

2) Gestión del espectro: Utilizar el ancho de banda que mejor se acople a la demanda del usuario de entre todas las frecuencias disponibles. La administración o gestión del espectro consta de dos pasos:

- **Análisis del espectro.** Consiste en identificar las características de cada banda disponible para saber las ventajas o inconvenientes de utilizarla (retardo, probabilidad de error, etc.).
- **Decisión del espectro.** Compara las características de cada una de las bandas con las requeridas por el usuario y valora cual es la mejor opción.

3) Movilidad del espectro: Es el proceso con el que la Radio Cognitiva cambia su frecuencia de transmisión o recepción. La Radio Cognitiva está ideada para cambiar de banda constantemente (a otras mejores) de una forma imperceptible para el usuario.

4) Compartición del espectro: Consiste en encontrar un método de distribución del espectro que sea equitativo y justo para todos los usuarios de la Radio Cognitiva sin interferir en las transmisiones de los usuarios con licencia. Éste es uno de los mayores retos a la hora de diseñar Radios Cognitivas.

2.4.1. Detección de Espectro

La Radio Cognitiva nos ofrece una alternativa para tener un uso eficiente del espectro radioeléctrico. El objetivo consiste en detectar qué parte del espectro no está siendo ocupado, para después hacer la transmisión en esa banda de frecuencia.

Para ello existe una clasificación de usuarios que son primarios y secundarios. Los usuarios secundarios pueden tener acceso y compartir el espectro sólo si la interferencia que causan es mínima para los usuarios primarios, o cuando los usuarios primarios están inactivos.

La primera tarea de la Radio Cognitiva consiste en detectar correctamente la actividad que se realiza en el espectro. Existen diferentes métodos para que la detección cooperativa sea más exacta que los esquemas individuales.

Después de las detecciones de espectro, los usuarios secundarios forman un grupo intercambiando toda la información que han recopilado antes de tomar decisiones. De este modo la probabilidad de una falsa alarma es menor comparada a que la toma de decisión la hiciera un solo usuario independientemente.

Sin embargo, el espectro cooperativo que detecta este tipo de esquemas tiene dos aspectos importantes:

- El Consumo de energía derivado de la carga computacional.
- El Retardo de la detección causado por la cooperación.

El retardo de la detección es más crítico porque las situaciones de los usuarios primarios pudieron haber cambiado ya, durante el proceso de decisión, es decir, los usuarios secundarios piensan que no hay un usuario primario y comienzan a tener acceso al espectro, hasta que ellos encuentran la presencia de los usuarios primarios. Sin embargo, debido al retardo del proceso, los usuarios secundarios causan interferencia a los usuarios primarios.

Los métodos de acceso múltiple actualmente disponibles incluyen el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA), el acceso múltiple por división por frecuencia (FDMA), y el espectro ensanchado por salto de frecuencia (FHSS).

TDMA asigna a cada usuario un “espacio” temporal, durante el cual se transfiere la información que le corresponde. Los demás usuarios no pueden transmitir hasta que les toca su propio espacio (slot). Este proceso es similar en recepción.

FDMA, asigna a cada usuario bandas de frecuencia distintas, similar al TDMA.

FHSS, cada usuario comparte todas las bandas de frecuencia saltando a diversas bandas en diferentes tiempos.

Los métodos de acceso múltiple (TDMA, FDMA y FHS), así como los métodos de acceso asimétricos, han demostrado ser métodos eficientes para la detección del espectro.

En la figura 3 se muestran los aspectos más relevantes a tener en cuenta en el diseño de redes secundarias cognitivas.

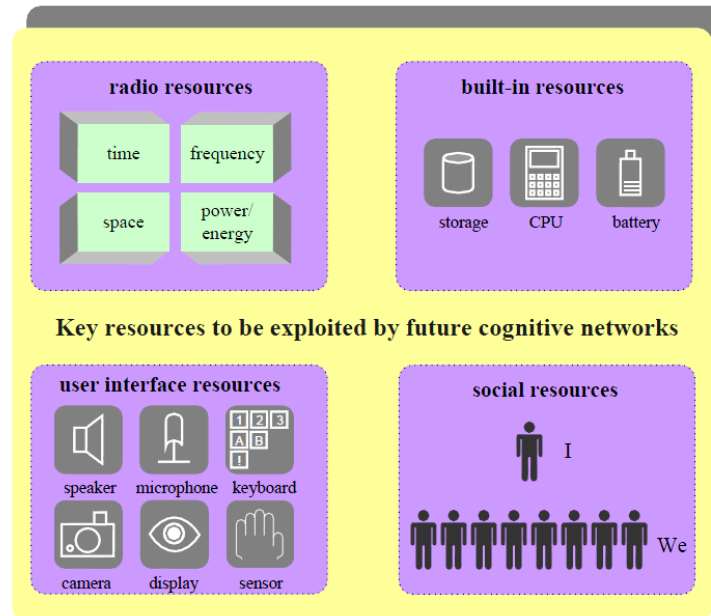


Figura 3 - Recursos clave para la explotación de Redes Cognitivas

2.4.2. Gestión del espectro radioeléctrico

En cada país la gestión del espectro la realiza una entidad gubernamental autorizada, en el caso de España el organismo que regula las Telecomunicaciones es el Ministerio de Industria, Energía y Turismo, tienen como finalidad, darle el mejor uso al espectro radioeléctrico, de modo que se reduzcan al mínimo las interferencias entre las señales, así como ofrecer un mejor servicio a la sociedad.

El Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias (CNAF) es el instrumento legal, dependiente del Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España, utilizado para asignar a los distintos servicios de radiocomunicaciones las diferentes bandas de frecuencias, estas bandas se extienden desde 8.3 KHz hasta 3000 GHz. En el CNAF también se especifica la metodología de uso del espectro radioeléctrico.

La gestión del espectro radioeléctrico que el CNAF dicta sigue los tratados y acuerdos internacionales en materia de planificación del espectro radioeléctrico en los que España forma parte, atendiendo a la normativa aplicable en la Unión Europea y a las resoluciones y recomendaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones, la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones y el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicación.

El CNAF puede establecer, entre otras, las siguientes previsiones:

- La reserva de parte del espectro para servicios determinados.
- Preferencias por razón del fin social del servicio a prestar.
- Delimitación de las partes del espectro dedicadas a los diferentes usos.
- Determinación de las partes del espectro de frecuencias radioeléctricas que el Estado se reserva para uso propio o cesión en uso a otras Administraciones.
- Previsión respecto de la utilización en el futuro de las distintas bandas de frecuencias.

Sus cambios son consecuencia de la evolución tecnológica, de los nuevos servicios y dispositivos que hacen necesario un uso óptimo del espectro. El CNAF es publicado en el Boletín Oficial del Estado (BOE) tal y como es desarrollado en el Ministerio de Ciencia y Tecnología, la última versión disponible se publicó en el BOE del 16 de Abril de 2015, con actualizaciones de la versión del 9 de Mayo de 2013 [5] [6] [7].

2.4.2.1. Dividendo Digital

Debido a la escasez de espectro radioeléctrico se buscó una manera de ampliar la capacidad espectral para los diferentes operadores de telecomunicaciones, para satisfacer las necesidades actuales y futuras, ya que son bandas con un número de usuarios en continuo crecimiento.

En 2007 la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones, convocada por la UIT acordó la asignación de la banda de 790-862 MHz (canales 61- 69) a los servicios de telefonía móvil servicio móvil para solventar estos problemas y cumpliendo con los acuerdos internacionales que lo establecen. Esta banda paso a ser reconocida internacionalmente como dividendo digital.

Según, la Comisión Europea COM el 20 de Septiembre de 2010, solicitó a todos los estados de la Unión Europea que liberen las frecuencias de 790 a 892 MHz para servicios de comunicación electrónicas desde el 01 de enero de 2013 con excepciones hasta el año 2015 [8].

En el caso de España la reordenación del espectro para liberar el Dividendo Digital se realizó el día 26 de Octubre de 2014. Para que la reordenación de los canales de televisión fuera de manera progresiva, se opto por transmitir de manera simultánea en la antigua y nueva frecuencia, de este modo se intentó minimizar el impacto que puedan recibir los diferentes usuarios, permitiéndoles tiempo suficiente para resintonizar los receptores y adaptar las antenas.

El proceso debió haber finalizado el 1 de Enero de 2015, fecha en la que tuvo que estar liberado el Dividendo Digital. Por otro lado se observo que no todos los equipos habrían sido adaptados y se opto por ampliar el margen hasta el 31 de Marzo de 2015, aprobado en el real decreto de ley del 26 de Diciembre de 2014.

2.4.3. Movilidad en el Espectro

La movilidad en el espectro tiene como función asegurarse que la Radio Cognitiva se traslade a un mejor canal, es decir, las bandas disponibles del espectro dependerán de diferentes factores, tales como el lugar y el tiempo. Se tendrá que desocupar la banda actual si la banda no está disponible por motivos tales como si el usuario principal está activo, o si causa interferencias. El proceso que efectúa la Radio Cognitiva para desocupar la banda actual del espectro y realizar el cambio a la nueva banda del espectro disponible se conoce como “*handoff*” espectral [9].

La movilidad del espectro tiene como objetivo detectar el mayor número de White Spaces con la finalidad de evitar que los usuarios secundarios se queden sin frecuencias disponibles. El esquema de “*handoff*” que se elija es determinante para el desempeño de las comunicaciones de usuarios secundarios, ya que deberá minimizar el número de cambios de canal para garantizar una transmisión de datos continua.

Durante el “*handoff*” de espectro, se pueden dar conflictos de seguridad. Por ejemplo, un atacante podría fingir ser un usuario principal, obligando a desocupar la actual banda a la Radio Cognitiva, provocando nuevos cambios, de este modo el proceso de selección se vuelve más lento, y existe mayor dificultad para encontrar una nueva banda disponible, por lo que se algunas veces puede fracasar la comunicación, es una de las futuras vías de investigación que nos brinda la CR.

También se pueden dar casos que algunos de los mensajes de uso común para el control del canal fuera modificado por un atacante, modificando de este modo la información pudiendo interferir con los usuarios primarios.

2.4.4. Compartición del espectro

Para poder realizar la compartición del espectro existen diversas propuestas que tienen como objetivo desarrollar un sistema que sea capaz de satisfacer en un futuro todas las necesidades del usuario.

Este sistema requiere de una gran eficacia para poder compartir el espectro, logrando así coexistir de una manera eficiente, dicho concepto tiene considerados dos mecanismos principales para compartir el espectro.

- 1) La eficacia total del sistema en el uso del espectro.
- 2) La flexibilidad del uso del espectro.

3. Equipo de Medidas

El equipo de medición se basa en una configuración de un analizador de espectro, concretamente el R&S FSL6, una antena AOR DN753 y diferentes dispositivos externos utilizados con el fin de proporcionar unas medidas precisas y fiables.

