

Ocupación espectral y modelo de radio cognitiva para Bogotá

Ocupación espectral y modelo de radio cognitiva para Bogotá

Luis Fernando Pedraza Martínez
César Augusto Hernández Suárez
Katherine Johanna Galeano Romero
Enrique Rodríguez de la Colina
Ingrid Patricia Páez



Gracias a Dios porque en estos momentos difíciles, este libro representa un principio para mí y la esperanza del futuro.

Luis Fernando Pedraza

A la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

César Augusto Hernández Suárez

Agradecimientos

Un especial agradecimiento al ingeniero Hans Márquez por su colaboración en el estado del arte de las arquitecturas de radio cognitiva implementadas a nivel mundial.

Enrique Rodríguez de la Colina desea agradecer a la Universidad Autónoma Metropolitana Iztapalapa y al Programa para el Desarrollo Profesional Docente (Prodep) de la Secretaría de Educación Pública de México (SEP) por el apoyo brindado para su participación en la creación de este libro.



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

UD
Editorial

E2
ESPACIOS

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas
© Ocupación espectral y modelo de radio cognitiva para Bogotá
© Luis Fernando Pedraza Martínez, César Augusto Hernández
Suárez, Katherine Johanna Galeano Romero, Enrique Rodríguez de la Colina, Ingrid Patricia Páez
Primera edición, febrero de 2016
ISBN: 978-958-8897-88-2

Dirección Sección de Publicaciones
Rubén Eliécer Carvajalino C.

Coordinación editorial
María Elvira Mejía Pardo

Corrección de estilo
Miguel Fernando Niño

Diagramación
Massayel Cuéllar Hernández

Editorial UD
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Carrera 24 No. 34-37
Teléfono: 3239300 ext. 6202
Correo electrónico: publicaciones@udistrital.edu.co

Ocupación espectral y modelo radio cognitiva en Bogotá / Luis Fernando Pedraza Martínez y otros. -- Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016.
128 páginas : ilustraciones ; 24 cm.
ISBN 978-958-8897-88-2
1. Espectro electromagnético - Bogotá (Colombia) 2. Espectro radioeléctrico - Bogotá (Colombia) 3. Espectro radioeléctrico - Mediciones - Bogotá (Colombia) 4. Telecomunicaciones - Bogotá (Colombia) I. Pedraza Martínez, Luis Fernando.
384 cd 21 ed.
A1518321

CEP-Banco de la República-Biblioteca Luis Ángel Arango

Todos los derechos reservados.
Esta obra no puede ser reproducida sin el permiso previo escrito de la Sección de Publicaciones de la Universidad Distrital.
Hecho en Colombia

Contenido

Prólogo	23
Introducción	25
Capítulo 1. Radio cognitiva	27
Características de la radio cognitiva	28
Capacidad cognitiva	28
Reconfigurabilidad	28
<i>Frecuencia de funcionamiento</i>	29
<i>Modulación</i>	29
<i>Potencia de transmisión</i>	29
<i>Tecnología de comunicación</i>	29
Escenarios y usos en radio cognitiva	32
Escenarios de espectro dedicado (licenciado)	32
<i>Multirradio definida por software en dispositivos móviles (usuario final)</i>	33
<i>Selección de tecnología de acceso a radio en redes inalámbricas compuestas</i>	33
<i>Optimización en el uso de recursos de radio en redes inalámbricas compuestas</i>	33
<i>Acceso cooperativo al espectro entre operadores</i>	33
Escenarios de espectro compartido (no licenciado)	34
Escenarios oportunistas	35
Otros escenarios posibles	37
<i>Femtoceldas cognitivas</i>	37
<i>Redes de radio cognitiva vehicular</i>	38
Radios cognitivas, tecnologías facilitadoras y aplicaciones de DSA	39
Las radios cognitivas en general	39
Las radios cognitivas para el acceso dinámico al espectro	41

Arquitectura de la radio cognitiva	43
Arquitectura física	43
Arquitectura de red	45
<i>Red primaria</i>	45
<i>Red de radio cognitiva</i>	45
Arquitecturas existentes	46
<i>CR1</i>	46
<i>xG</i>	46
<i>Radio cognitiva biológicamente inspirada</i>	46
<i>Corteks</i>	46
<i>Adapt4 XG1</i>	46
<i>Spectrum pooling</i>	47
<i>Corvus</i>	47
<i>IEEE 802.22</i>	47
<i>DIMSUMnet</i>	48
<i>Kuar</i>	49
<i>Knows</i>	49
<i>DRiVE/ Project</i>	49
<i>Flex</i>	49
<i>OCRA network</i>	49
<i>Sparta</i>	50
Gestión del espectro	51
<i>Detección de espectro</i>	51
<i>Decisión de espectro</i>	52
<i>Compartición de espectro</i>	52
<i>Movilidad de espectro</i>	52
Decisión de espectro	52
Análisis del espectro	52
<i>Interferencia</i>	52
<i>Pérdida por trayecto</i>	53
<i>Errores en el enlace inalámbrico</i>	53
<i>Retardo en la capa de enlace</i>	53
<i>Tiempo de permanencia</i>	53
Decisión del espectro	54
Retos en la decisión de espectro	55
<i>Modelo de decisión multivariado</i>	55

<i>Decisión de múltiples bandas del espectro</i>	55
<i>Cooperación con la reconfiguración</i>	55
<i>Decisión del espectro sobre bandas del espectro heterogéneo</i>	56
Movilidad de espectro	56
<i>Handoff</i> de espectro	56
Desafíos en la movilidad de espectro	57
<i>Detección de usuarios primarios</i>	57
<i>Decisión de Handoff espectral</i>	57
<i>Selección de canal objetivo</i>	57
<i>Recuperación de enrutamiento</i>	58
<i>Modelo de Handoff espectral</i>	58
<i>Retardos y pérdidas</i>	58
<i>Handoff vertical y horizontal</i>	58
<i>Movilidad del espectro en el dominio del tiempo</i>	58
<i>Movilidad del espectro en el espacio</i>	59
Compartición de espectro	59
Procedimiento para la compartición del espectro	59
Técnicas de compartición del espectro	60
<i>Compartición del espectro centralizado</i>	60
<i>Compartición del espectro distribuido</i>	60
<i>Compartición del espectro cooperativo</i>	60
<i>Compartición del espectro no cooperativa</i>	61
<i>Compartición del espectro sobre capa</i>	62
<i>Compartición del espectro subyacente</i>	62
Desafíos en la compartición del espectro	63
<i>Canal de control común (CCC)</i>	63
<i>Rango dinámico de alcance de radio</i>	63
Capítulo 2. Detección de espectro	65
Modelos de actividad del usuario primario	67
Detección de los usuarios primarios	68
Detección de transmisor (detección no cooperativa)	68
<i>Detección de energía</i>	69
<i>Detección de filtro adaptado y detección coherente</i>	73
<i>Detección de características cicloestacionarias</i>	74
<i>Detección Wavelet</i>	77

Detección del receptor	77
Detección cooperativa	78
Detección basada en la interferencia	80
Equipos utilizados en la detección de espectro	81
Analizador de espectro	81
<i>Relación entre los dominios del tiempo y frecuencia</i>	82
<i>Analizador de espectro superheterodino</i>	82
Equipos de radio definida por software	83
<i>USRP</i>	84
<i>Rendimiento del detector de energía</i>	87
<i>Rendimiento detector cicloestacionario</i>	87
Capítulo 3. Metodología de medición de espectro	89
Frecuencia	91
Localización	92
Amplitud	92
Capítulo 4. Resultados de medición de espectro	95
Capítulo 5. Modelo de radio cognitiva propuesto	101
Objetivos de usuario a usuario	103
Cognición	103
Auto-organización	104
Reconfiguración	105
Aplicaciones	106
Epílogo	107
Referencias	109

Índice de figuras

Figura 1. Mediciones de uso del espectro	25
Figura 2. Concepto de hueco espectral	28
Figura 3. Concepto de radio cognitiva	30
Figura 4. Ejemplo de optimización de uso de recursos radio	34
Figura 5. Izquierda: red de puntos de acceso; derecha: red P2P, junto con la mejora asociada a la utilización del espectro	35
Figura 6. Ilustración conceptual de la coexistencia de una red cognitiva (secundaria) y una red licenciada (primaria)	36
Figura 7. Transmisión cooperativa	39
Figura 8. Ciclo cognitivo	39
Figura 9. Ciclo cognitivo básico	42
Figura 10. Marco de gestión del espectro para redes de radio cognitiva	42
Figura 11. Arquitectura física de un dispositivo de radio cognitiva: (a) transreceptor de radio cognitiva y (b) arquitectura front-end de banda ancha RF / analógico	43
Figura 12. Clasificación de las técnicas de monitorización de espectro	51
Figura 13. Clasificación de la compartición del espectro en las redes de radio cognitiva	61
Figura 14. Clasificación de las técnicas de detección de espectro	68
Figura 15. Detección de transmisor primario	69
Figura 16. Diagrama de detector de energía	70
Figura 17. Curvas de la característica operativa del receptor (ROC) para el detector de energía bajo diferentes valores de SNR	71
Figura 18. Diagrama de bloques del filtro adaptado	73
Figura 19. Diagrama de bloques del detector de señales cicloestacionarias	76
Figura 20. Problema de detección del transmisor	77
Figura 21. Detección del receptor primario	78

Figura 22. Detección cooperativa del transmisor en un entorno con alta presencia de desvanecimientos y sombras	79
Figura 23. Modelo de temperatura de interferencia	81
Figura 24. Analizador de espectro desde 9 kHz a 7.1 GHz de intervalo de lectura	81
Figura 25. Señal en los dominios del tiempo y frecuencia	82
Figura 26. Diagrama de bloques de un clásico analizador de espectro superheterodino	82
Figura 27. USRP N210	84
Figura 28. Implementación de la herramienta de desarrollo de software de GNU Radio	86
Figura 29. Curvas ROC del detector de energía para USRP N210	87
Figura 30. Curvas ROC del detector cicloestacionario para USRP N210	88
Figura 31. Configuración de las mediciones con el analizador de espectro	90
Figura 32. (a). Diagrama de bloques de configuración de las mediciones con el equipo Ettus USRP N210. (b) Equipos USRP N210 utilizados en las mediciones	90
Figura 33. Puntos de medición (Mapa)	92
Figura 34. Ciclo de trabajo del rango completo de espectro medido durante la campaña en el punto 4 de medición mostrado en la figura 33	95
Figura 35. Porcentaje del ciclo de trabajo de acuerdo a los servicios ofrecidos en las bandas medidas para los diferentes puntos de medición mostrados en la figura 33	96
Figura 36. Ciclo de trabajo normalizado de 54 MHz a 216 MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33	96
Figura 37. Ciclo de trabajo normalizado para todas las bandas de TV analógica para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33	97
Figura 38. Ciclo de trabajo normalizado en la banda de TV digital para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33	97
Figura 39. Ciclo de trabajo normalizado de 800 MHz a 940 MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33	98
Figura 40. Ciclo de trabajo normalizado de 1850 MHz a 2300 MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33	98
Figura 41. Ciclo de trabajo normalizado de 2300MHz a 2650MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33	99
Figura 42. Arquitectura de red para compartir el espectro	102
Figura 43. Relación del modelo con los objetivos de usuario a usuario, la capacidad cognitiva, la capacidad de auto-organización y la capacidad de reconfiguración	103
Figura 44. Modelo de RC propuesto para Bogotá	106

Índice de tablas

Tabla 1.	Características de las técnicas fundamentales de detección de espectro	76
Tabla 2.	Especificaciones de los equipos para mediciones con el analizador de espectro	89
Tabla 3.	Especificaciones de los equipos para mediciones con el USRP N210	90
Tabla 4.	Umbral de detección por banda para el analizador de espectro	93
Tabla 5.	Umbral de detección por banda para el USRP N210	94

Abreviaturas

A/D:	Analógico / digital
AB:	Ancho de banda
ADC:	Convertidor analógico digital
AG:	Algoritmo genético
AGC;	Control automático de ganancia
AI:	Inteligencia artificial
ANE:	Agencia nacional del espectro
AOA:	Ángulo de llegada
AP:	Punto de acceso
API:	Interfaz de programación de aplicaciones
ASAP:	Protocolo de adaptación del espectro automático
AWGN:	Ruido gaussiano blanco aditivo
BCL:	Lista de canales de respaldo
BER:	Tasa de error de bit
BS:	Estación base
CAB:	Banda de acceso coordinado
CCC:	Canal de control común
CDMA:	Acceso múltiple por división de código
CER:	Conocimiento del entorno de radio
CMA:	Acceso al medio cognitivo
CRAHN:	Red ad hoc de radio cognitiva
CRN:	Red de radio cognitiva
CTS:	Listo para enviar
DARPA:	Agencia de proyectos de investigación avanzados de defensa
DDC:	Convertidor digital de bajada
DEC:	Densidad espectral cíclica
DECT:	Telecomunicaciones inalámbricas digitales mejoradas

DEP:	Densidad espectral de potencia
DIMSUMnet:	Gestión dinámica e inteligente del espectro para redes móviles ubicuas
DRIVE:	Servicios de internet en ambientes vehiculares
DSA:	Acceso dinámico al espectro
DSL:	Línea de abonado digital
DSP:	Procesador digital de señales
DSRC:	Comunicación dedicada de corto alcance
DTV:	Televisión digital
DUC:	Convertidor digital de subida
DVD:	Disco versátil digital
EIRP:	Potencia irradiada efectiva isotrópica
EM:	Expectativa - maximización
ETSI:	Instituto de estándares de telecomunicaciones europeas
FAC:	Función de autocorrelación cíclica
FCC:	Comisión federal de comunicaciones
FDM:	Multiplexación por división de frecuencia
FDOA:	Diferencia de la frecuencia de llegada
FFT:	Transformada rápida de Fourier
FOA:	Frecuencia de llegada
FPGA:	Arreglo de compuertas programables en campo
FTP:	Protocolo de transferencia de archivos
GCC:	Canal de control grupal
GLS:	Sistema de geolocalización
GPP:	Procesador de propósito general
GPS:	Sistema de posicionamiento global
GRC:	Aplicación para la creación de fluajogramas
GSM:	Sistema global para las comunicaciones móviles
HE:	Homo equalis
HMM:	Modelo oculto de Markov
HTTP:	Protocolo de transferencia de hipertexto
IDE:	Entorno de desarrollo integrado
IEEE:	Instituto de ingenieros eléctricos y electrónicos
IF:	Frecuencia intermedia
ISM:	Industriales, científicas y médicas
ITU:	Unión internacional de telecomunicaciones
KUAR:	Radio agil de la Universidad de Kansas

LNA:	Amplificador de bajo ruido
LO:	Oscilador local
LTE:	Evolución a largo plazo
MAC:	Control de acceso al medio
MER:	Mapas del entorno de radio
MIMO:	Múltiples entradas - múltiples salidas
MUSIC:	Clasificación de señal múltiple
NTIA:	Administración nacional de la información y las comunicaciones
OFDM:	Multiplexación por división de frecuencia ortogonal
P2P:	Entre pares
PDA:	Asistente digital personal
PE:	Motor de políticas
PHY:	Capa física
PLL:	Lazo enganchado en fase
POMDP:	Proceso de decisión de Markov parcialmente observable
QAM:	Modulación de amplitud en cuadratura
QoS:	Calidad de servicio
QPSK:	Modulación por desplazamiento de fase
RAN:	Red de acceso a radio
RANMAN:	Administrador designado de la RAN
RAT:	Tecnología de acceso a radio
RBW:	Ancho de banda de resolución
RC:	Radio Cognitiva
RF:	Radiofrecuencia
RISC:	Computador con conjunto de instrucciones reducidas
RKRL:	Lenguaje de representación de conocimiento de radio
ROC:	Característica operativa del receptor
RRS:	Sistema de radio reconfigurable
RTS:	Solicitud de envío
Rx:	Recepción
SCC:	Comité coordinador de estándares
SDR:	Radio definida por software
SFDR:	Margen dinámico libre de espurios
SINR:	Relación señal a interferencia más ruido
SMA:	Acceso multiplexado estadístico
SNR:	Relación señal a ruido
SPIM:	Agente de manejo de información del espectro

SRAM:	Memoria estática de acceso aleatorio
SSR:	Motor de estrategias
SUG:	Grupo de usuarios secundarios
TCP:	Protocolo de control de transporte
TDD:	Duplexado por división de tiempo
TDMA:	Acceso múltiple por división de tiempo
TDOA:	Diferencia del tiempo de llegada
TIC:	Tecnologías de la información y las comunicaciones
TOA:	Tiempo de Llegada
TPC:	Control de potencia en la transmisión
TV:	Televisión
Tx:	Transmisión
UCC:	Canal de control universal
UDP:	Protocolo de datagrama de usuario
UHD:	Controlador de hardware universal
UHF:	Frecuencia ultra alta
UMTS:	Sistema de telecomunicaciones móviles universal
UP:	Usuario primario
US:	Usuario secundario
USB:	Bus de serie universal
USRP:	Sistema universal de radio periférico por software
UWB:	Banda ultra ancha
V2R:	Vehículo a carretera
V2V:	Vehículo a vehículo
VCO:	Oscilador controlado por tensión
WISP:	Proveedor de servicio de internet inalámbrico
WLAN:	Red inalámbrica de área local
WRAN:	Red inalámbrica de área regional
WSS:	Estacionario en sentido amplio
xG:	Siguiente generación
X-MAC:	Protocolos de acceso al medio para xG

Prólogo

Este libro es resultado del proyecto de investigación titulado *Medición, estudio y análisis de la ocupación espectral en la ciudad de Bogotá, que permita proponer un modelo de radio cognitiva para incrementar la eficiencia en el uso del espectro radioeléctrico*, financiado por el Centro de Investigaciones y Desarrollo Científico de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, con la alianza entre los grupos de investigación *Gidemutus, Internet Inteligente y Armos*. Los objetivos desarrollados en este libro corresponden a: 1) estudiar las técnicas de detección de espectro radioeléctrico actuales y seleccionar las que mejor se adecuen a Bogotá. 2) Diseñar una metodología para realizar la medición del espectro radioeléctrico en Bogotá, definiendo claramente sus procedimientos y recomendando las características técnicas necesarias de los equipos para las medidas. 3) Realizar una campaña de mediciones en zonas específicas de Bogotá. 4) Estudiar y analizar los datos obtenidos a partir de la medición del espectro radioeléctrico en Bogotá. 5) Desarrollar una propuesta de modelo de radio cognitiva para las redes que operan en Bogotá.

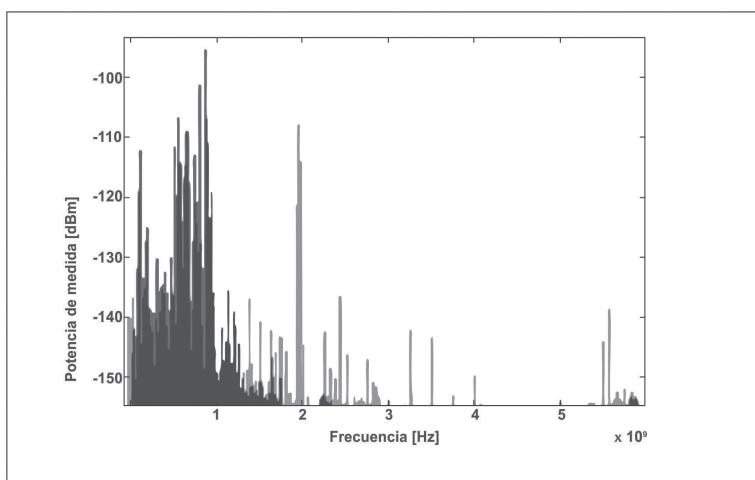
El espectro radioeléctrico es un bien limitado, que prácticamente está asignado en su totalidad a los proveedores de servicios inalámbricos, en las bandas de frecuencia donde se facilita la mejor propagación de las señales. Por lo tanto, se han propuesto tecnologías emergentes que conciben su uso y su compartición de una manera eficiente. Lo anterior implica un cambio en la concepción técnica y regulatoria en el uso del espectro. Para el análisis de la problemática anterior, esta investigación se centra en la parte técnica, en lo que respecta a la medición del espectro y a una propuesta de un modelo de radio cognitiva para Bogotá. La metodología para el desarrollo de la investigación consiste en la selección y la descripción de los equipos utilizados en las mediciones, y el ajuste de las variables de amplitud, frecuencia y localización; con el fin de dar cumplimiento a la reglamentación vigente, en lo que respecta a las mediciones del espectro radioeléctrico. En los resultados se observa el grado de utilización de espectro en diferentes puntos de Bogotá y se propone un modelo de radio cognitiva para mejorar el uso del espectro.

El libro se organiza de la siguiente forma: en el capítulo uno se presenta y se detalla el concepto de radio cognitiva. En el capítulo dos se describen las técnicas de detección de espectro y se indica cuáles son usadas en esta investigación. En el capítulo tres se presenta la metodología utilizada en las mediciones de espectro. El capítulo cuatro analiza los resultados de medición de espectro obtenidos. Y finalmente en el capítulo cinco se hace una descripción del modelo de radio cognitiva propuesto para Bogotá.

Introducción

Los estudios han demostrado que la mayoría de las bandas licenciadas del espectro radioeléctrico son subutilizadas en el dominio del tiempo y del espacio [1-3], lo cual resulta en “espacios en blanco” que no son utilizados en el dominio tiempo-frecuencia para una ubicación en particular. El uso del espectro se hace principalmente alrededor de ciertas bandas, mientras que una cantidad considerable del espectro está inutilizado como se muestra en la figura 1, donde se observa cómo el uso del espectro es más intenso y competitivo en frecuencias inferiores a 3 GHz; mientras que el espectro es subutilizado en las bandas de 3 a 6 GHz [1]. La Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) ha informado también sobre variaciones temporales y geográficas en el uso del espectro en un rango de 15 a 85% [2]. Por otro lado, las políticas de asignación fija del espectro no permiten que los usuarios sin licencia utilicen el espectro que es subutilizado por parte de los usuarios licenciados. Este problema, junto con la creciente demanda de servicios inalámbricos y de espectro radioeléctrico ha dado lugar a la escasez de espectro para aplicaciones inalámbricas [4].

Figura 1. Mediciones de uso del espectro



Fuente: tomado de [1]

Esto requiere un nuevo estándar de comunicación que les permita a los usuarios sin licencia, también conocidos como usuarios secundarios (US) o usuarios de radio cognitiva, utilizar las bandas desocupadas que están asignadas a los usuarios licenciados, igualmente llamados usuarios primarios (UP). Sin embargo, este acceso oportunista no debe interrumpir ningún proceso de los usuarios primarios en la banda. Por lo tanto, los US deben estar informados de la actividad del UP en la banda de interés. Los US deben observar los huecos espectrales y el estado de actividad de los UP, con el fin de explotar las bandas libres y también cuando el UP inicie su actividad, se debe evacuar la banda tan pronto como sea posible. La radio cognitiva (RC) realiza esta actividad mediante la interacción dinámica con el entorno y la alteración de los parámetros de funcionamiento, con el objetivo de explotar el espectro no utilizado sin interferir con los UP [5, 6]. La FCC les permitió a los usuarios no licenciados el uso del espectro de televisión sin utilizar en donde esté libre, lo que respalda el concepto sobre RC [6]. El Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) también ha apoyado el tema de la RC mediante el desarrollo de la norma IEEE 802.22 para redes inalámbricas de área regional (WRAN), que funciona en los canales de televisión no utilizados [4, 7].

En este libro se estudian las funcionalidades que involucra la RC, luego se describe la metodología y los resultados de la medición de espectro en Bogotá, que muestran que el uso del espectro es bastante moderado y, finalmente, se detalla el modelo de red propuesto, que posee la capacidad de obtener información del entorno, de tomar decisiones con base en la información recogida, de configurar los parámetros de funcionamiento y de cumplir con los objetivos de los usuarios.

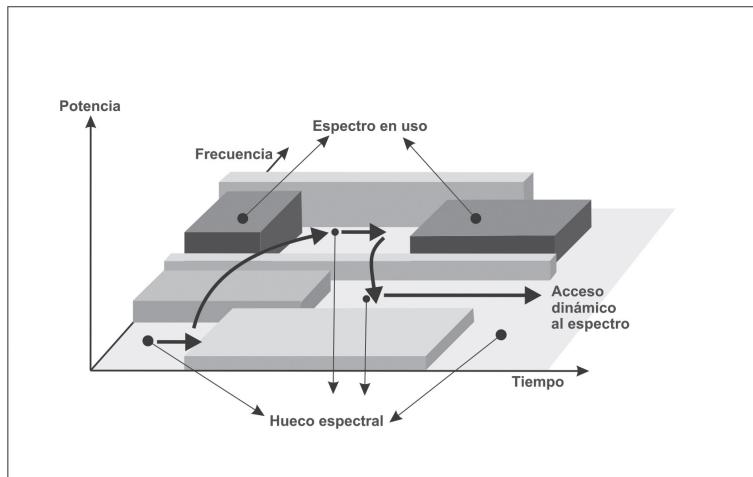
Capítulo 1. Radio cognitiva

La radio cognitiva (RC) está emergiendo como una tecnología promisoria e innovadora, que tiene como fin, solventar y solucionar uno de los grandes problemas de los sistemas de comunicaciones inalámbricas de próxima generación: la escasez de espectro radioeléctrico y la subutilización de este. Esta tecnología provee la capacidad de compartir de una manera oportunista el canal inalámbrico con los usuarios que poseen una parte licenciada del espectro [8, 9].

El concepto de RC fue creado por Joseph Mitola III en 1999, como “el punto en el cual los asistentes digitales personales (PDA) inalámbricos y las redes relacionadas son, en términos computacionales, lo suficientemente inteligentes con respecto a los recursos de radio y las correspondientes comunicaciones de ordenador a ordenador como para detectar las necesidades eventuales de comunicación del usuario, como una función del contexto de uso y proporcionarle los recursos de radio y servicios inalámbricos más adecuados a ese mismo instante” [5]. Sin embargo, varias entidades importantes han dado su punto de vista al respecto, según la Administración Nacional de la Información y las Comunicaciones (NTIA), la RC es una radio o sistema que detecta su entorno electromagnético de operación y puede ajustar de forma dinámica y autónoma sus parámetros de operación de radio para modificar la operación del sistema, para maximizar el rendimiento, reducir la interferencia y facilitar la interoperabilidad [10]. Según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), la RC es una radio o sistema que detecta y está al tanto de su entorno, y se puede ajustar de forma dinámica y autónoma de acuerdo con sus parámetros de funcionamiento de radio. Según el IEEE, la RC es un tipo de radio que puede detectar de forma autónoma y razonar sobre su entorno y adaptarse a este [3]. Según la FCC, RC es una radio que “puede cambiar los parámetros del transmisor basado en la interacción con su entorno” [11].

La RC tiene la capacidad de proveer ancho de banda a usuarios móviles, a través de arquitecturas inalámbricas heterogéneas, aumentando significativamente la eficiencia espectral, debido a que permite que el US comparta el espectro de manera oportunista con el UP [1], a partir de las porciones del espectro que no están siendo usadas en ese momento, también conocidas como huecos espectrales, oportunidades spectrales o espacios en blanco, como se muestra en la figura 2.

Figura 2. Concepto de hueco espectral



Fuente: tomado de [8]

Características de la radio cognitiva

Las principales características de la RC, que le confieren todas las capacidades descritas anteriormente, son la capacidad cognitiva y la reconfigurabilidad.

Capacidad cognitiva

La capacidad cognitiva es la tecnología capaz de capturar la información de su entorno de radiofrecuencia (RF) para identificar los segmentos del espectro que no están siendo utilizados, seleccionar el mejor espectro posible y definir los parámetros de operación más adecuados, con el objetivo de evitar la interferencia con otros usuarios [12, 13]. Esta capacidad no solo puede apoyarse en el monitoreo de potencia en una banda de frecuencias de interés, sino que las técnicas más sofisticadas, como el aprendizaje autónomo y la decisión de acción, son requeridas para captar las variaciones temporales y espaciales en el entorno de radio y evitar la interferencia a otros usuarios.

Reconfigurabilidad

La reconfigurabilidad es la capacidad de cambiar de forma dinámica, los diferentes parámetros de operación relacionados con la transmisión o la recepción, como frecuencia, potencia y modulación, con el objetivo de habilitar la radio para ser programada dinámicamente, esto con el fin de transmitir y recibir en una gran variedad de frecuencias en función del ambiente de radio y usar diferentes tecnologías de acceso a la transmisión, soportado por su diseño de *hardware* [12-14]. Esta capacidad le permite a la RC adaptarse fácilmente al entorno radio dinámico. Existen varios parámetros reconfigurables que pueden ser incorporados en la RC, como se explica a continuación [11]:

Frecuencia de funcionamiento

Una RC es capaz de cambiar la frecuencia de operación y con base en la información del entorno de radio determinar la frecuencia de funcionamiento más adecuada para que la comunicación se pueda realizar de forma dinámica.

Modulación

Una RC debe reconfigurar el esquema de modulación según las necesidades de los usuarios y de las condiciones del canal. Por ejemplo, en el caso de aplicaciones sensibles al retardo, la velocidad de datos es más importante (hasta cierto punto) que la tasa de error. Por lo tanto, se debe seleccionar un esquema de modulación que permita una capacidad de caudal superior. Por el contrario, las aplicaciones sensibles a las pérdidas se centran en la tasa de error y requieren un esquema de modulación con baja tasa de error de bit.

Potencia de transmisión

La potencia de transmisión se puede reconfigurar dentro de las limitaciones de potencia. El control de potencia permite la configuración dinámica de potencia de transmisión dentro del límite permitido. Si no es necesaria mayor potencia de operación, la RC reduce la potencia del transmisor a un nivel inferior y así reducir la interferencia para permitir que más usuarios compartan el espectro.

Tecnología de comunicación

Una RC también puede ser utilizada para proporcionar interoperabilidad entre diferentes sistemas de comunicación. Los parámetros de transmisión de una RC pueden ser reconfigurados al inicio de una transmisión y durante esta.

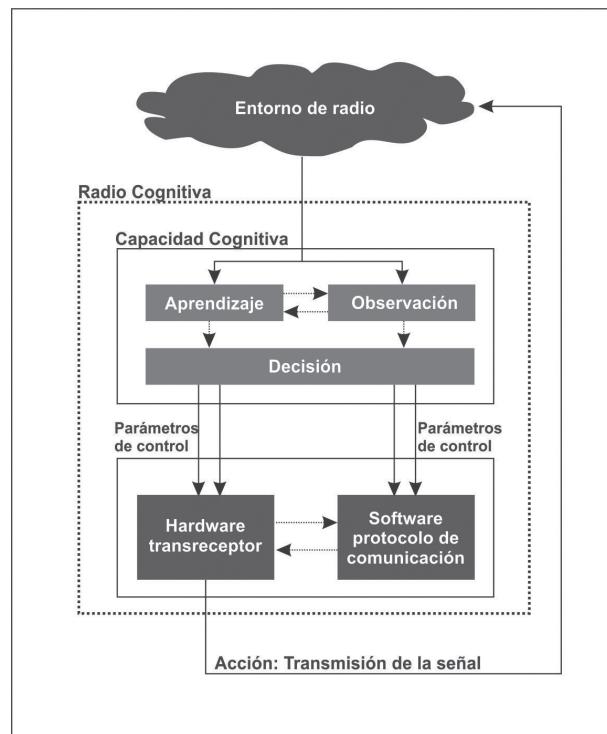
De acuerdo con las características del espectro, estos parámetros pueden ser reconfigurados de forma que si la RC cambia su transmisión a una banda del espectro diferente, el transmisor y el receptor reconfiguran los parámetros y utilizan los apropiados respecto al protocolo de comunicación y al esquema de modulación.

En la figura 3 se muestra el concepto de RC mediante la capacidad cognitiva y la reconfigurabilidad. En primer lugar, la RC identifica la información de radio por medio de la observación y los procesos de aprendizaje, y luego, toma las decisiones apropiadas.

Basada en estas decisiones, la RC reconfigura su *software* (por ejemplo, los protocolos de comunicación) y el *hardware* (por ejemplo, una frecuencia de radio para el RF *front-end* y una antena).

Mediante la capacidad cognitiva y la reconfigurabilidad, la RC permite el uso del espectro no utilizado temporalmente [6]. Si esta banda es usada por un UP, el US se mueve a otra oportunidad espectral para evitar interferir al UP, como se muestra en la figura 2. Esta nueva área de investigación prevé el desarrollo de las redes de radio cognitiva (CRN) para mejorar la eficiencia espectral.

