

REDES AD HOC UTILIZANDO TECNICAS DE RADIO COGNITIVO

**LINA MARIA MENDOZA PEÑA
JUAN PABLO ALVAREZ SANCHEZ**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA DE SISTEMAS
MINOR DE REDES Y TELECOMUNICACIONES
CARTAGENA**

2011

REDES AD HOC UTILIZANDO TECNICAS DE RADIO COGNITIVO

**LINA MARIA MENDOZA PEÑA
JUAN PABLO ALVAREZ SANCHEZ**

**Monografía para optar por el título de
Ingeniero de Sistemas**

**Asesor
GIOVANNY RAFAEL VASQUEZ MENDOZA
Ingeniero de Sistemas**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE BOLIVAR
FACULTAD DE INGENIERIA
PROGRAMA DE INGENIERIA DE SISTEMAS
MINOR DE REDES Y TELECOMUNICACIONES
CARTAGENA**

2011

Cartagena de Indias D.T. y C, Julio de 2011

Señores
Comité evaluador
Programa de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Tecnológica de Bolívar

Cordial Saludo

Nos dirigimos a ustedes con el fin de presentar la monografía titulada “**REDES AD HOC UTILIZANDO TECNICAS DE RADIO COGNITIVO**”, desarrollada para su estudio y evaluación como requisito fundamental del Minor en Redes y Telecomunicaciones, para optar al título de Ingeniero de Sistemas.

En espera que esta cumpla con las normas pertinentes establecidas por la institución quedamos a su disposición para cualquier aclaración.

Lina María Mendoza Peña
C.C 1.047.393.705 de Cartagena

Juan Pablo Álvarez Sánchez
C.C 1.104.009.003 de Sucre

Giovanny Vásquez Mendoza
Asesor de la Monografía

Nota de aceptación

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Cartagena de Indias D.T. y C, Julio de 2011.

A mis padres, Luz Nelly y Jaime,
Hermanos, sobrino y cuñado
gracias por apoyarme y hacer
que esto sea posible.
Para ti Abuela.

Lina Mendoza Peña.

En agradecimiento a mis padres
Y al resto de mi familia,
por brindarme apoyo y confianza
durante toda mi época de
estudiante.

Juan Pablo Álvarez Sánchez.

AGRADECIMIENTOS

A Gustavo Pinto por su gran ayuda.

A Haroldo Romero Ramírez y Luz Eliana Mendoza, por su motivación.

A Jairo Gutiérrez, ingeniero de Sistemas, por sus aportes y colaboración.

A Giovanni Vásquez, ingeniero de Sistemas y asesor de esta monografía, por su orientación y colaboración.

A todos los profesores del Minor en Redes y Telecomunicaciones 2011, por compartir sus valiosos conocimientos.

Julio de 2011, Cartagena – Bolívar

Señores
Universidad Tecnológica de Bolívar

Yo Lina María Mendoza Peña, identificada con el número de cedula 1.047.393.705 de Cartagena, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado Redes Ad-hoc utilizando técnicas de Radio Cognitivo producto de mi actividad académica para optar el título de Ingeniero de Sistemas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Lina María Mendoza Peña
c.c. 1.047.393.705 de Cartagena

Julio de 2011, Cartagena – Bolívar

Señores
Universidad Tecnológica de Bolívar

Yo Juan Pablo Álvarez Sánchez, identificado con el número de cedula 1.104.009.003 de San Pedro-Sucre, manifiesto en este documento mi voluntad de ceder a la Universidad Tecnológica de Bolívar los derechos patrimoniales, consagrados en el artículo 72 de la Ley 23 de 1982 sobre Derechos de Autor, del trabajo final denominado Redes Ad-hoc utilizando técnicas de Radio Cognitivo producto de mi actividad académica para optar el título de Ingeniero de Sistemas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

La Universidad Tecnológica de Bolívar, entidad académica sin ánimo de lucro, queda por lo tanto facultada para ejercer plenamente los derechos anteriormente cedidos en su actividad ordinaria de investigación, docencia y extensión. La cesión otorgada se ajusta a lo que establece la Ley 23 de 1982. Con todo, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada con arreglo al artículo 30 de la Ley 23 de 1982. En concordancia suscribo este documento que hace parte integral del trabajo antes mencionado y entrego al Sistema de Bibliotecas de la Universidad Tecnológica de Bolívar.