Se puede apreciar en la siguiente imagen el diseño que se instauró para llevar a término la campaña de medidas:

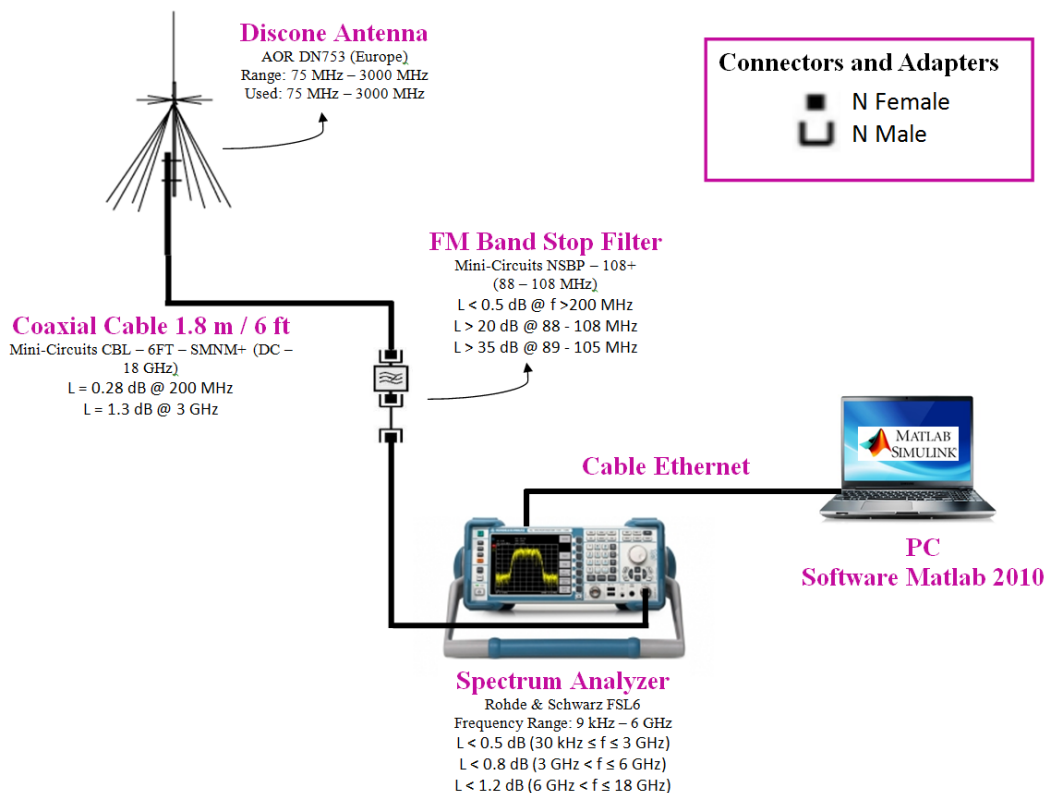


Figura 4 - Esquema de Trabajo

Como se puede observar se utilizó un ordenador portátil para controlar remotamente el analizador de espectro, lo que da completamente la libertad para planificar unas medidas mediante scripts, utilizando la herramienta de software Matlab.

3.1. Antena AOR DN753

La antena que se utilizó fue la AOR DN753 [10], de tipo discono, polarizada verticalmente y un diagrama de recepción omnidireccional en el plano horizontal, cubriendo un rango de frecuencias de 75 MHz a 3 GHz. La siguiente imagen muestra la antena situada en la azotea del edificio D4.



Figura 5 - Antena AOR DN753

3.2. Filtro Elimina Banda

Con el fin de eliminar señales no deseadas, se incluyó un filtro elimina banda que cancela las señales en un rango de frecuencias de 87.5 a 108 MHz, correspondientes a las estaciones de transmisión de frecuencia modulada (FM). Ya que estas transmisiones suelen ser con potencias elevadas y tasa de ocupación alta, el filtro corresponde a un Mini-Circuits NSBP -108+, se conectó directamente a la antena para evitar posibles interferencias o sobrecargas en nuestro receptor.

Para compensar algunas pérdidas que se sufren con el uso de dispositivos y cables, y a su vez aumentar la sensibilidad de nuestro sistema, se utilizó el amplificador interno del analizador, siempre llevando la precaución que en ningún momento se sature provocando que las medidas sean erróneas.



Figura 6 - Filtro Elimina Banda

3.3. Analizador de Espectro R&S FSL6

El analizador de espectro utilizado es el Rohde & Schwarz FSL6, proporciona medidas de potencia y registra la actividad espectral sobre una gama de frecuencias que oscila de los 9 KHz a los 6 GHz.

Cuenta con un bajo nivel de ruido promediado -117 dBm con un valor típico de 300 Hz de RBW [12]. La configuración del instrumento se realiza mediante parámetros de entrada en los scripts donde se planificaban las medidas que se realizarían. En todo momento se podía variar el valor de los mismos, pero muchos de ellos los mantendremos fijos durante todo el estudio ya que se observó con que valores se obtenían los resultados óptimos en estudios previos, en capítulos posteriores se expondrán las diferentes conclusiones y los valores que se adoptaron.

Puesto que los diferentes modos de funcionamiento del analizador de espectro pueden alterar significativamente los resultados, se realizó una primera campaña de medidas en el laboratorio del Grupo de Investigación en Comunicaciones Móviles. Ya que la elección de los parámetro es crucial para obtener resultados válidos y fiables.



Figura 7 - Analizador de Espectro R&S FSL6

La gama de frecuencias de medición es de 75 MHz a 3 GHz, la hemos dividido en 5 bloques con tamaños variables que oscilan entre los 525 MHz hasta los 710 MHz. Esta división se ha llevado a cabo siguiendo las asignaciones del espectro gubernamental españolas contenidas todas ellas en el Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias y adoptando mayor interés en determinadas bandas, a su vez también debían tener cierta coherencia ya que posteriormente se debían procesar todos los datos obtenidos.

Uno de los principales parámetros que se debe seleccionar es el rango de frecuencias que se quiere visualizar. Se puede elegir de dos maneras diferentes, indicando la frecuencia central y el SPAN, o bien indicando las frecuencias de inicio y fin.

Otro de los parámetros importantes que se pueden encontrar es el tipo de barrido, en nuestro caso se selecciona Single Sweep, o barrido simple. De este modo no se realiza en el transcurso de las medidas ningún promediado con el fin de procesar los datos traza por traza. Continuando con los diferentes parámetros, el número de puntos por traza o barrido es de vital importancia, ya que a mayor número, mayor resolución.

En el caso del analizador de espectro Rohde & Schwarz FSL6 [11], el número de puntos máximos que se pueden almacenar para un determinado rango de frecuencias por barrido o traza es un total de 32001, altamente superior al Anritsu MS2721B, que tan solo disponía de 551 puntos. Este último analizador de espectro ha sido utilizado en diversos proyectos dentro del grupo de GRCM, la principal ventaja que comporta respecto al que utilizamos en el proyecto es su comportamiento ligero y la facilidad que nos aporta a la hora de realizar medidas donde se tenga que estar constantemente transportando el analizador de un punto a otro. Estos puntos comúnmente los denominamos “Sweep Points” en el argot inglés.

El ancho de banda de resolución (RMW) desempeña un papel fundamental en las mediciones obtenidas. Si se selecciona un RBW estrecho incrementaremos la selectividad, por contrapartida se incrementa el tiempo de barrido. Observando previamente las bandas a medir, se optó por un valor de 30 KHz como RBW.

Seguidamente el ancho de banda de video (VBW), lo se emplea para promediar o suavizar la traza vista por pantalla. No incrementa de forma alguna la resolución en frecuencia. Se utiliza para reducir el efecto del ruido en la amplitud de la señal mostrada. Este efecto también se puede llegar a lograr promediando un número determinado de trazas. El valor que se eligió para nuestro estudio fue de 100 KHz.

Esto hace pensar si estos valores son lo suficientemente adecuados para el estudio, veamos un ejemplo concreto para medir las bandas atribuidas al sistema global de comunicaciones móviles GSM. El SPAN o rango de frecuencias de estas bandas es de 710 MHz, con lo que tendremos intervalos frecuenciales:

$$710 \text{ MHz} / (32001 - 1) = 22.19 \text{ KHz},$$

Notablemente más estrecho que el ancho de banda de las señales GSM (200 KHz).

Básicamente deberemos cumplir:

$$SPAN \leq RBW * \text{Número de puntos} = 960 \text{ MHz}$$

Cada banda de frecuencia se ha medido durante un periodo de 24 horas. Se ha utilizado el analizador de espectro con el preamplificador activado, ya que proporciona una ganancia de 20 dB.

El nivel de referencia se ajusta de acuerdo con el nivel de potencia máxima dentro de la banda de estudio, inclusive existe la opción de realizar una captura de imagen en el momento de realizar la medición, es por ello la importancia de este valor, ya que marcará

la referencia en el analizador. Del mismo modo la escala se ajusta al nivel de señal mínimo. En ningún momento del estudio se introducen parámetros de atenuación en la entrada.

Mencionar que nuestro analizador disponía de baterías recargables, ya que tiene la finalidad de poder ser trasladado y liberarnos de la carga de tener que estar en un puesto de trabajo con alimentación eléctrica permanente.

3.4. Cableado

La conexión de la antena con el analizador se realiza mediante un cable coaxial. Por otro lado, la conexión entre el ordenador y el analizador se realiza por medio de un cable Ethernet (RJ45), comúnmente utilizados como cables de red.

4. Metodología de medición

4.1. Estudio número de trazas R&S FSL6

Una vez adquiridos los conocimientos suficientes y la destreza con el analizador de espectro, se procedió a realizar diferentes campañas de mediciones con números determinados de trazas.

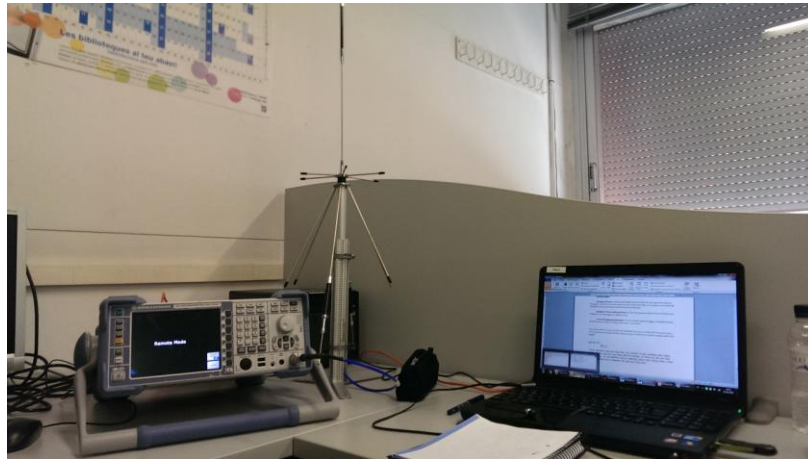


Figura 8 - Equipo Mediciones Laboratorio

El objetivo de este estudio era el delimitar un número de trazas óptimo, el cual se usó en posteriores campañas de medidas, puesto que este es uno de los parámetros de mayor importancia. Se estudió la desviación típica y la esperanza de los valores obtenidos. Para ello se crearon diferentes scripts en Matlab que permitían realizar todas estas operaciones.