Figura 3. Concepto de radio cognitiva



Fuente: tomado de [15]

La capacidad cognitiva y la reconfigurabilidad son las características fundamentales de la RC, y a partir de estas se potencializan un mayor número de características derivadas, como la capacidad de negociar el espectro con otros usuarios para hacer más eficiente la utilización del espectro. Otras características derivadas se mencionan a continuación:

- Ya sea directa o indirectamente, el dispositivo con RC es capaz de adquirir la información del ambiente en el que opera. De acuerdo con esta característica, la RC puede seleccionar la frecuencia de operación y el formato de transmisión, o actuar como un puente entre dos sistemas, al recibir la señal en una frecuencia y un formato, y retransmitirla en otra frecuencia y formato, más adecuados para su reconocimiento por parte del sistema receptor [16]. De acuerdo con lo anterior, la tecnología de RC puede mejorar su acceso en zonas rurales.
- La RC puede seleccionar la modulación más apropiada para una transmisión en particular, lo que permite la interoperabilidad entre los sistemas. De esta forma, la RC puede comunicarse con sistemas que hacen uso de esquemas de acceso al canal como acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) y acceso múltiple por división de código (CDMA), dependiendo del tipo de sistema de la

comunicación. Otros usos que se le pueden dar a la modulación adaptativa es la selección del ancho de banda (AB) basado en la disponibilidad del espectro y la tasa de transferencia deseada. También se puede pensar en nuevos tipos de modulación en RC, como la posibilidad de dividir una señal para que ocupe bandas de frecuencias no contiguas simultáneamente [17].

- La RC puede ser diseñada para arquitecturas de red centralizada, distribuida, ad-hoc o redes *mesh* [18] y estar en capacidad de ser usada, tanto para aplicaciones licenciadas como no licenciadas. De esta forma, las funcionalidades de la RC pueden ser aprovechadas por una estación base (BS) dentro de una red centralizada o *mesh*, para coordinar los accesos al medio de cada uno de los usuarios pertenecientes a la red o puede ser utilizada en redes ad-hoc, las cuales no poseen una topología de red definida, donde se pueden conectar dos dispositivos sin necesidad de un coordinador en la comunicación [19, 20].
- La RC también tiene la capacidad de cambiar rápidamente la frecuencia de operación, un requerimiento en los procesos de negociación e intercambio del espectro que se puede dar entre UP y US, lo cual contribuye de manera directa en la eficiencia espectral y en la reducción de interferencia co-canal con otros usuarios que hacen uso del espectro en un momento determinado.
- El control de potencia en la transmisión (TPC) es otra característica que le permite a un dispositivo de RC configurar dinámicamente los niveles de potencia de acuerdo con las exigencias en el proceso de transmisión. Bajo estas condiciones, los dispositivos deben tener en cuenta la cercanía de dispositivos vecinos, la máxima potencia permitida en la localización geográfica o la cantidad mínima de potencia que se requiere en el proceso de transmisión, para que la información sea enviada de manera confiable, minimizando los posibles errores en la transmisión [21].
- La RC puede incorporar un mecanismo que permita conocer su ubicación con respecto a la de otros transmisores, y con base en ello, seleccionar parámetros adecuados para la transmisión, como la potencia y la frecuencia permitidas. Una opción para realizar esta tarea es la geolocalización, que hace uso del Sistema de Posicionamiento Global (GPS) para poder determinar la localización geográfica del dispositivo. Esta información puede ser introducida a la base de datos que maneje la red y ser usada por ella, con el propósito de evitar posibles interferencias con otros dispositivos [22].
- La RC también está en la capacidad de compartir el espectro con US. Algunos mecanismos de compartición del espectro están sujetos al cobro de un costo adicional por el uso del espectro, en este sentido la RC propendería a incurrir en el menor costo posible por la transacción, automatizando todos o parte de los procesos requeridos para negociar los términos de arrendamiento del espectro. Estos términos se refieren a las frecuencias disponibles, niveles de potencia, tiempo de permanencia en el espectro [11].

Escenarios y usos en radio cognitiva

El estado del arte para los escenarios de uso de la RC se describe en una serie de esfuerzos de estandarización, [23-27], de corporaciones sin ánimo de lucro y proyectos europeos de investigación en curso como *Faramir*¹, que tiene por objetivo la investigación y el desarrollo de técnicas para incrementar la eficiencia espectral en los futuros sistemas inalámbricos [28-30]. Como un elemento común, todos estos casos de uso implícitamente suponen una capacidad de reconfiguración del equipo de radio (ya sea en el lado de la red o en el lado de la terminal, o ambos) en términos de parámetros como la frecuencia de funcionamiento, ancho de banda o tecnología de acceso a radio (RAT) [31].

En general, los diferentes escenarios se basan en tres áreas básicas de clasificaciones o puntos de vista que dominan el uso de acceso dinámico al espectro (DSA) y los sistemas de RC, ya sea como limitaciones u oportunidades. Estas áreas de clasificación son:

- Cuestiones regulatorias y reglamentación de licencias;
- consideraciones económicas y modelos de negocio, incluidos los servicios que se ofrecen, y
- posibilidades y oportunidades tecnológicas.

Existe una cantidad razonable de literatura para considerar estos aspectos, especialmente en el dominio de la regulación y de los impactos económicos [32-42]. También algunos proyectos europeos, como el recientemente iniciado *Quasar Spectrum*, hacen frente a este problema. Los escenarios explícitos y la clasificación no son críticos para el proyecto *Faramir*, excepto para especificar prototipos y modelos de explotación. Esto es así porque el proyecto *Faramir* se centra sobre todo en el suministro de tecnologías facilitadoras, que son aplicables para la mayoría de los escenarios posibles de las áreas de clasificación anteriores. Las cuestiones regulatorias están presentes en cualquier debate de la RC, por lo tanto, a continuación se categoriza los diversos casos de uso y escenarios de acuerdo con las políticas de licenciamiento relacionadas con las bandas de frecuencias pertinentes. Esta clasificación se alinea en gran medida con las realizadas en [23, 24, 43].

Escenarios de espectro dedicado (licenciado)

En esta clase de escenarios se supone que todo el espectro relevante es licenciado. En particular, a uno o más operadores les son asignados derechos exclusivos para el uso dedicado de porciones del espectro radioeléctrico. Los ejemplos que pertenecen a este grupo son los escenarios del informe en borrador del Instituto de Estándares de Telecomunicaciones Europeas (ETSI) [23], el escenario en el Anexo A del estándar IEEE 1900.4 del comité coordinador de estándares (SCC)-41 [24] y los escenarios que figuran en el Informe de la ITU [25]. Todos estos escenarios están en un número

¹ *Faramir* es un proyecto cuyo objetivo principal es investigar y desarrollar técnicas para aumentar la conciencia radio ambiental y espectral de los futuros sistemas inalámbricos.

más pequeño de clases generales, que se caracterizan por los siguientes usos de las tecnologías de RC [43].

Multirradio definida por software en dispositivos móviles (usuario final)

Este escenario supone que la tecnología de multirradio definida por *software* se utiliza para realizar la reconfiguración de los equipos de radio en los dispositivos móviles (terminales de usuario final). Una radio reconfigurable es capaz de, entre otras cosas, realizar un barrido de las frecuencias de radio y hacer una selección autónoma de la RAT con base en las preferencias del usuario [43].

Selección de tecnología de acceso a radio en redes inalámbricas compuestas

En este escenario, un operador utiliza múltiples redes de acceso a radio (RAN) en diferentes bandas de frecuencia asignadas al operador bajo la regulación existente, y el operador desea combinar todas estas redes de radio individuales en una única red compuesta. Mediante el monitoreo de la carga de tráfico en las diferentes redes de radio, el sistema de gestión de la red cognitiva puede decidir sobre la asignación a los usuarios de las diferentes RAT de una manera dinámica, lo que conduce a un uso óptimo de la capacidad compuesta de las bandas de frecuencia. Este escenario también es aplicable a la situación en la que las redes inalámbricas no son propiedad de un único operador, sino de varios operadores que desean cooperar con el fin de gestionar sus redes de radio compuestas en forma conjunta y eficientemente [43].

Optimización en el uso de recursos de radio en redes inalámbricas compuestas

En este escenario, uno o más operadores poseen múltiples RAN en diferentes bandas de frecuencia. Se asume que los nodos de radio en el lado de la red y en las terminales tienen la capacidad de reconfiguración por medio de, por ejemplo, la tecnología de radio definida por *software* (SDR). Estos nodos de radio reconfigurables en el lado de la red ajustan dinámicamente sus parámetros de funcionamiento o recursos de radio, con el fin de cumplir con algunos objetivos predefinidos (por ejemplo, aumentar la capacidad y mejorar la QoS) de acuerdo con las actuales regulaciones de radio. Los mismos principios generales pueden aplicarse también en el caso de las RAN existentes, ya sea en forma centralizada o de manera distribuida, distribuyendo la toma de decisiones sobre la reconfiguración de los terminales con el fin de optimizar el uso de recursos de radio y mejorar la QoS [43].

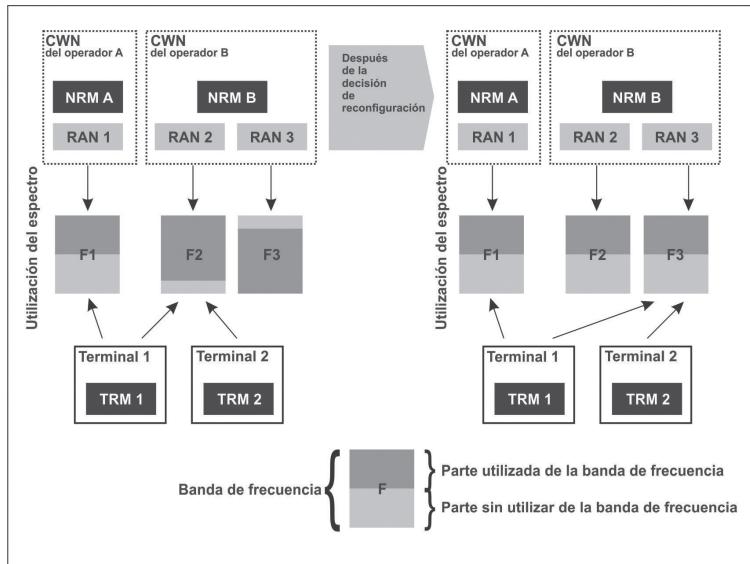
Acceso cooperativo al espectro entre operadores

En este escenario, el énfasis no está en la reconfiguración o la gestión de las redes de los operadores individuales, sino en permitir el uso más eficiente de recursos y especialmente, el uso del espectro entre los operadores. Técnicas relacionadas con este escenario incluyen una variedad de esquemas dinámicos de compartición del espectro como mecanismos basados en el mercado, agentes de espectro, entre otros [43].

En resumen, el objetivo clave en esta clase de casos de uso es la optimización de los recursos de radio entre los diferentes operadores o entre diferentes RAN. El caso de uso A.3 en [24], así como el Caso 4 en [25] describen ejemplos en los que a través

de terminales reconfigurables conectadas a diferentes redes, se puede mejorar un uso originalmente desequilibrado de los recursos de radio. La figura 4 ilustra esta idea.

Figura 4. Ejemplo de optimización de uso de recursos radio



Fuente: tomado de [24].

Con base en lo que se conoce como información de contexto —esencialmente, cualquier pieza de información distinta a las políticas necesarias para la toma de decisiones en la optimización de recursos de radio—, un gestor de reconfiguración de la red establece en cualquier punto en el tiempo una distribución deseable del uso de recursos radio sobre estas redes o sobre diferentes operadores.

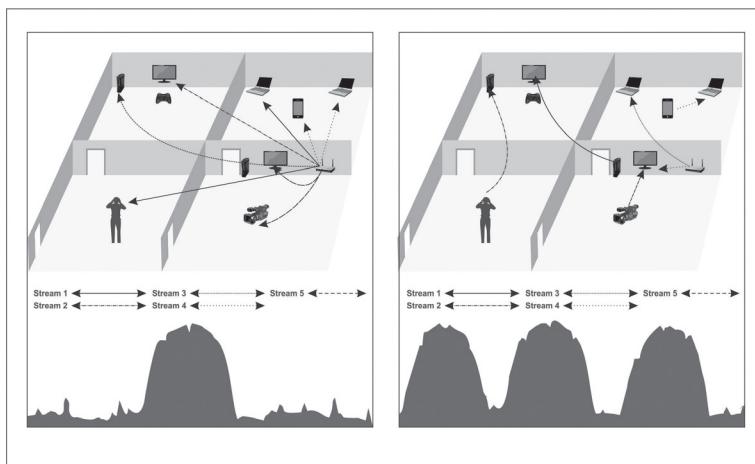
Escenarios de espectro compartido (no licenciado)

Esta clase de escenarios y casos de uso se asocia con el espectro no licenciado (libre). Los usuarios acceden al espectro de manera autónoma, cuando y donde lo deseen. Este tipo de partición del espectro ya existe en las denominadas bandas industriales, científicas y médicas (ISM) donde, por ejemplo, los equipos para los estándares IEEE 802.11, IEEE 802.15 y telecomunicaciones inalámbricas digitales mejoradas (DECT) acceden todos al mismo espectro. La introducción de los conceptos cognitivos en estos sistemas parece por lo tanto bastante sencilla. El caso de uso U.1: *Redes de radio cognitiva en bandas sin licencia* reportado en [23], describe este escenario [43].

A modo de ejemplo, el *escenario multirradio doméstico* en el proyecto *Aragorn* [29] describe una visión para el hogar del futuro, donde los residentes pueden acceder a una amplia gama de dispositivos y servicios (por ejemplo, servidores multimedia, dispositivos PDA e impresoras inalámbricas, reproductores de disco versátil digital (DVD), cámaras de seguridad del hogar y consolas de juegos e incluso máquinas de café y neveras). La figura 5 describe este escenario. Con una red doméstica actual

con punto de acceso (AP), basado en, por ejemplo la tecnología IEEE 802.11, se pueden producir muchos problemas que son evitables cuando se implementa un sistema cognitivo basado en la comunicación entre pares (P2P). Cuando se evita la comunicación mediante el AP, un resultado inmediato es una duplicación de la eficiencia espectral, pero más allá de esta ventaja obvia, un enfoque cognitivo daría lugar a más beneficios. Los recursos espectrales disponibles se pueden utilizar de manera más eficiente, la interferencia se puede evitar de forma adaptativa, la utilización de recursos puede ser optimizada para la calidad de servicio requerida, entre otros [43].

Figura 5. Izquierda: red de puntos de acceso; derecha: red P2P, junto con la mejora asociada a la utilización del espectro



Fuente: tomado de [29].

Escenarios oportunistas

Esta clase de escenarios se basa en la noción de UP y US del espectro. Aquí, los UP son aquellos que poseen licencias para partes dedicadas del espectro. Los US son aquellos que, sin licencia, pero bajo un régimen de regulación distinto, pueden acceder al espectro licenciado de los UP. Normalmente, este régimen de regulación se basa en la capacidad del sistema secundario de utilizar las bandas de espectro pertinentes sin interferir con los UP. Esto es precisamente lo que se ha denominado DSA [43].

Los US de un sistema de RC acceden dinámicamente al espectro, ya sea como un sistema bajo capa o subyacente (*underlay*), o como un sistema sobre capa (*overlay*). Algunos autores también añaden una tercera categoría denominada *sistemas entrelazados (interweave)*. En un sistema subyacente se permite que el US transmita con la condición de que cumpla con la limitación de potencia de interferencia total experimentada por el UP. Las tecnologías como banda ultra ancha (UWB) a menudo se proponen como un método de comunicación para los US en este contexto [43].

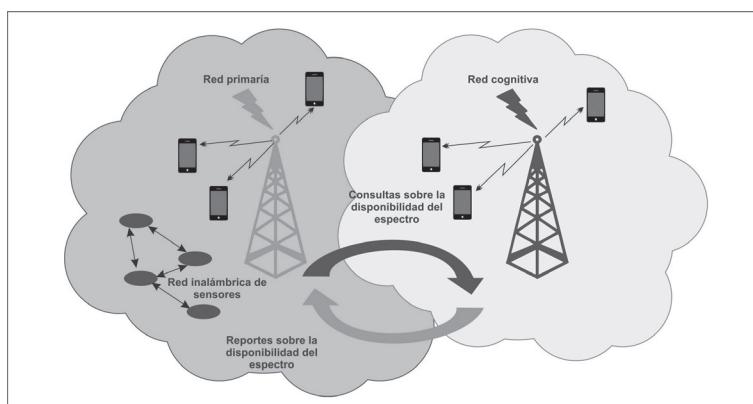
Otros autores utilizan el término entrelazado para dichas tecnologías y dicen que un sistema sobre capa se caracteriza por el hecho de que permite el uso simultáneo

del espectro por un UP y un US, por ejemplo, repetición cooperativa y técnicas de codificación. También se podría utilizar el término sistema colaborativo.

Los escenarios que pertenecen a este grupo se han dado por varias organizaciones y proyectos, tales como ETSI sistema de radio reconfigurable (RRS) [23], SCC- 41 [24], la ITU [25], IEEE 802.22 [26], el proyecto SENDORA [28] y el foro SDR [30]. Los escenarios comunes incluyen redes de tipo ad-hoc que operan en bandas licenciadas en forma oportunista y las redes tácticas militares estrechamente relacionadas. Las redes de emergencia de uso civil, a menudo, han sido mencionadas como un escenario clave de aplicación, en el que se requiere DSA, optimización de la red y autoorganización, para hacer frente al alto nivel de dinamismo y las condiciones hostiles de propagación en la red. Por último, las redes cognitivas domésticas que operan con DSA forman una importante área de potencial aplicación, en especial, en relación con la reutilización de frecuencias asignadas originalmente a los radiodifusores. Este escenario está significativamente relacionado con el *escenario multiradio doméstico* mencionado anteriormente [43].

Un primer ejemplo sólido de un escenario práctico es el estándar IEEE 802.22, que se ilustra en la figura 6. Este estándar tiene por objetivo “la implementación de técnicas de radio cognitiva para permitir el uso compartido de espectro inutilizado geográficamente, asignado al servicio de televisión, bajo un enfoque de no interferencia con el fin de ofrecer acceso de banda ancha a zonas de difícil acceso y de baja densidad de población, típicas de los entornos rurales” [7]. Una BS, de acuerdo con este estándar de acceso de banda ancha, puede atender hasta 255 unidades fijas (casas) en una zona rural típicamente de 25 km de radio (hasta 100 km). Una vez más, esta será la base para todos los reportes de DSA [43].

Figura 6. Ilustración conceptual de la coexistencia de una red cognitiva (secundaria) y una red licenciada (primaria)



Fuente: tomado de [28].

Un segundo ejemplo es el sistema de comunicaciones de seguridad pública descrita en [30]. En ese informe, se analiza el atentado al metro de Londres el 7 de julio de 2005, con el fin de “imaginar cómo la evolución de la tecnología (radio) cognitiva

podría mejorar la capacidad de respuesta en el futuro para comunicarse de forma más eficaz y eficiente que con la tecnología disponible actualmente.”

El caso de uso correspondiente al segundo ejemplo, identifica dificultades de comunicación derivadas de la gran cantidad de llamadas en la red de comunicaciones de voz a través de los teléfonos móviles. El DSA podría, de acuerdo con [30], ser una solución en un escenario con tales limitaciones de capacidad. Esto implica, entonces el empleo de bandas de espectro que normalmente no se utilizan en el sistema de telefonía móvil. Una forma de identificar el espectro no utilizado o subutilizado es monitorear el uso del espectro en frecuencias no licenciadas de la red y reconfigurarla para utilizar ese espectro; por ejemplo, solo en situaciones de emergencia [43].

Otros escenarios posibles

Las femtoceldas cognitivas y las redes vehiculares de RC, son otros dos posibles escenarios de uso y despliegue de CRN.

Femtoceldas cognitivas

Las femtoceldas [44], también conocidas como BS pequeñas, son AP de bajo consumo de energía y corto alcance, utilizados para aumentar la cobertura de telefonía móvil en interiores, para proporcionar altas velocidades de datos. Las femtoceldas están usualmente conectadas a la macro-celda a través de una conexión por cable de banda ancha, como cable o línea de abonado digital (DSL) o a través de un enlace inalámbrico *back haul*. En femtoceldas cognitivas, la determinación de una estrategia de compartición del espectro es un tema crucial, ya sea en una base ortogonal (en el que las femtoceldas y macroceldas comparten diferentes secciones del espectro asignado a la macro-celda) o sobre una base no ortogonal (donde la femtocelda reutiliza el espectro asignado a la macrocelda). El equilibrio obvio entre estas dos estrategias es incrementar la capacidad celular versus el aumento de la interferencia entre la macrocelda y las femtoceldas, y entre las distintas femtoceldas [43].

Las femtoceldas cognitivas pueden operar de manera oportunista dentro del espectro asignado a la macrocelda. Mediante el empleo de detección de espectro en la banda espectral de la macrocelda, las femtoceldas pueden identificar canales que no están siendo utilizados en el momento por la macrocelda, y utilizar dichos canales para sus propias transmisiones, es decir, funcionan sobre una base espectral no ortogonal con la macrocelda y ahorrán valiosos recursos espectrales. Las macroceldas podrían informar a las femtoceldas sobre los canales que se utilizan en su vecindad, pero esa solución introducirá importantes gastos a la macrocelda, especialmente en vista del hecho de que las femtoceldas se instalan normalmente por el consumidor y pueden ser colocadas aleatoriamente, por lo tanto, podría ser necesario que la coordinación de la interferencia se lleve a cabo de forma descentralizada [43].

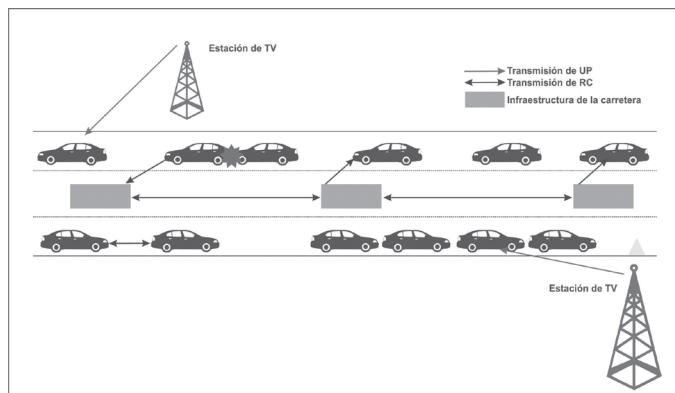
En este sentido, el despliegue de femtoceldas de RC es una manera espectralmente eficiente de utilizar el espectro asignado a una macrocelda. La cooperación entre las diferentes femtoceldas dentro de una macrocelda es vital para evitar la interferencia y lograr compartir eficientemente el espectro. Dado que el rango de transmisión de las femtoceldas de RC es limitado, se requieren retransmisores cooperativos para la

coexistencia de múltiples femtoceldas de RC y para compartir el espectro de forma cooperativa y eficaz. Por ejemplo, dos femtoceldas cercanas pueden observar diferentes disponibilidades de canales en el espectro asignado a la macrocelda. Para que estas dos femtoceldas utilicen de manera óptima estos canales vacantes, necesitan utilizar un esquema de asignación de recursos consciente de la interferencia con el fin de evitarla. También pueden contar con retransmisores cooperativos para mejorar aún más el uso del espectro con otras femtoceldas fuera de su rango de transmisión [43].

Redes de radio cognitiva vehicular

Las redes de comunicación vehicular han recibido gran atención en la última década como una forma de apoyar aplicaciones interesantes, como la seguridad en la conducción, prevención de accidentes e información y entretenimiento en el automóvil, entre otras. Aquí consideramos CRN vehiculares, donde se lleve a cabo la comunicación de vehículo a vehículo (V2V) y vehículo a carretera (V2R) de una manera oportunista sobre algún espectro vacante. La figura 7 muestra una implementación típica de este tipo de redes en un espacio en blanco de una banda de televisión (TV). El espacio en blanco en la banda de frecuencia ultra alta (UHF) se pone a disposición debido a la reciente transición a la televisión digital (DTV), lo cual es de especial importancia para este tipo de aplicación debido a las características favorables de propagación de las frecuencias de UHF, en comparación con la banda de 5.9 GHz asignada actualmente para las comunicaciones vehiculares bajo el marco de la comunicación dedicada de corto alcance (DSRC). El hecho de que la ocupación de esta banda de TV cambia de un punto geográfico a otro tiene un beneficio adicional que garantiza la continua disponibilidad de un espectro vacante, de esta manera se mantiene la conectividad de red, especialmente para los vehículos que se mueven a lo largo de las autopistas. Por otra parte, la interferencia con los UP coexistentes se puede evitar mediante la aplicación de transmisión de baja potencia, que también se ajusta a las restricciones de la FCC en los dispositivos de RC portátiles/personales para limitar su potencia de transmisión a niveles por debajo de 100 mW [43].

Debido a la alta movilidad de los vehículos, las CRN vehiculares se enfrentan a más retos en comparación con las redes fijas de RC. Específicamente, se necesitan esquemas cooperativos rápidos de detección del espectro, debido a la movilidad del vehículo y a que la ocupación del espectro cambia rápidamente. Como los vehículos pueden ser bloqueados por edificios o montañas, se requiere que el sistema de detección cooperativo reduzca el retardo en la detección y mejore la detección de los UP. Además de la detección rápida y cooperativa del espectro de banda ancha, se utiliza la técnica de transmisión ágil no ortogonal de frecuencia para satisfacer los requisitos de ancho de banda (AB) y para adaptarse al entorno que cambia rápidamente. Como se muestra en la figura 7, los vehículos y la infraestructura de la carretera se utilizan como retransmisores cooperativos para compartir el espectro cuando se observa heterogeneidad. Se necesita un esquema de asignación de recursos para los vehículos con el fin de compartir de manera óptima comutaciones rápidas de los canales como resultado de una alta movilidad [43].

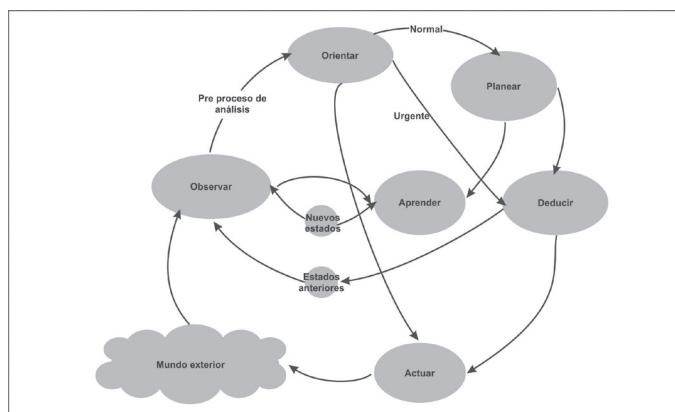
Figura 7. Transmisión cooperativa

Fuente: tomado de [43].

Radios cognitivas, tecnologías facilitadoras y aplicaciones de DSA

Las radios cognitivas en general

Como se ha mencionado, la definición original de una RC dada por Mitola es la de una radio inteligente, sensible al contexto, capaz de aprender y adaptarse a través de la pila de protocolos en diversas condiciones del entorno [45]. Se asume típicamente que la operación de una RC sigue el ciclo cognitivo completo representado en la figura 8. La mayoría de las RC sigue este ciclo cognitivo, primero reúne las observaciones del mundo exterior mediante diferentes tipos de sensores, lo que es seguido por la orientación y la planificación de posibles acciones, la toma de decisiones entre las diferentes opciones y finalmente la realización de las decisiones tomadas. Mientras este *ciclo externo* se procesa, la RC también aprende de los resultados de sus decisiones y de las entradas sensoriales del mundo exterior, manteniendo la actualización de su modelo del mundo, representando así su percepción de cómo afectaría el medio y sus relaciones con otras radios las diferentes acciones emprendidas [43].

Figura 8. Ciclo cognitivo

Fuente: tomado de [43, 45].

En el trabajo original de Mitola, las observaciones, por ejemplo, no se centraron específicamente en el espectro radioeléctrico, sino que también incluye otros estímulos sensoriales como el sonido, las imágenes de cámaras, el reconocimiento de voz y la ubicación geográfica. Del mismo modo, la planificación y las acciones no se limitan al dominio radio, sino que abarca toda la pila de protocolos. Por lo tanto, la RC, en general, debe ser vista como un modelo adaptativo y autoorganizado para la gestión integral de los recursos en las redes inalámbricas, una entidad capaz de ajustar su propio comportamiento mediante aprendizaje. Este también es el punto de vista adoptado en el proyecto *Faramir*. El ciclo cognitivo requiere diferentes tecnologías facilitadoras. Iniciando desde el estado *observar*, una RC puede percibir una serie de diferentes aspectos de su entorno. Normalmente, un sensor de espectro mide características como la potencia total recibida en un intervalo de frecuencias, la presencia de señales transmitidas por tecnologías particulares o ciertas familias de esquemas de modulación digital [43].

Este sensor de espectro (o analizador) también puede aplicarse a una RC por medio de un componente de *hardware*, o se puede basar en la cooperación entre varias RC en un vecindario. Las observaciones también se pueden realizar mediante la comunicación explícita entre diferentes radios, por ejemplo, algunos transmisores envían explícitamente la información de control en las frecuencias utilizadas. Como ya se ha mencionado anteriormente, las RC pueden, en general, hacer observaciones con respecto no solo al espectro, sino también de otra información de contexto. Un ejemplo común es la información de geolocalización, en cuanto a las coordenadas absolutas o las posiciones relativas, con aplicación directa en diversos problemas de gestión de recursos de radio. Cualquier localización o marco de seguimiento se puede utilizar como fuente de estos datos, como podrían ser los sistemas basados en satélites como el GPS o los métodos de localización de corto alcance sobre la base de las comunicaciones inalámbricas. Otros tipos de sensores que pueden proporcionar observaciones a las RC incluyen los de audio o visuales, presentes en numerosas plataformas, así como acelerómetros y giroscopios que se pueden utilizar para evaluar, por ejemplo, cambios inminentes en ubicación y en consecuencia, en el entorno de propagación [43].

La etapa de orientación se relaciona con el procesamiento de la información obtenida de los diferentes sensores y la integración de cualquier conocimiento previo, con el fin de actualizar la estimación del estado del sistema y de su entorno. Dependiendo de la diversidad de la información de detección y el conocimiento previo disponible, se pueden utilizar numerosas y diferentes estimaciones de estado y mecanismos de aprendizaje para el estado de orientación. Por ejemplo, el tratamiento posterior de la información obtenida por medio de sensores de espectro se puede fusionar con la información de ubicación para llegar a conclusiones lógicas acerca de si ciertos transmisores están activos o no.

Dependiendo del cambio en el estado, la RC cambia ya sea al estado de planificación o, en caso de que se requiere reacción urgente, al estado de decisión. La diferencia fundamental entre estos dos estados es típicamente el nivel de rendimiento en tiempo real. Por ejemplo, la aparición de un nuevo cliente en una red cognitiva

de femtoceldas podría desencadenar un control de admisión de conexión urgente y una rutina de asignación de recursos, mientras que en la planificación los parámetros de estado de algoritmos de control de potencia, podrían ser ajustados en un bucle de control externo a un ritmo más relajado. En cualquier caso, normalmente se esperaría que todos los algoritmos de gestión de recursos radio en sistemas de RC y redes inalámbricas cognitivas residan en estos dos estados [43].

Después del estado de toma de decisiones, la RC debe actuar potencialmente de acuerdo con las decisiones tomadas. Las acciones aquí se suelen relacionar con el cambio en cualquiera de los parámetros ajustables en toda la pila de protocolos, incluyendo la selección de los protocolos que se utilizarán y los enlaces reales o conexiones de extremo a extremo establecidas para otros nodos. En caso de que la RC se implemente en una plataforma SDR, las acciones también pueden incluir una amplia reconfiguración de la forma de onda utilizada.

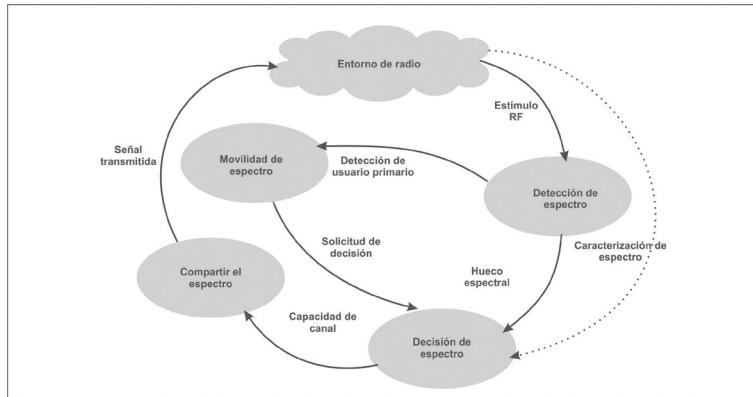
Por último, en el centro del ciclo cognitivo está el estado de aprendizaje. Aquí, la RC o una red inalámbrica cognitiva actualizan los diferentes modelos que ha construido del entorno, de las propiedades de otras radios y de la dinámica de su propio estado. El elemento clave en el proyecto *Faramir* sobre el estado de aprendizaje es el almacenamiento y el procesamiento, la información del entorno y la información del estado. Los mapas de entorno de radio formarán el marco común para almacenar, procesar e intercambiar dicha información. Los algoritmos necesarios para el proceso de aprendizaje incluyen el análisis estadístico y la modelación a largo plazo del medio sobre la base de lecturas de los sensores, así como sobre las respuestas en esas lecturas de acciones elegidas para ser llevadas a cabo en la etapa de decisión. Las técnicas y la teoría, como el aprendizaje de máquina también desempeñan un papel clave [43].