Juan Pablo Álvarez Sánchez
c.c. 1.104.009.003 de San Pedro-Sucre

CONTENIDO

	Pag.
1. MARCO TEORICO	19
1.1 HISTORIA, DEFINICIÓN Y ASPECTOS BÁSICOS DE RADIO COGNITIVO	19
1.1.1 USUARIOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS	23
1.1.2 DEFINICION DE RADIO COGNITIVO	24
1.1.3 CARACTERÍSTICAS	24
1.1.3.1 CAPACIDAD COGNITIVA	24
1.1.3.2 RECONFIGURABILIDAD	25
1.1.4 EVOLUCIÓN	26
1.1.5 PARADIGMAS	27
1.1.5.1 UNDERLAY	28
1.1.5.2 OVERLAY	28
1.1.5.3 INTERWEAVE	29
1.2 AD HOC	29
1.2.1 APLICACIONES TÍPICAS	30
1.2.2 FUNCIONES DE MOVILIDAD	30
2. ARQUITECTURA DE UN SISTEMA RADIO COGNITIVO	31
2.1 ESTABLECIMIENTO DE UNA CONEXIÓN	31
2.1.1 Spectrum Sensing	32
2.1.2 Spectrum Decision	32
2.1.3 spectrum Handoff	32
2.2 PROTOCOLO MAC	33
2.3 SOFTWARE RADIO	35
2.4 ESTANDARIZACION Y REGULACION DE LA RADIO COGNITIVA	38
2.5 TIPOS DE RADIO COGNITIVA	38
2.5.1 Adapt4 XG1	39
2.5.2 Corvus	39
2.5.3 CR1	40
2.5.4 DARPA xG	40
2.5.5 E2R Proyect	40
2.5.6 Nautilus	40
2.5.7 KNOWS	41
2.5.8 Spectrum Pooling	41
2.6 ARQUITECTURA AD-HOC	42
3. LIMITACIONES PARA LA IMPLEMENTACION DE RADIO COGNITIVO	43
3.1 LIMITACIONES TECNICAS	43

3.2 LIMITACIONES POLITICAS Y LEGALES	44
3.3 LIMITACIONES ECONOMICAS	47
4. RADIO COGNITIVA Y TECNOLOGIAS INALAMBRICAS PARA REDES AD-HOC	48
4.1 ESPECIFICACIONES INALAMBRICAS 802.11	48
4.1.1 WI-FI	
4.1.1.1 PROTOCOLOS	49
4.1.2 WIMAX	51
4.1.2.1 CARACTERISTICAS	52
4.1.3 BLUETOOTH	53
4.1.3.1 DESCRIPCION	54
4.1.3.1.1 ARQUITECTURA HARDWARE	54
4.1.3.1.2 ARQUITECTURA SOFTWARE	55
4.1.4 ZIGBEE	56
4.1.4.1 PROTOCOLOS	56
4.2 APORTE DE LA RADIO COGNITIVA A LAS REDES INALAMBRICAS	57
4.2.1 VENTAJAS DE RADIO COGNITIVO	57
4.2.2 DESVENTAJAS DE RADIO COGNITIVO	58
5. APLICACIONES DE RADIO COGNITIVO	59
5.1 AMBITO MILITAR	59
5.2 AMBITO DE SEGURIDAD PÚBLICA	60
5.3 AMBITO COMERCIAL	61
5.3.1 DIVIDENDO DIGITAL Y ESPACIOS DE TELEVISION ABIERTA	62
5.3.2 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UWB	62
5.3.3 PUESTA EN COMUN DEL ESPECTRO	63
5.4 CASOS DE ÉXITO	63
5.4.1 SpeakEasy	63
5.4.2 USRP	64
5.4.3 CAMBRIDGE TV WHITE SPACES	65
5.4.4 SISTEMA DE PRUEBA OFRECE LLAMADAS, MENSAJES DE TEXTO, Y DATOS ENVIANDO SEÑALES A TRAVÉS DE LOS INTERCOMUNICADORES PARA BEBÉS Y LOS TELÉFONOS INALÁMBRICOS	66
5.4.5 SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES UTILIZADOS PARA CASOS DE EMERGENCIA EN EL ECUADOR	67
CONCLUSION	69
BILBIOGRAFIA	71
ANEXOS	74