Inicialmente se realizó una campaña de medidas en toda la banda de Televisión Digital Terrestre [13]. Los parámetros que se seleccionaron en este caso fueron los siguientes:

SPAN: 8 MHz (Ancho de banda de los canales de TV)

VBW: 100 KHz

RBW: 30 KHz

Puntos por traza: 32001 puntos

Preamplificador: Activado

Por último se seleccionó un total de 500 trazas, con el objetivo de obtener un número considerable para poder analizar el valor óptimo. Generando matrices de 32001 x 500 para cada uno de los canales estudiados, una vez llegados a este punto se analizaron

los resultados en diferentes variantes, con el fin de observar las diferencias entre cada una de las mismas.

TotalcoorsY <32001x500 double>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-102.8567	-99.2335	-97.3913	-94.7356	-102.1318	-98.0488	-99.5783	-116.6800	-102.3116
2	-105.8208	-105.9548	-93.8320	-96.2678	-100.2085	-99.5999	-98.2610	-108.8056	-103.6478
3	-105.9355	-101.9881	-92.3417	-98.1216	-99.2039	-102.0289	-100.6753	-105.9227	-108.1524
4	-103.7071	-96.8316	-92.4497	-100.9818	-97.8848	-102.6609	-104.6998	-106.2557	-102.7405
5	-103.4528	-95.1130	-94.0774	-104.2182	-97.3339	-100.4167	-101.9962	-108.6114	-97.7613
6	-108.7611	-94.9811	-97.7688	-106.2557	-98.2002	-98.5439	-98.5824	-111.8922	-95.8904
7	-110.4627	-96.1194	-105.1920	-105.0460	-100.8415	-98.4324	-96.4102	-107.8034	-96.1257
8	-99.2781	-98.9161	-112.4307	-101.6565	-106.2092	-100.7810	-96.4188	-102.8477	-98.8705
9	-96.7377	-103.6281	-104.0410	-99.4588	-111.7407	-105.4006	-98.7294	-101.5049	-101.9921
10	-97.2179	-111.2185	-99.9890	-98.9218	-108.1193	-113.0048	-102.6170	-100.2085	-99.2572
11	-100.5709	-102.2108	-98.4486	-100.1919	-102.5864	-115.8783	-106.5881	-97.9408	-95.9980
12	-108.0127	-98.1713	-98.2716	-102.7361	-99.4649	-122.2066	-104.5018	-96.6557	-94.6880
13	-107.7164	-97.5780	-98.6570	-101.8547	-98.4161	-117.3937	-100.4371	-96.6999	-94.5815

Figura 9 - Medidas Canal TV

Se eligieron 4 modalidades:

- i) Cogiendo 500 trazas.
- ii) Cogiendo 100 primeras trazas.
- iii) Cogiendo 250 primeras trazas.
- iv) Cogiendo las 100 primeras y las 100 últimas.

Para cada una de ellas se creó una matriz de potencia con el script "CreatePowerMatrix.mat", que convierte los valores de energía a potencia para los diferentes canales de estudio, creando una matriz de 500 x 40, en el caso de la primera variante.

PowerMatrix <500x40 double>								
	1	2	3	4	5	6	7	8
1	-75.7751	-50.3377	-42.4544	-75.3557	-75.5367	-48.8912	-43.7547	-75.4188
2	-75.7886	-50.2420	-42.4481	-75.4005	-75.5645	-48.8537	-43.7802	-75.3317
3	-75.7736	-50.3366	-42.4848	-75.3970	-75.5229	-49.0156	-43.8778	-75.3963
4	-75.8020	-50.3350	-42.5166	-75.4598	-75.3053	-49.0560	-43.8136	-75.4502
5	-75.7445	-50.3433	-42.5607	-75.4500	-75.1661	-49.0551	-44.0181	-75.4389
6	-75.8011	-50.3987	-42.5341	-75.4892	-75.4715	-49.3679	-44.0506	-75.4427
7	-75.8460	-50.3598	-42.4974	-75.4002	-75.5215	-49.4202	-44.0777	-75.5450
8	-75.9913	-50.2838	-42.4835	-75.5101	-75.5016	-49.3845	-44.0808	-75.3267
9	-75.9749	-50.3386	-42.5305	-75.5268	-75.4968	-49.0341	-44.0880	-75.4006
10	-75.8893	-50.3911	-42.5142	-75.4125	-75.4482	-48.6696	-44.0816	-75.3620
11	-75.8049	-50.2953	-42.6824	-75.3479	-75.4429	-48.6611	-43.9908	-75.4668
12	-75.8650	-50.3233	-42.8768	-75.3865	-75.1662	-48.0251	-43.9805	-75.4857

Figura 10 - Matriz Potencia Canales TV

Ahora se debe estudiar el umbral de decisión, con el que se comparará la potencia recibida de un canal. Para fijarlo se ha elegido el criterio de Probabilidad de Falsa Alarma (PFA) que consiste en fijar el umbral de manera que exista un correspondiente porcentaje de probabilidad de error en detectar que el canal se encuentre ocupado

cuando en realidad esté libre. Este porcentaje se conoce como probabilidad de falsa alarma. En este caso se decide fijar el umbral de manera que exista un 1% de probabilidad de falsa alarma. Este método fue elegido por ser mucho más restrictivo que la ocupación teórica a la hora de tomar una decisión.

Los umbrales de decisión se calculan a partir del nivel de ruido interno del analizador de espectro. Para realizar la medida del ruido del analizador de espectro se colocó una carga adaptada de 50 Ω en la entrada RF del equipo y se realizaron las medidas de cada canal con los mismos parámetros anteriores.

Se guardaron todos los datos obtenidos de los 40 canales con la carga adaptada para su procesado. Con la ayuda de Matlab se construyó la matriz del ruido se utilizó la misma función citada anteriormente "CreatePowerMatrix.mat".

Luego de obtener la matriz de potencia de ruido, con la ayuda de Matlab y su función "prctile" se calcula el percentil 99. Este percentil es el valor de potencia de ruido para el cual la probabilidad de que haya una potencia de ruido mayor a este valor es del 1%. Toda potencia detectada superior al P99 será considerada como canal ocupado mientras que por el caso contrario, será tomada como libre. Se obtiene un vector que será el umbral de decisión y se compara con el valor medio de la matriz "PowerMatrix.mat" aplicándole la función de Matlab "mean", obteniendo a su vez un vector de 40 componentes.

ans <1x40 double>									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-75.7343	-75.6888	-75.4029	-75.4233	-75.4365	-75.4584	-75.4516	-75.4757	-75.4757
2									

Figura 11 - Umbral de Decisión

En los siguientes apartados se verán los resultados obtenidos para cada una de las diferentes variantes. Se ve oportuno mostrar únicamente 3 de los 40 canales disponibles pese a que se realizó el estudio para todos ellos, la manera de seleccionarlos fue basándonos en una distribución equifrecuencial en el espectro.

4.1.1. 500 trazas

Canal	Frecuencia Central (MHz)	Estado	Potencia Recibida (dBm)	Desviación (dB)	Umbral (dBm)
21	474	Libre	-75,8741	0,0586	-75,7343
40	626	Libre	-75,4475	0,0680	-75,3255
60	786	Libre	-75,9994	0,0507	-75,8828

Tabla 2 - Resultados 500 trazas

Para obtener la desviación típica de los canales se utilizó la función de Matlab denominada "std". Además se añadió la catalogación de los diferentes canales, para comparar si dependiendo de las variantes se podían llegar a diferentes resultados. Los

canales libres son aquellos que no superan el umbral de decisión, en caso contrario se encontraría ocupado.

4.1.2. 100 primeras trazas

En este caso se eligen las 100 primeras trazas dentro del conjunto total de 500. Para ello se implementó un script que resulta muy útil a la hora de discriminar entre diferentes muestras, se denomina “muestreoMedidas”, este permite muestrear un número concreto de trazas, argumento que le pasaremos como entrada, además de indicarle el número de puntos por traza que se utiliza y los nombres de los archivos de medidas, tanto de entrada como el de salida.

En todos los scripts que se han implementado en este proyecto se detalla una breve explicación con el fin de poder ser utilizados en futuras investigaciones y sean de fácil utilidad.

<i>Canal</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Estado</i>	<i>Potencia Recibida (dBm)</i>	<i>Desviación (dB)</i>	<i>Umbral (dBm)</i>
21 (1)	474	Libre	-75,867	0,0775	-75,755
40(20)	626	Libre	-75,448	0,0505	-75,349
60(40)	786	Libre	-76,000	0,0512	-75,881

Tabla 3 - Resultados 100 primeras trazas

4.1.3. 250 primeras trazas

Utilizando de nuevo las funciones mencionadas, obtenemos:

<i>Canal</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Estado</i>	<i>Potencia Recibida (dBm)</i>	<i>Desviación (dB)</i>	<i>Umbral (dBm)</i>
21 (1)	474	Libre	-75,871	0,0628	-75,725
40(20)	626	Libre	-75,449	0,0521	-75,314
60(40)	786	Libre	-75,999	0,0504	-75,884

Tabla 4 - Resultados 250 primeras trazas

4.1.4. 100 primeras y 100 últimas trazas

En este caso nos encontramos con la particularidad que no se trataban de muestras consecutivas, es por ello que se implementó el script “muestreoMedidas_100_100”, este permitió coger las 100 primeras y las 100 últimas.

<i>Canal</i>	<i>Frecuencia Central (MHz)</i>	<i>Estado</i>	<i>Potencia Recibida (dBm)</i>	<i>Desviación (dB)</i>	<i>Umbral (dBm)</i>
21 (1)	474	Libre	-75,876	0,0673	-75,761
40(20)	626	Libre	-75,447	0,0526	-75,349
60(40)	786	Libre	-75,995	0,0549	-75,885

Tabla 5 - Resultados 100 primeras y 100 últimas trazas

4.1.5. Conclusión

Una vez realizado el estudio, se puede apreciar que los resultados obtenidos son muy similares. En todos los estados de los 40 canales no se observó ninguna diferencia respecto a su ocupación, en cada una de las diferentes variantes. Se puede observar que la variación en la desviación típica es menor de 0.1 dB en todos los casos lo que indica que las medidas son fiables. Es por ello que existen razones de peso para elegir un número total de 100 trazas para los estudios posteriores.

4.2. Measure

Uno de nuestros principales objetivos era la implementación de un script con la plataforma de software MATLAB que fuese capaz de realizar una campaña de medidas predeterminadas estableciendo una conexión previa con el analizador de espectro, en nuestro caso concreto el Rohde & Schwarz FSL6.

Inicialmente se realizó un arduo trabajo para comprender todos aquellos pasos previos que requería la conexión remota, para posteriormente variar los parámetros y realizar la captura de los datos deseados.

Como se cita en alguna ocasión, en los códigos de las diferentes funciones se detalla su utilidad y la manera de utilizarlo. En concreto este script te permite una flexibilidad total a la hora de implementar una campaña de medidas.

Lo primero que establece es la conexión remota con el analizador y posteriormente varía todos aquellos parámetros de relevancia antes de comenzar con la captura de datos en función de los 17 valores de entrada.

La función permite trabajar en dos modos, ya bien sea con el SPAN y la frecuencia central, o la frecuencia inicial y final. Dando libertad al usuario de elegir el modo que mejor le convenga.