La discusión anterior sobre RC y tecnologías facilitadoras hasta ahora se han llevado a cabo a nivel general, aplicable a una amplia variedad de escenarios y tareas de optimización de redes autónomas y sin interés explícito o especialización en los problemas de gestión del espectro. Una de las áreas clave en las que los conceptos de RC ha atraído considerable interés es, precisamente la gestión del espectro radioeléctrico y más concretamente el uso oportunista de bandas licenciadas de frecuencias del espectro no utilizadas. Por ejemplo, el programa Sigiente Generación (xG) de la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA) que ha buscado implementar radios inteligentes basados en políticas [12, 43, 46-48] precisamente de esta manera.

Las radios cognitivas para el acceso dinámico al espectro

La tecnología de RC en el contexto de DSA les permitirá a los usuarios (1) determinar qué porción del espectro está disponible y detectar la presencia de UP cuando un usuario opera en una banda con licencia (detección del espectro), (2) seleccionar el mejor canal disponible (decisión sobre el espectro), (3) coordinar el acceso a este canal con otros usuarios (compartir el espectro) y (4) desocupar el canal cuando se detecta un UP (movilidad de espectro). Centrándonos en estas funciones resulta una versión simplificada del ciclo cognitivo como la descrita por la figura 9 [43].

Figura 9. Ciclo cognitivo básico

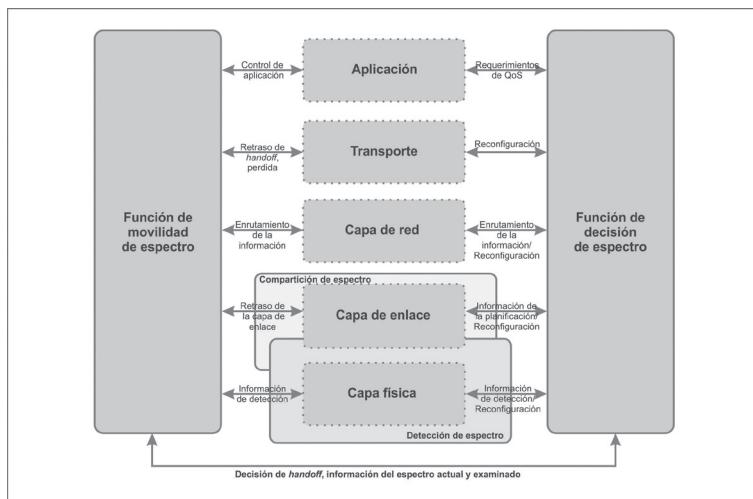


Fuente: tomado de [33].

Sin embargo, en comparación con el ciclo cognitivo completo (figura 8), al bucle le faltan algunos componentes importantes. Uno de ellos es un objetivo primordial, que debe alimentarse desde fuera del bucle y guiar a los componentes de orientación y decisión mediante la proporción de un contexto en el cual se toma una decisión. Otro componente que falta es un módulo de aprendizaje, el cual evita que errores de iteraciones anteriores se realicen en futuras iteraciones [43].

Es evidente por el número significativo de iteraciones, que las funciones de gestión del espectro requieren un enfoque de diseño multicapa (*cross-layer*). El marco de la gestión del espectro para la comunicación de una CRN se describe en la figura 10.

Figura 10. Marco de gestión del espectro para redes de radio cognitiva



Fuente: tomado de [12].

Una vez que una radio sea compatible con la capacidad de seleccionar el mejor canal disponible, el siguiente reto es hacer que los protocolos de red se adapten al espec-

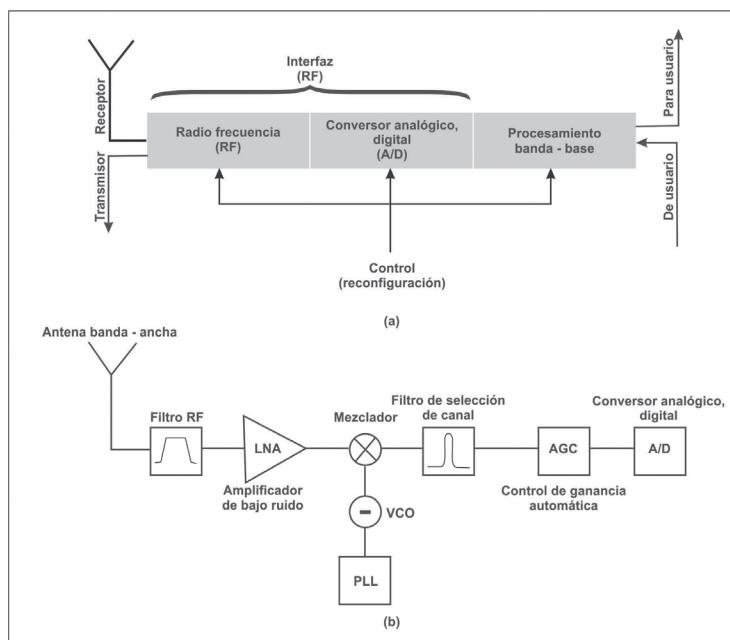
tro disponible. Por lo tanto, se requieren nuevas funcionalidades en una CRN para apoyar esta adaptabilidad y activar los protocolos de comunicación conscientes del espectro. Los componentes de la arquitectura de CRN típica cuando se aplica a DSA, se pueden clasificar en dos grupos, la red primaria y la CRN. La red primaria se conoce como la red existente que tiene derecho exclusivo a una banda determinada del espectro. Los ejemplos incluyen las redes comunes de transmisión de TV y celular. Por el contrario, la CRN no tiene licencia para operar en la banda deseada. Por lo tanto, se permite el acceso al espectro solo de manera oportuna [43].

Arquitectura de la radio cognitiva

Arquitectura física

Una arquitectura genérica de un transceptor de radio cognitiva se muestra en la figura 11 (a) [49]. Los componentes principales de un transceptor de RC son la radio *front-end* y la unidad de procesamiento de banda base. Cada componente puede ser reconfigurado mediante un bus de control para adaptarse al entorno de RF variable en el tiempo. En el *front-end* de RF, la señal recibida es amplificada, mezclada y convertida de analógica a digital (A/D). En la unidad de procesamiento de banda base, la señal se modula/demodula y se codifica/decodifica. La unidad de procesamiento de banda base de una RC es esencialmente similar a los transceptores existentes. Sin embargo, la novedad de la RC es el *front-end* RF [12].

Figura 11. Arquitectura física de un dispositivo de radio cognitiva: (a) transceptor de radio cognitiva y (b) arquitectura front-end de banda ancha RF / analógico



Fuente: tomado de [1, 49].

La característica novedosa del transreceptor de RC es la capacidad de detección de banda ancha del *front-end* RF. Esta función está principalmente relacionada con las tecnologías de *hardware* de RF, tales como antenas de banda ancha, amplificadores de potencia y filtros adaptativos. El *hardware* RF para la RC debe ser capaz de sintonizar cualquier parte de una amplia gama del espectro de frecuencias [12].

También tal detección del espectro permite mediciones en tiempo real de información de espectro del entorno de radio. Generalmente, una arquitectura *front-end* de banda ancha para la RC tiene la estructura descrita en la figura 11 (b) [1]. Los componentes de un *front-end* RF de RC son los siguientes [12]:

Filtro de RF: el filtro de RF selecciona la banda deseada a través de un filtro pasabanda de la señal de RF recibida.

Amplificador de bajo ruido (LNA): el LNA amplifica la señal deseada y simultáneamente reduce al mínimo la componente de ruido.

Mezclador: en el mezclador, la señal recibida se mezcla con la frecuencia de RF generada localmente y se convierte a la banda base o la frecuencia intermedia (IF).

Oscilador controlado por tensión (VCO): el VCO genera una señal a una frecuencia específica para una tensión dada, la cual se mezcla con la señal entrante. Este procedimiento convierte la señal de entrada a la banda base o una IF.

Lazo enganchado en fase (PLL): el PLL asegura que una señal está bloqueada en una frecuencia específica y también se puede utilizar para generar frecuencias precisas con resolución fina.

Filtro de selección del canal: el filtro de selección de canal se utiliza para seleccionar el canal deseado y rechazar los canales adyacentes. Hay dos tipos de filtros de selección de canal [50]. El receptor de conversión directa utiliza un filtro de paso bajo para la selección de canales. Por otro lado, el receptor superheterodino adopta un filtro de paso de banda.

Control automático de ganancia (AGC): el AGC mantiene la ganancia o el nivel de potencia de salida de un amplificador constante en un amplio rango de niveles de señal de entrada.

En esta arquitectura, una señal de banda ancha es recibida por medio del *front-end* de RF, se muestrea por el convertidor analógico a digital (ADC) de alta velocidad, y las mediciones se llevan a cabo para la detección de la señal de usuario con licencia. Sin embargo, existen algunas limitaciones en el desarrollo del *front-end* de la RC. La antena RF de banda ancha recibe señales de varios transmisores con diferentes niveles de potencia, AB y ubicaciones. Como resultado, la interfaz de RF debe tener la capacidad de detectar una señal débil en un gran rango dinámico. Sin embargo, esta capacidad requiere una velocidad de un convertidor analógico a digital (ADC) de varios gigahercios con alta resolución, lo que podría ser poco factible [1, 51].

El requisito de un ADC en el orden de los gigahercios requiere que el rango dinámico de la señal se reduzca antes de la conversión analógica a digital (A/D). Esta reducción se puede lograr mediante el filtrado de señales de alta intensidad o potencia. Dado que las señales con alta potencia se pueden ubicar en cualquier lugar en el rango de amplio espectro, se requieren filtros de banda regulable para la reducción

[51]. Otro enfoque es usar múltiples antenas, de manera que el filtrado de la señal se realiza en el dominio espacial en lugar del dominio de la frecuencia. Múltiples antenas pueden recibir señales de forma selectiva usando técnicas de conformación de haces *beamforming* [51].

El reto clave de la arquitectura física de la RC es una detección precisa de las señales débiles de los UP en un amplio rango del espectro. Por lo tanto, la implementación del *front-end RF* de banda ancha y el ADC son temas críticos en las CRN.

Arquitectura de red

Las arquitecturas de redes inalámbricas actuales emplean heterogeneidad, en términos de las políticas del espectro y las tecnologías de comunicación [52]. Por otra parte, cierta porción del espectro inalámbrico está licenciado para diferentes fines, mientras que algunas bandas permanecen libres. Para el desarrollo de protocolos de comunicación es esencial una descripción clara de la arquitectura de una CRN [12].

Los componentes de la arquitectura de una CRN se pueden clasificar en dos grupos: red primaria y CRN. Los elementos básicos de la CRN y de la red primaria se definen a continuación [12]:

Red primaria

La infraestructura de red existente se conoce generalmente como red primaria, la cual tiene derecho exclusivo a una determinada banda del espectro. Algunos ejemplos incluyen las redes de difusión de televisión y las redes de telefonía celular convencionales. Los componentes de la red primaria son los siguientes:

Usuario primario: un UP tiene una licencia para operar en una determinada banda del espectro. Este acceso solo puede ser controlado por la BS primaria y no debe ser afectado por las operaciones de ningún US. Los UP no necesitan ninguna modificación o funciones adicionales para la coexistencia con las BS de la CRN o US.

Estación base primaria: la BS primaria es un componente de red de infraestructura fija que tiene licencia para cierta porción del espectro, tal como un sistema transceptor de una BS en un sistema celular. En principio, la BS primaria no tiene ninguna capacidad cognitiva para compartir espectro con los US. Sin embargo, puede requerirse que la BS primaria tenga protocolos cognitivos y protocolos existentes para el acceso de los US a la red primaria.

Red de radio cognitiva

La CRN no tiene licencia para operar en la frecuencia que desee. Por lo tanto, se permite el acceso al espectro solo de manera oportunista. Las CRN pueden desplegarse tanto como una red de infraestructura como una red ad hoc. Los componentes de una CRN son los siguientes:

Usuario secundario: un US no tiene licencia del espectro. Por lo tanto, necesita funciones adicionales para compartir la banda del espectro con licencia.

Estación base cognitiva: una BS cognitiva (o estación base sin licencia, estación base secundaria) es un componente de infraestructura fija con capacidades cognitivas. Una BS cognitiva ofrece una conexión de un solo salto hacia los US sin licencia.

A través de esta conexión, un US puede acceder a otras redes.

Agente del espectro: un agente del espectro es una entidad central de red que desempeña un papel importante en la compartición de los recursos del espectro entre diferentes CRN. El agente del espectro puede ser conectado a cada red y puede servir como un gestor de información del espectro para permitir la coexistencia de múltiples CRN [53-55].

Arquitecturas existentes

A continuación se detallan los diferentes tipos de arquitecturas de RC que han realizado entes gubernamentales e instituciones de educación superior en respuesta a la necesidad de eficiencia en el uso del espectro [12]:

CR1

CR1 es la arquitectura desarrollada por Joseph Mitola en su tesis doctoral [45], donde se utiliza el lenguaje de representación de conocimiento de radio (RKRL) para determinar las adaptaciones de la radio. Este lenguaje representa el conocimiento de radio de un conjunto de lenguajes naturales y modelos basados en computador.

xG

El programa de Darpa xG está llevando a cabo una implementación de RC, que tiene la iniciativa de autorizar espectro de uso estático, como resultado de una aparente escasez de espectro, que puede ser evitado por la correcta aplicación de las técnicas dinámicas de reparto del espectro. Como resultado se tiene el proyecto X-MAC, el cual utiliza una arquitectura que relaciona el motor de políticas (PE) con el motor de estrategias (SSR) [56].

Radio cognitiva biológicamente inspirada

Tema del trabajo doctoral de Christian Rieser [57], se utilizan mediciones de canal y de su entorno para construir un modelo oculto de Markov (HMM). Los resultados de la HMM a su vez son utilizados por un algoritmo genético (AG) para predecir el rendimiento de diferentes combinaciones de componentes de forma de onda para las condiciones de canal observado.

*Cortek*s

La *RC Cortek*s implementada en la Universidad de Virginia Tech es controlada por un *software* de políticas definidas que actúa como un US del espectro, adaptando su frecuencia de operación y modulación para maximizar las posibilidades y tratando en la misma vía de evitar las interferencias que se pudiesen occasionar con los UP. Para determinar la presencia de UP se utilizan redes neuronales para clasificar las señales [16].

Adapt4 XG1

Adapt4 es un tipo de RC que utiliza un algoritmo propietario denominado protocolo de adaptación del espectro automático (ASAP), el cual está diseñado para operar como US [58], con características como DSA, salto de frecuencias y TPC, en los casos donde sea posible, minimizando la interferencia en los UP.

Spectrum pooling

En [59] se propone la utilización de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). Esta arquitectura consiste de una BS cognitiva y US. La modulación OFDM es candidata para este trabajo, debido a que es posible dejar un grupo de subportadoras sin modular, lo cual es conveniente cuando estas subportadoras están siendo utilizadas por los UP. La detección de usuarios es realizada mediante el envío periódico, a través de la red, de tramas de detección. Con estas tramas los US actualizan el estado de la detección de espectro. La información de detección es entonces almacenada en la BS. Los US modulan un símbolo complejo a máxima potencia en las subportadoras donde los UP aparecen. Por medio de este método la BS recibe una señal amplificada de todas las subportadoras con los nuevos UP.

Corvus

Esta arquitectura está enfocada en la utilización de US para sacar ventaja del espectro que no esté siendo utilizado en una banda de frecuencias licenciadas. En [60, 61], CORVUS maneja un grupo de US denominado SUG, los cuales se comunican entre sí mediante una red *ad hoc* para coordinar sus actividades.

Esta arquitectura utiliza *Spectrum Pooling* desde el rango de los MHz hasta los GHz, creando una banda virtual no licenciada. Dentro de ella existen unos canales lógicos dedicados, que se utilizan para el intercambio de información de control y detección denominados canal de control universal (UCC) y canal de control grupal (GCC), el primero de ellos se usa para la coordinación entre grupos y el segundo se usa para el intercambio interno de cada grupo de información de control y detección [62]. Avances recientes en esta arquitectura plantean un enlace confiable de mantenimiento dentro de CORVUS para conservar la calidad en la comunicación del US [63]. En [64] se discute sobre la capa base, así como estrategias de superposición para uso en sistemas de radiocomunicaciones cognitivos, para compartir el espectro. Presentan, además, el banco de pruebas utilizado para la RC, junto a las técnicas basadas en cicloestacionariedad.

IEEE 802.22

Es el primer estándar mundial basado en tecnología de RC [65, 66], también conocido como WRAN. El objetivo prominente es el acceso al espectro radioeléctrico en áreas rurales y remotas con un rendimiento comparable a las tecnologías de acceso a banda ancha existentes en la actualidad. Por esta razón, entes gubernamentales, como la FCC, estimulan el desarrollo de nuevas tecnologías basadas en RC, que incrementen la disponibilidad de acceso a banda ancha para estos sectores no atendidos [67-70].

El estándar hace uso de las bandas de TV, debido a que estas bandas tienen buenas características en cuanto a propagación, lo que les permite a potenciales usuarios acceder a los servicios de banda ancha, siendo un negocio conveniente para los proveedores de servicio de internet inalámbrico (WISP).

Mientras que la mayor parte de desarrollo comercial de RC se está realizando en Estados Unidos, el objetivo del estándar IEEE 802.22 es definir un estándar interna-

cional, que pueda operar como un régimen regulatorio. Por lo tanto, este estándar identifica las bandas de operación desde los 54-862 MHz para el territorio norteamericano, mientras que aún se encuentra en debate el rango de frecuencia desde los 41-910 MHz para adecuarse a los requerimientos internacionales. De igual forma, el estándar debe acomodarse al AB de los canales que difieren de 6, 7 y 8 MHz.

En cuanto a la capacidad del servicio, el estándar determina eficiencias espectrales del orden de los 0,5 bit /(s/Hz) hasta los 5 bit /(s/Hz), por lo cual para un canal con un AB de 6 MHz, la tasa de transferencia de datos podría ubicarse en el rango de los 3Mbps hasta los 30 Mbps.

A continuación, se muestra un resumen sobre algunas de las especificaciones técnicas del estándar:

- Topología de red Punto-Multipunto.
- Máxima potencia irradiada efectiva isotrópica (EIRP) de 4W y radio de celda de 10 a 100km para BS fijas.
- Antena de transmisión/recepción (Tx/Rx) omnidireccional en la BS. Para el caso del usuario de red la antena Tx/Rx es direccional.
- Sistemas basados en geolocalización mediante el uso de GPS.
- 802.22 soporta la estructura de trama duplexado por división de tiempo (TDD).
- Soporta la modulación por desplazamiento de fase (QPSK), 16- modulación de amplitud en cuadratura (QAM) y 64-QAM

DIMSUMnet

La gestión dinámica e inteligente del espectro para redes móviles ubicuas (DIMSUMnet) [53] implementa el acceso multiplexado estadístico (SMA) al espectro en una banda de acceso coordinado (CAB). La función de SMA es la mejora en la utilización del espectro mientras que CAB mejora la eficacia del acceso al espectro y la equidad. CAB utiliza una parte contigua del espectro reservado por las autoridades reguladoras. Un agente de espectro permanentemente maneja el CAB y la arrienda de acuerdo con las solicitudes. DIMSUMnet utiliza un sistema centralizado, un mecanismo de intermediación de red regional que tiene como objetivo mejorar significativamente la utilización del espectro y reducir la complejidad y los requerimientos de agilidad del sistema implementado. La BS se registra con el administrador designado de su red de acceso (Ranman), el cual, a su vez, negocia un contrato de arrendamiento de una porción apropiada del espectro con el agente de manejo de información del espectro (SPIM). Si el arrendamiento es exitoso, el Ranman configura el espectro arrendado en la BS. La BS envía la información recibida del Ranman, a sus usuarios para la configuración del cliente [71]. Trabajos recientes se enfocan en el precio del espectro y las funciones de localización del espectro para los agentes del espectro [72].

En [73], los autores investigan las cadenas de Markov en tiempo continuo para DSA en redes inalámbricas de espectro abierto, es decir, bandas de frecuencias no licenciadas y se consideran tanto los modelos de colas como no colas. Se hace uso de un modelo antropológico para el acceso al medio, el cual usa solamente la informa-

ción local, denominado homo equalis (HE). Los resultados analíticos se derivan de los modelos de Markov.

Kuar

En [74], los autores presentan una plataforma de desarrollo de SDR, portátil, potente y flexible, denominada Radio Agil de la Universidad de Kansas (Kuar). El propósito de esta plataforma es permitir la investigación avanzada en las áreas de redes de radio inalámbricas, DSA, y RC. Describen en detalle los requerimientos en *hardware*, herramientas de software, y presenta un ejemplo de aplicación de la modulación de *Kuar*, medición del espectro, estimación de canal, y la rápida configuración y adaptación de *Kuar*.

Knows

Este sistema detecta los huecos en la banda de frecuencias de TV haciendo uso de detección cooperativa. Emplea un esquema distribuido denominado b-SMART, el cual dinámicamente ajusta la frecuencia de operación, el tiempo de ocupación en el canal asignado, el AB de la comunicación, basado en el conocimiento de huecos espectrales disponibles en el espectro. Con este conocimiento, *Knows* provee a cada usuario con un segmento del AB disponible.

Knows hace uso de un nuevo esquema de control de acceso al medio (MAC) denominado CMAC, basado en el protocolo MAC, pero a diferencia de este, CMAC incorpora una mejora en los mecanismos solicitud de envío (RTS) y listo para enviar (CTS) del estándar IEEE 802.11, y en vez de reservar tiempo de transmisión en el aire en un canal, reservan segmentos vacíos de frecuencias en el espectro [75].

DRiVE/ Project

El proyecto europeo de radio dinámica para servicios de Internet en ambientes vehiculares (DRiVE), enfoca sus esfuerzos en proveer un espectro dinámico en redes donde convergen varias tecnologías heterogéneas, haciendo uso de un canal común de coordinación [76].

El proyecto OverDRiVE fue un avance de su antecesor DRiVE. Este proyecto apunta al desarrollo y coordinación de Sistema de Telecomunicaciones Móviles Universal (UMTS) en las CRN de una red hibrida, para asegurar la eficiencia del espectro para los servicios de multimedia en dispositivos móviles [77].

Flex

En [78] los autores proponen *Flex*, la cual es una arquitectura distribuida para AP WiFi, que realiza la localización del espectro y eficientemente se adapta a las demandas de tráfico dinámico de forma que se maximice la satisfacción del usuario.

OCRA network

En [79], la red OCRA considera todos los escenarios de implementación posibles sobre las redes heterogéneas cognitivas y desarrolla operaciones en la capa cruzada para DSA basado en OFDM. Para la decisión de espectro y el *handoff* de espectro, la red OCRA provee un nuevo concepto del espectro basado en OFDM para ambientes

heterogéneos. Con base en la estructura de la capa física (PHY), se propone una estructura de modo dual de espectro compartido, la cual habilita el acceso a las redes existentes, así como la coordinación entre los usuarios cognitivos.

En [80] se proponen protocolos MAC cognitivos descentralizados que les permiten a los US ser autónomos al momento de buscar oportunidades espetrales, sin tener que estar controlados por un coordinador del espectro o un canal de comunicación dedicado. Se desarrolla, asimismo, un marco analítico para el acceso al espectro oportunista basado en la teoría del proceso de decisión de Markov parcialmente observable (POMDP). Este enfoque de decisión teórica integra el diseño de protocolos de acceso al espectro en la capa MAC con la detección del espectro en la capa PHY y estadísticas del tráfico determinadas por la capa de aplicación de la red primaria. Sin mensajes de intercambio de control entre el transmisor secundario y el receptor debido a los protocolos descentralizados, asegura saltos síncronos en el espectro entre ellos en presencia de ambientes con colisión y errores en la detección de espectro.

En [81], los autores diseñan una RC que puede coexistir con múltiples canales paralelos de redes inalámbricas de área local (WLAN) respetando al mismo tiempo una limitación de interferencia. La interacción entre los dos sistemas, que se caracteriza por la medición y la coexistencia, es mejorada por la predicción del comportamiento de WLAN basadas en un modelo de cadena de Markov de tiempo continuo. El acceso al medio cognitivo (CMA) se deriva de este modelo por la recomposición del problema como uno de los procesos de decisión de Markov limitados. La RC considerada en este artículo es basada en saltos de frecuencia con una PHY similar a la utilizada por Bluetooth. Esto permite realizar comparaciones conceptuales de coexistencia entre Bluetooth y WLAN.

Sparta

En [82], los autores proponen *Sparta*, una nueva arquitectura DSA que provee un eficiente y estable uso del espectro integrando la planificación proactiva con la adaptabilidad reactiva. *Sparta* introduce un novedoso algoritmo de control de admisión estadístico que proactivamente evita la congestión en la demanda por el espectro, mientras lida con la interferencia. Esta arquitectura permite determinar el volumen de la demanda soportada por cada AP basada en sus estadísticas y la condición de interferencia local.

En [83] se describe un modelo concreto para una RC genérica para utilizar un motor de aprendizaje. El objetivo es incorporar los resultados del motor de aprendizaje en un motor basado en razonamiento, de manera que las radios pueden recordar las lecciones aprendidas en el pasado y actuar con rapidez en el futuro. También investigan las diferencias entre el razonamiento y el aprendizaje, y los fundamentos de cuando una aplicación particular requiere aprender, y cuando el razonamiento simple es suficiente. La arquitectura básica es consistente con los motores cognitivos observados en la investigación de inteligencia artificial (AI). El objetivo de este artículo no es proponer nuevos algoritmos de aprendizaje de máquina, sino formalizar su aporte a la RC y desarrollar un marco desde el cual puedan ser útiles.

En [84], se presenta una nueva metodología emergente para la inferencia estadística, que mejora algunas deficiencias del algoritmo expectativa-maximización (EM).

Esta metodología se denomina aproximación variacional y se puede utilizar para resolver los complejos modelos bayesianos donde el algoritmo EM no se puede aplicar. La inferencia bayesiana basada en la aproximación variacional ha sido ampliamente utilizada por la comunidad de aprendizaje de máquina desde la década de los noventa, cuando se introdujo por primera vez.

En [85] se propone la evaluación del rendimiento de las redes de RC tomando en cuenta factores como las métricas utilizadas por las redes, algoritmos utilizados en el proceso cognitivo y con base en esto los autores proponen los resultados de acuerdo a los escenarios planteados.

Gestión del espectro

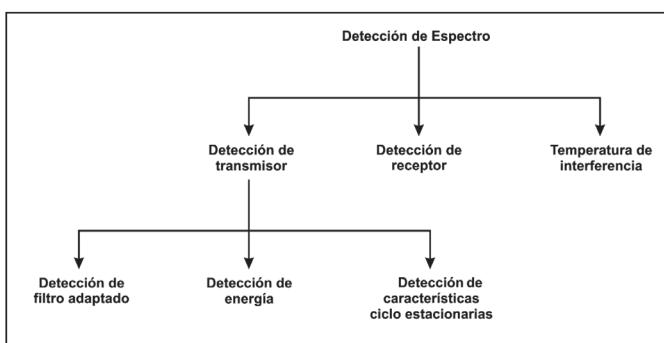
Las CRN también imponen retos en la gestión del espectro, debido a la naturaleza fluctuante del espectro disponible y a los requerimientos de QoS de varias aplicaciones. La RC ofrece la capacidad de compartir los canales inalámbricos con los UP de una manera oportunista. Esto lleva a que los US necesiten monitorear continuamente el espectro para determinar la presencia de los UP y reconfigurar el *front-end* RF de acuerdo con las demandas y las necesidades de las capas superiores. Para cumplir con lo anterior, las CRN implementan cuatro funciones encargadas de realizar la gestión del espectro: detección de espectro, decisión de espectro, compartición de espectro y movilidad de espectro, las cuales conforman el ciclo cognitivo descrito anteriormente.

Las siguientes son las principales características de estas cuatro funciones:

Detección de espectro

En las bandas licenciadas los US solo pueden ser asignados a huecos especcrales, para que no interfieran con los UP. Por lo tanto, es necesario que los US estén monitorizando las bandas de espectro disponibles, capturando su información y después detectando dichos huecos especcrales [14]. Actualmente existen varias técnicas para la detección de espectro, las cuales se clasifican como se muestra en la figura 12, siendo la detección de energía la más básica de ellas.

Figura 12. Clasificación de las técnicas de monitorización de espectro



Fuente: tomado de [14].

Decisión de espectro

Después de que los huecos espectrales han sido identificados, los US deben seleccionar el más adecuado lo más rápido posible para un esquema reactivo, mientras que para un esquema proactivo se pueden tener en cuenta los requerimientos de QoS, políticas internas y posiblemente externas, debido a que puede esperar un poco más. Para tomar la decisión anterior se han desarrollado algoritmos que tienen en cuenta las características del canal de radio y el comportamiento estadístico de los UP, entre otros factores [14].

Compartición de espectro

Debido a que múltiples US pueden intentar acceder al espectro, la función de compartición de espectro, proporciona la capacidad de compartir este recurso e información con múltiples US, coordinando sus transmisiones para evitar colisiones e interferencias [14, 86].

Movilidad de espectro

Los US son considerados como *visitantes* en el espectro. Si los UP necesitan una parte específica del espectro o las condiciones del canal se deterioran, los US deben dejar el canal de frecuencia que están utilizando y continuar su comunicación en otro huecopectral [14]. Esta función debe garantizar que se genere la movilidad lo más rápido posible.

Decisión de espectro

La función de decisión de espectro está compuesta por dos procesos, el análisis de espectro y la decisión de espectro en sí misma. A continuación se presentan los dos, junto con los retos de esta función de gestión del espectro.

Análisis del espectro

En las CRN, los huecos espectrales disponibles tienen diferentes características que varían con el tiempo. Dado que los US poseen la PHY basada en RC, es importante comprender las características de las diferentes bandas del espectro. El análisis del espectro permite la caracterización de las diferentes bandas del espectro, lo que puede ser utilizado para obtener la banda de espectro adecuada a las necesidades de los usuarios. Con el fin de describir la naturaleza dinámica de las CRN, cada hueco del espectro debe caracterizarse considerando el entorno de radio variable en el tiempo y también la actividad de los UP y la información de la banda del espectro, tal como frecuencia de trabajo y AB. Por lo tanto, es esencial para definir parámetros como el nivel de interferencia, la tasa de error de canal, las pérdidas de trayecto, el retardo de la capa de enlace y el tiempo de tenencia lo que puede representar la calidad de una banda spectral en particular, como se ilustra a continuación [12].

Interferencia

Algunas bandas del espectro son más utilizadas que otras. Por lo tanto, la banda del espectro en uso determina las características de interferencia del canal. De la cantidad de la interferencia en el receptor primario se puede derivar la potencia permitida

de un US, la cual se utiliza para la estimación de la capacidad del canal. Sin embargo, esta interferencia puede variar con la distancia, debido a la atenuación que sufre la señal con la distancia.

Pérdida por trayecto

La pérdida de propagación aumenta a medida que aumenta la frecuencia de operación. Por lo tanto, si la potencia de transmisión de un US se mantiene igual, entonces su rango de transmisión disminuye a frecuencias más altas. Del mismo modo, si la potencia de transmisión se aumenta para compensar el aumento de la pérdida de trayectoria, entonces, esto se traduce en una mayor interferencia para otros usuarios.

Errores en el enlace inalámbrico

El nivel de interferencia en la banda del espectro puede afectar la tasa de error del canal y el esquema de modulación varía la probabilidad de error.

Retardo en la capa de enlace

Para hacer frente a las pérdidas por trayectoria, los errores en la capa de enlace y la interferencia, se requieren diferentes tipos de protocolos de capa de enlace, en distintas bandas espectrales. Esto da lugar a un retardo heterogéneo en la transmisión de paquetes en la capa de enlace. Este retardo depende de la propagación en el medio de comunicación, el tiempo de transmisión y el tiempo de procesamiento.

Tiempo de permanencia

Las actividades de los UP pueden afectar la calidad del canal en las CRN. El tiempo de permanencia se refiere a la duración esperada en el que el US puede ocupar una banda con licencia antes de ser interrumpido. Obviamente, entre más largo es el tiempo de permanencia, mejor será la calidad.

Dado que el frecuente *handoff* espectral puede reducir el tiempo de permanencia, se deben considerar patrones estadísticos de transferencia anteriores, para diseñar CRN, con el fin de lograr un tiempo largo de permanencia. La capacidad de canal, que se puede derivar de los parámetros explicados anteriormente, dicha capacidad de canal es el factor más importante para la caracterización del espectro. Por lo general, la relación señal a ruido (SNR) en el receptor se usa para la estimación de la capacidad. Sin embargo, dado que la SNR considera solo observaciones locales de los US, no es suficiente para evitar la interferencia a los UP.

Por lo tanto, la caracterización del espectro se concentra en la estimación de la capacidad con base en la interferencia en los receptores licenciados. El modelo de temperatura de interferencia [87, 88] se puede utilizar para este enfoque. El límite de temperatura de interferencia indica un límite superior para la energía RF que podría ser introducida en la banda. En consecuencia, el uso de la cantidad de interferencia permisible posibilita la determinación de la potencia de transmisión máxima de un US.