Otro de los parámetros importantes son los temporales, en el caso de fijar un valor nulo "0", el analizador procederá a capturar datos en el mismo momento que se ejecute el comando, por contrapartida se pueden fijar fechas de inicio y fin en el siguiente formato [aaaa mm dd hh mm ss], siendo la fecha de inicio el momento en el cual se inicie la captura de datos y la fecha de fin el momento en que la finalice, siempre y cuando no se supere el límite impuesto de trazas en otro de los argumentos de entrada.

Al mismo tiempo un parámetro útil es el tiempo entre que se recopila cada una de las trazas, siendo otro de estos argumentos. Esto facilita los estudios de ocupación espectral ya que se puede fijar el número de trazas a recopilar.

Por último mencionar que también existe la posibilidad de capturar una imagen en el momento de realizar cada medición.

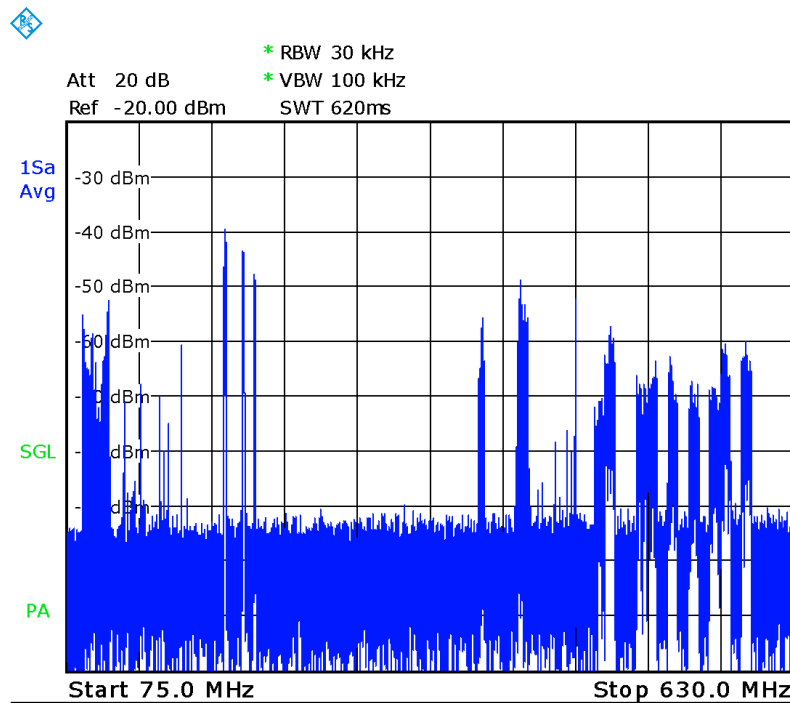


Figura 12 - Ejemplo Captura Analizador de Espectro

5. Campaña de Medidas

5.1. Descripción del lugar

El lugar donde se lleva a cabo este estudio es en la azotea del edificio D4 del Campus Nord de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), es un entorno urbano con línea de visión directa a varias estaciones transmisoras, sin edificios bloqueando la propagación de las ondas radioeléctricas.

El equipo de mediciones se instaló en el Laboratorio de Telecontrol, una zona habilitada exclusivamente para realizar medidas de esta índole y permaneció en ella durante los periodos de recopilación de muestras. Se puede observar en la imagen la disposición de los diferentes elementos.



Figura 13 - Disposición de los elementos de medidas

Esta ubicación permite abarcar con precisión la actividad espectral de casi todos los factores que pueden intervenir en el espectro radio eléctrico, la televisión y las emisoras de FM, de igual modo las comunicaciones celulares y una sede militar próxima. También se puede ver el impacto de los transmisores marítimo y aeronáutico, debido a la proximidad del puerto y el aeropuerto desde el punto donde nos hallamos.

Se puede obtener una geolocalización precisa del lugar con ayuda de google maps:

Latitud: 41° 23 '21 "de latitud norte.

Longitud: 2° 6' 43.5" al este.

Altitud: 175 metros.

Un mapa de la ubicación se muestra en la siguiente figura, el equipo de medición se coloca en la azotea del edificio marcado con un círculo amarillo.

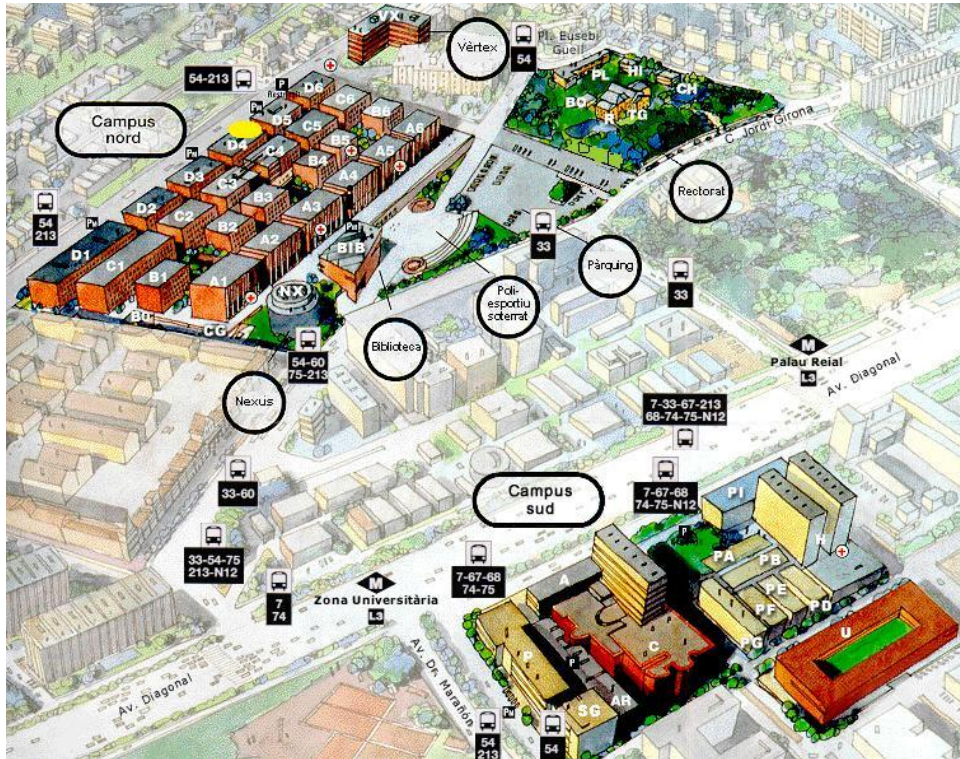


Figura 14 - Campus Nord (UPC, Barcelona)

En la imagen siguiente es posible apreciar la presencia de la torre de comunicaciones de Collserola, la cual transmite señales de radiodifusión muy potentes, por ese motivo el uso del filtro eliminador de banda.



Figura 15 - Torre de Collserola

6. Procesado de los resultados

6.1. Calcular Estadísticas de Ocupación

Con el fin de calcular las estadísticas de ocupación, el duty cycle y las densidades espectrales de potencia en todo el rango de frecuencias de 75 MHz a 3000 MHz, se llevó a cabo una campaña de medidas que englobó la segunda y tercera semana de Mayo de 2016. Se programó un SCRIPT denominado “medidas”, el cual permitía realizar una extracción de datos durante todo un día para cada banda de estudio.

En campañas anteriores se discernía entre un número mayor de particiones del espectro frecuencial, pero en posteriores estudios se observó que dada la gran capacidad de resolución que nos aportaba el analizador R&S se podía disminuir el número de las mismas y aumentar el número de trazas recopiladas temporalmente por banda, es decir, más muestras temporales para poder calcular estadísticas de ocupación.

En la siguiente tabla se observan las bandas en las que se realizan las mediciones.

Frec. Inicial (MHz)	Frec. Final (MHz)	Span – BW (MHz)
75	630	555
630	1155	525
1155	1710	555
1710	2290	580
2290	3000	710

Tabla 6 - Bandas de Estudio

Los parámetros que se utilizan se enumeran a continuación:

VBW: 100 KHz

RBW: 30 KHz

Puntos por traza: 32001 puntos

Preamplificador: Activado

Nivel de referencia: -20 dB

Los anteriores parámetros permitían abarcar rangos frecuenciales de hasta 960 MHz, con las resoluciones prefijadas.

Una vez obtenidos los resultados se procedió a procesarlos, para ello se realizó un script en Matlab capaz de computarlos todos ellos y mostrarnos graficas que permitiesen extraer las conclusiones de la ocupación de los diferentes canales en espectro frecuencial. De este modo se observó cuáles son las mejores opciones para la implantación de un sistema de CR en el Campus Nord de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Previamente se tendrá que tener para cada uno de los diferentes rangos frecuenciales de estudio 4 archivos, los cuales contienen las medidas realizadas, en el caso del archivo de “Amplitudes”, las frecuencias asociadas a las medidas, en el caso del archivo de “Frecuencias”, los tiempos en los que se realizaron cada una de las capturas de datos, en el caso del archivo “Times”, y por último el Threshold, el cual contiene el ruido interno asociado al analizador de espectro cuando este tiene una carga adaptada de 50 Ω en la entrada RF del equipo. Todos ellos son matrices de resultados que devuelve la función “measure”, salvo en el caso del ruido del analizador. Este umbral de decisión se calculó a partir de un número total de 500 trazas, en cada uno de los rangos frecuenciales. Se aplicó a continuación el criterio de Probabilidad de Falsa Alarma (PFA) del 1%, consistiendo en fijar el umbral de manera que exista un correspondiente porcentaje de probabilidad de error en detectar que el canal se encuentre ocupado cuando en realidad esté libre.

Dependiendo de los parámetros de entrada de la función, guardará mayor o menor información, pudiendo llegar a entregar 4 figuras con 3 subgráficas por cada una de ellas, que representaran los diferentes parámetros de las bandas de estudio, en el apartado que sigue se verán con más detalle. Por otra parte, se pueden almacenar las matrices de valores tanto globales como particulares por cada banda, si exclusivamente se estudia una banda ambos resultados serán idénticos.

6.2. Métricas de Ocupación

Una vez realizada la campaña de medidas, se procesan todos esos datos obtenidos con el fin de poder extraer conclusiones y observar cuales son las bandas candidatas que cumplen los requisitos para poder ser propuestas en un entorno CR.

La ocupación del espectro se ha evaluado por medio de diferentes métricas, la primera de ellas es la densidad espectral de potencia (PSD – Figura 16), mostrada en el gráfico superior de las diferentes figuras mostradas en el anexo de resultados. Se muestra tanto el valor máximo, mínimo y promedio, esto nos muestra un comportamiento temporal de un canal. Por ejemplo, si los tres valores que se han obtenido son bastantes similares, se puede llegar a pensar que se encontrará un único transmisor en la banda y siempre está activado, probablemente no se esté moviendo. Por otra parte, una gran diferencia entre los valores mínimos, máximos y promediados sugiere que la utilización de esas componentes espectrales son más intermitentes.

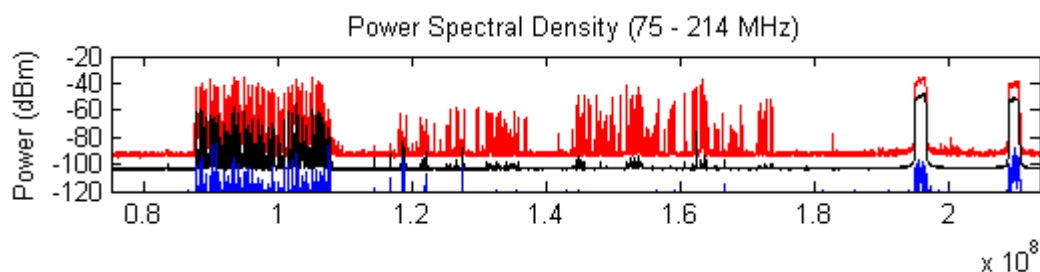


Figura 16 - Densidad Espectral de Potencia

El gráfico medio (Figura 17) de cada figura representa la evolución instantánea de la ocupación del espectro temporal. Los puntos rojos indican que el punto de frecuencia

correspondiente se midió como ocupado en ese instante temporal, mientras que los puntos verdes significan que el punto de frecuencia se midió como desocupado. Comparando la energía de la señal que se recibe por cada banda con un umbral predefinido, de este modo se define la ocupación del canal.

En este caso se decide fijar el umbral de manera que exista un 1% de probabilidad de falsa alarma. Este método fue elegido por ser mucho más restrictivo que la ocupación teórica a la hora de tomar una decisión.

Los umbrales de decisión se calculan a partir del nivel de ruido interno del analizador de espectro. Para realizar la medida del ruido del analizador de espectro se colocó una carga adaptada de 50 Ω en la entrada RF del equipo y se realizaron las medidas de cada canal, se repitieron en 3 ocasiones contrastando que los resultados que se obtenían eran los mismos o muy similares.

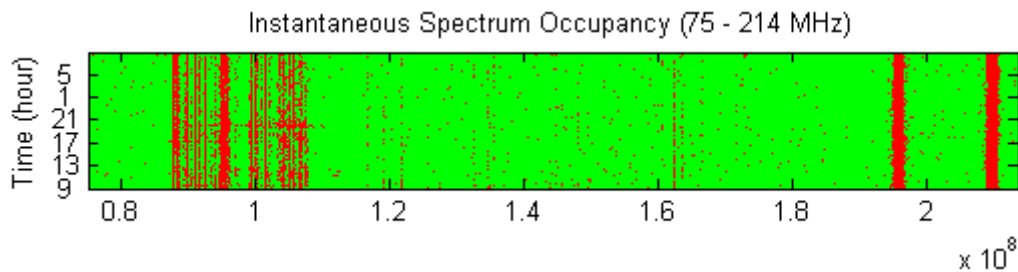


Figura 17 - Ocupación Espectral Temporal

Por último la gráfica inferior (Figura 18) de cada figura muestra el ciclo de trabajo (DutyCycle) en función de la frecuencia. Para cada punto frecuencial, se calcula el ciclo de trabajo como el porcentaje de muestras de PSD que consideraron que el canal se encontraba ocupado, partidas por el número de muestras de PSD. En definitiva representara la fracción de tiempo que ese punto frecuencial se encuentra en estado activo (ocupado).

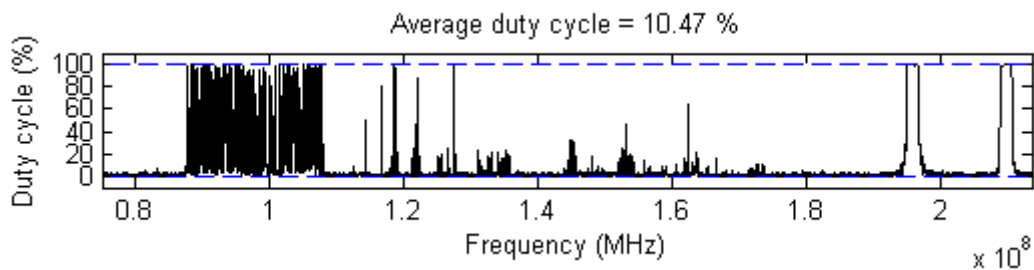


Figura18 - Ciclo de Trabajo

6.3. Estadísticas de Ocupación del Espectro

En las dos siguientes tablas se muestran las estadísticas de ocupación de las diferentes bandas y servicios ubicados en el rango frecuencial de 75 MHz a 3000 MHz.

<i>Rango de Frecuencias (MHz)</i>	<i>Ciclo de Trabajo Promediado</i>	
75 -214	10.47 %	20.42 %
214 – 352	2.39 %	
353 – 491	14.44 %	
491 – 630	41.00 %	
630 – 761	28.38 %	
761 – 892	21.72 %	
893 – 1024	24.54 %	
1024 - 1155	1.05 %	1.09 %
1155 – 1294	1.11 %	
1294 – 1432	1.06 %	
1433 – 1571	1.08 %	
1571 – 1710	1.16 %	
1710 – 1855	23.76 %	
1855 – 2000	9.62 %	15.52 %
2000 – 2145	17.16 %	
2145 – 2290	11.54 %	
2290 – 2467	1.16 %	
2468 – 2645	2.11 %	2.05 %
2645 - 2822	3.70 %	
2823 – 3000	1.23 %	

Tabla 7 - Ciclos de Trabajo Promedio

El porcentaje de uso total es de 9.77 % entre 45 MHz y 3000 MHz.

Frec. Inicial (MHz)	Frec. Final (MHz)	BW (MHz)	Atribución del Servicio Ubicado	Espectro Ocupado (MHz)	Porcentaje Ocupación (%)
75.2	87.5	12.3	PMR / PAMR	0,16	1,33
87.5	108	20.5	FM Radiodifusión	7,93	38,68
108	137	29	Radionavegación aeronáutica (ILS/VOR)	0,82	2,83
137	144	7	Aeronáutico, marítimo y satélite	0,09	1,30
144	146	2	Aficionados	0,13	6,68
146	174	28	PMR/PAMR, marítimo (GMDSS) y ERMES	0,80	2,85
174	195	21	Micrófonos Wireless	0,37	1,75
195	223	28	DAB-T	5,98	21,38
223	235	12	PMR/PAMR	0,11	0,99
235	400	165	Sistemas de Defensa (DoD) & TETRA	3,89	2,36
400	406	6	Satélite & ULP-AMI	0,06	0,99
406	430	24	PMR/PAMR (TETRA)	3,95	16,48
430	440	10	Aficionados & ISM-433 (SRD)	0,23	2,33
440	470	30	PMR/PAMR (PMR 446 & TETRA)	1,13	3,77
470	790	320	DVB-T	105,57	32,99
790	862	72	Dividendo Digital	27,71	38,49
862	868	6	Micrófonos Wireless & RFID	0,23	3,88
868	870	2	SRD & alarmas	0,03	1,54
870	876	6	PMR/PAMR (CT1-E & TETRA) UL	0,06	0,99
876	880	4	R-GSM 900 UL	0,04	1,05
880	915	35	E-GSM 900 UL	0,41	1,16
915	921	6	PMR/PAMR (CT1-E & TETRA) DL	0,06	1,04
921	925	4	R-GSM 900 DL	0,43	10,82
925	960	35	E-GSM 900 DL	30,69	87,70
960	1350	390	Aero radionavegación (GALILEO)	4,25	1,09
1350	1400	50	Sistemas de Defensa (DoD)	0,52	1,05
1400	1427	27	Satélite	0,28	1,05
1427	1452	25	Point-to-point fixed links	0,27	1,08
1452	1492	40	Audio broadcasting (DAB-T & satellite)	0,44	1,11
1492	1517	25	Point-to-point fixed links	0,27	1,08
1517	1530	13	Sistemas de Defensa (DoD)	0,14	1,05
1530	1559	29	Satélite (MSS)	0,32	1,09
1559	1610	51	Aero radionavegación (GPS/GALILEO)	0,54	1,07
1610	1675	65	Satellite (S-PCS) & SAP/SAB point-to-point links	0,81	1,26
1675	1710	35	Sistemas de Defensa (DoD)	0,37	1,07
1710	1785	75	DCS 1800 UL	0,77	1,03
1785	1800	15	Radio micrófonos	0,15	1,01
1800	1805	5	Usos Harmonizados	0,05	1,00
1805	1880	75	DCS 1800 DL	46,12	61,50
1880	1900	20	DECT	0,25	1,26
1900	1920	20	UMTS FDD	0,21	1,07

1920	1980	60	UMTS FDD UL	0,64	1,06
1980	2010	30	Satélite UMTS	0,31	1,04
2010	2025	15	UMTS TDD	0,16	1,10
2025	2110	85	Point-to-point fixed links	0,90	1,06
2110	2170	60	UMTS FDD DL	39,07	65,11
2170	2200	30	Satélite UMTS	0,30	1,00
2200	2290	90	Point-to-point fixed links	1,07	1,19
2290	2300	10	Investigación Espacial	0,11	1,11
2300	2500	200	ENG, RFID & ISM 2450	2,26	1,13
2500	2690	190	Extensión UMTS	7,94	4,18
2690	2700	10	Satélite	0,15	1,47
2700	2900	200	Radares Militares	2,48	1,24
2900	3000	100	Radionavegación (Sistemas de Defensa)	1,08	1,08

Tabla 8 - Ocupación Servicios Espectro Radioeléctrico

6.4. Resultados Campañas de Medidas

Con el fin de poder visualizar todos los resultados obtenidos en las diferentes campañas de medidas se adjunta un anexo con todas las gráficas generadas mediante los scripts de Matlab citados anteriormente.

Para mejorar la fiabilidad del estudio se realizaron 2 campañas en las diferentes porciones en las que se dividió el espectro frecuencial, se recopilaban datos durante un día completo con el objetivo de poder extraer estadísticas de ocupación. Es por ello que en el mismo anexo se diferenciaron dos días alternativos para cada una de las bandas. Se tuvieron en cuenta las características meteorológicas, ya que de no ser así se podría obtener medidas menos conservadoras visualizando algunas de las bandas desocupadas cuando en realidad podrían estar siendo utilizadas. Al analizar los resultados de las dos campañas, se pudo ver que los resultados eran muy similares, en casi todas las bandas, tanto en parámetros de densidad espectral de potencia como de ocupación.

Además también se incluye una captura del analizador de espectro en el momento de la captura de las medidas ya que se había activado esta función. Es recomendable ya que permite extraer una primera conclusión antes de analizar los resultados, y de este modo condiciona la manera en la que se estudiarán los datos recopilados.

Por otra parte, a la hora de analizar el ruido del analizador con la carga adaptada se repitieron las medidas en 3 ocasiones, saliendo prácticamente idénticas en los 3 casos, con lo que aportaba fiabilidad a las medidas capturadas.

7. Análisis de los Resultados

El espectro experimenta un uso relativamente moderado en todo el rango frecuencial de estudio, siendo este de un 9.77 %. Lo que revela la existencia de cantidades significativas de espectro no utilizado que potencialmente podría ser utilizado en futuras redes CR. Se observa que esta cifra aumenta hasta el 20.42 % si se discrimina exclusivamente el primer gigahercio del espectro, del mismo modo asciende hasta el 15.52 % si nos situamos entre 1710 MHz y 2290 MHz. Fuera de estos rangos la ocupación que se puede observar oscila entre 1.09 % y el 2.05 %, notablemente inferior hablando en términos de ocupación espectral.