En [89] se propone un método de estimación de la capacidad que considera el AB y la potencia de transmisión admisible. En consecuencia, la capacidad del espectro C , se puede estimar como lo describe la ecuación 1:

$$C = AB \cdot \log\left(1 + \frac{S}{N+1}\right) \quad (1)$$

Donde AB es el ancho de banda, S es la señal recibida del US, N es la potencia de ruido del receptor cognitivo, e I es la potencia interferente recibida en el receptor cognitivo debido al transmisor primario. La estimación de la capacidad del espectro también ha sido investigada en el contexto de sistemas de RC basados en OFDM [90]. De acuerdo con ello, la capacidad del espectro de las CRN basadas en OFDM es definida como lo muestra la ecuación 2 [90]:

$$C = \int_{\Omega} \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{G(f)S_0}{N_0} \right) df \quad (2)$$

Donde Ω es la colección de segmentos espectrales no utilizados, $G(f)$ es la ganancia de potencia del canal a la frecuencia f , S_0 y N_0 , son la señal y la potencia de ruido por unidad de frecuencia, respectivamente. El trabajo reciente sobre el análisis del espectro solo se centra en la estimación de la capacidad del espectro. Sin embargo, además de la capacidad, otros factores tienen una influencia significativa en la calidad de los servicios, como el retardo, la tasa de error del enlace y el tiempo de permanencia. Por otra parte, la capacidad está estrechamente relacionada tanto con el nivel de interferencia como con la pérdida por trayectoria.

Hay que mencionar que aun esta por desarrollar un análisis completo y un modelo del espectro para las CRN. El objetivo de la decisión de espectro, para diferentes tipos de aplicaciones, es identificar las bandas del espectro que combinen la mayoría de los requerimientos de la aplicación y que están caracterizados por los parámetros descritos anteriormente.

Decisión del espectro

Una vez que todas las bandas de espectro disponibles se caracterizan, se debe seleccionar la banda del espectro que más se acerca a los requerimientos para la transmisión, teniendo en cuenta los requisitos de QoS y las características del espectro. Por lo tanto, la función de gestión del espectro debe conocer los requisitos de QoS del usuario. Con base en las necesidades de los usuarios se puede determinar: la velocidad de datos, la tasa de error aceptable, el retardo permitido, el modo de transmisión y el AB para la transmisión. Entonces, puede ser elegido el conjunto de bandas del espectro apropiado, de acuerdo con las reglas de decisión y los algoritmos que evalúan las posibles soluciones. En [91] se presentan cinco reglas de decisión del espectro, que se centran en la equidad y el costo de la comunicación. Sin embargo, este método asume que todos los canales tienen una capacidad de rendimiento similar [12]. Lo ideal es ajustarse a los requerimientos que imponen las distintas aplicaciones.

En [92] se propone un protocolo de saltos de canal de frecuencia oportunista para la búsqueda de un canal de mejor calidad, esta decisión del canal se basa en la SNR. Con el fin de tener en cuenta la actividad del UP, se toma en cuenta para la decisión del espectro el número de transferencias del espectro y lo que ocurre en una determinada banda del espectro [93]. La decisión del espectro constituye un tema importante que sigue abierto a la investigación.

Retos en la decisión de espectro

Existen varias cuestiones de investigación abiertas que necesitan ser estudiadas para el desarrollo de la función de decisión del espectro, algunas de ellas se mencionan a continuación [12].

Modelo de decisión multivariado

La SNR no es suficiente para caracterizar las bandas espectrales en las CRN. Además de la SNR, muchos parámetros de caracterización del espectro afectan la calidad. Por lo tanto, la manera de combinar estos parámetros de caracterización del espectro para el modelo de decisión del espectro sigue siendo una cuestión abierta.

Decisión de múltiples bandas del espectro

En las CRN se pueden utilizar simultáneamente múltiples bandas del espectro para la transmisión. Por otra parte, las CRN no requieren que las múltiples bandas seleccionadas sean contiguas. De este modo, un US puede enviar paquetes a través de bandas del espectro no contiguas. Esta transmisión sobre múltiples bandas muestra menos degradación de calidad durante el *handoff* espectral en comparación con la transmisión convencional sobre una sola banda del espectro [79]. Por ejemplo, si un UP aparece en una banda del espectro en particular, el US tiene que desalojar solo esa banda, y en el resto de las bandas de espectro mantendrá la comunicación, por lo cual la degradación de la QoS puede ser mitigada.

Adicionalmente, la transmisión en múltiples bandas del espectro permite menor consumo de energía en cada banda del espectro. Como resultado, se consigue menos interferencia con los UP, en comparación con la transmisión en una única banda del espectro [79]. Por estas razones, el esquema de gestión del espectro debe tener la capacidad de toma de decisión para múltiples bandas. Por ejemplo, la forma de determinar el número de bandas del espectro y cómo seleccionar el conjunto de bandas apropiadas siguen siendo temas de investigación abiertos en CRN.

Cooperación con la reconfiguración

La tecnología de RC permite que los parámetros de transmisión de una radio se puedan reconfigurar para un funcionamiento óptimo en una banda del espectro determinada. Por ejemplo, si la SNR es fija, la tasa de error de bit (BER) se puede ajustar para mantener la capacidad del canal, mediante la utilización de técnicas de adaptación de la modulación [94, 95]. Por lo tanto, se requiere un esquema de cooperación que tenga en cuenta tanto la decisión del espectro como la reconfiguración.

Decisión del espectro sobre bandas del espectro heterogéneo

En la actualidad, ciertas bandas del espectro ya están asignadas a diferentes propósitos, mientras que algunas bandas se mantienen sin licencia. Por lo tanto, es muy probable que el espectro utilizado por las CRN sea una combinación de espectro de acceso licenciado y espectro sin licencia. En el caso de las bandas con licencia, los US deben considerar las actividades de los UP en el análisis y la decisión del espectro con el fin de no influir en la transmisión de estos últimos.

Por el contrario, en las bandas sin licencia, ya que todos los US tienen los mismos derechos de acceso al espectro, son necesarias técnicas sofisticadas de compartición del espectro. Con el fin de seleccionar la mejor banda del espectro en el entorno heterogéneo. La CRN debe tener la capacidad de decisión del espectro tanto en las bandas con licencia como en las bandas sin licencia, teniendo en cuenta las características diferentes.

Movilidad de espectro

Las CRN tienen como objetivo utilizar el espectro de manera dinámica, lo cual permite que los terminales de radio cognitiva, operen en la mejor banda de frecuencia disponible. Esto permite obtener el mejor canal, disponible para fines de comunicación, esto implica que una RC tenga que capturar el mejor espectro disponible.

La movilidad de espectro se puede definir como el proceso en donde un US cambia su frecuencia de operación cuando las condiciones de un canal se degradan o cuando un UP aparece, ya que el primero se encuentra utilizando un canal licenciado [8, 12].

La movilidad espectral da lugar a un nuevo tipo de *handoff* en la CRN, llamado *handoff* espectral. El concepto de *handoff* de espectro en RC difiere de los mecanismos tradicionales de las redes inalámbricas, pues hay dos tipos de usuarios con diferentes prioridades. Los UP (con alta prioridad), que tienen derecho a interrumpir la transmisión de los US (con baja prioridad). En un *handoff* tradicional los usuarios tienen la misma prioridad [96].

Handoff de espectro

Durante la movilidad espectral es inevitable que la comunicación se rompa temporalmente, debido a que es necesario realizar un proceso de descubrimiento de nuevas bandas de frecuencias disponibles, por tanto, la movilidad espectral requiere un modelo de *handoff* de espectro que permita cambiar la del US a una nueva banda espectral con la mínima degradación de calidad, reconfigurando sus parámetros de comunicación [14].

Cada vez que ocurre un *handoff* de espectro, los parámetros de operación de la CRN cambian para minimizar el impacto en la operación de los US, con el objetivo de satisfacer su QoS pero sin causar interferencia a los UP [97].

Los protocolos para diferentes capas de la pila de red deben adaptarse a los parámetros del canal de la frecuencia de operación. Por otra parte, deben ser transparentes.

tes a la transferencia del espectro y a la latencia asociada. Como se ha indicado en secciones anteriores, una RC puede adaptarse a la frecuencia de funcionamiento. Por lo tanto, cada vez que un US cambia su frecuencia de funcionamiento, los protocolos de la red van a cambiar de un modo de funcionamiento a otro. El propósito de la gestión de la movilidad espectral en las CRN es asegurarse de que estas transiciones se hacen sin problemas y tan pronto como sea posible, de manera que las aplicaciones que se ejecutan en un US perciben una mínima degradación de rendimiento durante una transferencia del espectro. Es esencial para los protocolos de gestión de la movilidad aprender de antemano la duración de una transferencia del espectro. Esta información debe ser proporcionada por el algoritmo de detección.

Una vez que los protocolos de gestión de la movilidad aprenden sobre esta latencia, su trabajo es asegurarse de que las comunicaciones en curso, de un US, experimenten solo una mínima degradación del rendimiento. En consecuencia, se requieren protocolos de gestión de la movilidad multicapa para llevar a cabo las funcionalidades de movilidad del espectro. Estos protocolos soportan la gestión de movilidad adaptativa para diferentes tipos de aplicaciones. Por ejemplo, una conexión mediante el protocolo de control de transporte (TCP) se puede poner en un estado de espera hasta que la transferencia del espectro se haya terminado. Por otra parte, ya que los parámetros TCP cambian después de un *handoff* de espectro, es esencial aprender los nuevos parámetros y asegurarse de que la transición de los antiguos a los nuevos parámetros se lleve a cabo rápidamente. Para una comunicación de datos por ejemplo, mediante el protocolo de transferencia de archivos (FTP); los protocolos de gestión de movilidad deben implementar mecanismos para almacenar los paquetes que se transmiten durante un *handoff* de espectro, mientras que para una aplicación en tiempo real no hay necesidad de almacenar los paquetes ya que no serán útiles si se entregan tiempo después [12].

Desafíos en la movilidad de espectro

Los siguientes son los temas de investigación abiertos con respecto a la movilidad del espectro eficiente en las CRN.

Detección de usuarios primarios

La velocidad de detección y la exactitud de detección son dos factores importantes en la detección de espectro para una movilidad espectral eficiente. De hecho, existe una compensación entre las dos [98]. Para incrementar la velocidad y la exactitud en la detección, los nodos de RC pueden seleccionar otro nodo de RC ocioso, como socio, para desempeñar una detección espectral cooperativa [98].

Decisión de Handoff espectral

Define en qué momento se debe realizar el *handoff* espectral. Actualmente, existen varios modelos que permiten tomar esta decisión.

Selección de canal objetivo

Encontrar un canal aceptable sobre el cual un US pueda continuar su sesión de transmisión de datos es el asunto más apremiante en movilidad espectral [98].

La selección del canal depende de muchos factores como [98]:

- Capacidad de canal.
- Disponibilidad del canal durante el *handoff* espectral.
- Probabilidad de que el canal siga libre en el futuro.

Una pobre selección de canal puede causar múltiples *handoffs* espetrales, degradando el desempeño de todo el conjunto. El enfoque más común para la selección de canal es usar una lista de canales de respaldo (BCL) [98, 99].

Recuperación de enrutamiento

El *handoff* espectral probablemente puede causar que se rompa la ruta. El US requerirá recuperar la tabla de enrutamiento para mantener la conectividad en la red. El recálculo de enrutamiento es un proceso costoso en cuanto a tiempo y consumo de recursos. Una solución puede ser recalcular una nueva ruta y hacer el *handoff* espectral. Una segunda solución sería evitar recalcular la nueva ruta, preparando dos canales redundantes, antes de comenzar la transmisión [98].

Modelo de Handoff espectral

El modelo de *handoff* espectral es considerado el tema principal en la movilidad espectral. Los tipos de modelos de *handoff* espectral dependen de a) si la detección de espectro se realiza antes o después del *handoff*, b) si la decisión de *handoff* se realiza antes o después del *handoff* [98].

Retardos y pérdidas

Una vez que se selecciona el mejor espectro disponible, el siguiente reto es diseñar nuevos enfoques de movilidad y gestión de conexiones para reducir los retardos y las pérdidas durante la transferencia de espectro.

Handoff vertical y horizontal

La transferencia del espectro puede ocurrir debido a distintas razones, no solo por la detección de un UP. Por lo tanto, existen otros esquemas de *handoff* de espectro en las CRN. Si un US se mueve de un lugar a otro, el *handoff* de espectro puede ocurrir porque las bandas del espectro disponibles cambian. Así, el esquema de *handoff* de espectro debe integrar la transferencia entre celdas. Aparte de esto, también es probable que se produzca en las CRN el *handoff* de espectro entre diferentes redes, el cual se conoce como *handoff* vertical. Bajo un entorno tan diverso, es esencial que el esquema de *handoff* de espectro tenga en consideración todo lo anterior.

Movilidad del espectro en el dominio del tiempo

Las CRN se adaptan al espectro inalámbrico basadas en las bandas disponibles del espectro. Dado que estos canales disponibles cambian con el tiempo, ofrecer QoS en este ambiente es un reto, la radio debería ser *movida* a través del espectro para satisfacer los requisitos de QoS.

Movilidad del espectro en el espacio

Las bandas disponibles también cambian a medida que el usuario se desplaza de un lugar a otro. Por lo tanto, la asignación continua de espectro es un gran desafío en CRN.

Compartición de espectro

En las CRN, uno de los principales retos en el uso del espectro libre es el uso compartido del espectro. La compartición del espectro puede ser considerada similar a los problemas encontrados en el MAC genérico de los sistemas existentes. Sin embargo, existen diferentes desafíos para la compartición del espectro en las CRN. La convivencia con los UP y la amplia gama del espectro disponible son dos de las principales razones de estos desafíos únicos [12].

Procedimiento para la compartición del espectro

A fin de proporcionar una guía acerca de los diferentes retos durante el uso compartido del espectro, se enumeran los pasos para la compartición del espectro en las CRN. Los retos y las soluciones propuestas para los pasos se explican en detalle a continuación. El proceso para compartir el espectro consiste en cinco pasos principales [12].

1. **Detección del espectro:** un US solo puede asignar una porción del espectro si no está siendo utilizada por otro US. Por consiguiente, cuando un US pretende transmitir paquetes, primero debe conocer la utilización del espectro en su vecindad [100].
2. **Asignación del espectro:** con base en la disponibilidad del espectro, el US puede asignar un canal. Esta asignación no solo depende de la disponibilidad de espectro, sino también se determina con base en las políticas internas (y posiblemente externas). Por lo tanto, el diseño de una política de asignación del espectro para mejorar el rendimiento de un usuario es un tema de investigación.
3. **Acceso al espectro:** en este paso, se tiene otro gran problema de la compartición del espectro. Dado que pueden existir múltiples US que intentan acceder al espectro, este acceso también debe ser coordinado con el fin de evitar que varios usuarios colisionen en ciertas porciones del espectro superpuestas.
4. **Saludo transmisor-receptor:** una vez que se determina una parte del espectro para la comunicación, el receptor de esta comunicación también debe conocer el espectro seleccionado. Por lo tanto, es esencial para la comunicación eficiente un protocolo de saludo transmisor-receptor en la CRN. Tener en cuenta que no se restringe este protocolo a solo el transmisor y el receptor, un tercero, como una estación centralizada también puede estar involucrado.
5. **Movilidad del espectro:** los US son considerados como visitantes en el espectro asignado. Por lo tanto, si la parte específica del espectro en uso es requerida por un UP, la comunicación debe ser continuada en otra porción vacante. Como resultado, la movilidad del espectro también es importante para la comunicación con éxito entre los US.

Las investigaciones existentes en la compartición del espectro en las CRN tienen como objetivo proporcionar soluciones para cada paso que se ha explicado anteriormente. Las soluciones existentes constituyen una amplia literatura sobre la compartición del espectro en las CRN.

Técnicas de compartición del espectro

Las soluciones existentes para el uso compartido del espectro en las CRN se pueden clasificar principalmente en tres aspectos: en función de la arquitectura supuesta, el comportamiento en la asignación del espectro y la técnica de acceso al espectro como se muestra en la figura 13. En esta sección se describen estas tres clasificaciones y se presentan los resultados fundamentales que analizan estas clasificaciones. El análisis de las técnicas de compartición del espectro ha sido investigado mediante dos grandes enfoques teóricos. Por un lado, algunos trabajos utilizan técnicas de optimización para encontrar estrategias óptimas para la compartición del espectro y por otro lado, también se ha usado la teoría de juegos en esta área [12]. La primera clasificación para las técnicas de compartición del espectro en CRN se basa en la arquitectura, lo que se puede describir de la siguiente manera [12].

Compartición del espectro centralizado

En estas soluciones, una entidad centralizada controla los procedimientos de asignación y de acceso al espectro [55, 101, 102]. Con la ayuda de estas operaciones, se propone un procedimiento de detección distribuida de forma que cada entidad de la CRN envíe sus medidas a la entidad central y esa entidad construya un mapa de asignación del espectro.

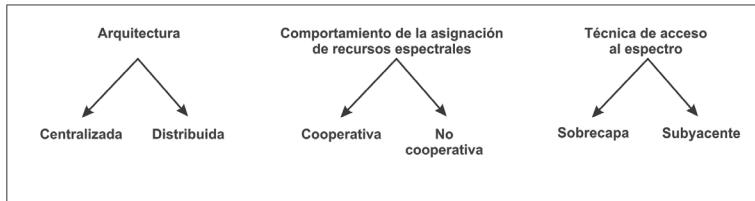
Compartición del espectro distribuido

Las soluciones distribuidas se proponen principalmente para los casos en que no es viable la construcción de infraestructura [91, 103-108]. En consecuencia, cada nodo es responsable de la asignación del espectro y el acceso se basa en las políticas locales (o posiblemente, a nivel general).

La segunda clasificación para las técnicas de compartición del espectro en CRN se basa en el comportamiento de acceso. Más específicamente, el acceso al espectro puede ser cooperativo o no cooperativo, como se explica a continuación:

Compartición del espectro cooperativo

Las soluciones cooperativas (o colaborativas) consideran el efecto de la comunicación de un nodo en los demás nodos [101, 103-105, 107]. En otras palabras, las mediciones de interferencia de cada nodo se comparten con otros nodos. Por otra parte, los algoritmos de asignación del espectro también tienen en cuenta esta información. Si bien todas las soluciones centralizadas pueden ser consideradas como cooperativas, también existen soluciones cooperativas distribuidas.

Figura 13. Clasificación de la compartición del espectro en las redes de radio cognitiva

Fuente: tomado de [12]

Compartición del espectro no cooperativa

Contrariamente a las soluciones cooperativas, las soluciones no cooperativas (o no colaborativas) consideran solo el nodo en cuestión [91, 106, 108]. Las soluciones no cooperativas pueden dar lugar a la utilización reducida del espectro.

Estas dos soluciones por lo general han sido comparadas mediante la utilización del espectro, la equidad y el rendimiento. La utilización y la equidad en el acceso al espectro se ha investigado en [109], donde el problema de la asignación de espectro se modela como un problema de grafos y se investigan ambos enfoques centralizados y distribuidos.

Utilizando este modelo, se desarrolló un esquema de optimización. En este esquema, los US asignan canales de acuerdo con la interferencia causada por la transmisión. Los resultados de la simulación muestran que los enfoques cooperativos superan los enfoques no cooperativos y se aproximan al óptimo global. Por otra parte, la comparación de soluciones centralizadas y distribuidas revela que la solución distribuida sigue de cerca la solución centralizada. Un análisis similar se ha presentado en [110], donde se investigan los efectos de la colaboración en el acceso al espectro. Un supuesto importante en estos trabajos es que los US conocen la ubicación y la potencia de transmisión de los UP, de manera que los cálculos de interferencia se pueden realizar fácilmente.

Sin embargo, tal suposición no siempre puede ser válida en CRN. También se ha explotado la teoría de juegos para la evaluación del desempeño de los sistemas cognitivos de acceso al espectro. Sobre todo, la comparación entre los enfoques cooperativos y no cooperativos se ha presentado en [111] por medio de análisis teórico de juegos. En [111], la teoría de juegos se utiliza para analizar el comportamiento de la RC en la asignación adaptativa y distribuida de canales. Se supone que los usuarios implementan CDMA y determinan el canal de operación y la velocidad de codificación, manteniendo constante la potencia de transmisión. Se muestra que el caso cooperativo puede ser modelado como un juego, que converge a una solución de estrategia de equilibrio de Nash pura. Sin embargo, se ha demostrado que este esquema no es aplicable para la compartición no cooperativa del espectro y se ha propuesto un algoritmo de aprendizaje. Las evaluaciones revelan que el punto de equilibrio de Nash para los usuarios cooperativos se alcanza rápidamente y da lugar a un cierto grado de justicia, así como de mejor rendimiento.

Por otro lado, el algoritmo de aprendizaje para los usuarios no cooperativos converge a una estrategia de asignación mixta. Adicionalmente, la imparcialidad se de-

grada cuando se utiliza el enfoque no cooperativo. Si bien este enfoque se traduce en un desmejoramiento leve del rendimiento, el intercambio de información requerida por los usuarios egoístas es significativamente bajo. Por último, la tercera clasificación para compartir el espectro en las CRN se basa en la tecnología de acceso como se explica a continuación.

Compartición del espectro sobrecapa

La compartición del espectro sobrecapa se refiere a la técnica de acceso al espectro utilizado. Más específicamente, un nodo accede a la red utilizando una porción del espectro que no ha sido utilizado por el UP [89, 91, 101, 103, 105-108]. Como resultado, la interferencia al sistema primario se reduce al mínimo.

Compartición del espectro subyacente

La compartición del espectro con solapamiento explota las técnicas de espectro ensanchado desarrolladas para redes celulares [104]. Una vez ha sido adquirido un mapa de asignación del espectro, un US comienza la transmisión de manera que su potencia de transmisión en una cierta porción del espectro se considera como ruido por parte de los UP. Esta técnica requiere técnicas sofisticadas de espectro ensanchado y se puede utilizar un mayor AB en comparación con las técnicas sin solapamiento. En [86], los efectos de los dos métodos en un esquema cooperativo son investigados, allí los usuarios no cooperativos se analizan utilizando la teoría de juegos. Usando este esquema, se demuestra que la multiplexación por división de frecuencia (FDM) es óptima cuando la interferencia entre los usuarios es alta. Como resultado, el enfoque subyacente se vuelve más eficiente que el sobrecapa cuando la interferencia entre los usuarios es alta.

Sin embargo, la falta de cooperación entre los usuarios hace necesario un enfoque sobrecapa. Las evaluaciones comparativas muestran que la pérdida de rendimiento, debido a la falta de cooperación, es pequeña y se desvanece a medida que aumenta la SNR. Sin embargo, en este esquema no se consideran el costo y las inexactitudes en el intercambio de información entre los usuarios; otra comparación de los enfoques se presenta en [112]. La comparación se basa en la influencia de la red secundaria en el sistema primario, en cuanto a la probabilidad de interrupción, y se consideran tres técnicas de compartición del espectro. La primera técnica (propagación subyacente) requiere que los US difundan su potencia de transmisión a través de todo el espectro, tal como CDMA o UWB. La segunda técnica (propagación sobrecapa) requiere que los nodos elijan una banda de frecuencia para transmitir de manera que se reduce al mínimo la interferencia hacia los UP [12].

También se investigó una técnica híbrida (la propagación subyacente con evitación de interferencia), donde un nodo propaga su transmisión a través de todo el espectro y en frecuencias donde un UP está transmitiendo. A continuación, se determinan las estadísticas de interferencia para cada técnica con el fin de realizar el análisis de la probabilidad de interrupción. Luego, se deriva la probabilidad de interrupción para cada técnica suponiendo tres escenarios: que no hay conocimiento del sistema, que se conoce todo el sistema y el conocimiento limitado del sistema. Al igual que en otros trabajos existentes, cuando se supone el conocimiento total del sistema, el

esquema sobrecapa supera el esquema subyacente en términos de probabilidad de interrupción [12]. También es importante mencionar que el esquema subyacente tiene poco alcance debido a su baja potencia.

Sin embargo, cuando se evita la interferencia en la compartición del espectro, el esquema subyacente garantiza menor probabilidad de interrupción en comparación con la técnica de evitación de interferencias solamente. En un caso más realista, cuando se considera el conocimiento del sistema limitado, se acentúa la importancia de la técnica híbrida. Los esquemas sobrecapa acarrean problemas de rendimiento debido a las imperfecciones en la detección del espectro. Más específicamente, un nodo puede transmitir en un canal donde un UP está transmitiendo. Sin embargo, cuando se usa el modelo subyacente junto con la evitación de interferencia, la interferencia causada al UP se reduce al mínimo. Otro resultado importante es que el esquema híbrido puede tener un mayor número de US transmitiendo en comparación con el modelo de evitación de interferencia solamente [12].

Desafíos en la compartición del espectro

Aunque ya existe una gran cantidad de investigaciones en la compartición del espectro, todavía hay muchos temas de investigación abiertos para la realización de la operación eficaz y sin fallas sobre el espectro libre. A continuación se detallan los retos para la compartición del espectro en las CRN junto con algunas posibles soluciones [12].

Canal de control común (CCC)

Varias soluciones de uso compartido del espectro, ya sea centralizado o distribuido, suponen un CCC para compartir el espectro [101, 105, 106]. Está claro que un CCC facilita diferentes funcionalidades de compartición del espectro, como el saludo entre el transmisor y el receptor [105], la comunicación con una entidad central [101] o el intercambio de la información de detección. Sin embargo, debido al hecho de que los US son considerados como los visitantes del espectro, cuando un UP elige un canal, este canal debe quedar libre para no generar interferencia. Esto también aplica para el CCC. Como resultado, la aplicación de un CCC fijo no es factible en CRN. Por otra parte, en una red con UP, un CCC para todos los usuarios es altamente dependiente de la topología, por lo tanto, varía en el tiempo [107]. En consecuencia, para los protocolos que requieren un CCC y también se necesita una técnica de mitigación del CCC, o debe ser utilizado un CCC local para los grupos de nodos [107]. Por otro lado, cuando no se utiliza un CCC, el saludo transmisor-receptor se convierte en un reto. Para esta situación pueden ser utilizadas las técnicas basadas en el receptor propuestas en [108].

Rango dinámico de alcance de radio

El rango de alcance de radio cambia con la frecuencia de operación debido a la variación de la atenuación. En muchas soluciones, se asume un rango fijo independiente del espectro operativo [103, 107]. Sin embargo, en las CRN, donde se considera una gran parte del espectro inalámbrico, los vecinos de un nodo pueden cambiar a medida que se den cambios de las frecuencias de funcionamiento. Esto afecta el perfil

de interferencia, así como las decisiones de enrutamiento. Por otra parte, debido a esta propiedad, la elección de un canal de control debe ser realizada cuidadosamente.

Sería mucho más eficiente seleccionar canales de control en las porciones inferiores del espectro donde el rango de transmisión es mayor y seleccionar canales de datos en las porciones más altas del espectro donde se puede dar una operación localizada minimizando la interferencia. Hasta el momento, no existe ninguna actividad para abordar este importante reto en CRN, se recomiendan técnicas de compartición del espectro con conocimiento de la frecuencia de funcionamiento debido la interdependencia directa entre la interferencia y rango de alcance de la radio.

Capítulo 2. Detección de espectro

La detección de espectro (*Spectrum Sensing*) ha sido brevemente definida como la labor de obtener espectro disponible, determinando la existencia de UP dentro de una región geográfica definida. Esto se obtiene de diversas formas dentro de las cuales se encuentra la detección local del espectro en RC [113-115]. En la técnica de acceso al espectro sobre capa, un usuario de RC puede transmitir únicamente en frecuencias que no estén siendo usadas en el espectro que lo rodea. Por lo tanto, dicho usuario debe monitorear las bandas disponibles y capturar su información para finalmente detectar lo que se conoce como huecos espectrales [6, 31].

A pesar de que la detección de espectro es tradicionalmente entendida como la medida de la energía de las frecuencias de radio a lo largo del espectro; cuando se trata de RC, la detección se convierte en un término más amplio que involucra la obtención de características de uso espectral en múltiples dimensiones como el tiempo, el espacio, la frecuencia y el código [116]. La detección comprende una gran variedad de aspectos asociados con la determinación del tipo de señal que ocupa una banda; sin embargo, esto requiere técnicas más robustas para el análisis de señales, que suponen mayor complejidad desde el punto de vista computacional [117].

El conocimiento del entorno de radio (CER) es un requisito fundamental en los sistemas de comunicación que incluyen tareas especiales como: la detección y la estimación de la ubicación de las fuentes de transmisión de señales de RF, la posterior identificación de sus características internas (si es necesaria), la descripción del perfil espectral de una banda determinada como *observada* (es decir, potencialmente medida o extrapolada) en una localización particular en los dominios espacio/tiempo, entre otros. Todas estas actividades están destinadas a crear, mejorar y actualizar los mapas del entorno de radio (MER), que luego se pueden utilizar en muchas aplicaciones y servicios, como en la mejora de la capacidad de las redes celulares y otras redes coexistentes, ya que al realizar traspasos entre ellas, se logra balancear la carga y evitar la interferencia; en la introducción de servicios basados en el DSA; en sistemas de comunicación de emergencia; en estimación de ubicaciones sin GPS, etc. Para las aplicaciones anteriores es de gran importancia caracterizar con precisión el entorno mediante la identificación de la presencia de transmisores RF, la clasificación de sus componentes (por ejemplo formas de onda) y su localización en términos espaciales. Actualmente, los sistemas y redes de radio cognitiva conllevan importantes requisitos

de CER para determinar las bandas del espectro no utilizadas y así usarlas de una manera eficiente [31, 118].

Una RC está diseñada para estar consciente y ser susceptible a los cambios en su entorno, lo que hace de la detección de espectro un requisito importante para el desarrollo de las redes de RC. La detección de espectro les permite a los usuarios de RC aprovechar la porción de espectro no utilizada, adaptándose al entorno de radio. Esta capacidad es necesaria en los siguientes casos: 1) los usuarios de RC encuentran huecos espectrales disponibles en un amplio rango de frecuencia para su transmisión (detección fuera de banda) y 2) los usuarios de RC monitorean la banda espectral durante la transmisión y detectan la presencia de redes primarias con el fin de evitar causar interferencias (detección en banda). Las siguientes funcionalidades para la detección del espectro se analizan en las secciones posteriores:

- **Detección de UP:** el usuario de RC observa y analiza su entorno de radio local. Basándose en estas observaciones de la ubicación de sí mismo y sus vecinos, los usuarios de RC determinan la presencia de transmisiones de los UP y, en consecuencia, identifican la disponibilidad de espectro actual.
- **Detección cooperativa:** la información observada en cada usuario de RC se intercambia con sus vecinos con el fin de mejorar la precisión de la detección.
- **Control de detección:** esta función le permite a cada usuario de RC realizar sus operaciones de detección adaptándose al entorno de radio dinámico. Además, coordina las operaciones de detección de los usuarios de RC y sus vecinos de una manera distribuida, lo que previene falsas alarmas en la detección cooperativa.

Un sistema CER completo debe contener como mínimo las siguientes partes, para una adecuada detección y ubicación de los transmisores [116]:

- Un bloque de procesamiento que detecte las señales de interés (como los UP) y proporcione estimaciones de ciertas características de RF, como la frecuencia de operación, la ocupación espectral, la velocidad de transmisión, el nivel de ruido, la SNR, etc.
- Un procesador que proporcione estimaciones más finas de las características del entorno (como una estimación de canal), así como estimaciones de alta calidad de las características espaciales del transmisor como el ángulo de llegada (AOA), tiempo de llegada /diferencia del tiempo de llegada (TOA/TDOA) y frecuencia de llegada/diferencia de la frecuencia de llegada (FOA/FDOA), siempre que el escenario lo permita.
- Un sistema de geolocalización (GLS) que combine lo anterior más la información de una plataforma de ubicación asistida con GPS, con el fin de proporcionar la posición del transmisor con la mayor precisión posible.
- Un sistema que abarque todo el mapa del entorno de radio (MER), el cual recibe toda esta información estimada —además de otra posible información de bases de datos relacionadas— para una presentación y evaluación final del entorno de radio [31].

Modelos de actividad del usuario primario

Para describir la naturaleza dinámica de las redes de RC se necesita una nueva métrica para capturar el comportamiento estadístico de las redes primarias, llamada actividad de UP. Dado que no hay garantía de que una banda de espectro esté disponible durante toda la comunicación de un usuario de RC, la estimación de la actividad de los UP es un tema relevante en la toma de decisiones.

La mayor parte de las investigaciones de RC asumen que la actividad de los UP se modela por arribos distribuidos exponencialmente, [80, 119-123]. En este modelo, el tráfico de los UP puede ser modelado como un proceso de dos estados de nacimiento-muerte con tasa de mortalidad α y tasa de nacimiento β . Un estado *encendido* (ocupado) representa el periodo utilizado por UP y un estado *apagado* (inactivo) representa el periodo no utilizado [124]. Puesto que cada arribo de usuario es independiente, cada transición sigue el proceso de arribo de Poisson. Por lo tanto, la duración de los periodos de encendido y apagado son distribuidos exponencialmente.