A priori se puede afirmar que el espectro radioeléctrico permanece en su mayoría poco utilizado, se discutirán algunas excepciones que se pueden contrastar con las gráficas de resultados.

En la tabla 7 se muestran los diferentes ciclos de trabajo promediados para las bandas de estudio. Estos se calculan a partir de los resultados obtenidos y muestran una primera aproximación de la ocupación que se halla en esas frecuencias, posteriormente se estudió particularmente cada banda, calculando su ciclo de trabajo promediado.

En la tabla 8 se pueden visualizar todos los servicios ubicados dentro del rango de frecuencias que oscilan entre los 75.2 MHz y los 3000 MHz. Además contiene la frecuencia inicial y final de cada servicio, incluyendo el ancho de banda asociado. Puesto que se tenía toda la recopilación de medidas, se implementó una función en Matlab denominada "OcupacionEspectralBanda". Esta permitía de una manera rápida y sencilla calcular el porcentaje de ocupación promedio entre un margen de frecuencias, parámetros de entrada. Al mismo tiempo calculaba el espectro ocupado dentro de ese rango frecuencial.

Aunque estos resultados indican claramente bajos niveles de utilización del espectro, no proporcionan una idea clara de cómo se utiliza el espectro en las diferentes bandas frecuenciales. Es por ello que en lo que sigue se discutirá en detalle el uso del espectro en algunas bandas que se consideran de interés.

Aunque se observa una mayor actividad espectral por debajo de 1 GHz, se pueden encontrar White Spaces que permitan la implantación de redes cognitivas, incluso en aquellas donde se encuentra un ciclo de trabajo promedio más alto, ya que como se observa en ningún caso es cercano al 100 %. Siendo de los más elevados por ejemplo el que pertenece a la DVB-T y Dividendo Digital, en estas subbandas se diferencian con gran facilidad las que se encuentran ocupadas o libres, y dada su naturaleza tienen un comportamiento mayormente estático. Es por ello que se identifican algunas de ellas con ciclos de trabajo aproximadamente del 100 %, es decir, emisión continua. Lógicamente estas bandas estarían descartadas para cualquier estudio de CR, por contrapartida, se localizan algunos espacios desocupados en el espectro. Esto se ha visto incentivado por el paso de la televisión analógica a digital, favoreciendo la aparición de nuevos White Spaces. Estas regiones frecuenciales son las que se podrían implementar en futuras redes CR.

En general, los canales de TV ocupados muestran un ciclo de trabajo promedio del 100 %, es posible que en ocasiones lleguen canales con una señal muy debilitada, y a priori pueda parecer que la banda se encuentre libre. En nuestro caso el ciclo de trabajo promedio entre 470 y 790 MHz era de 32.99 %, lo que significa que se encuentra dos

tercios de la banda de televisión desocupado, esto se puede deber a la débil recepción de las señales que transmiten desde las estaciones de televisión más distantes. Por lo tanto, pese a tener una alta ocupación dentro de la banda de TV, ofrece algunas oportunidades para realizar un uso secundario del espectro.

Continuando con los casos de mayor interés por debajo de 1 GHz, se observan las bandas de frecuencias atribuidas a la telefonía móvil (GSM), se pueden diferenciar las frecuencias atribuidas a los enlaces de subida y bajada. La banda que contiene el enlace ascendente de 876 a 915 MHz se presenta como un firme candidato a posibles implantaciones de CR con un ciclo de trabajo promedio 1.05 %. Sin embargo se observa que la baja actividad registrada en este canal no implica necesariamente que pueda ser utilizado, ya que si se observa la densidad espectral de potencia vemos como alcanza valores significativos, relevando la presencia de señales primarias en el enlace ascendente, ver figura 19 y 20. Si se fija la atención en el descendente de 921 a 960 MHz se observa una actividad considerablemente más alta, alrededor de un 87.70 % de ocupación. Además se suma el hecho de que el GSM se basa en técnicas FDD (Frequency División Duplex) manteniendo una comunicación bidireccional, nos sugiere que el uso real de la banda de enlace ascendente puede ser mayor que el nivel de actividad registrada. Esto lleva a preguntarse el desequilibrio que se encuentra entre ambos enlaces, esto se debe a que la potencia de transmisión de una estación base es considerablemente mayor que la un teléfono celular convencional. Por lo tanto, la presencia de señales de enlaces descendentes se puede detectar con mayor facilidad además de que en el estudio se tenía visión directa con varias estaciones transmisoras cercanas. Por otra parte, las señales de enlaces ascendentes por norma común no disponen de visión directa y la potencia es mucho menor con lo que no nos facilita la localización dentro del espectro frecuencial.

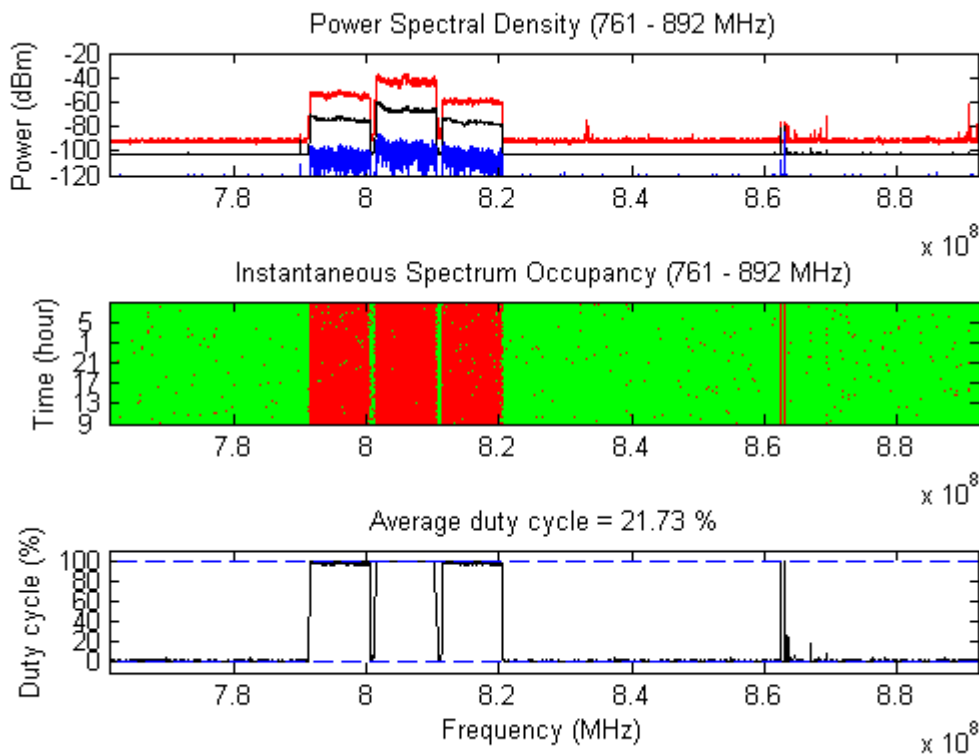


Figura 19- Análisis Ocupación 761 - 892 MHz

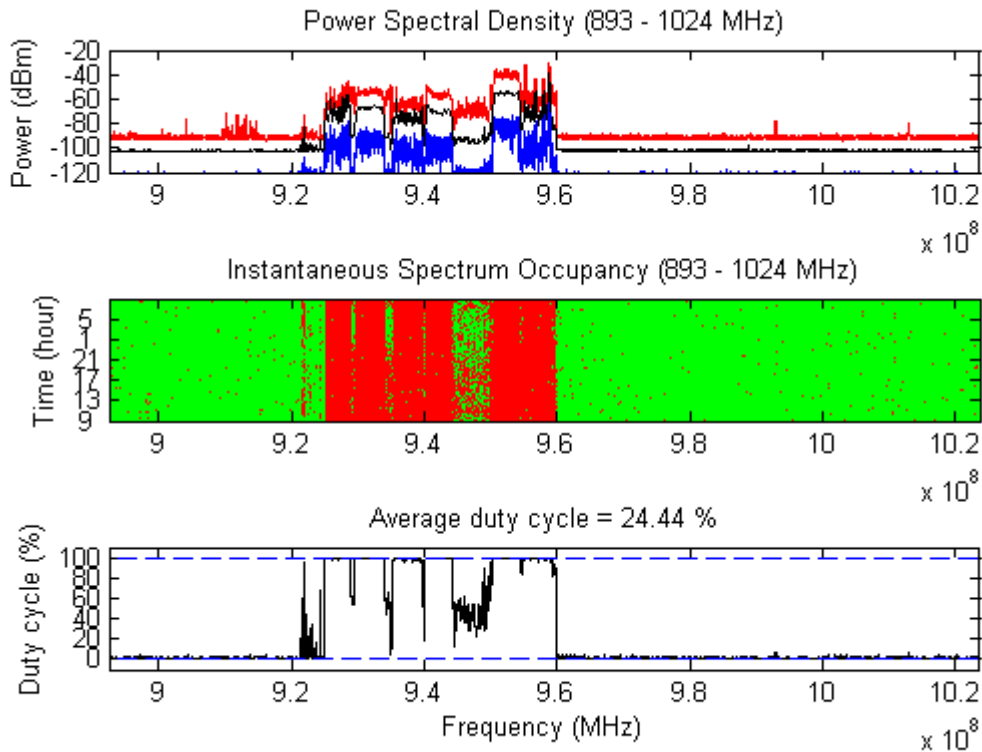


Figura 20 - Análisis Ocupación 893 - 1024 MHz

En las bandas de espectro más bajas, concretamente de 75 – 235 MHz se observan ciclos de trabajo oscilantes entre 38.68 % y 1.30 %. En estas bandas se encuentran servicios con sistemas de banda estrecha, como pueden ser PMR/PAMR (75.2 a 87.5 MHz), radiodifusión analógica FM (87.5 a 108 MHz), Sistemas de radionavegación aeronáutica y marítimos (137 a 146 MHz), Sistemas de localización ERMES (146 a 174 MHz), Micrófonos Wireless (174 a 195 MHz) y DAB – T (195 a 223 MHz). Todos ellos presentan ciclos de trabajo moderados con lo que se podría pensar una posible implantación de redes CR. Si se observa con más detalle, los huecos que presentan estas bandas son de anchos de banda muy estrechos, dada la naturaleza de las mismas. Además se observa que existe una actividad importante al observar los diferentes valores de densidad espectral de potencia, con lo que no serían las bandas más idóneas.

Por otra parte, toda la banda desde 235 a 400 MHz está reservada exclusivamente para los servicios de seguridad y los sistemas de defensa del Ministerio de Defensa Español, que en principio se opone a la utilización de estas bandas de espectro para aplicaciones CR. Se puede comprobar que el tipo de actividad en el momento de las mediciones es mínima, con un ciclo de trabajo promedio 2.36 %.

Otras de las bandas que encontramos por debajo de 1 GHz se asignan a los micrófonos inalámbricos y RFID (862 a 870 MHz), teléfonos inalámbricos CT1 (870 a 871 MHz y 915 a 916 MHz), acceso celular telefonía rural (874 a 876 MHz y 919 a 921 MHz) y R-GSM 900 (876 a 880 MHz y 921 a 925 MHz).

Continuando con la búsqueda de posibles bandas candidatas a la implantación de una red de uso secundario, entre 1 y 2 GHz se observa que existe un bajo nivel de utilización, concretamente de 5.55 %, donde se sitúa el mayor uso del espectro en las bandas atribuidas a la variante de la norma GSM (DCS 1800), teniendo más canales disponibles y un ancho de banda mayor, ya que al aumentar la frecuencia, aumenta la absorción, y es por ello que en ocasiones para poder asegurar el servicio es necesario utilizar terminales de mayor potencia o disminuir el área cubierta por celda, lo que obliga a aumentar la cantidad de estaciones bases. Del mismo que en GSM se puede apreciar el enlace ascendente (1710 MHz a 1785 MHz) con un ciclo de trabajo promedio del 1.03 % y su respectivo enlace descendente (1805 MHz a 1880MHz) con un ciclo de trabajo promedio 61.50 %. Se puede observar que en caso del DCS 1800, las diferencias respecto a los canales ascendente y descendente son más notables, esto se debe al hecho de que se transmiten con potencias más bajas que en GSM 900, esto se traduce en una ocupación espectral más reducida en el enlace ascendente, se puede observar en las dos figuras siguientes los ciclos de ocupación promedio.

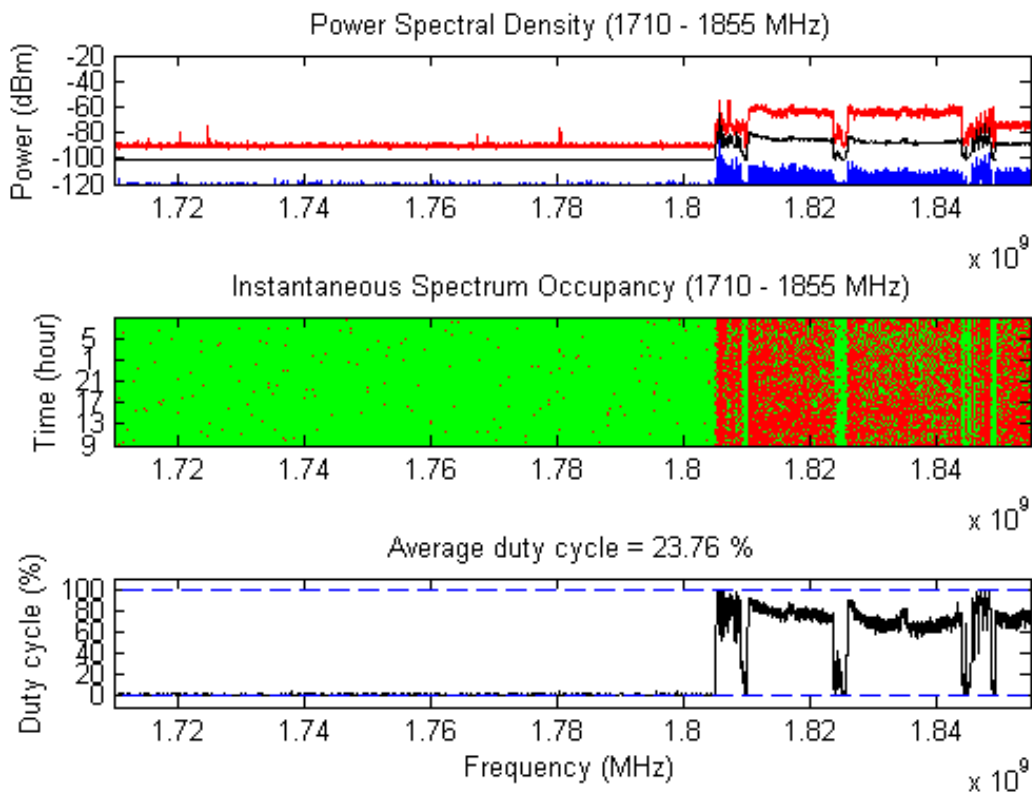


Figura 21 – Análisis Ocupación 1710 - 1855 MHz

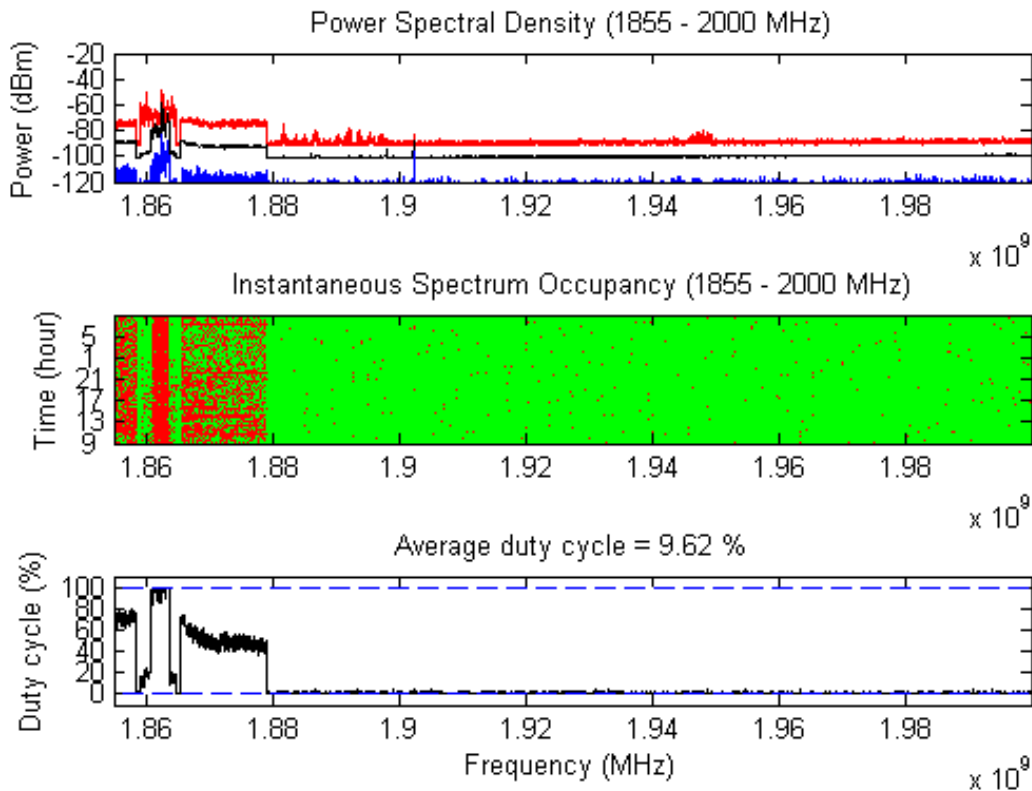


Figura 22 - Análisis Ocupación 1855 – 2000 MHz

También encontramos las bandas de frecuencia UMTS, utilizadas por los móviles de tercera generación, tecnología sucesora del GSM, debido a que esta última tecnología no podía evolucionar para prestar los servicios que la tercera generación requería. Los sistemas UMTS operan en las bandas de frecuencia que oscilan entre 1900 MHz y 2200MHz, se observa el enlace ascendente (1920 MHz a 1980 MHz) con un ciclo de trabajo promedio del 1.06 % y su enlace descendente (2110 MHz a 2170 MHz) con un ciclo de trabajo promedio del 65.11 %.

En el caso de UMTS, también se produce una gran diferencia entre sus enlaces, esto es debido a la naturaleza de la tecnología utilizada, concretamente se basa en una técnica de acceso múltiple por separación de código WCDMA, el objetivo es proporcionar una mayor eficiencia espectral, respecto a las tecnologías de acceso TDMA y FDMA. Ya que todos los usuarios transmiten al mismo tiempo, por lo que no existe separación temporal, y con el mismo ancho de banda, ya que no existe separación frecuencial, pudiendo ser discriminados asignando un código a cada usuario identificándolos de manera unívoca.

En las codificaciones de espectro ensanchado se utiliza el código para modular digitalmente la portadora, de tal forma que aumenta el ancho de banda de la transmisión y reduce de este modo la densidad espectral de potencia, por lo que la señal resultante tiene un espectro muy parecido al ruido, de tal forma que a todos los radio-receptores les parecerá ruido menos al que va dirigida la señal. Esto hace que sea difícil la captura de estas señales mediante los analizadores de espectro.