Hay algunos esfuerzos para modelar la actividad de los UP en bandas específicas del espectro con base en experimentos de campo. En [125] se presentan las características del uso primario en redes celulares con base en registros de llamadas recolectadas por los sistemas de red, en lugar de la medición real. Este análisis muestra que un modelo exponencial de arribo de llamadas es adecuado para interpretar la actividad de los UP, mientras que la duración de las llamadas de voz inalámbricas no sigue una distribución exponencial. Asimismo, se muestra que se puede utilizar un camino aleatorio para describir la actividad de los UP en condiciones de alto tráfico [31].

En [126] se propone un modelo estadístico del tráfico de WLAN con base en un modelo semi-Markov, para describir el comportamiento temporal de las redes WLAN. Por medio de estudios empíricos se muestra que una distribución hiper-Erlang de la duración de ocupado ofrece la mejor aproximación para el tráfico estacionario de protocolo de datagrama de usuario (UDP) y para el tráfico no estacionario del protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP) en redes WLAN. Sin embargo, la complejidad de esta distribución dificulta su aplicación práctica en las funciones de RC. Los planteamientos anteriores son modelos fijos basados en mediciones desconectadas, por lo tanto, no representan adecuadamente la naturaleza variante en el tiempo de la actividad de los UP. Adicionalmente, de forma similar al modelo de Poisson clásico, estos enfoques no logran interpretar las características de ráfagas de los datos monitoreados [127, 128]. Sin embargo, como se menciona en [125], también es importante tener en cuenta las fluctuaciones a corto plazo para que los usuarios de RC puedan detectar de forma precisa más oportunidades de transmisión.

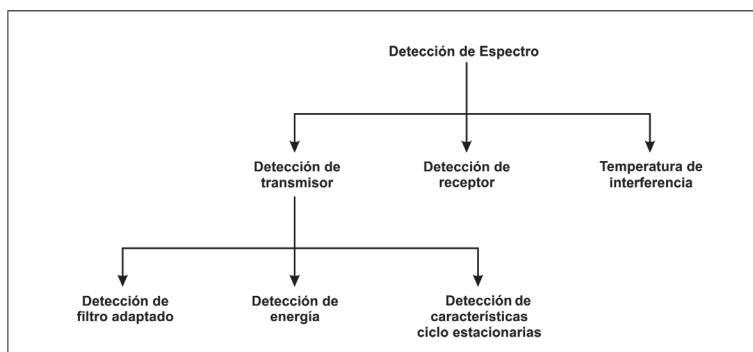
Con el fin de rastrear con precisión la actividad cambiante de los UP, se desarrolla en [129] *cognitive radio* (CR un modelo novedoso de la actividad de los UP con base en mediciones en tiempo real para redes de RC. Primero, se recogen muestras de la señal de los UP durante un tiempo predeterminado; entonces, si las señales observadas de los UP son mayores a un umbral se agrupan. A partir de esta agrupación, se pueden estimar las tasas de llegada y salida de los UP. En este trabajo se calcula la duración de la toma de muestras de la señal, así como el umbral para clasificar el valor observado como una señal legítima de un UP. Sin embargo, este enfoque necesita varias

muestras de la señal de los UP en un lugar centralizado. Por lo tanto, esto debe extenderse a las redes ad hoc de RC (CRAHN), de modo que cada usuario de RC pueda formar grupos de las señales de los UP, basándose en su observación local, que a su vez se pueden combinar para modelar por completo la actividad de los UP. Por otra parte, el modelo de canal de ruido gaussiano blanco aditivo (AWGN) utilizado en el método propuesto no incorpora los efectos de los desvanecimientos, lo que puede reducir la precisión de la predicción en la actividad de los UP [31].

Detección de los usuarios primarios

La detección de espectro les permite a los usuarios de RC adaptarse al entorno de radio para determinar las partes de espectro no utilizadas, llamadas huecos espectrales, sin causar interferencia a la red primaria. Generalmente, las técnicas de detección de espectro se pueden clasificar en tres grupos: 1) detección del transmisor primario, 2) detección del receptor primario y 3) administración de la temperatura de interferencia, como se muestra en la figura 14. A continuación se presentan las técnicas fundamentales de detección de espectro, que a su vez son la base para desarrollar algoritmos de detección más elaborados [31, 100, 130].

Figura 14. Clasificación de las técnicas de detección de espectro



Fuente: tomado de [12].

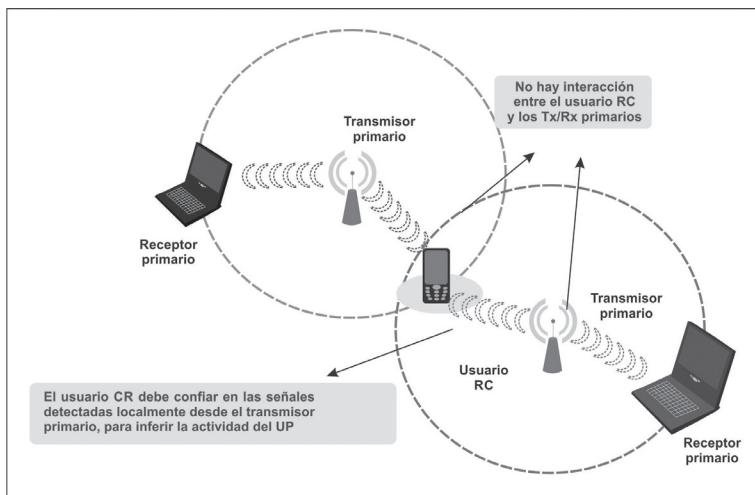
Detección de transmisor (detección no cooperativa)

Dado que se asume que los usuarios de RC no tienen ningún tipo de interacción en tiempo real con los transmisores y los receptores primarios, no se pueden conocer los datos exactos sobre las transmisiones actuales en las redes primarias. Por lo tanto, en la detección de transmisor, los usuarios de RC detectan la señal de un transmisor primario únicamente por medio de las observaciones locales de los usuarios de RC, con el fin de distinguir entre las bandas de espectro utilizadas y no utilizadas, tal como se muestra en la figura 15. Así pues, los usuarios de RC deben tener la capacidad de determinar si una señal del transmisor primario está presente localmente en determinado espectro. Se puede definir un modelo básico de hipótesis para la detección del transmisor de la siguiente manera:

$$y(t) = \begin{cases} w(t)H_0 \\ hs(t) + w(t)H_1 \end{cases} \quad (3)$$

Donde $y(t)$ es la señal recibida por el usuario de RC, $s(t)$ es la señal transmitida por el UP, $w(t)$ es el AWGN de media cero y h es la ganancia en amplitud del canal. H_0 es una hipótesis nula, que indica que no hay señal de un usuario licenciado en determinada banda del espectro. Por otro lado, H_1 es una hipótesis alternativa, que indica que existe alguna señal de un UP.

Figura 15. Detección de transmisor primario



Fuente: tomado de [14].

Se utilizan generalmente tres esquemas para la detección de transmisor: detección de filtro adaptado, detección de energía y detección de características cicloestacionarias [1, 31].

Detección de energía

El enfoque basado en el detector de energía es la forma más común de detección de espectro debido a su baja complejidad computacional y de implementación [1, 75, 90, 106, 131-154]. Adicionalmente, es más genérico, ya que los receptores no necesitan ningún conocimiento sobre la señal de los UP. La señal se detecta mediante la comparación de la salida del detector de energía con un umbral que depende del piso de ruido [155]. Algunos de los retos en la detección de energía incluyen la selección del umbral para la detección de los usuarios primarios, la incapacidad para diferenciar entre la interferencia de los UP y el ruido, y el bajo rendimiento en condiciones de baja SNR [90]. Por otra parte, los detectores de energía no funcionan de manera eficiente para la detección de señales de espectro ensanchado [1, 150]. De la ecuación

(3) se supone que la señal recibida en discreto con una ganancia unitaria, tiene la siguiente forma [116]:

$$y(n) = s(n) + w(n) \quad (4)$$

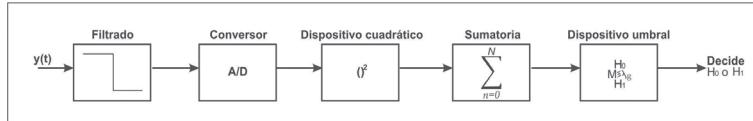
Donde n es el índice de la muestra. Cuando $s(n) = 0$ no hay transmisión del UP. La métrica de decisión para el detector de energía se puede escribir como:

$$M = \sum_{n=0}^N |y(n)|^2 \quad (5)$$

Donde N es el tamaño del vector de observación. La decisión sobre la ocupación de una banda se puede obtener mediante la comparación de la métrica de decisión M con un umbral fijo λ_E , como se presenta en la figura 16. Reescribiendo la ecuación (3) es equivalente a distinguir entre las dos siguientes hipótesis:

$$\begin{aligned} H_0 : & y(n) = w(n) \\ H_1 : & y(n) = s(n) + w(n) \end{aligned} \quad (6)$$

Figura 16. Diagrama de detector de energía



Fuente: tomada de [116]

El desempeño del algoritmo de detección se puede resumir con dos probabilidades: probabilidad de detección P_D y probabilidad de falsa alarma P_F . P_D es la probabilidad de detectar una señal en la frecuencia considerada cuando realmente está presente. Por lo tanto, se desea una probabilidad de detección alta y puede ser formulada como:

$$P_D = P_r(M > \lambda_E | H_1) \quad (7)$$

P_F es la probabilidad de que erróneamente se decida que la frecuencia está ocupada, cuando en realidad no lo está y puede ser escrita como:

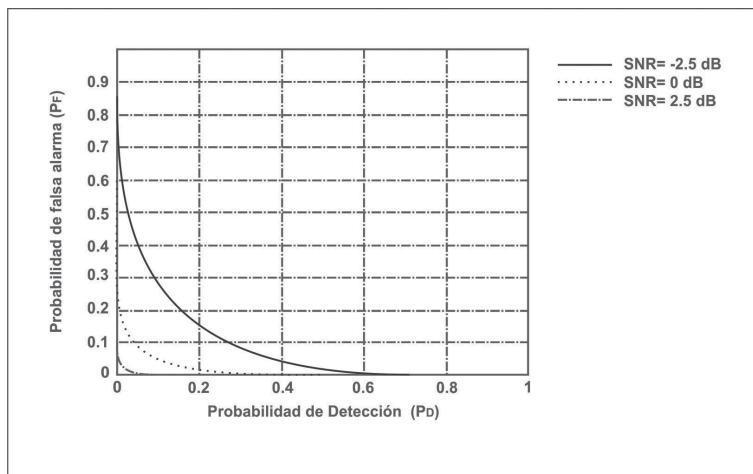
$$P_F = P_r(M > \lambda_E | H_0) \quad (8)$$

La P_F debe mantenerse tan pequeña como sea posible, con el fin de evitar la subutilización de las oportunidades de transmisión. El umbral de decisión λ_E puede ser seleccionado en busca de un equilibrio óptimo entre la P_D y la P_F . Sin embargo, esto requiere el conocimiento de las potencias de ruido y de las señales detectadas. La potencia de ruido puede ser estimada, pero la potencia de la señal es difícil de estimar, ya que cambia dependiendo de las características de transmisión y de la distancia entre el radio cognitivo y el UP. En la práctica, se elige el umbral para obtener una cierta tasa de falsa alarma [156]. Por lo tanto, el conocimiento de la varianza del ruido es suficiente para la selección de un umbral [116].

El ruido blanco puede ser modelado como una variable aleatoria gaussiana de media cero, con varianza, esto es, para un análisis simplificado, se va a modelar la señal como una variable gaussiana de media cero, de la misma forma: el modelo de $s(n)$ es más complicado ya que se debe considerar también el desvanecimiento. Debido a estos supuestos, la métrica de decisión sigue la distribución chi-cuadrado con $2N$ grados de libertad y por lo tanto, se puede modelar como:

$$M = \begin{cases} \frac{\sigma_w^2}{2} X_{2N}^2 H_0 \\ \frac{\sigma_w^2 + \sigma_s^2}{2} X_{2N}^2 H_1 \end{cases} \quad (9)$$

Figura 17. Curvas de la característica operativa del receptor (ROC) para el detector de energía bajo diferentes valores de SNR



Fuente: tomado de [116].

Para el detector de energía, las probabilidades P_F y P_D pueden calcularse como [138]:

$$P_F = 1 - r \left(L_f L_t, \frac{\lambda_E}{\sigma_w^2} \right) \quad (10)$$

$$P_F = 1 - r \left(L_f L_t, \frac{\lambda_E}{\sigma_w^2} \right) \quad (11)$$

donde λE es el umbral de decisión y $\Gamma(a, x)$ es la función gamma incompleta [157]. Con el fin de comparar los resultados de diferentes valores de umbral, se pueden utilizar curvas de ROC. Las curvas ROC permiten explorar la relación entre la sensibilidad (probabilidad de detección) y la especificidad (tasa de falsa alarma) de un método de detección para diferentes umbrales, permitiendo así la determinación de un umbral óptimo. La figura 17 muestra las curvas ROC para diferentes valores de SNR. La SNR se define como la relación de potencia de la señal del UP y la potencia de ruido, es decir, $SNR = \frac{\sigma_s^2}{\sigma_w^2}$. El número de muestras usadas es $N = 15$.

La figura 17 muestra claramente, que el desempeño de los detectores de umbral aumenta directamente con valores de SNR.

El umbral utilizado en los algoritmos de detección basados en el detector de energía depende de la varianza del ruido. En consecuencia, un pequeño error en la estimación de la potencia de ruido hace que el rendimiento se degrade significativamente [97]. Como una solución a este problema, el nivel de ruido se estima de forma dinámica mediante la separación de los subespacios de la señal y del ruido utilizando el algoritmo de clasificación de señal múltiple (MUSIC) [158]. La varianza del ruido se obtiene como el valor más pequeño de la señal de autocorrelación de la entrada; a continuación, el valor estimado se utiliza para elegir el umbral que satisface una tasa de falsa alarma constante. En [153] se propone un algoritmo iterativo para encontrar el umbral de decisión. El umbral se encuentra de forma iterativa para satisfacer un nivel de confianza determinado, es decir, la probabilidad de falsa alarma. El método propuesto estima adaptativamente el nivel de ruido, por lo tanto, es adecuado para los casos prácticos en los que no se conoce la varianza del ruido.

En [126, 146, 147] se analizan los resultados de mediciones utilizando detector de energía para identificar los períodos de inactividad y de ocupación de canales WLAN. En [106] se mide y se compara el nivel de energía para cada ranura del sistema global para las comunicaciones móviles (GSM) con el fin de identificar las ranuras inactivas para su utilización. La tarea de detección en este trabajo es diferente, pues el radio cognitivo se debe sincronizar con la red del UP y el tiempo de detección se limita a la duración de la ranura. Un enfoque similar se utiliza en [159], para la utilización oportunista de ranuras celulares no ocupadas; en [143], el nivel de potencia en la salida de la Transformada Rápida de Fourier (FFT) de una señal entrante se compara con un valor de umbral, con el fin de identificar los canales de televisión utilizados. La FFT se realiza sobre los datos muestreados a 45 kHz alrededor de la frecuencia portadora de televisión para cada canal de televisión [116].

Detección de filtro adaptado y detección coherente

Si los usuarios secundarios conocen a priori la información acerca de la señal de un UP, el método óptimo de detección es el filtro adaptado [160], ya que un filtro adap-

tado puede correlacionar la señal primaria ya conocida con la señal recibida para detectar la presencia del UP, y por lo tanto maximizar la SNR en la presencia de ruido estocástico aditivo. El mérito del filtro adaptado es el corto tiempo que se requiere para alcanzar un determinado rendimiento de detección, como lo son una baja probabilidad de detección fallida y de falsa alarma [161], ya que un filtro adaptado necesita menos muestras de la señal. Sin embargo, el número requerido de muestras de la señal también crece a medida que la SNR recibida disminuye [162]. Adicionalmente, la complejidad en la implementación y el consumo de energía son demasiado altos [1], debido a que el filtro adaptado necesita receptores para todos los tipos de señales y los algoritmos de recepción correspondientes para ser ejecutados [163].

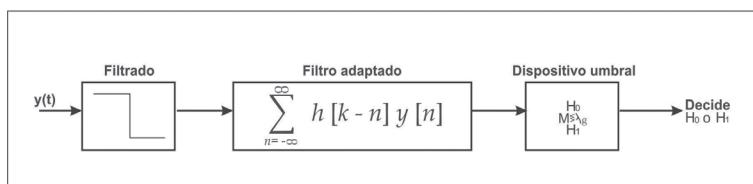
El filtrado adaptado requiere un conocimiento perfecto de la señal del UP, tal como la frecuencia de funcionamiento, el ancho de banda, el tipo de modulación y el orden, la forma del pulso, el formato del paquete, etc. Si se utiliza información incorrecta para el filtrado adaptado, el rendimiento en la detección se degrada notoriamente. Por otro lado, la mayoría de sistemas de comunicaciones inalámbricas exhiben ciertos patrones, como los tonos piloto, los preámbulos, los códigos de ensanchamiento, etc., que se utilizan para ayudar a los propósitos de control, ecualización, sincronización, o referencia [163].

La detección de filtro adaptado puede ser expresa como [164]:

$$M = \sum_{n=-\infty}^{\infty} h[k-n] y[n] \quad (12)$$

Donde y es el vector de la señal recibida y se convoluciona con h , que es la respuesta al impulso del filtro adaptado, que para este caso corresponde a la señal de referencia que busca maximizar la SNR. Inicialmente, la señal de entrada pasa a través de un filtro pasabanda y a continuación se convoluciona con el filtro adaptado, como se muestra en la figura 18 [165].

Figura 18. Diagrama de bloques del filtro adaptado



Fuente: tomado de [166].

Aunque no pueda obtenerse la información perfecta de una señal de un UP; si a partir de las señales recibidas un cierto patrón es conocido, se puede utilizar la detección coherente para decidir si un UP está transmitiendo o no [149]. Como un ejemplo, el procedimiento de detección coherente usando el patrón piloto, se explica a continuación [149, 163].

Hay dos hipótesis en la detección coherente:

$$\begin{aligned} H_0 : & y(t) = w(t) \\ H_1 : & y(t) = \sqrt{\epsilon}x_p(t) + \sqrt{1-\epsilon}x(t) + w(t) \end{aligned} \quad (13)$$

Donde $x_p(t)$ es un tono piloto conocido, ϵ es la fracción de la energía asignada al tono piloto, $x(t)$ es la señal deseada asumida como ortogonal al tono piloto y $w(t)$ es el AWGN. Las estadísticas de prueba de la detección coherente se definen como la señal recibida proyectada en la dirección del piloto, es decir

$$T = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N y(t) \hat{x}_p(t) \quad (14)$$

\hat{x}_p es un vector de unidad normalizado en la dirección del tono piloto. A medida que N aumenta, las estadísticas de prueba T bajo la hipótesis H_1 serán mucho mayores que bajo H_0 . Mediante la comparación de T con un umbral de detección predeterminado, se puede decidir la presencia de un UP. La detección coherente también se puede realizar en el dominio de la frecuencia [167]. Se puede expresar la prueba de hipótesis binaria utilizando la densidad espectral de potencia de la señal recibida $S_y(w)$ y distinguir entre H_0 y H_1 mediante el aprovechamiento de la firma espectral única exhibida en $S_y(w)$ [163].

Detección de características cicloestacionarias

Las señales moduladas son, en general, acopladas con portadores de onda sinusoidal, trenes de pulso, secuencias de saltos o prefijos cílicos, lo que da lugar a incorporar periodicidad. Por lo tanto, estas señales moduladas se caracterizan como cicloestacionarias, ya que su media y autocorrelación muestran periodicidad. El detector de características utiliza esta periodicidad inherente a la señal del usuario primario mediante el análisis de la función de correlación espectral [168]. La ventaja principal de la detección de características es su robustez frente a la incertidumbre en la potencia de ruido.

El detector de características distingue entre la energía del ruido y la energía de la señal modulada, que es el resultado de que el ruido es una señal estacionaria sin correlación, mientras que las señales moduladas son cicloestacionarias con correlación espectral, debido a la periodicidad incorporada. Además, dado que el detector de características también es capaz de diferenciar distintos tipos de señales, puede tolerar las falsas alarmas causadas por señales externas, como los procedentes de otros usuarios de RC o de interferencia. Por lo tanto, un detector de características cicloestacionarias puede funcionar mejor que el detector de energía en la diferenciación de los distintos tipos de señales. Sin embargo, es computacionalmente complejo y requiere un tiempo de observación significativamente largo [163].

La detección de características cicloestacionarias es un método para la detección de las transmisiones de usuarios primarios mediante la exploración de las características

de cicloestacionariedad de las señales recibidas [1, 51, 131, 139, 169-176]. Las características de cicloestacionariedad son causadas por la periodicidad en la señal o en sus estadísticas, como la portadora de una señal sinusoidal, los trenes de pulso, las secuencias de saltos, o los prefijos cíclicos, entre otros; lo que da lugar a incorporar periodicidad en su media y autocorrelación [31, 169], o pueden ser inducidas intencionalmente para ayudar a detectar el espectro [177-179]. En lugar de la densidad espectral de potencia (DEP), se utiliza la función de correlación cíclica, para la detección de señales presentes en un determinado espectro. Los algoritmos de detección basados en la cicloestacionariedad pueden diferenciar el ruido de las señales de los usuarios primarios. Este, como consecuencia de que el ruido es estacionario en sentido amplio (WSS) sin correlación, mientras que las señales moduladas son cicloestacionarias con correlación espectral debido a la redundancia de periodicidades en la señal [51]. Además, la cicloestacionariedad se puede utilizar para distinguir entre diferentes tipos de transmisiones y usuarios primarios [175].

La función de densidad espectral cíclica (DEC) de una señal recibida puede ser calculada como [116, 180],

$$S(f, \alpha) = \sum_{\tau=-\infty}^{\infty} R_y^\alpha(\tau) e^{-j2\pi f\tau} \quad (15)$$

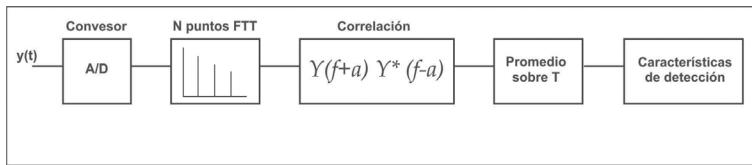
En donde

$$R_y^\alpha(\tau) = E[y(n+\tau)y^*(n-\tau)e^{j2\pi\alpha n}] \quad (16)$$

$R_y^\alpha(\tau)$ es la función de autocorrelación cíclica (FAC) y α es la frecuencia cíclica. La función de la DEC entrega a la salida valores pico cuando la frecuencia cíclica es igual a las frecuencias fundamentales de la señal transmitida $x(n)$. Se puede suponer que se conocen las frecuencias cíclicas [170, 173] o pueden ser extraídas y utilizadas como características para identificar las señales transmitidas [172]. Por lo tanto, un detector de características cicloestacionarias puede funcionar mejor que el detector de energía en la diferenciación de los distintos tipos de señales. Sin embargo, es computacionalmente complejo y requiere un tiempo de observación significativamente largo [116].

La señal OFDM es alterada antes de la transmisión en [177-179] con el fin de generar firmas específicas del sistema o frecuencias cíclicas en ciertas frecuencias. Estas firmas se utilizan para proporcionar un mecanismo efectivo en la clasificación de la señal. En [179], el número de características generadas en la señal se incrementa con el fin de aumentar la robustez contra los desvanecimientos por múltiples trayectos. En la figura 19 se muestra el diagrama de bloques de un detector cicloestacionario [116].

Figura 19. Diagrama de bloques del detector de señales cicloestacionarias



En la tabla 1 se pueden resumir las principales técnicas de detección de espectro [163].

Tabla 1. Características de las técnicas fundamentales de detección de espectro

Técnica	Estadísticas de prueba	Ventajas	Desventajas
Detector de energía	Energía de las muestras de la señal recibida.	Fácil de implementar. No requiere conocimiento previo de las señales primarias.	Alta falsa alarma debido a la incertidumbre del ruido. Poco confiable en señales de baja SNR. No puede diferenciar un usuario primario de otra fuente de señales.
Filtro adaptado y detección coherente.	Señal recibida prevista en sentido de la ya conocida señal primaria o de un cierto patrón de señal.	Más robusto ante la incertidumbre del ruido y mejor detección de señales de baja SNR que el detector de características. Requiere menos muestras de la señal para conseguir una buena detección.	Se requiere información previa y precisa sobre ciertos patrones de las señales primarias. Alta complejidad.
Detector de característica.	Función de densidad de espectro cíclica de la señal recibida, o por coincidencia de las características generales de la señal recibida con las características de la ya conocida señal primaria.	Más robusto en contra de la incertidumbre del ruido y mejor detección de señales de baja SNR que el detector de energía. Puede distinguir entre diferentes tipos de transmisiones y sistemas primarios.	Las características particulares de la señal pueden necesitar ser introducidas, por ejemplo, comunicaciones basadas en OFDM. Características específicas, por ejemplo, características cicloestacionarias, deben ser asociadas con señales primarias.

Fuente: tomado de [163].

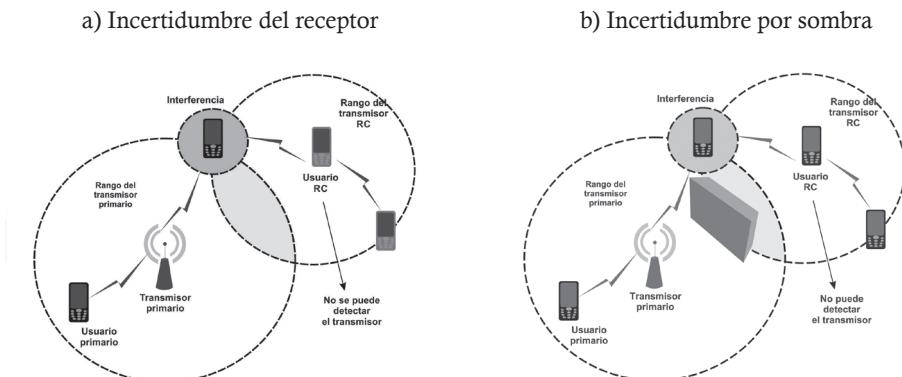
Detección Wavelet

La detección de espectro de banda ancha con múltiples subbandas puede ser visto como un problema en la detección. En la técnica de detección wavelet, el espectro de banda ancha se considera como subbandas continuas, en las que las características

espectrales de potencia son suaves dentro de las bandas, pero cambian abruptamente en los bordes de las bandas. Mediante el empleo de una transformada wavelet de la DEP en la señal observada $y(t)$, pueden ser localizadas las singularidades de la DEP $Sy(f)$ y, por lo tanto, se pueden encontrar las bandas de frecuencia disponibles. El enfoque de detección wavelet es particularmente útil cuando se hace la detección en bandas no contiguas del espectro. En [181] se propuso un enfoque wavelet para la detección del espectro de banda ancha para los radios cognitivos [31].

Las técnicas de detección descritas anteriormente, usadas de manera no cooperativa, o sea sin el intercambio de la información detectada por parte los usuarios de RC; pueden causar problemas de interferencia al UP. En la figura 20 (a) se ilustra la interferencia causada a un UP como consecuencia de la no detección del espectro por parte de un usuario de RC. Ya que el rango de detección del transmisor primario se encuentra fuera de la distancia de detección del usuario de RC. En la figura 20 (b) se presenta otro caso de interferencia a un UP, debido a la no detección del espectro de un usuario de RC, derivado de un obstáculo existente entre el transmisor primario y el usuario de RC.

Figura 20. Problema de detección del transmisor

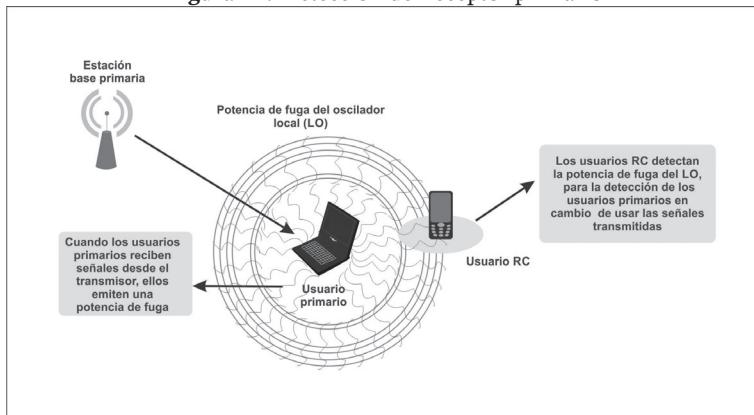


Fuente: tomado de [12].

Detección del receptor

Una de las formas más eficientes para detectar *huecos espectrales* es detectar a los usuarios primarios que están recibiendo datos dentro del rango de comunicación de un usuario de RC. Como se muestra en la figura 21, el receptor primario normalmente emite una potencia de fuga del oscilador local (LO) desde su *RF front-end* cuando recibe las señales del transmisor primario. Con el fin de determinar la disponibilidad de espectro, el método de detección del receptor primario utiliza esta potencia de fuga del LO, en lugar de utilizar la señal proveniente del transmisor primario y detecta la presencia del receptor primario directamente [89]. Este enfoque es factible para los receptores de televisión; para otras tecnologías se necesitaría *hardware* adicional, como una red de sensores de apoyo, desplegada en el área junto a los receptores primarios [31].

Figura 21. Detección del receptor primario

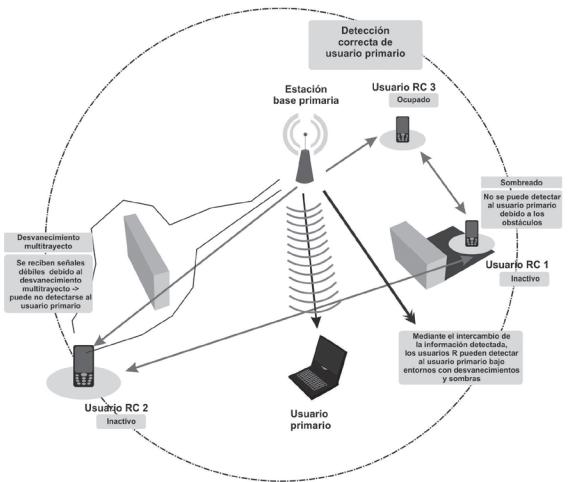


Fuente: tomado de [14].

Detección cooperativa

Debido a la falta de interacción entre los usuarios primarios y los usuarios de RC, las técnicas de detección del transmisor confían en las señales débiles provenientes solo de los transmisores primarios. Por ende, las técnicas de detección del transmisor por sí solas, no pueden evitar la interferencia a los receptores primarios, debido a la falta de información del receptor primario, como se muestra en la figura 22; adicionalmente, los modelos de detección del transmisor no pueden evitar el problema del terminal oculto. Un usuario de RC (transmisor) puede tener línea de vista hacia un receptor de RC, pero puede no ser capaz de detectar el transmisor primario debido a la sombra, como se presenta en la figura 22. Por lo tanto, se requiere la información detectada desde otros usuarios para que la detección del transmisor primario sea más precisa, lo que se conoce como detección cooperativa, que teóricamente es más precisa, ya que la incertidumbre en la detección de un único usuario puede ser minimizada mediante la colaboración [182-184]. Además, los efectos del desvanecimiento multirayecto y por sombra pueden ser mitigados de manera que se mejora la probabilidad de detección, en un entorno fuertemente afectado por sombras [31].

Figura 22. Detección cooperativa del transmisor en un entorno con alta presencia de desvanecimientos y sombras



Fuente: tomado de [31].

Se asume que hay tres usuarios de RC, como se ilustra en la figura 22. El usuario de RC 2 recibe una señal débil (con una baja SNR) debido al desvanecimiento multitrayecto, no puede detectar la señal del transmisor primario. El usuario de RC 1 está en el área de sombra, por lo que tampoco puede detectar al usuario primario. Solamente el usuario de RC 3 detecta la señal del usuario primario correctamente. En este caso, los usuarios de RC 1 y 2 causarían interferencias si intentan transmitir con base en sus observaciones locales. Sin embargo, debido al intercambio de información con el usuario de RC 3, los usuarios de RC 1 y 2 pueden detectar la existencia del usuario primario a pesar de que están dentro de un ambiente con desvanecimientos y sombras.

En la detección cooperativa tradicional, la banda del espectro es determinada como disponible solamente si no se detecta actividad de ningún UP. Incluso si únicamente una actividad de un UP es detectada, los usuarios de RC no pueden utilizar esta banda del espectro [182]. A partir de este criterio de detección, la probabilidad de detección cooperativa \bar{P}_d^c de N usuarios de RC se obtiene por $\bar{P}_d^c = 1 - (1 - \bar{P}_d)^N$

donde \bar{P}_d es la probabilidad de detección individual de un usuario de RC. Si bien esta estrategia de decisión ciertamente aumenta la probabilidad de detección, también aumenta la probabilidad cooperativa de falsa alarma, $\bar{P}_f^c = 1 - (1 - \bar{P}_f)^N$ donde \bar{P}_f es la probabilidad de falsa alarma individual de un usuario de RC, lo que conlleva a desaprovechar más oportunidades espectrales. Por otra parte, los enfoques cooperativos pueden causar efectos adversos en las redes con recursos limitados debido a la sobrecarga de tráfico [31].

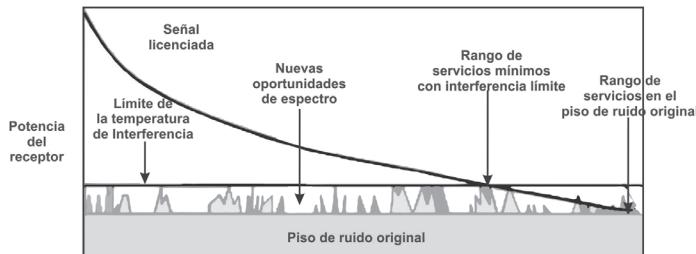
En la detección cooperativa, un canal de control común (CCC) [12, 185] es comúnmente utilizado por los usuarios de RC para reportar los datos de detección local hacia la BS o para compartir los resultados de detección con los nodos vecinos. Como resultado, un canal de control es el elemento de detección cooperativa. El canal de control se puede implementar como un canal dedicado en bandas licenciadas o sin licencia, o como un canal subyacente de UWB [5]. Para acceder al canal de control es generalmente utilizado un esquema de MAC para el acceso múltiple de todos los usuarios de RC cooperantes. Desde la perspectiva de la PHY, un enlace físico punto a punto desde un usuario de RC cooperante hasta la BS, es llamado canal de reportes [186]. Para reportar los datos detectados se deben cumplir tres requisitos en el canal de control para la detección cooperativa: ancho de banda, fiabilidad y seguridad.

Detección basada en la interferencia

La interferencia es típicamente regulada de una manera centralizada en el transmisor, lo cual significa que la interferencia se puede controlar en el transmisor por medio de la potencia radiada, las emisiones y la ubicación fuera de banda de los transmisores individuales. Sin embargo, la interferencia tiene lugar realmente en los receptores, como se muestra en la figura 20 (a) y (b). Por lo tanto, la FCC ha planteado un modelo para la medición de la interferencia, conocido como *temperatura de interferencia* mostrado en la figura 23 [39].

El modelo muestra la señal de una estación de radio diseñada para operar en un rango en el que la potencia recibida se acerca al nivel del piso de ruido. Adicionalmente, aparecen señales interferentes, el piso de ruido se aumenta en varios puntos dentro del área de servicio, según lo indicado por los picos encima del piso de ruido original. A diferencia del enfoque tradicional del transmisor centralizado, el modelo de temperatura de interferencia administra las interferencias en el receptor por medio del límite de temperatura de interferencia, que es representado por la cantidad de nuevas interferencias que el receptor podría tolerar. En otras palabras, el modelo de temperatura de interferencia representa la energía RF acumulada desde múltiples transmisiones y establece un límite máximo en su nivel total. Mientras los usuarios de RC no superen este límite debido a sus transmisiones, pueden utilizar esta banda del espectro. Sin embargo, existen algunas limitaciones en la medición de la temperatura de interferencia, puesto que los usuarios de RC no pueden distinguir entre las señales reales del UP y el ruido o las interferencias [12, 26].

A partir del análisis de las técnicas de detección de espectro, descritas anteriormente y de los equipos de medida con que se cuenta para la investigación presentada en este libro, se decide utilizar la técnica de detección de energía, técnica, implícita en el analizador de espectro, y la técnica de detección cicloestacionaria, que permite una detección más robusta de señales conocidas, para este caso se aplica en las señales GSM y de TV digital.

Figura 23. Modelo de temperatura de interferencia

Fuente: tomado de [12].

Equipos utilizados en la detección de espectro

A continuación se describen los equipos utilizados en la medición del espectro de la investigación presentada en este libro.

Analizador de espectro

Las mediciones de potencia en el espectro y el registro de la actividad espectral sobre el rango completo de frecuencias son realizadas con el analizador de espectro superheterodino *Anritsu MS2721B*, que se muestra en la figura 24. Este analizador de espectro ofrece un rango de medición desde 9 kHz a 7.1 GHz, un bajo nivel de ruido, (muestra un nivel de ruido inferior a -163 dBm con un ancho de banda de resolución (RBW) de 1 Hz a 1 GHz) y un preamplificador incorporado (≈ 25 dB de ganancia), que facilita la detección de las señales débiles, ajuste automático de la velocidad de barrido y la posibilidad de conectar un dispositivo de almacenamiento externo USB, para guardar las mediciones y realizar luego un posprocesamiento de los datos. El analizador de espectro también incluye un sensor GPS externo, que permite observar las coordenadas de la actual medición en las trazas guardadas [187]. En los siguientes apartados se presenta un resumen conceptual del analizador utilizado.

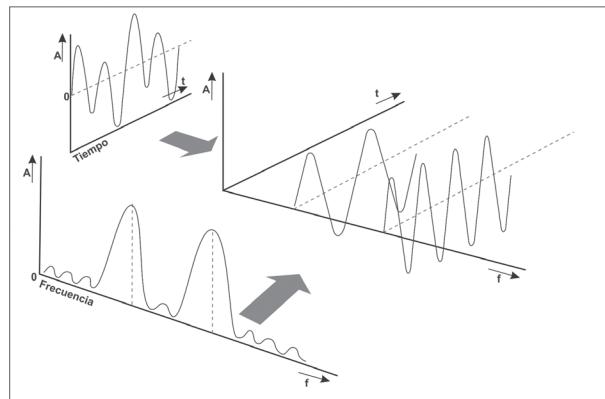
Figura 24. Analizador de espectro desde 9 kHz a 7.1 GHz de intervalo de lectura

Fuente: tomado de [188].

Relación entre los dominios del tiempo y frecuencia

Las señales eléctricas pueden ser examinadas en el dominio del tiempo con ayuda de un osciloscopio y en el dominio de la frecuencia con ayuda de un analizador de espectro (ver figura 25) [189].

Figura 25. Señal en los dominios del tiempo y frecuencia

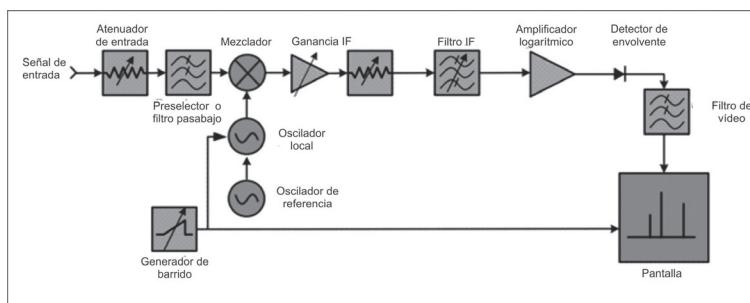


Fuente: tomado de [189].

Analizador de espectro superheterodino

Debido al limitado ancho de banda de los convertidores análogo/digitales disponibles, los analizadores de Transformada Rápida de Fourier (FFT) solo son adecuados para mediciones en señales de baja frecuencia. Para visualizar el espectro de señales de alta frecuencia hasta el rango de microondas, se utilizan analizadores con conversión de frecuencia. En este caso el espectro de la señal de entrada no se calcula a partir de la característica de tiempo, sino es directamente determinado por el análisis en el dominio de la frecuencia. Para un análisis de este tipo es necesario descomponer el espectro de entrada en componentes individuales. El analizador mezcla la señal de entrada con la que proviene de un LO trasladando la señal a la IF, ver figura 26 [189].

Figura 26. Diagrama de bloques de un clásico analizador de espectro superheterodino



Fuente: tomado de [190]

El receptor heterodino convierte la señal de entrada con la ayuda de un mezclador y un LO a una IF. Si la frecuencia del LO es sintonizable (un requisito que es técnicamente factible), el rango completo de la frecuencia de entrada puede ser convertido a una IF constante mediante la variación de la frecuencia del LO. La resolución del analizador se da entonces por un filtro IF con frecuencia central fija.

La señal convertida se amplifica antes de ser aplicada al filtro IF. El ancho de banda del filtro IF corresponde al RBW del analizador. Cuanto menor sea el RBW, mayor será la resolución espectral del analizador; el problema es que la resolución afecta el tiempo de barrido y el tiempo de barrido está directamente relacionado con el tiempo necesario para completar una medida.

La señal de IF se comprime usando un amplificador logarítmico y un detector de envolvente, para permitir que una amplia gama de señales se muestren simultáneamente en la pantalla. La señal resultante se conoce como la señal de video. Esta señal se puede promediar con la ayuda de un filtro paso bajo ajustable llamado filtro de video. Por lo tanto, el ruido de la señal es eliminado y la señal suavizada para su visualización. La señal de video se aplica a la deflexión vertical de un tubo de rayos catódicos. Finalmente, puesto que la señal se va a visualizar como una función de la frecuencia, se utiliza una señal diente de sierra para la deflexión horizontal del haz de electrones, así como para sintonizar el LO [189].

Mediante el uso de los filtros analógico o digital IF, la velocidad máxima permisible de barrido está limitada por el tiempo transitorio del filtro IF y del filtro de video. El tiempo transitorio no tiene efecto si el ancho de banda de video es mayor que el RBW. En este caso, el tiempo transitorio requerido aumenta inversamente con el cuadrado del RBW, por lo que con una disminución del RBW por el factor n el tiempo de barrido mínimo requerido se convierte n^2 más largo. Por consiguiente:

$$ST = k \frac{\Delta_f}{RBW} \quad (17)$$

Donde ST es el tiempo de barrido mínimo requerido, Δ_f es el *span* y k es el factor proporcional. La ecuación (17) muestra que un cambio en el RBW tiene un cambio significativo en el ST [189].

Equipos de radio definida por software

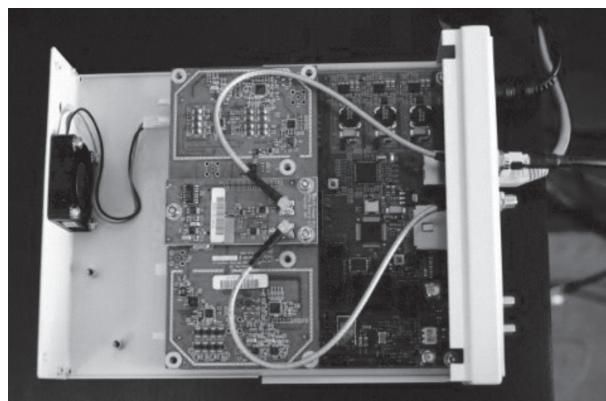
Este concepto se refiere a las tecnologías cuyas funcionalidades se realizan mediante módulos de *software* que se ejecutan en arreglos de compuertas programables en campo (FPGA), procesadores digitales de señales (DSP), procesadores de propósito general (GPP), o una combinación de estos. Esto permite la programación de los convertidores digitales de bajada (DDC) y de subida (DUC) y del procesamiento de banda base. Por lo tanto, características de operación de la radio, como la codificación, el tipo de modulación, y la banda de frecuencia, se pueden cambiar simplemente cargando un nuevo *software*. También varios dispositivos de radio que utilizan diferentes modulaciones, pueden ser reemplazados por un único dispositivo de radio

que consigue realizar la misma tarea [191]. Los equipos de SDR usados en la medición de espectro son los sistemas universales de radio periférico por *software* (USRP), descritos a continuación.

USRP

El USRP usado en el desarrollo de la investigación que se presenta en este libro es el N210, que es una plataforma de *hardware* de código abierto de la familia de productos USRP desarrollado por *Ettus Research/National Instruments* [192]. El *hardware*, compuesto por una tarjeta principal y una tarjeta secundaria, permite un ajuste flexible de las características de transmisión/recepción (Tx/Rx) de la radio. Las diferentes tarjetas secundarias permiten una amplia selección de rangos de frecuencia. Esta soporta la comutación rápida de analógico a digital y de digital a analógico, de este modo se logra la inspección de extensas bandas del espectro y un rango dinámico mayor. El USRP N210 y la radio GNU (conjunto de herramientas de desarrollo de *software* libre) [193], forman una plataforma de SDR donde la radio GNU proporciona los bloques básicos de procesamiento de señales. La figura 27 presenta el dispositivo USRP N210 [194].

Figura 27. USRP N210



Fuente: tomado de [195].

Especificaciones de hardware: El *hardware* USRP se compone de dos tarjetas principales, es decir la tarjeta principal que realiza las operaciones de alta tasa de muestreo y la comunicación con el computador, y una tarjeta secundaria, que representa la parte RF. Las diferentes tarjetas secundarias permiten la selección de amplios rangos de frecuencias. Las principales características de la tarjeta principal son [194]:

- FPGA Spartan 3A con un microprocesador de computador con conjunto de instrucciones reducidas (RISC) de 50 MHz y 32 bits, que realiza las operaciones DDC y DUC de alta velocidad (las operaciones de baja tasa de muestreo se realizan en el lado del computador).

- Memoria estática de acceso aleatorio (SRAM) de alta velocidad de 1 MB, la configuración y el firmware del USRP se almacenan en una memoria Flash para permitir una fácil programación en la red.
- Dos convertidores análogo-digital, para la parte real e imaginaria de la señal, realizan un muestreo con una tasa de 100 megamuestras/s con una resolución de datos de 14 bits.
- Dos convertidores digital-análogo, para la parte real e imaginaria de la señal, realizan un muestreo con una tasa de 400 megamuestras/s y una resolución de datos de 16 bits.
- Interfaz Gigabit Ethernet para la conexión a la computadora.
- Una interfaz de expansión que permite la conexión de múltiples dispositivos USRP N210 en sistemas de antenas de múltiples entradas-múltiples salidas (MIMO).

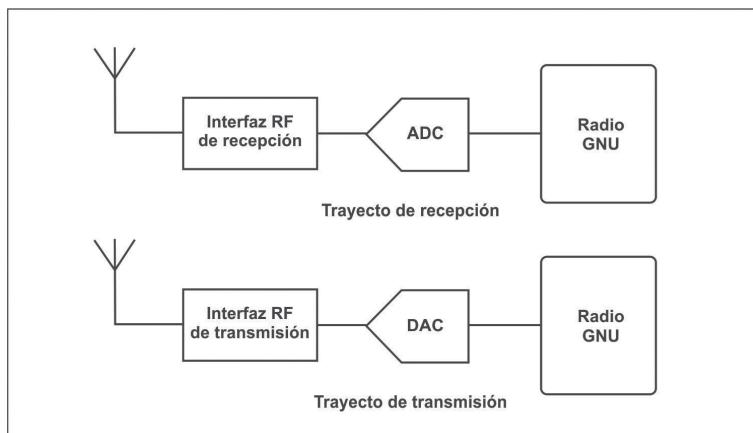
El *hardware* USRP N210 puede ser programado si se utilizan las siguientes soluciones de entorno de desarrollo integrado (IDE):

- GNU Radio: se ejecuta preferiblemente en el sistema operativo Linux;
- Matlab Simulink, LabView: se ejecuta en el sistema operativo Windows;
- Controlador de hardware universal (UHD).

GNU radio es un conjunto de herramientas de *software* de código abierto para el desarrollo de aplicaciones de radio definidas por *software*. Generalmente, GNU radio convierte los problemas de *hardware* en problemas de *software*. Permite definir las señales de transmisión y la demodulación de señales recibidas mediante el procesamiento de *software*, en lugar de usar transformaciones en circuitos analógicos o circuitos combinados con chips digitales. El funcionamiento básico se da en una arquitectura de dos niveles, con la creación de bloques de procesamiento de señales en el primer nivel y su conexión a manera de flujo gráfico en el segundo nivel. De manera más general, GNU radio abarca lo siguiente [194]:

- Una API (interfaz de programación de aplicaciones) para la creación de bloques de señal (C++/ Python);
- Un entorno de ejecución para el procesamiento de señales;
- Una biblioteca de bloques de procesamiento de señales;
- Aplicaciones y scripts de usuario;
- Controladores de *hardware* (USRP N210);
- Una aplicación para la creación de flujo gráficos (GRC).

Figura 28. Implementación de la herramienta de desarrollo de software de GNU Radio



Fuente: tomado de [194].

La figura 28 muestra la relación entre GNU radio y el USRP N210.

Especificaciones de la detección de espectro: el *hardware* USRP N210 se puede utilizar como un dispositivo de detección de espectro. Las principales características del *hardware* en términos de capacidades de detección (principalmente relacionados con la detección de energía) son:

- El USRP N210 realiza muestreo I-Q. Tiene dos canales de entrada, por lo tanto, la potencia recibida se representa como 10 veces el logaritmo de la suma de las magnitudes al cuadrado de las componentes I y Q;
- El ancho de banda resolución del USRP N210 depende de la tasa de decimación seleccionada;
- El USRP N210 puede realizar la transformada rápida de Fourier (FFT). Al utilizar esta función, se puede lograr un más amplio conjunto de resoluciones de frecuencia;
- El retardo de la commutación de frecuencia es inferior a 200 μ s para las tarjetas transreceptoras secundarias;
- El tiempo de muestreo I-Q depende de la tasa de decimación seleccionada.

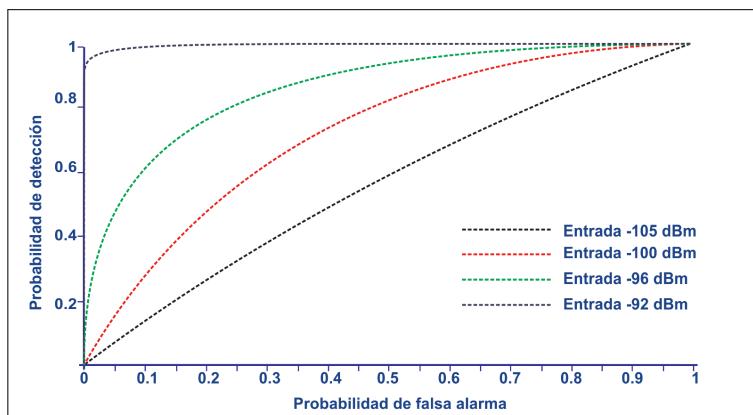
Se pueden distinguir tres tipos de medición, si se utilizan conjuntos de ajustes en la GNU radio y el USRP N210:

- Modo de medición en tiempo real: ofrece un análisis en tiempo real de las bandas del espectro, con la FFT como una opción;
- Modo de medición de barrido: ofrece un análisis de banda espectral en forma de barrido;
- Modo de medición híbrido: ofrece un análisis de las bandas del espectro en forma de barrido combinado con el análisis de la FFT de bloques de espectro separados.

Rendimiento del detector de energía

A continuación se presentan las prestaciones del USRP N210. Las métricas de interés son la probabilidad de detección para diferentes probabilidades de falsa alarma, es decir, las curvas ROC, así como la dependencia de la probabilidad de detección de la potencia de entrada RF. Estas curvas se calculan empíricamente teniendo en cuenta el ruido y las estadísticas de la señal recogidas en paralelo a las mediciones. Las métricas se calculan para un caso de 80 muestras en promedio en el dominio de la potencia (mW).

Figura 29. Curvas ROC del detector de energía para USRP N210

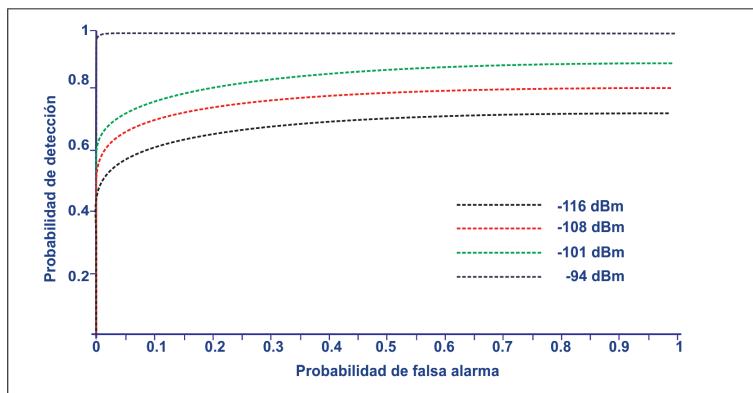


La figura 29 presenta la curva ROC para el USRP N210, correspondiente a la detección de energía, lo que representa la capacidad de detección del anterior. Como puede observarse, las señales de entrada de -96 dBm y por encima de este valor se pueden detectar de forma fiable con el dispositivo USRP N210. Cabe señalar que estas curvas son válidas para la configuración específica de la USRP N210 - la tarjeta secundaria WBX 50-2200 MHz con frecuencia central de 850 MHz, RBW de 150 kHz y ganancia del receptor de 31 dB.

Rendimiento detector cicloestacionario

La figura 30 muestra las curvas ROC para el detector cicloestacionario en la banda de televisión digital, las señales de entrada por encima de -108 dBm pueden detectarse de manera segura. La configuración del equipo en esta banda se realizó con la tarjeta secundaria WBX 50-2200 MHz con frecuencia central de 490 MHz, RBW de 8 kHz y ganancia del receptor de 31 dB.

Figura 30. Curvas ROC del detector cicloestacionario para USRP N210



Capítulo 3.

Metodología de medición de espectro

Los rangos de medición de las bandas en el analizador de espectro como en los equipos USRP N210 se basaron en aspectos como el tiempo de barrido, el RBW y el *span*, con el fin de garantizar una adecuada medida en función del piso de ruido y el ancho de banda del canal de la tecnología a medir [196]. Obtener cifras representativas en términos de promedios estadísticos tomó un tiempo de 48 horas por cada uno los intervalos de medición, tiempo suficiente de acuerdo con la cantidad de muestras necesarias para alcanzar un intervalo de confianza mayor al 95% [197]. La campaña de medición se realizó durante diecisiete meses, desde marzo de 2012 a julio de 2013. La configuración de la medición se muestra en la figura 31 para el analizador de espectro, y en la figura 32 (a) y 32 (b) para los equipos USRP N210, y las especificaciones técnicas de los dispositivos usados se pueden observar en las tablas 2 y 3, respectivamente. Como se espera, el analizador de espectro proporciona la detección basada en energía con el fin de indicar si las señales están presentes o ausentes, las mediciones con los equipos USRP se usaron especialmente en las bandas de televisión digital y telefonía celular, con las técnicas de detección de energía y cicloestacionaria.

Tabla 2. Especificaciones de los equipos para mediciones con el analizador de espectro

Equipos	Especificaciones	
	Rango de Frecuencia	Referencia
Antena tipo discono	25 MHz-6 GHz	Super-M Ultra Base
Cable de banda ancha	0 Hz-18 GHz	CBL-6FT SMNM+
Amplificador de bajo ruido	20 MHz-8 GHz	ZX60-8008E-S+
Analizador de espectro	9 KHz-7.1 GHz	MS2721B Anritsu

Fuente: tomado de [198].

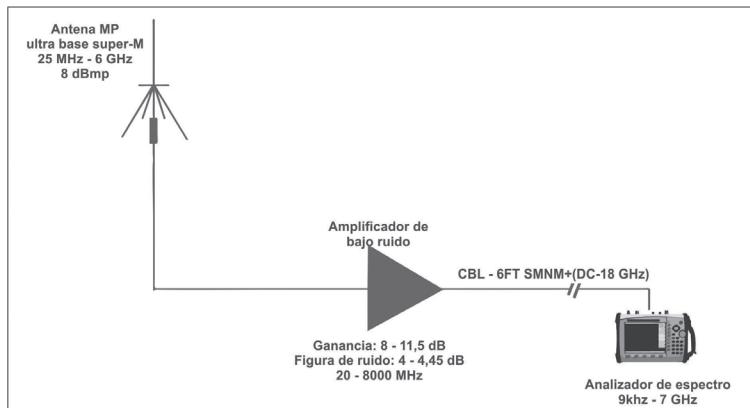
Tabla 3. Especificaciones de los equipos para mediciones con el USRP N210

Equipos	Especificaciones	
	Rango de Frecuencia	Referencia
Antenas Logoperiódicas 5-6 dBi	400 MHz-6 GHz	LP0410 y LP09650
Cable SMA-SMA	0 Hz-6 GHz	-
Tarjetas secundarias	50 MHz-6 GHz	WBX 50-2200 MHz y CBX 1200-6000 MHz
Equipo SDR	0 Hz-6 GHz	USRP N210

Fuente: tomado de [199].

A continuación se describen las variables características que se consideraron en este estudio [196].

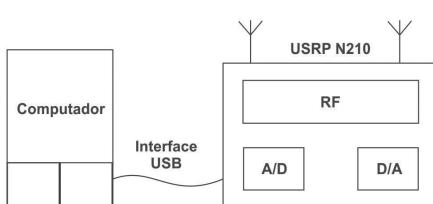
Figura 31. Configuración de las mediciones con el analizador de espectro



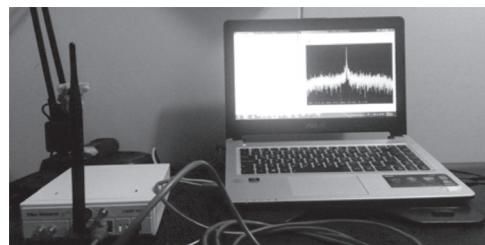
Fuente: tomado de [198].

Figura 32. (a). Diagrama de bloques de configuración de las mediciones con el equipo Ettus USRP N210. (b) Equipos USRP N210 utilizados en las mediciones

(a)



(b)



Frecuencia

La ocupación del espectro se midió en el intervalo de 54 MHz a 6 GHz. En el caso del analizador de espectro el *span* para cada medición fue menor a 100 MHz y fue calculado a partir de las ecuaciones (18) y (19), cuando la tecnología por medir es conocida (por ejemplo, Señales AM-FM, TV y GSM), con el fin de garantizar un estimado razonablemente preciso de ocupación.

$$AB_T > f_b \quad (18)$$

$$f_b = \frac{SPAN}{pps - 1} \quad (19)$$

Donde AB_T es el ancho de banda del canal de la tecnología por medir, f_b es el *bin* de frecuencia y pps es el número de puntos por *span* del analizador, que para este caso es 551. Dichos segmentos menores a 100 MHz permitieron escoger a $RBW \leq AB_T$ y el cual estuvo alrededor de $3 \text{ kHz} \leq RBW \leq 100 \text{ kHz}$, con tiempos de barrido que oscilaron entre 290 milisegundos y 5124 segundos, lo que para 48 horas de medición conlleva a obtener entre 33.724 y 595.863 trazas de medida. Por ejemplo, para un *span* de 50 MHz con un *RBW* de 3 kHz, por lo menos tres muestras de frecuencia están contenidas en un solo *bin* del analizador de espectro. Separaciones de *bin* de frecuencia menores que el ancho de banda del canal, garantizan la detección de la señal [198].

Para las mediciones con el equipo USRP N210, el *RBW* se obtiene a partir de la ecuación (20):

$$RBW = \frac{f_s}{N} \quad (20)$$

En donde f_s es la frecuencia de muestreo y N el número de puntos en la Transformada Rápida de Fourier (FFT), por lo tanto:

$$f_s = \frac{100}{D} \text{ MHz} \quad (21)$$

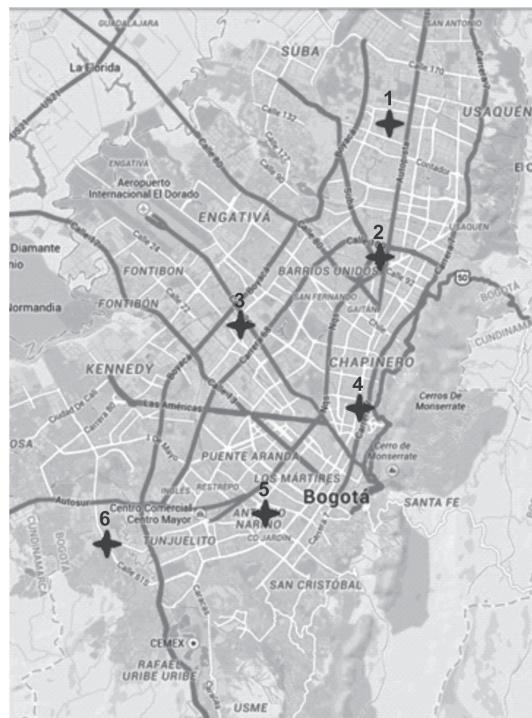
En donde D es la tasa de diezmado, por ejemplo, en una FFT con 1024 puntos y una frecuencia de muestreo de 128 KHz, se tiene un *RBW* de 125 Hz; aunque con un tiempo de barrido de más de 10 segundos.

Localización

Las mediciones se llevaron a cabo en seis edificaciones ubicadas en diferentes localidades y en las siguientes coordenadas de Bogotá, Colombia, tal como se muestra en la figura 33 en los sitios que se señalaron en forma de estrella:

- Punto 1: Latitud = $4^{\circ}73'0''$ norte, longitud = $74^{\circ}0'5''$ oeste.
- Punto 2: Latitud = $4^{\circ}68'2''$ norte, longitud = $74^{\circ}0'5''$ oeste.
- Punto 3: Latitud = $4^{\circ}65'5''$ norte, longitud = $74^{\circ}1'0''$ oeste.
- Punto 4: Latitud = $4^{\circ}62'8''$ norte, longitud = $74^{\circ}0'6''$ oeste.
- Punto 5: Latitud = $4^{\circ}58'8''$ norte, longitud = $74^{\circ}1'0''$ oeste.
- Punto 6: Latitud = $4^{\circ}57'9''$ norte, longitud = $74^{\circ}1'5''$ oeste.

Figura 33. Puntos de medición (Mapa)



Amplitud

Los niveles de amplitud se ajustaron en cada segmento del analizador de espectro y del equipo USRP N210 sin exceder los niveles de señal a la entrada; pues de lo contrario se producen espurios mayores que la variación promedio de ruido de piso, para cada medida. Estudios de espectro previos [196], sugieren que un buen criterio

para configurar el rango dinámico de un equipo de medida, al que se le conecta un amplificador a la entrada, es ajustar los niveles de amplitud para que las señales se encuentren dentro del margen dinámico libre de espurios (SFDR), el cual se calcula como:

$$SFDR(dB) = P_I(dBm) - P_N(dBm) \quad (22)$$

Donde, P_I es la potencia de la señal a la entrada y P_N es la potencia de ruido equivalente a la entrada. El objetivo era tener tanta sensibilidad como fuera posible en el receptor con el uso del amplificador, evitando que los niveles de espurios pudieran ser detectados como actividad de un usuario primario (usuario licenciando). El nivel de ruido promedio del instrumento para cada medida fue determinado con la ubicación de una impedancia de 50Ω a la entrada del analizador de espectro, con un nivel de atenuación de 0 dB, detección RMS y un largo periodo de medición. Los niveles de decisión (λ) se presentan en las tablas 4 y 5, y se encontraron a partir de la ecuación (23) con una probabilidad de falsa alarma (P_{fa}) del 1 % [138, 200]:

$$P_{fa} = \frac{\Gamma\left(m, \frac{\lambda}{2}\right)}{\Gamma(m)} \quad (23)$$

Donde $\Gamma(\cdot)$ y $\Gamma(\cdot, \cdot)$ son la función gamma completa e incompleta, respectivamente, y m es el producto del tiempo por el ancho de banda [198].

Tabla 4. Umbral de detección por banda para el analizador de espectro

Banda	Nivel de ruido promedio detectado (dBm)	Nivel de decisión promedio (dBm)
54-500MHz	-115 dBm	-111 dBm
500-1000MHz	-113 dBm	-109 dBm
1000-1500MHz	-112 dBm	-108 dBm
1500-2800MHz	-111 dBm	-108 dBm
2800-3100MHz	-110 dBm	-108 dBm
3100-3550MHz	-109 dBm	-106 dBm
3550-3950MHz	-110 dBm	-107 dBm
3950-4200MHz	-109 dBm	-106 dBm
4200-4700MHz	-108 dBm	-104 dBm
4700-4950MHz	-109 dBm	-105 dBm
4950-5350MHz	-107 dBm	-104 dBm
5350-5650MHz	-108 dBm	-105 dBm
5650-5800MHz	-107 dBm	-104 dBm

Banda	Nivel de ruido promedio detectado (dBm)	Nivel de decisión promedio (dBm)
5800-6000MHz	-105 dBm	-102 dBm

Fuente: tomado de [198].

Tabla 5. Umbral de detección por banda para el USRP N210

Banda	Nivel de ruido promedio detectado (dBm)	Nivel de decisión promedio (dBm)
470-512MHz	-118 dBm	-116 dBm
806-936MHz	-106 dBm	-102 dBm
1850-2300MHz	-108 dBm	-105 dBm

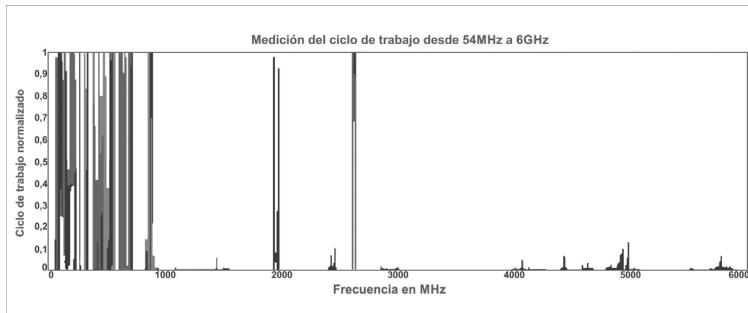
Aunque sería ambicioso indicar que los resultados presentados en el siguiente capítulo corresponden a mediciones perfectamente ideales, cabe mencionar que el intervalo de frecuencias detectadas es considerable. Además, en las bandas de frecuencia detectadas (y de acuerdo con las políticas de asignación de espectro en Colombia), las mediciones presentadas incluyen un gran número de transmisores de diversa naturaleza, desde sistemas de banda estrecha hasta de banda ancha y desde señales débiles recibidas cerca del piso de ruido hasta señales fuertes.