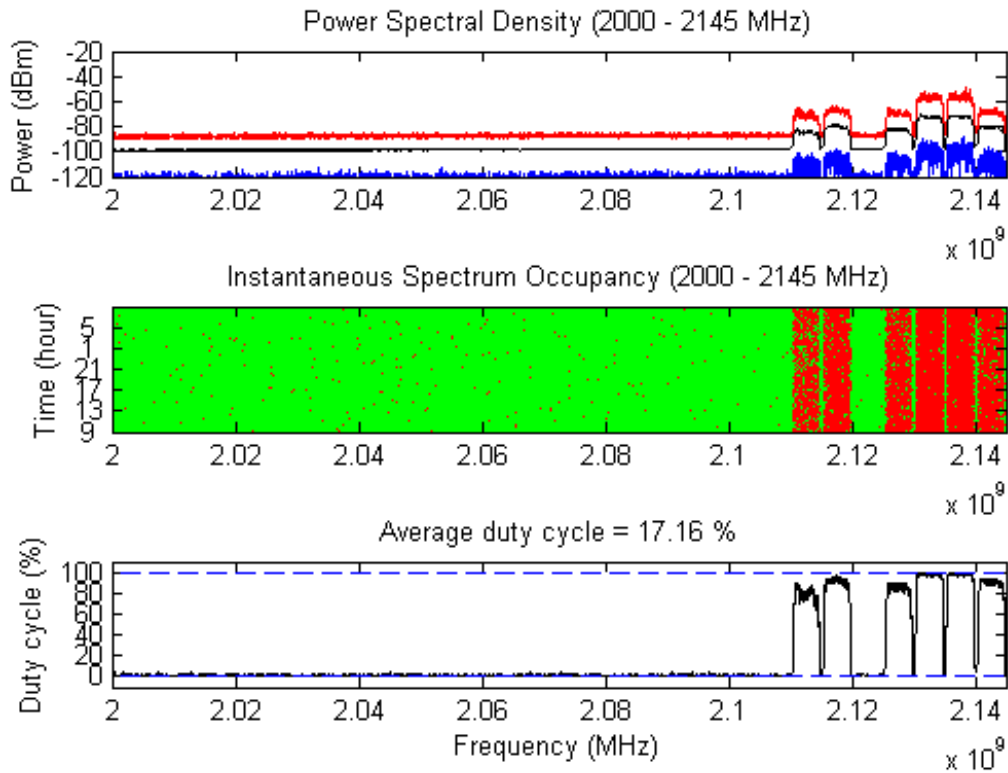


Figura 23 – Anàlisi Ocupació 2000 – 2145 MHz

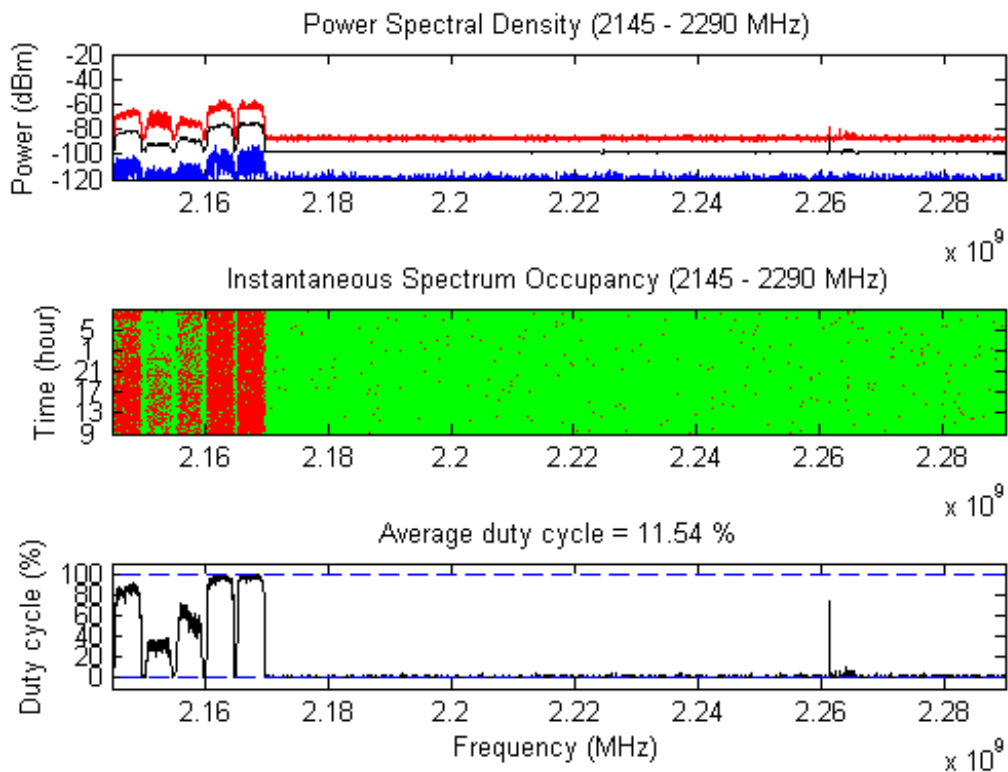


Figura 24 - Anàlisi Ocupació 2145 – 2290 MHz

A pesar que DCS 1800 y UMTS muestran niveles de ocupación elevados en el enlace descendente (61.50% y 65.11% respectivamente), estas bandas también podrían proporcionar algunas oportunidades para accesos secundario.

En el caso de UMTS, se observan varios canales de 5 MHz desocupados. Por otra parte, las bandas UMTS reservadas para la multiplexación por división de tiempo (TDD) componentes que oscilan entre 2010-2025 MHz no son utilizadas, tampoco las componentes de satélite (1980 a 2010 MHz y 2170 a 2200 MHz).

Aunque la mayor actividad por encima de 1GHz se observa para DCS 1800 y UMTS, algunas otras bandas también se encuentran claramente ocupadas a menores tasas de ocupación.

Por último, vale la pena señalar que algunas bandas del espectro aparecen como desocupadas si se juzga por sus ciclos de trabajo promedio. Sin embargo, a la hora de visualizar los valores máximos de su densidad espectral de potencia, se observan algunos usuarios primarios presentes en dichas bandas.

8. Presupuesto

Este proyecto se ha desarrollado en el grupo de investigación en comunicaciones móviles (GRCM) del departamento de Teoría de la señal y Comunicaciones (TSC) de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), todos los equipos y licencias de software han sido proporcionados por el mismo. A continuación se realiza una estimación del coste que ha supuesto la implementación de esta tesis, incluyendo los diferentes conceptos, tales como el número de horas empleadas o el coste de los equipos utilizados, entre otros.

El número aproximado de horas dedicadas a este proyecto es de 320 repartidas en las diferentes etapas que se describen en el plan de trabajo.

El software utilizado consta exclusivamente de Matlab, se utilizó esta plataforma de desarrollo para dar lugar a todos los scripts utilizados, tanto para la conexión remota con el analizador de espectro, como la obtención de medidas y su posterior análisis. La licencia ha sido proporcionada por la UPC, institución de ámbito educacional.

Concepto	Coste (€)
320 horas x 15 €/hora	4800
Antena AOR DN753	125
Analizador de Espectro Rohde & Schwarz FSL6	12.600
Licencia de Software MATLAB 2014	2.500
Ordenador Portátil	500
TOTAL:	20.525

9. Impacto Ambiental

Este proyecto no tiene ningún impacto medio ambiental negativo. Únicamente se utiliza un analizador de espectro, el cual recibe ondas electromagnéticas de estaciones bases cercanas o dispositivos transmisores.

Varios estudios han demostrado que no existe riesgo real para la salud debido a la exposición a campos electromagnéticos creados por trasmisiones de este tipo, al menos a los niveles de radiación permitidos por los organismos internacionales, según a la potencia que se emiten.

Por otra parte, en lo que a la radio cognitiva se refiere, se buscan maneras de aprovechar más eficientemente todo el espectro radioeléctrico del cual se dispone, con el fin de hacer más sostenible el desarrollo de las telecomunicaciones en los próximos años, ya que su demanda se ve incrementada.

10. Conclusiones y Líneas de Futuro

En este trabajo de final de grado se ha estudiado la viabilidad de desplegar una red de radio cognitiva exterior en el “Campus Nord” de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Tal y como se ha podido comprobar el espectro experimenta un uso relativamente moderado por debajo de 1 GHz, un bajo uso en las frecuencias que oscilan entre los 1710 MHz y 2290 MHz y un uso muy reducido en las bandas restantes.

En ningún caso el ciclo de trabajo promedio supera el 41 % en las porciones de espectro estudiadas, lo que hace referencia a la infrautilización del espectro radioeléctrico actualmente. Por otra parte si se observan las frecuencias que oscilan entre los 1024 MHz y 1710 MHz el ciclo de trabajo promediado es de tan solo el 1,09 %.

El ciclo de trabajo promedio general en toda la gama de frecuencias consideradas en este estudio es del 9.77 %, que revela la existencia de cantidades significativas de espectro no utilizadas, estas podrían ser utilizadas potencialmente para explotar futuras redes cognitivas.

Los resultados obtenidos muestran que algunas bandas del espectro están sujetas a un uso intensivo, mientras que otras muestran niveles de utilización moderados, y por último muchas de ellas no se utilizan en absoluto, quedando reservadas exclusivamente para los posibles usuarios primarios que tienen adjudicados los derechos legítimos de uso.

Las tasas de ocupación más altas que se observan están atribuidas a los servicios de radiodifusión tanto de las bandas de FM como las bandas asignadas a la televisión digital, seguido de los servicios de comunicaciones móviles (E-GSM 900, DCS 1800 y UMTS) entre otros.

La mayor parte del espectro analizado, ofrece posibilidades para el uso de redes secundarias, incluso aquellas que presentan un ciclo de trabajo moderado, ya que se pueden llegar a visualizar espacios espectrales desocupados (White Spaces) que podrían ser explotados por estas tecnologías. Remarcar al mismo tiempo que por sí solo el ciclo de trabajo no es una estadística suficiente para afirmar si una banda espectral se encuentra ocupada o desocupada por usuarios primarios. Como se pudo comprobar visualizando la densidad espectral de potencia, se localizaban usuarios primarios en los enlaces ascendentes transmitiendo a baja potencia, lo que dificultaba su localización.

Como líneas de futuro se deberán analizar cómo estos dispositivos son capaces de adaptarse a las variaciones producidas por todos los usuarios de su entorno, organismos gubernamentales como puede ser la Ofcom o la FCC ya están realizando revisiones técnicas y pruebas experimentales de redes de uso secundario y todo lo que ello llevaría.

La principal idea es aprovechar toda la información relevante y aprender los hábitos de los usuarios o servicios para que de este modo se pueda realizar un uso mucho más eficiente del espectro, sin interferir en ningún momento a los usuarios primarios de las bandas.

Se prevé su ingreso en el terreno comercial, ya que la demanda así lo exige, por último otra de las vías de estudio, sería la manera en las que los dispositivos pudieran llegar a moverse entre frecuencias y adaptarse a múltiples protocolos.

Bibliografía:

- [1] Miguel López Benítez, Fernando Casadevall, "Spectrum Survey in Urban Environment: UPC Campus Nord, Barcelona, Spain", Mobile Communication Research Group (GRCM), Department of Signal Theory and Communications (TSC), Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).
- [2] A. Umbert, J.Pérez-Romero, F. Casadevall, A. Kliks, P. Kryszkiewicz, "On the use of Indoor Radio Environment Maps for HetNets Deployment", Signal Theory and Communications Dept. Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) – Chair of Wireless Communications Poznan University of Technology (PUT).
- [3] Joseph Mitola III, Gerald Q. Maguire Jr., "Cognitive Radio: Making Software Radios More Personal", IEEE Personal Communications, Royal Institute of Technology, Agosto 1999.
- [4] Joseph W. Mwangoka, Paulo Marques, Jonathan Rodriguez, "Exploiting TV White Spaces in Europe: The COGEU Approach", Instituto de Telecomunicaciones, Campus Universitario de Santiago.
- [5] Cuadro de Atribuciones de Frecuencias - CNAF 2013 (B.O.E. de 9 de mayo 2013, actualizado B.O.E. de 16 de abril 2015) - <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/Paginas/CNAF.aspx>
- [6] Notas de Utilización nacional - UN CNAF 2013 (actualizado según Orden IET/614/2015) - <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/CNAF/notasUN2013.pdf>
- [7] Figuras de canalización y disposición de bandas de frecuencias - <http://www.minetur.gob.es/telecomunicaciones/Espectro/CNAF/figuras2013.pdf>
- [8] Wikipedia, "Dividendo Digital"- http://es.wikipedia.org/wiki/Dividendo_Digital
- [9] F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, Mehmet C. Vuran, and Shantidev Mohanty, "A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks", Ian, Georgia Institute of Technology.
- [10] Especificaciones ANTENA - DS3000 - DA753G - DN753 - AOR USA, INC. - <http://www.aorusa.com>
- [11] How to use Rohde & Schwarz® Instruments in MATLAB®. Application Note. 2014.
- [12] R&S®FSL Spectrum Analyzer Specifications. 2013.
- [13] Agilent Spectrum Analysis Basics. Application Note 150. 2006.

Glosario

CNAF: Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias

CR: Cognitive Radio

FCC: Federal Communications Commission

FDD: Frequency Division Duplex

FDMA: Frequency Division Multiple Access

OfCom: Office of Communications (Reino Unido)

RBW: Resolution BandWidth

RC: Radio Cognitiva

REM: Radio Environment Maps

R&S: Rohde & Schwarz

ST: Sweep Time

TDD: Time Division Duplexing

TDMA: Time Division Multiple Access

UIT: Unión Internacional de Telecomunicaciones

UMTS: Universal Mobile Telecommunications System

VBW: Video BandWidth

WCDMA: Wideband Code Division Multiple Access (Acceso múltiple por división de código de banda ancha)

Wi-Fi: Wireless Fidelity

WLAN: Wireless Local Area Network