Capítulo 4.

Resultados de medición de espectro

En este capítulo, las mediciones se clasifican según el tipo de tecnología encontrada en las diferentes bandas de espectro asignado. La asignación de espectro en Colombia es regulada por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (Ministerio TIC), con la asesoría de la Agencia Nacional del Espectro (ANE). La figura 34 muestra una estimación global del ciclo de trabajo (*duty cycle*) desde 54 MHz a 6 GHz, en el punto 4 de medición mostrado en la figura 33. Para cada frecuencia medida, el ciclo de trabajo se calcula como el cociente entre el número de muestras de la densidad espectral de potencia (DEP) correspondientes a canales ocupados y el número total de muestras de DEP capturadas durante el periodo de medida. Para cada frecuencia, esta métrica representa el tiempo durante la cual el canal permanece ocupado por la red primaria. Para una determinada banda, el ciclo de trabajo promedio se calcula como la media aritmética de los ciclos de trabajo obtenidos para las diversas frecuencias medidas dentro de dicha banda [196]. En la figura 34 se hace evidente que el espectro está siendo subutilizado en esta área [198].

Figura 34. Ciclo de trabajo del rango completo de espectro medido durante la campaña en el punto 4 de medición mostrado en la figura 33

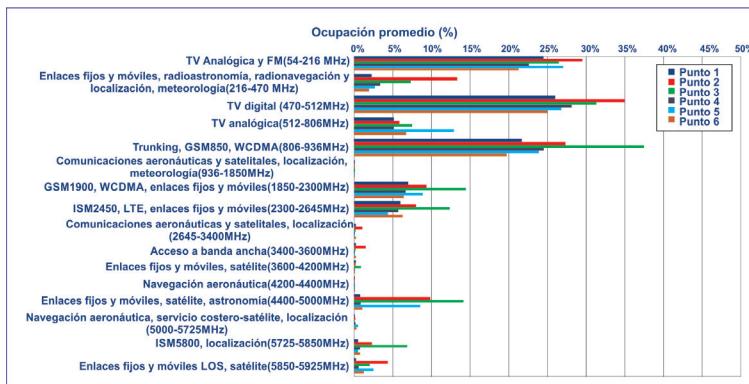


Fuente: tomado de [198].

La figura 35 resume las estadísticas de ocupación promedio de espectro, en función de los servicios de cada banda, para los seis puntos donde se realizaron las mediciones. Los resultados obtenidos muestran que algunas bandas de espectro están sujetas

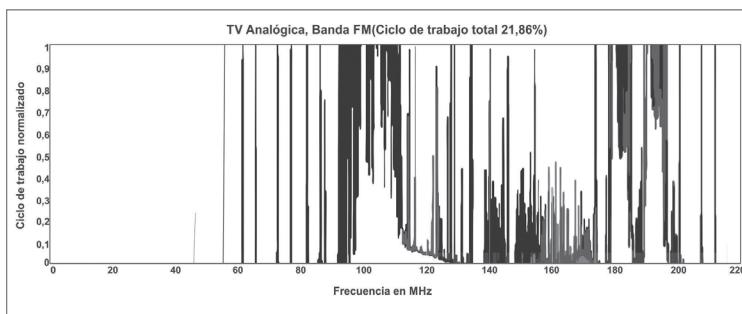
a moderados niveles de utilización, mientras que algunas otras exhiben usos escasos y, en algunos casos, prácticamente no existe uso.

Figura 35. Porcentaje del ciclo de trabajo de acuerdo a los servicios ofrecidos en las bandas medidas para los diferentes puntos de medición mostrados en la figura 33



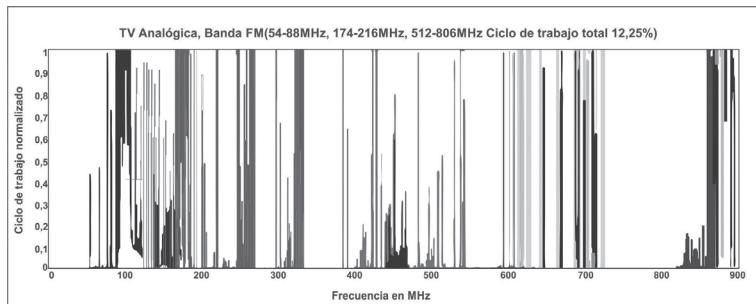
A continuación se analiza el ciclo de trabajo de algunas bandas específicas para uno de los puntos, por ejemplo para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33. La banda FM, que se encuentra entre 88-108 MHz (figura 36), presenta niveles de ocupación espectral del 78%. Por otra parte, como se observa en la figura 37, los servicios de televisión analógica (54-88 MHz, 174-216 MHz y 512-806 MHz) presentan niveles de ocupación de espectro del 12% [198].

Figura 36. Ciclo de trabajo normalizado de 54 MHz a 216 MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33



Fuente: tomado de [198].

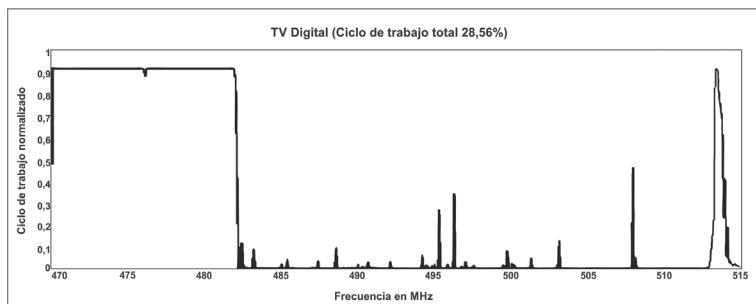
Figura 37. Ciclo de trabajo normalizado para todas las bandas de TV analógica para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33



Fuente: tomado de [198].

Como se observa en la figura 38, la banda de televisión digital (entre 470 y 482 MHz) presenta una ocupación espectral de aproximadamente el 100%. No obstante, hay muchos canales individuales desde 482 hasta 512 MHz que exhiben niveles bajos de ocupación, lo que conduce a un ciclo de trabajo total del 28.5% para toda la banda que está entre 470 y 512 MHz.

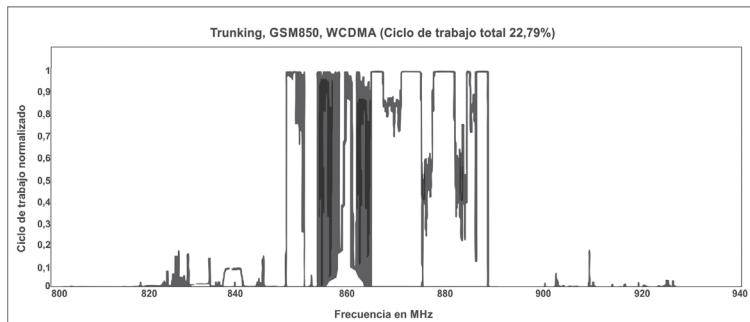
Figura 38. Ciclo de trabajo normalizado en la banda de TV digital para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33



Fuente: tomado de [198].

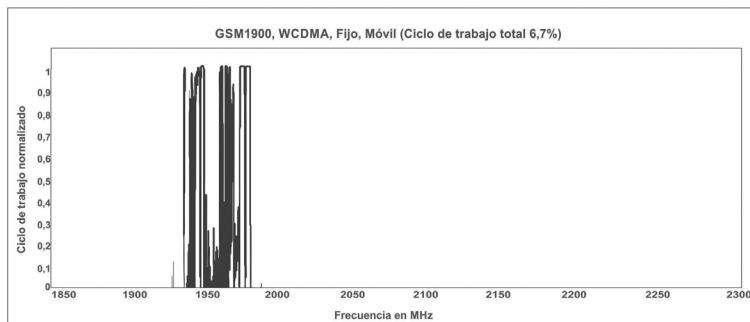
Respecto a la banda del espectro asignada para el enlace ascendente GSM, que se encuentra entre 824 y 849 MHz (figura 39), se presenta un ciclo de trabajo total que no supera el 20%; para la porción de espectro asignada al enlace descendente GSM (entre 869 y 894 MHz), se exhibe un ciclo de trabajo mucho más alto, cercano al 80% en la mayoría de sus canales. Al examinar el enlace ascendente GSM1900, esto es entre 1850-1910 MHz (figura 40), la ocupación espectral puede ser considerada despreciable en relación con el correspondiente enlace descendente, es decir, la banda entre 1930-1990 MHz, donde la mayoría de los canales tienen niveles de ocupación espectral cercanos al 100%. Esto prueba que, incluso para tecnologías de gran demanda (como el servicio de voz), se pueden encontrar huecos espectrales [198].

Figura 39. Ciclo de trabajo normalizado de 800 MHz a 940 MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33



Fuente: tomado de [198].

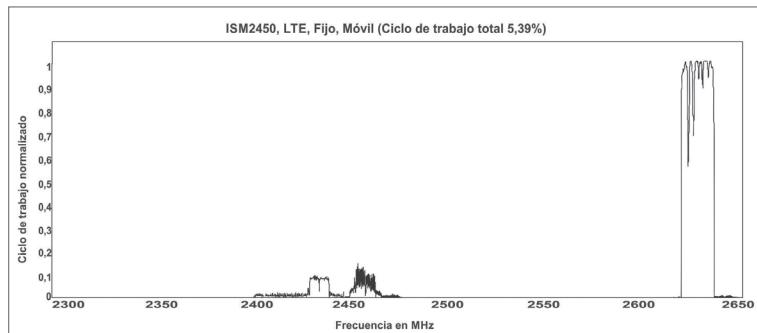
Figura 40. Ciclo de trabajo normalizado de 1850 MHz a 2300 MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33



Fuente: tomado de [198].

En la figura 41, la banda ISM (2400-2500 MHz) presenta una ocupación de espectro de solo el 4%. En esta banda en particular, se miden señales de baja potencia, resultado de la atenuación debida a suelos y paredes; y de los obstáculos, en general. Dicha baja potencia es consecuencia de la ubicación en ambientes interiores de los *routers* WiFi. Adicionalmente, en la figura 41 se puede observar que la tecnología evolución a largo plazo (LTE), cuya banda fue asignada recientemente en Colombia (2500-2525 MHz y 2620-2645 MHz), alcanza niveles actuales de ciclo de trabajo del 42%. Es importante mencionar que este ciclo de trabajo para la tecnología LTE lo aporta la banda superior (84%), ya que la banda inferior está prácticamente vacía [198].

Figura 41. Ciclo de trabajo normalizado de 2300MHz a 2650MHz para el punto 4 de medición mostrado en la figura 33



Fuente: tomado de [198].

Capítulo 5.

Modelo de radio cognitiva propuesto

Con el desarrollo de las tecnologías de RC, los usuarios secundarios que no están autorizados para el uso del espectro licenciado, pueden utilizar las bandas de los UP no utilizadas temporalmente. Por lo tanto, en una arquitectura de red de RC, los componentes incluyen tanto una red secundaria como una red primaria, como se muestra en la figura 42 [163].

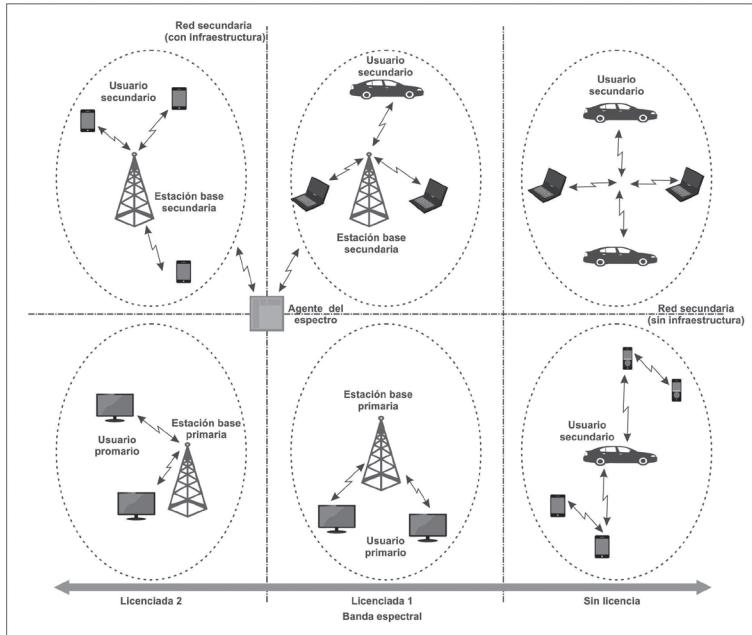
Como se indicó anteriormente, una red secundaria se refiere a una red compuesta de un conjunto de usuarios secundarios con o sin una BS secundaria. Los US solo podrían tener acceso al espectro con licencia, cuando no está ocupado por un usuario primario. El acceso oportunista al espectro de los usuarios secundarios se coordina generalmente por una BS secundaria, que es un componente de la infraestructura fija que sirve como un eje de la red secundaria. Tanto los usuarios secundarios como las estaciones base secundarias están equipados con funciones de RC. Si varias redes secundarias comparten una banda común del espectro, su utilización del espectro puede ser coordinada por una entidad central de la red, denominada agente del espectro [102]. El agente del espectro recoge información de la operación de cada red secundaria y asigna los recursos de la red para llegar a una compartición del espectro justa y eficiente [163].

Una red primaria se compone de un conjunto de usuarios primarios y una o más estaciones base primarias. Los UP están autorizados a utilizar ciertas bandas del espectro con licencia bajo la coordinación de las estaciones base primarias. Su transmisión no debe ser interferida por las redes secundarias. Los UP y las estaciones base primarias, en general, no están equipadas con funciones de RC. Por lo tanto, si una red secundaria comparte una banda licenciada con una red primaria, además de detectar el hueco espectral y la utilización de la mejor banda espectral, se requiere que la red secundaria detecte de inmediato la presencia de un UP y dirija la transmisión secundaria a otra banda disponible, con el fin de evitar la interferencia con la transmisión primaria, para el caso de un sistema sobrecapaz.

Dado que las RC son capaces de percibir, detectar y vigilar el entorno RF, como la interferencia y la disponibilidad de acceso, y volver a configurar sus propias características de operación según las situaciones del entorno, las comunicaciones cognitivas pueden aumentar la eficiencia espectral y apoyar un servicio de mayor ancho de banda. Por otra parte, la capacidad de tomar decisiones autónomas en tiempo

real para la compartición eficiente del espectro también reduce la carga en la gestión centralizada del espectro [163].

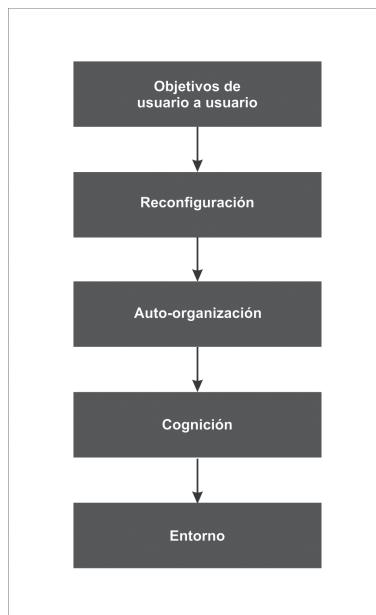
Figura 42. Arquitectura de red para compartir el espectro



Fuente: tomado de [163].

Como se mostró en el capítulo 4, la utilización del espectro en Bogotá es bastante moderada, lo que indica una clara subutilización del espectro radioeléctrico. Por esta razón se plantea un modelo de RC con base en la propuesta de [201], para mejorar la compartición del espectro entre los diferentes usuarios, donde la arquitectura de RC proporciona: 1) capacidad cognitiva: capacidad de detectar y obtener información de su entorno; 2) capacidad de auto-organización: capacidad de tomar decisiones optimizadas con base en la información recogida; 3) capacidad de reconfiguración: capacidad de volver a configurar los parámetros de funcionamiento de acuerdo con las decisiones optimizadas; 4) capacidad de alcanzar los objetivos de usuario a usuario. Sin embargo vale la pena destacar que este modelo propuesto puede ser extendido a diferentes entornos geográficos en los que exista una subutilización del espectro, como en Bogotá y una escasez de frecuencias para asignarles a los diferentes servicios inalámbricos existentes. La figura 43 ilustra la relación del modelo con los objetivos de usuario a usuario, la capacidad cognitiva, la capacidad de auto-organización y la capacidad de reconfiguración.

Figura 43. Relación del modelo con los objetivos de usuario a usuario, la capacidad cognitiva, la capacidad de auto-organización y la capacidad de reconfiguración



Objetivos de usuario a usuario

El componente de gestión de objetivos de usuario a usuario puede venir de usuarios, operadores de red o aplicaciones, para lograr los resultados deseados. En este caso, el alcance de la aplicación de usuario a usuario incluye todos los elementos de red involucrados en un flujo de datos de transmisión, tales como *gateways*, *switches*, *routers*, protocolos, modulación, codificación, etc. La mayoría de las veces, hay varios objetivos que deben cumplirse y no es posible optimizar todos los objetivos al mismo tiempo, por lo tanto, es necesario un equilibrio en la optimización de los objetivos [201].

Cognición

El componente de cognición, posee cinco funcionalidades básicas:

- Reunir la información del entorno de radio externa e información de la plataforma de radio interna. La información del entorno de radio incluye información sobre el uso del espectro, la distribución de interferencia, la relación señal a interferencia más ruido (SINR), etc. Por otra parte, la información de la plataforma de radio contiene información acerca de los recursos físicos y los recursos computacionales. En este componente se incluiría el resultado de las mediciones mostradas en el capítulo anterior.

- Reunir la información sobre la red, que incluye el tráfico de la red, la carga de los elementos de la red, el retardo, el enrutamiento, la seguridad, la topología, entre otros.
- Entender las necesidades, tanto del proveedor de servicios como de los usuarios finales, incluidas las preferencias de operación, las preferencias de acceso al radio, los requerimientos de desempeño, la disponibilidad de acceso, el tipo de servicio, la calidad de servicio, etc., y la ubicación del usuario. Por ejemplo, la información sobre la localización del usuario se puede obtener mediante el empleo de sistemas de localización como el GPS.
- Recopilar la información sobre las políticas que rigen el funcionamiento de la red. La información acerca de las políticas incluye el plan de frecuencias de radio, los límites de potencia de interferencia, entre otros.
- Los cuatro componentes mencionados anteriormente pueden trabajar solos para la recopilación de información; pero la mayoría de veces, tienen que trabajar juntos. Por lo tanto, es necesario un componente responsable de la coordinación y la gestión de las interacciones entre los cuatro componentes nombrados con antelación. Esto permite que la arquitectura sea modular y extensible en el sentido de que los componentes de la cognición se pueden adicionar, reemplazar o actualizar de forma independiente; sin afectar a los otros componentes ni a la integridad de todo el modelo [201].

Auto-organización

Este módulo está compuesto por cinco funciones:

- Obtener la configuración básica para realizar las operaciones de red y de los nodos recién desplegados en la red.
- Tomar decisiones óptimas basadas en la información recopilada de la red para alcanzar los objetivos de usuario a usuario, como la asignación de potencia y de canales [202, 203]. Teniendo en cuenta que es imposible obtener la información completa sobre el entorno, se puede adoptar el aprendizaje de máquina [204] para mejorar el rendimiento de usuario a usuario mediante la experiencia obtenida a lo largo del tiempo.
- Realizar las tareas de operación y mantenimiento de la red.
- Detectar los problemas en la red y luego resolver o mitigar estos problemas para evitar el deterioro de la experiencia de los usuarios y reducir los costos de mantenimiento de la red.
- Los cuatro componentes de auto-organización mencionados anteriormente pueden trabajar solos para tomar decisiones. Pero en la mayoría de los casos, tienen que trabajar juntos. Por lo tanto, es necesaria la coordinación y la gestión de las interacciones de los cuatro componentes anteriormente descritos. La coordinación también se encarga de enviar las decisiones al componente de

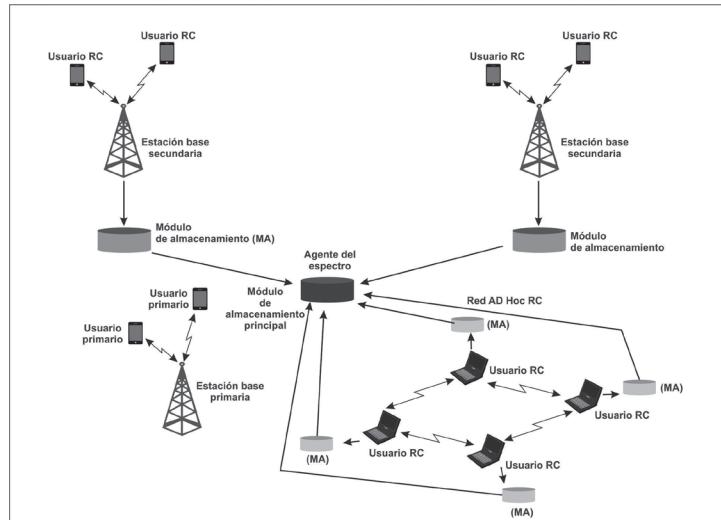
gestión de reconfiguración y de recibir los objetivos de optimización del componente de gestión de objetivos de usuario a usuario [201].

Reconfiguración

Es responsable de la reconfiguración de la red de acuerdo con las decisiones tomadas por el componente auto-organización y la información recogida por el componente de cognición. En el contexto de la RC, la reconfiguración dinámica de la red incluye el espectro radioeléctrico, la potencia de transmisión, la modulación y la codificación, las tecnologías de acceso al radio, las pilas de protocolos, la topología de la red, el enrutamiento, solo por mencionar algunos aspectos [201].

Además de que el modelo debe cumplir con las funcionalidades ya expuestas, es necesario que incorpore una función proactiva capaz de predecir cuándo y dónde existen caminos de comunicación y más importante aún, cuándo y dónde existirán. Debe ser capaz de idear planes de contingencia basados en las redes disponibles, las condiciones del entorno, así como también en la calidad en los objetivos de servicio para el usuario junto a la predicción de la movilidad del usuario. Este modelo requiere una mentalidad global en lugar de una operación estrictamente individualista. El modelo no puede ser limitado por un único salto dentro de una red de comunicaciones o por un traspaso vertical en una red heterogénea. Debe ser capaz de permitir varios saltos mediante sistemas dispares con el fin de mantener la conectividad a toda costa. Toda esta información debe estar guardada en un módulo de almacenamiento, como se muestra en la figura 44, en la que coexiste una red primaria basada en infraestructura con tres redes secundarias: dos basadas en infraestructura y una sin infraestructura. Estas redes secundarias envían y consultan información, como la presentada en el capítulo anterior, a módulos de almacenamiento secundarios, que a su vez se comunican con el modulo de almacenamiento principal para desarrollar las funcionalidades del modelo propuesto. La infraestructura que se podría utilizar para el despliegue de este modelo corresponde a la instalada en Bogotá por parte de los operadores de telefonía celular, los puntos de acceso WiFi, las estaciones de monitoreo de la ANE, entre otras; adicionando los módulos de almacenamiento y los agentes del espectro. Para este desarrollo es necesario contar con una regulación por parte del Ministerio de TIC que permita la compartición del espectro disponible.

Figura 44. Modelo de RC propuesto para Bogotá



Aplicaciones

A partir de los resultados presentados en las mediciones realizadas en las bandas de Bogotá, se comprobó que en las horas pico, algunos proveedores de servicios de las bandas de tecnologías como la de la telefonía móvil celular, presentan congestión. Por lo tanto, otros proveedores pueden proporcionar sus bandas de frecuencia disponibles, mediante el modelo descrito anteriormente, con el fin de cumplir con los objetivos de usuario a usuario.

Las comunicaciones militares están limitadas por la escasez del espectro radioeléctrico, ya que las asignaciones estáticas de frecuencia congelan el ancho de banda en aplicaciones improductivas, donde una gran cantidad de espectro está inactivo. Con el modelo propuesto, la RC utiliza el DSA para contrarrestar la congestión del espectro por medio de la asignación eficiente del ancho de banda y el acceso flexible al espectro. Por lo tanto, usando el modelo propuesto, se pueden proporcionar comunicaciones militares adaptativas y seguras.

Por otra parte, este modelo puede ser aplicado para mejorar la seguridad pública y la seguridad nacional. Un desastre natural o un ataque terrorista puede destruir la infraestructura de comunicaciones existente, por lo que es indispensable una red de emergencia para ayudar en las labores de búsqueda y rescate. Dado que el modelo propuesto puede reconocer la disponibilidad de espectro y reconfigurarse para una comunicación más eficiente, le proporciona al personal de seguridad pública la selectividad dinámica espectral y una comunicación de banda ancha confiable, para minimizar el retraso de la información. Por otra parte, puede facilitar la interoperabilidad entre los diversos sistemas de comunicación. Por medio de la adaptación a los requisitos y las condiciones de otra red, los dispositivos de RC, en este modelo, pueden soportar múltiples tipos de servicios, como voz, datos, video, entre otros.

Epílogo

El espectro es un recurso valioso en los sistemas de comunicación inalámbrica y ha sido un punto de investigación y desarrollo en las últimas décadas. La radio cognitiva es uno de los conceptos para utilizar el espectro disponible de manera más eficiente mediante la utilización del acceso oportunista, por lo tanto se ha convertido en una tecnología prometedora. Uno de los elementos importantes de la radio cognitiva es detectar las oportunidades de espectro disponibles. En esta investigación se explican técnicas y aspectos de la tarea de detección de espectro, que son utilizadas por el analizador de espectro y el equipo de radio definida por *software*, para la evolución del espectro radioeléctrico en seis zonas urbanas de Bogotá.

En las diferentes mediciones realizadas en seis zonas de Bogotá y para distintos tipos de servicios, que involucró un rango amplio de bandas de frecuencias (54 MHz-6 GHz), se logró evidenciar que el espectro radioeléctrico en esta región del país está siendo altamente subutilizado, lo que conlleva a confirmar la necesidad de un cambio en la actual política de asignación fija del espectro, permitiendo la generación de regulaciones para tecnologías de acceso dinámico al espectro, como la radio cognitiva.

Para el desarrollo de las mediciones se recomienda hacer uso de tiempos de barrido cortos, en las bandas de las tecnologías variantes en el tiempo como GSM y WiFi, y tiempos de duración de la medida en múltiplos de 24 horas; mientras para las tecnologías de radiodifusión como radio y TV, se sugiere usar tiempos de barrido mayores y tiempos de duración de la medida menores a 1 hora.

Adicionalmente, se puede afirmar que el uso del espectro en Bogotá, para frecuencias menores a 1 GHz es modesto, para frecuencias entre 1 y 2 GHz es bajo y para frecuencias entre 3 y 6 GHz es extremadamente bajo. Con esto se destaca la importancia de una gestión dinámica del espectro radioeléctrico, junto con la investigación de cada una de sus funciones, que permitan un correcto despliegue de las tecnologías inalámbricas modernas.

Las bandas de frecuencia de 3 a 6 GHz son de particular interés debido a los bajos niveles de utilización, por lo tanto, se le recomienda al Ministerio de TIC desarrollar un modelo de gestión de subasta de este espectro, que estimule a los proveedores de servicios de comunicaciones inalámbricas, para operar en dichas bandas.

Se ha descrito un modelo de red de radio cognitiva para Bogotá, que puede ser extensible a otros entornos geográficos, que se basa particularmente en el cumplimiento

de los objetivos de usuario a usuario, y que consta de cuatro componentes: objetivos de extremo a extremo, cognición, auto-organización y reconfiguración. Este modelo proporciona la funcionalidad para gestionar estos componentes, permitir la comunicación entre ellos y facilita las interfaces entre la red de radio cognitiva y su entorno circundante. El modelo propuesto es flexible y extensible debido a que los componentes en el modelo pueden ser adicionados, sustituidos o actualizados de forma independiente, sin afectar los otros componentes ni la integridad de todo el modelo. Con el fin de demostrar la funcionalidad del modelo propuesto, se presentaron tres casos de servicios de acceso inalámbrico.

Los cuatro componentes presentados en el modelo propuesto para este libro hacen que este sea más flexible y adaptable a diferentes tipos de tecnologías y de usuarios, logrando incluso el cumplimiento de parámetros de QoS para los usuarios; lo que no es observable en diferentes modelos propuestos como [12, 52]. Ademas, se recomienda que una vez se apruben las políticas regulatorias actualmente en estudio, por parte de entidades como la ITU, para el desarrollo de sistemas de RC, sean incluidas en modelos como el propuesto en este texto.

Referencias

- [1] D. Cabric, *et al.*, “Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios,” in *Proc. 38th. Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, 2004, pp. 772-776.
- [2] *F. C. Commission, Federal communications commission: spectrum policy task force report*, 2002.
- [3] V. Valenta, *et al.*, “Survey on spectrum utilization in Europe: Measurements, analyses and observations,” *Proc. Fifth International Conference on Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications (CROWNCOM)*, pp. 1-5, 2010.
- [4] S. Zarrin, “Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks,” Doctor of Philosophy, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Toronto, Toronto, 2011.
- [5] J. Mitola, III and G. Q. Maguire, Jr., “Cognitive radio: making software radios more personal,” *Personal Communications, IEEE*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, 1999.
- [6] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [7] C. Stevenson, *et al.*, “IEEE 802.22: The first cognitive radio wireless regional area networks (WRANs) standards,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 47, no. 1, pp. 130-138, 2009.
- [8] I. Akyildiz, *et al.*, “A Survey on Spectrum Management in Cognitive Radio Networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, pp. 40-48, Abril 2008.
- [9] J. Mitola, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communication,” in *Mobile Multimedia Communications*, San Diego, 1999, pp. 3-10.
- [10] NTIA, “Facilitating opportunities for flexible, efficient and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies,” 2005.
- [11] “ET docket no 03-222 Notice of Proposed Rule Making and Order,” Federal Communications Commission, Washington, 2003.

- [12] I. Akyildiz, *et al.*, “NeXt generation / dynamic spectrum access / cognitive radio wireless networks: A survey,” *Computer Networks Journal*, vol. 50, pp. 2127-2159, May 2006.
- [13] J. H. Aguilar y N. A., “Radio cognitiva-estado del arte,” *Sistemas y Telemática*, vol. 9, no. 16, pp. 31-53, 2011.
- [14] I. Akyildiz, *et al.*, “CRAHNs: Cognitive radio ad hoc networks,” *Ad Hoc Networks Journal (Elsevier)*, vol. 7, pp. 810-836, 2009.
- [15] W. Y. Lee, “Spectrum Management in Cognitive Radio Wireless Networks,” Thesis for the Degree Doctor of Philosophy in the School of Electrical and Computer Engineer, Georgia Institute of Technology, Atlanta, 2009.
- [16] J. Neel, “Analysis and design of cognitive radio networks and distributed radio resource management algorithms,” Doctor of Philosophy, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, 2006.
- [17] S. Seidel, *et al.*, “Adaptive Air Interface Waveform for Flexibility and Performance in Commercial Wireless Communications Systems,” *World Wireless Research Forum*, 2002.
- [18] L. Pedraza, *Redes inalámbricas mesh. Caso de estudio: ciudad Bolívar*, vol. 1. Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2012.
- [19] P. Santi, “Topology control in wireless ad hoc and sensor networks,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 37, no. 2, pp. 164-194, 2005.
- [20] A. Sgora, *et al.*, “IEEE 802.11s Wireless Mesh Networks: Challenges and Perspectives,” in *Mobile Lightweight Wireless Systems*. vol. 13, F. Granelli, C. Skianis, P. Chatzimisios, Y. Xiao, and S. Redana, Eds., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 263-271.
- [21] M. Gast, *802.11 wireless networks: the definitive guide*, 2nd ed.: O'Reilly, 2005.
- [22] N. Chandra, *Handbook of smart antennas for RFID systems*: Wiley, 2010.
- [23] M. Mueck, *et al.*, “ETSI reconfigurable radio systems: status and future directions on software defined radio and cognitive radio standards,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 48, no. 9, pp. 78-86, 2010.
- [24] “IEEE Standard for Architectural Building Blocks Enabling Network-Device Distributed Decision Making for Optimized Radio Resource Usage in Heterogeneous Wireless Access Networks,” *IEEE Std 1900.4-2009*, pp. 1-130, 2009.
- [25] ITU-R, “Introduction to cognitive radio systems in the land mobile service,” *Report ITU-R M.2225*, 2011.
- [26] “IEEE Draft Standard for Wireless Regional Area Networks Part 22: Cognitive Wireless RAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications: Policies and procedures for operation in the TV Bands - Amendment: Management and Control Plane Interfaces and Procedures and

- Enhancement to the Management Information Base (MIB)," *IEEE P802.22a/D2, October 2013*, pp. 1-551, 2013.
- [27] I. P802.19, "Wireless Coexistence: WhiteSpace Coexistence Use Cases," *IEEE 802.19-09/26r4, 2009*.
 - [28] SENDORA, "Scenario descriptions and system requirements," *EU Project 216076, 2008*.
 - [29] ARAGORN, "Adaptive reconfigurable access and generic interfaces for optimisation in radio networks-ARAGORN," *EU project 216856, 2008*.
 - [30] "Use Cases for Cognitive Applications in Public Safety Communications Systems - Volume 1: Review of the 7 July Bombing of the London Underground, Wireless Innovation Forum," *CSDRF-07-P-0019-v1.0.0, 2007*.
 - [31] J. Riihijärvi, *et al.*, "State of the Art Review FARAMIR D2.1," *Flexible and Spectrum-Aware Radio Access through Measurements and Modelling in Cognitive Radio Systems*, pp. 1-160, 2010.
 - [32] B. Junjik, *et al.*, "Spectrum Markets for Wireless Services," in *3rd IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN, 2008*, pp. 1-10.
 - [33] T. Börgers and C. Dustmann, "Awarding telecom licences: the recent European experience," *Economic Policy*, pp. 215-218, 2003.
 - [34] M. Bykowsky, "A secondary market for the trading of spectrum: promoting market liquidity," *Telecommunications Policy*, pp. 533-541, 2003.
 - [35] M. Bykowsky, *et al.*, "Efficiency gains from using a market approach to spectrum management," *Information Economics and Policy*, pp. 73-90, 2010.
 - [36] C. E. Caicedo and M. B. H. Weiss, "Spectrum Trading: An Analysis of Implementation Issues," in *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, DySPAN, 2007*, pp. 579-584.
 - [37] J. M. Chapin and W. H. Lehr, "Cognitive Radios for Dynamic Spectrum Access - The Path to Market Success for Dynamic Spectrum Access Technology," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 5, pp. 96-103, 2007.
 - [38] J. M. Chapin and W. H. Lehr, "Time-limited leases in radio systems," *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 6, pp. 76-82, 2007.
 - [39] A. S. De Vany, *et al.*, "A property system for market allocation of the electromagnetic spectrum: A legal-economic-engineering study," *Stanford Law Review*, pp. 1499-1561, 1969.
 - [40] D. Lingjie, *et al.*, "Competition with Dynamic Spectrum Leasing," in *IEEE Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum, 2010*, pp. 1-11.
 - [41] S. Gandhi, *et al.*, "Towards real-time dynamic spectrum auctions," *Computer Networks*, vol. 52, no. 4, pp. 879-897, 2008.

- [42] H. Mutlu, *et al.*, “Spot Pricing of Secondary Spectrum Access in Wireless Cellular Networks,” *IEEE/ACM Transactions on Networking*, vol. 17, no. 6, pp. 1794-1804, 2009.
- [43] I. Akyildiz, *et al.*, “Flexible and Spectrum-Aware Radio Access through Measurements and Modelling in Cognitive Radio Systems,” *FARAMIR, Document Number D2.1*, 2010.
- [44] V. Chandrasekhar, *et al.*, “Femtocell networks: a survey,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 46, no. 9, pp. 59-67, 2008.
- [45] J. Mitola, “Cognitive radio: an integrated agent architecture for software defined radio,” Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2000.
- [46] DARPA-XG-WG, “The XG Architectural Framework V1.0,” 2003.
- [47] DARPA-XG-WG, “The XG Vision RFC V1.0,” 2003.
- [48] I. Akyildiz, *et al.*, “Spectrum management in cognitive radio ad hoc networks,” *Network, IEEE*, vol. 23, pp. 6-12, 2009.
- [49] F. K. Jondral, “Software-defined radio-basic and evolution to cognitive radio,” in *EURASIP Journal on Wireless Communication and Networking*, pp. 275-283, 2005.
- [50] B. Razavi, *RF Microelectronics*, 2nd ed. New York: Prentice Hall, 2011.
- [51] D. Cabric and R. W. Brodersen, “Physical layer design issues unique to cognitive radio systems,” in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2005. PIMRC 2005. IEEE 16th International Symposium on*, vol. 2, 2005, pp. 759-763.
- [52] I. Akyildiz, *et al.*, “AdaptNet: an adaptive protocol suite for the next-generation wireless Internet,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 42, no. 3, pp. 128-136, 2004.
- [53] M. M. Buddhikot, *et al.*, “DIMSUMNet: new directions in wireless networking using coordinated dynamic spectrum access,” *IEEE WoWMoM*, pp. 78-85, 2005.
- [54] O. Ileri, *et al.*, “Demand responsive pricing and competitive spectrum allocation via a spectrum server,” *IEEE DySPAN*, pp. 194-202, 2005.
- [55] S. A. Zekavat and X. Li, “User-central wireless system: ultimate dynamic channel allocation,” *IEEE DySPAN*, pp. 82-87, 2005.
- [56] R. Ramanathan and C. Partridge, “Next generation (xG) architecture and protocol development (XAP),” *DARPA*, 2005.
- [57] C. Rieser, “Biologically Inspired Cognitive Radio Engine Model Utilizing Distributed Genetic Algorithms for Secure and Robust Wireless Communications and Networking,” PhD Dissertation, Virginia Tech, 2004.
- [58] *Adapt4 technology*. Available: <http://www.adapt4.com/adapt4-technology.php>

- [59] T. A. Weiss, *et al.*, “Efficient signaling of spectral resources in spectrum pooling systems,” *10th Symposium on Communications and Vehicular Technology*, 2003.
- [60] R. W. Brodersen, *et al.*, “Corvus: a cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum,” 2004.
- [61] D. Cabric, *et al.*, “A Cognitive radio approach for usage of virtual unlicensed spectrum,” *14th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, 2005.
- [62] S. M. Mishra, *et al.*, “A real time cognitive radio testbed for physical and link layer experiments,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 562-567.
- [63] D. Willkomm, *et al.*, “Reliable link maintenance in cognitive radio systems,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 371-378.
- [64] D. Cabric, *et al.*, “Spectrum sharing radios,” *Circuits and Systems Magazine, IEEE*, vol. 6, no. 2, pp. 30-45, 2006.
- [65] K. C. C. Cordeiro, D. Birru, and S. Shankar, “IEEE 802.22: the first worldwide wireless standard based on cognitive radios,” *Proceedings of IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, pp. 328–337, 2005.
- [66] *IEEE 802.22 Working group on wireless regional area networks*. Available: <http://www.ieee802.org/22/>
- [67] FCC, “Notice of Proposed Rule Making,” *ET Docket no. 04-113*, 2004.
- [68] FCC, “Report and Order and Memorandum Opinion and Order,” *ET Docket no. 05-56*, 2005.
- [69] FCC, “Report and Order,” *ET Docket no. 05-57*, 2005.
- [70] K. Challapali, *et al.* (2004). *Spectrum Agile Radio for Broadband Applications*. Available: http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1271129
- [71] T. Kamakaris, *et al.*, “A case for coordinated dynamic spectrum access in cellular networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 289-298.
- [72] M. M. Buddhikot and K. Ryan, “Spectrum management in coordinated dynamic spectrum access based cellular networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 299-307.
- [73] X. Yiping, *et al.*, “Dynamic spectrum access in open spectrum wireless networks,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 24, no. 3, pp. 626-637, 2006.
- [74] J. B. E. G. J. Minden, L. S. Searl *et al*, “An agile radio for wireless innovation,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 45, no. 5, pp. 113-121, 2007.

- [75] Y. Yuan, *et al.*, "Knows: Cognitive Radio Networks Over White Spaces," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 416-427.
- [76] X. Lin, *et al.*, "DRiVE-ing to the Internet: Dynamic Radio for IP services in Vehicular Environments," in *Local Computer Networks, 2000. LCN 2000. Proceedings. 25th Annual IEEE Conference on*, 2000, pp. 281-289.
- [77] D. Grandblaise, *et al.*, "Dynamic spectrum allocation (DSA) and reconfigurability," *Software-Defined Radio (SDR) Forum*, 2002.
- [78] L. Yang, *et al.*, "Traffic-aware dynamic spectrum access," presented at the Proceedings of the 4th Annual International Conference on Wireless Internet, Maui, Hawaii, 2008.
- [79] I. F. Akyildiz and Y. Li, "OCRA: OFDM-based cognitive radio networks," *Broadband and Wireless Networking Laboratory Technical Report*, 2006.
- [80] Z. Qing, *et al.*, "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: A POMDP framework," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 25, no. 3, pp. 589-600, 2007.
- [81] S. Geirhofer, *et al.*, "Cognitive Medium Access: Constraining Interference Based on Experimental Models," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 26, no. 1, pp. 95-105, 2008.
- [82] C. Lili and Z. Haitao, "Stable and Efficient Spectrum Access in Next Generation Dynamic Spectrum Networks," in *INFOCOM 2008. The 27th Conference on Computer Communications. IEEE*, 2008.
- [83] C. Clancy, *et al.*, "Applications of Machine Learning to Cognitive Radio Networks," *Wireless Communications, IEEE*, vol. 14, no. 4, pp. 47-52, 2007.
- [84] D. G. Tzikas, *et al.*, "The variational approximation for Bayesian inference," *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 25, no. 6, pp. 131-146, 2008.
- [85] Z. Youping, *et al.*, "Performance Evaluation of Cognitive Radios: Metrics, Utility Functions, and Methodology," *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 4, pp. 642-659, 2009.
- [86] R. Etkin, *et al.*, "Spectrum sharing for unlicensed bands," *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 25, no. 3, pp. 517-528, 2007.
- [87] FCC, "Notice of inquiry and notice of proposed Rulemaking," *ET Docket No 03-237*, 2003.
- [88] S. Perez, *et al.*, "Underlay control channel using adaptive hybrid spread spectrum techniques for dynamic spectrum access," *International Symposium on Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems*, pp. 99-106, 2013.
- [89] B. Wild and K. Ramchandran, "Detecting primary receivers for cognitive radio applications," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 124-130.

- [90] H. Tang, "Some physical layer issues of wide-band cognitive radio systems," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 151-159.
- [91] Z. Haitao and C. Lili, "Device-centric spectrum management," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 56-65.
- [92] V. Kanodia, *et al.*, "MOAR: a multi-channel opportunistic auto-rate media access protocol for ad hoc networks," in *Broadband Networks, 2004. BroadNets 2004. Proceedings. First International Conference on*, 2004, pp. 600-610.
- [93] S. Krishnamurthy, *et al.*, "Control channel based MAC-layer configuration, routing and situation awareness for cognitive radio networks," in *Military Communications Conference, 2005. MILCOM 2005. IEEE*, vol. 1, 2005, pp. 455-460.
- [94] 3GPP2, "cdma2000 High Rate Packet Data Air Interface Specification," *TS C.S0024 V2.0*, 2000.
- [95] E. Esteves, "The high data rate evolution of the cdma2000 cellular system mobility and teletraffic for wireless communications," *Kluwer Academic Publishers*, vol. 5, pp. 61–72, 2000.
- [96] W. Li-Chun and W. Chung-Wei, "Spectrum Handoff for Cognitive Radio Networks: Reactive-Sensing or Proactive-Sensins?," in *Performance, Computing and Communications Conference, 2008. IPCCC 2008. IEEE International*, 2008, pp. 343-348.
- [97] N. Hoven, *et al.*, "Some fundamental limits on cognitive radio," *In Proc. Allerton Conf. on Commun Control, and Computing*, 2004.
- [98] I. Christian, *et al.*, "Spectrum mobility in cognitive radio networks," *Communications Magazine, IEEE*, vol. 50, no. 6, pp. 114-121, 2012.
- [99] J. Hernandez, *et al.*, "A novel cognitive radio MAC protocol for dynamic spectrum access," *IEEE Latin-America Conference on Communications*, pp. 1-6, 2012.
- [100] L. F. Pedraza, *et al.*, "Deteción de espectro para radio cognitiva," *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 20, pp. 197-210, 2012.
- [101] V. Brik, *et al.*, "DSAP: a protocol for coordinated spectrum access," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 611-614.
- [102] C. Raman, *et al.*, "Scheduling variable rate links via a spectrum server," in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 110-118.
- [103] C. Lili and Z. Haitao, "Distributed spectrum allocation via local bargaining," in *Sensor and Ad Hoc Communications and Networks, 2005. IEEE SECON 2005. 2005 Second Annual IEEE Communications Society Conference on*, 2005, pp. 475-486.

- [104] J. Huang, *et al.*, “Spectrum Sharing with Distributed Interference Compensation,” *IEEE DySPAN 2005*, pp. 88-93, 2005.
- [105] L. Ma, *et al.*, “Dynamic open spectrum sharing MAC protocol for wireless ad hoc networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 203-213.
- [106] P. Papadimitratos, *et al.*, “A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, no. 12, pp. 10-14, 2005.
- [107] Z. Jun, *et al.*, “Distributed coordination in dynamic spectrum allocation networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 259-268.
- [108] Z. Qing, *et al.*, “Decentralized cognitive mac for dynamic spectrum access,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 224-232.
- [109] C. Peng, *et al.*, “Utilization and fairness in spectrum assignment for opportunistic spectrum access,” *Mobile Networks and Applications (MONET)*, vol. 11, no. 4, pp. 555-576, 2006.
- [110] Z. Haitao and P. Chunyi, “Collaboration and fairness in opportunistic spectrum access,” in *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on*, vol. 5, 2005, pp. 3132-3136.
- [111] N. Nie and C. Comaniciu, “Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 269-278.
- [112] M. Rekha, *et al.*, “Outage probability based comparison of underlay and overlay spectrum sharing techniques,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 101-109.
- [113] FCC, “Notice of proposed rule making, unlicensed operation in the TV broadcast bands,” *FCC 04-186*, 2004.
- [114] M. J. Marcus, “Unlicensed cognitive sharing of TV spectrum: the controversy at the Federal Communications Commission,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 43, no. 5, pp. 24-25, 2005.
- [115] Z. Youping, *et al.*, “Applying Radio Environment Maps to Cognitive Wireless Regional Area Networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 115-118.
- [116] T. Yucek and H. Arslan, “A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications,” *Communications Surveys & Tutorials, IEEE*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.

- [117] E. Axell, *et al.*, “Spectrum Sensing for Cognitive Radio: State-of-the-Art and Recent Advances,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 29, no. 3, pp. 101-116, 2012.
- [118] R. Couillet, *et al.*, “Eigen-Inference for Energy Estimation of Multiple Sources,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 57, no. 4, pp. 2420-2439, 2011.
- [119] A. Al Daoud, *et al.*, “Secondary Pricing of Spectrum in Cellular CDMA Networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 535-542.
- [120] C. Chun-Ting, *et al.*, “What and how much to gain by spectrum agility?,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 25, no. 3, pp. 576-588, 2007.
- [121] K. Hyoil and K. G. Shin, “Fast Discovery of Spectrum Opportunities in Cognitive Radio Networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on*, 2008, pp. 1-12.
- [122] K. Hyoil and K. G. Shin, “Efficient Discovery of Spectrum Opportunities with MAC-Layer Sensing in Cognitive Radio Networks,” *Mobile Computing, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 5, pp. 533-545, 2008.
- [123] L. Won-Yeol and I. F. Akyildiz, “Optimal spectrum sensing framework for cognitive radio networks,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 7, no. 10, pp. 3845-3857, 2008.
- [124] K. Sriram and W. Whitt, “Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 4, no. 6, pp. 833-846, 1986.
- [125] D. Willkomm, *et al.*, “Primary Users in Cellular Networks: A Large-Scale Measurement Study,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2008. DySPAN 2008. 3rd IEEE Symposium on*, 2008, pp. 1-11.
- [126] S. Geirhofer, *et al.*, “Cognitive Radios for Dynamic Spectrum Access - Dynamic Spectrum Access in the Time Domain: Modeling and Exploiting White Space,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 45, no. 5, pp. 66-72, 2007.
- [127] R. Jain and S. Routhier, “Packet Trains-Measurements and a New Model for Computer Network Traffic,” *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, vol. 4, no. 6, pp. 986-995, 1986.
- [128] V. Paxson and S. Floyd, “Wide area traffic: the failure of Poisson modeling,” *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 3, no. 3, pp. 226-244, 1995.
- [129] B. Canberk, *et al.*, “Primary User Activity Modeling Using First-Difference Filter Clustering and Correlation in Cognitive Radio Networks,” *Networking, IEEE/ACM Transactions on*, vol. 19, no. 1, pp. 170-183, 2011.
- [130] M. Subhedar and G. Birajdar, “Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Networks: A Survey,” *International Journal of Next-Generation Networks*, vol. 3, no. 2, pp. 37-51, 2011.

- [131] N. S. Shankar, *et al.*, “Spectrum agile radios: utilization and sensing architectures,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 160-169.
- [132] G. Ganesan and L. Ye, “Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio,” in *Global Telecommunications Conference, 2005. GLOBECOM '05. IEEE*, 2005, pp. 5, pp. 2509.
- [133] G. Ganesan and Y. Li, “Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 137-143.
- [134] D. Cabric, *et al.*, “Spectrum Sensing Measurements of Pilot, Energy, and Collaborative Detection,” in *Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE*, 2006, pp. 1-7.
- [135] A. Ghasemi and E. S. Sousa, “Optimization of Spectrum Sensing for Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio Networks,” in *Consumer Communications and Networking Conference, 2007. CCNC 2007. 4th IEEE*, 2007, pp. 1022-1026.
- [136] D. Datla, *et al.*, “Parametric Adaptive Spectrum Sensing Framework for Dynamic Spectrum Access Networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 482-485.
- [137] T. Weiss, *et al.*, “A diversity approach for the detection of idle spectral resources in spectrum pooling systems,” *48th Int. Scientific Colloquium*, pp. 37-38, 2003.
- [138] F. Digham, *et al.*, “On the Energy Detection of Unknown Signals Over Fading Channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2007.
- [139] Q. Peng, *et al.*, “A Distributed Spectrum Sensing Scheme Based on Credibility and Evidence Theory in Cognitive Radio Context,” in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2006 IEEE 17th International Symposium on*, 2006, pp. 1-5.
- [140] P. Pawelczak, *et al.*, “WLC10-4: Performance Measures of Dynamic Spectrum Access Networks,” in *Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM '06. IEEE*, 2006, pp. 1-6.
- [141] M. P. Wylie-Green, “Dynamic spectrum sensing by multiband OFDM radio for interference mitigation,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 619-625.
- [142] S. D. Jones, *et al.*, “An experiment for sensing-based opportunistic spectrum access in CSMA/CA networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 593-596.

- [143] A. E. Leu, *et al.*, “Ultra sensitive TV detector measurements,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 30-36.
- [144] J. Lehtomaki, “Analysis of energy based signal detection,” Ph.D. dissertation, University of Oulu, Finland, 2005.
- [145] J. J. Lehtomaki, *et al.*, “Spectrum Sensing with Forward Methods,” in *Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE*, 2006, pp. 1-7.
- [146] S. Geirhofer, *et al.*, “A Measurement-Based Model for Dynamic Spectrum Access in WLAN Channels,” in *Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE*, 2006, pp. 1-7.
- [147] S. Geirhofer, *et al.*, “Dynamic spectrum access in WLAN channels: empirical model and its stochastic analysis,” presented at the Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum, Boston, Massachusetts, 2006.
- [148] A. E. Leu, *et al.*, “Modeling and analysis of interference in listen-before-talk spectrum access schemes,” *Int. J. Netw. Manag.*, vol. 16, no. 2, pp. 131-147, 2006.
- [149] A. Sahai, *et al.*, “Fundamental design tradeoffs in cognitive radio systems,” presented at the Proceedings of the first international workshop on Technology and policy for accessing spectrum, Boston, Massachusetts, 2006.
- [150] T. Yucek and H. Arslan, “Spectrum Characterization for Opportunistic Cognitive Radio Systems,” in *Military Communications Conference, 2006. MILCOM 2006. IEEE*, 2006, pp. 1-6.
- [151] P. Pawełczak, *et al.*, “Cluster-based spectrum sensing architecture for opportunistic spectrum access networks,” *Tech. Rep. IRCTR-S-004-07*, 2007.
- [152] X. Liu and S. S. N., “Sensing-based opportunistic channel access,” *Mob. Netw. Appl.*, vol. 11, no. 4, pp. 577-591, 2006.
- [153] F. Weidling, *et al.*, “A framework for R.F. spectrum measurements and analysis,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 573-576.
- [154] S. M. Mishra, *et al.*, “Cognitive Technology for Ultra-Wideband/WiMax Co-existence,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 179-186.
- [155] H. Urkowitz, “Energy detection of unknown deterministic signals,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 55, no. 4, pp. 523-531, 1967.
- [156] J. J. Lehtomaki, *et al.*, “Threshold setting strategies for a quantized total power radiometer,” *Signal Processing Letters, IEEE*, vol. 12, no. 11, pp. 796-799, 2005.
- [157] M. Abramowitz and I. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, 10th ed. New York: National Bureau of Standards, 1972.

- [158] M. P. Olivieri, *et al.*, “A scalable dynamic spectrum allocation system with interference mitigation for teams of spectrally agile software defined radios,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 170-179.
- [159] S. Lal and A. Mishra, “A look ahead scheme for adaptive spectrum utilization,” in *Radio and Wireless Conference, 2003. RAWCON '03. Proceedings*, 2003, pp. 83-86.
- [160] J. Proakis, “*Digital Communications*,” ed. New York: McGraw-Hill, 2000.
- [161] A. Sahai and D. Cabric, “A tutorial on spectrum sensing: Fundamental limits and practical challenges,” *New Frontiers Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)*, 2005.
- [162] R. Tandra and A. Sahai, “SNR Walls for Signal Detection,” *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 2, no. 1, pp. 4-17, 2008.
- [163] W. Beibei and K. J. R. Liu, “Advances in cognitive radio networks: A survey,” *Selected Topics in Signal Processing, IEEE Journal of*, vol. 5, no. 1, pp. 5-23, 2011.
- [164] FCC, “Facilitating opportunities for flexible, efficient and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies: Notice of proposed rule making and order,” *ET Docket No. 03-108*, 2003.
- [165] A. Garhwal and P. Pratim, “A Survey on Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio,” *International Journal of Computer Science & Communication Networks*, vol. 1, no. 2, pp. 196-205, 2011.
- [166] A. Shahzad, “Comparative Analysis of Primary Transmitter Detection Based Spectrum Sensing Techniques in Cognitive Radio Systems,” *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, pp. 4522-4531, 2005.
- [167] Q. Zhi, *et al.*, “Spectrum Sensing by Cognitive Radios at Very Low SNR,” in *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE*, 2009, pp. 1-6.
- [168] H. B. Salameh, *et al.*, “Distance- and Traffic-Aware Channel Assignment in Cognitive Radio Networks,” in *Sensor, Mesh and Ad Hoc Communications and Networks, 2008. SECON '08. 5th Annual IEEE Communications Society Conference on*, 2008, pp. 10-18.
- [169] N. Khambekar, *et al.*, “Utilizing OFDM Guard Interval for Spectrum Sensing,” in *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*, 2007, pp. 38-42.
- [170] M. Oner and F. Jondral, “Cyclostationarity based air interface recognition for software radio systems,” in *Radio and Wireless Conference, 2004 IEEE*, 2004, pp. 263-266.
- [171] M. Oner and F. Jondral, “Cyclostationarity-based methods for the extraction of the channel allocation information in a spectrum pooling system,” in *Radio and Wireless Conference, 2004 IEEE*, 2004, pp. 279-282.

- [172] A. Fehske, *et al.*, “A new approach to signal classification using spectral correlation and neural networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2005. DySPAN 2005. 2005 First IEEE International Symposium on*, 2005, pp. 144-150.
- [173] M. Ghozzi, *et al.*, “Cyclostationarity-Based Test for Detection of Vacant Frequency Bands,” in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2006. 1st International Conference on*, 2006, pp. 1-5.
- [174] H. Ning, *et al.*, “Spectral correlation based signal detection method for spectrum sensing in IEEE 802.22 WRAN systems,” in *Advanced Communication Technology, 2006. ICACT 2006. The 8th International Conference*, 2006, pp. 6, pp.1770.
- [175] J. Lunden, *et al.*, “Spectrum Sensing in Cognitive Radios Based on Multiple Cyclic Frequencies,” in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on*, 2007, pp. 37-43.
- [176] K. Kyouwoong, *et al.*, “Cyclostationary Approaches to Signal Detection and Classification in Cognitive Radio,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 212-215.
- [177] K. Maeda, *et al.*, “Recognition Among OFDM-Based Systems Utilizing Cyclostationarity-Inducing Transmission,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 516-523.
- [178] P. D. Sutton, *et al.*, “Cyclostationary Signatures for Rendezvous in OFDM-Based Dynamic Spectrum Access Networks,” in *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks, 2007. DySPAN 2007. 2nd IEEE International Symposium on*, 2007, pp. 220-231.
- [179] P. D. Sutton, *et al.*, “Cyclostationary Signature Detection in Multipath Rayleigh Fading Environments,” in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2007. CrownCom 2007. 2nd International Conference on*, 2007, pp. 408-413.
- [180] W. A. Gardner, “Exploitation of spectral redundancy in cyclostationary signals,” *Signal Processing Magazine, IEEE*, vol. 8, no. 2, pp. 14-36, 1991.
- [181] Z. Tian and G. B. Giannakis, “A Wavelet Approach to Wideband Spectrum Sensing for Cognitive Radios,” in *Cognitive Radio Oriented Wireless Networks and Communications, 2006. 1st International Conference on*, 2006, pp. 1-5.
- [182] S. M. Mishra, *et al.*, “Cooperative Sensing among Cognitive Radios,” in *Communications, 2006. ICC '06. IEEE International Conference on*, 2006, pp. 1658-1663.
- [183] G. Ganesan and L. Ye, “Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio, Part I: Two User Networks,” *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 6, pp. 2204-2213, 2007.

- [184] G. Ganesan and Y. Li, "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio, Part II: Multiuser Networks," *Wireless Communications, IEEE Transactions on*, vol. 6, no. 6, pp. 2214-2222, 2007.
- [185] B. F. Lo, *et al.*, "Efficient Recovery Control Channel Design in Cognitive Radio Ad Hoc Networks," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 9, pp. 4513-4526, 2010.
- [186] I. F. Akyildiz, *et al.*, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey," *Phys. Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 40-62, 2011.
- [187] M. López and F. Casadevall, "Spectrum Survey in Urban Environment: UPC Campus Nord, Barcelona, Spain," *Technical Report*, 2010.
- [188] Anritsu, "Spectrum Master™ Model MS2721B," *Maintenance Manual*, 2012.
- [189] C. Rauscher, *Fundamentals of Spectrum Analysis*, 6th ed. Munchen: Rohde&Schwarz, 2008.
- [190] Agilent-Technologies, "Spectrum Analysis Basics - Application," *Note 150*, 2014.
- [191] A. M. Wyglinski, *et al.*, *Cognitive Radio Communications and Networks Principles and Practice*. Burlington: Elsevier, 2010.
- [192] Ettus, *Universal Software Radio Peripheral 2 (USRP2)*, 2013. Available: www.ettus.com
- [193] GNU-Radio, *GNU Radio software*. 2013. Available: <http://gnuradio.org/redmine/projects/gnuradio/wiki>
- [194] A. Dejonghe, *et al.*, "Spectrum Sensing Engine and Prototype Measurements FARAMIR D3.2," *Flexible and Spectrum Aware Radio Access through Measurements and Modelling in Cognitive Radio Systems*, pp. 1-78, 2011.
- [195] *Running GPS software on USRP*. Available: <http://yo3iiu.ro/blog/?p=1127>
- [196] M. López and F. Casadevall, "Methodological aspects of spectrum occupancy evaluation in the context of cognitive radio," *European Transactions on Telecommunications (Wiley), Special Issue on European Wireless 2009 Conference*, vol. 21, no. 9, pp. 680-693, December 2010.
- [197] ITU, "UIT-R SM.1880. Spectrum Occupancy Measurement Technical Report," *International Telecommunications Union*, 2011.
- [198] L. Pedraza, *et al.*, "Evaluación de ocupación del espectro radioeléctrico en Bogotá-Colombia," *Ingeniería y Ciencia*, vol. 10, no. 19, pp. 127-143, 2014.
- [199] L. Pedraza, *et al.*, "Estudio del uso del espectro radioeléctrico en zonas urbanas de Bogotá en Colombia," *4to Congreso Internacional de Espectro (ANE)*, 2014.
- [200] R. Ferro, *et al.*, "Maximización del Throughput en una red de radio cognitiva basado en la probabilidad de falsa alarma," *Tecnura*, vol. 15, no. 30, pp. 64-70, 2011.

- [201] X. Ding, *et al.*, “An Architecture for Cognitive Radio Networks with Cognition, Self-Organization and Reconfiguration Capabilities,” in *Vehicular Technology Conference (VTC Fall), 2012 IEEE*, 2012, pp. 1-5.
- [202] Y. Chun-gang, *et al.*, “Optimal Power Control for Cognitive Radio Networks Under Coupled Interference Constraints: A Cooperative Game-Theoretic Perspective,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 59, no. 4, pp. 1696-1706, 2010.
- [203] D. Xu, *et al.*, “Outage probability minimising joint channel and power allocation for cognitive radio networks,” *Electronics Letters*, vol. 47, no. 25, pp. 1402-1404, 2011.
- [204] M. Thathachar and P. Sastry, *Networks of Learning Automata: Techniques for Online Stochastic Optimization*, 1st ed. Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 2004.

Autores

Luis Fernando Pedraza Martínez

Ingeniero electrónico, Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y candidato a Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asociado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito al programa de Ingeniería en Telecomunicaciones de la Facultad Tecnológica; Integrante del grupo de investigación *Gidenutas*, en el que lidera investigaciones de aplicaciones tecnológicas que contribuyen a mejorar la calidad de vida de comunidades vulnerables. También pertenece al grupo de investigación Internet Inteligente, en el área de Radio Cognitiva y Networking; tiene varias publicaciones en el área de las comunicaciones en revistas de categoría nacional e internacional.

César Augusto Hernández Suárez

Ingeniero electrónico con especialización en Interconexión de Redes, Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, y candidato a Doctor en Ingeniería de Sistemas y Computación de la Universidad Nacional de Colombia. Profesor asociado de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, adscrito a los programas de Tecnología en Electricidad e Ingeniería Eléctrica de la Facultad Tecnológica. Integrante del grupo de investigación *Armos*, en el que lidera investigaciones de aplicaciones tecnológicas que contribuyen a mejorar la calidad de vida de comunidades vulnerables. También pertenece al grupo de investigación Internet Inteligente y *Gidenutas*, en el área de radio cognitiva y networking; tiene varias publicaciones en el área de las comunicaciones en revistas de categoría nacional e internacional.

Katherine Johanna Galeano Romero

Ingeniera en Telecomunicaciones, Magister en Ciencias de la Información y las Comunicaciones de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Integrante del grupo de investigación *Gidenuotas*, en el que ha desarrollado proyectos de investigación en las áreas de redes inalámbricas comunitarias y radio cognitiva, las cuales le han representado ponencias y publicaciones de tipo nacional e internacional. Se desempeña como *Roll Out Manager* en Alcatel-Lucent.

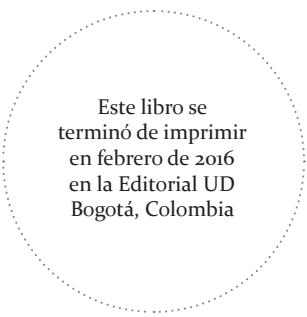
Enrique Rodríguez de la Colina

Profesor-Investigador en el Departamento de Ingeniería Eléctrica en el Área de Redes y Telecomunicaciones de la Universidad Autónoma Metropolitana - Iztapalapa (UAM-I) desde agosto de 2010. Obtuvo el grado de Doctor en Sistemas de Comunicaciones Fotónicas, en el Departamento de Ingeniería de la Universidad de Cambridge, Inglaterra. Colaboró como investigador asociado en el postdoctorado en la Universidad de Gerona, España, en el Grupo de Comunicaciones de Banda Ancha y Sistemas Distribuidos (BCDS) en 2009. En 2003 obtuvo el grado de Maestro en Ciencias de la Computación en la Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco (UAM-A), y realizó un diplomado en Habilidades Gerenciales en el Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM) en 2001. En 1994, recibió el título de Ingeniero en Electrónica especialidad en Comunicaciones de la UAM-I. Cuenta con más de 15 años de experiencia trabajando en la industria como: ingeniero, gerente de proyectos y consultor para varias compañías de telecomunicaciones.

Su interés en la investigación se centra en los sistemas de comunicaciones de alta velocidad, redes inalámbricas cognitivas, conmutación de paquetes y protocolos de comunicaciones para redes de alta capacidad, incluyendo enlaces inter-satelitales. Es autor de publicaciones internacionales en conferencias, seminarios y revistas científicas; además es miembro de la sociedad de IEEE Communications.

Ingrid Patricia Páez

Ingeniera electricista de la Escuela Colombiana de Ingeniería. Ingeniera Industrial y Doctora en Ingeniería de Telecomunicaciones en la Universidad de Cantabria, Santander, España. Actualmente se desempeña como docente en dedicación exclusiva del Departamento de Ingeniería de Sistemas e Industrial de la Universidad Nacional de Colombia, sede Bogotá. Su área de interés son los sistemas de comunicación inalámbrica.



Este libro se
terminó de imprimir
en febrero de 2016
en la Editorial UD
Bogotá, Colombia