LISTA DE FIGURAS Y TABLAS

	Pág.
Figura 1.1. Convergencia a Radio Cognitivo	21
Figura 1.2. Medidas de ocupación del espectro efectuados por la Shared Spectrum Company, en Dublín, Irlanda. Abril 2007.	23
Figura 2.1. Diagrama de Flujo para establecer una conexión.	34
Figura 2.2. Esquema de intercambio de mensajes.	35
Figura 2.3. Modelo de un sistema de Radio Cognitivo.	36
Figura 2.4. Arquitectura que soporte aplicaciones actuales y futuras.	38
Figura 2.5. Arquitectura Ad-hoc de CR	43
Figura 3.1. Ocupación espectral medida en Washington DC por la empresa Shared Spectrum Company.	46
Figura 5.1. Espacio en blanco del espectro en la ciudad de San Francisco, USA, después de la transición a Televisión Digital.	62
Figura 5.3. Operación de UWB.	63
Tabla 4.1. Características de WIMAX frente a otras tecnologías inalámbricas.	53

ACRÓNIMOS

ARQ:	Automatic Repeat-reQuest
BCCH:	Broadcast Control Channel
CR:	Radio Cognitivo
CTS:	Clear To Send
CSMA/CA:	Carrier Sense Multiple Access – Collision Avoidance
DSP:	Procesador Digital de Señal
ETSI:	European Telecommunication Standards Institute
FCC:	Federal Communications Comision
FDD:	Floppy Disk Device
FEC:	Forward Error Correction
FCCH:	Frecuency Correction Channel
FDMA:	Frequency Division Multiple Access
GERAN:	GSM/EDGE Radio Access Network
GPP:	Procesador de Propósito General
GPS:	Global System Positioning
HCF:	Hybrid Coordination Function
HCI:	Host Controller Interface
ID:	Identificador
IR:	Infrared Light
ISM:	Industrial, Scientific and Medical
LC:	Link Controller
MAC:	Medium Access Control
NTIA:	National Telecommunications and Information Administration
OFDM:	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
SU:	Usuarios Secundario
PDA:	Personal Digital Assistant
PRI:	Sistema Primario
PU:	Usuario Primario
QoS:	Quality of Service
RES:	Reservation
RF:	Radiofrecuencia
RTS:	Request To Send
SEC:	Sistema Secundario
SCH:	Synchronization Channel
SDR:	Software Definido Por Radio
TDD:	Test-driven development
TM:	Terminal móvil
TDMA:	Time Division Multiple Access
UHF:	Ultra High Frequency
UWB:	Ultra Wide Band
VHF:	Very High Frequency

GLOSARIO

ARQ: (*Automatic Repeat-reQuest*), son protocolos utilizados para el control de errores en la transmisión de datos, garantizando la integridad de los mismos. Estos suelen utilizarse en sistemas que no actúan en tiempo real ya que el tiempo que se pierde en el reenvío puede ser considerable y ser más útil emitir mal en el momento que correctamente un tiempo después.

CODIGO ORTOGONAL: son aquellos que en un ambiente ideal no interfieren unos con otros. Para lograr esto los códigos deben estar sincronizados en tiempo.

CSMA/CA: es un protocolo de control de redes de bajo nivel que permite que múltiples estaciones utilicen un mismo medio de transmisión. Cada equipo anuncia opcionalmente su intención de transmitir antes de hacerlo para evitar colisiones entre los paquetes de datos (comúnmente en redes inalámbricas, ya que estas no cuentan con un modo práctico para transmitir y recibir simultáneamente).

DSP: CPU de propósito especial que ejecuta secuencias de instrucciones a muy alta velocidad, usado comúnmente en aplicaciones de procesamiento y representación de señales analógicas en tiempo real.

ESPECTRO: es el gráfico que muestra cómo es la descomposición de una señal ondulatoria (sonora, luminosa, electromagnética,...) en el dominio frecuencial.

FEC: La corrección de errores hacia adelante (en inglés, *Forward Error Correction* o *FEC*) es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original. Se utiliza en sistemas sin retorno o sistemas en tiempo real donde no se puede esperar a la retransmisión para mostrar los datos. Este mecanismo de corrección de errores se utiliza por ejemplo, en las comunicaciones vía satélite, en las grabadoras de DVD y CD o en las emisiones de TDT para terminales móviles

FRECUENCIA: es una magnitud que mide el número de repeticiones por unidad de tiempo de cualquier fenómeno o suceso periódico.

GPP: (Procesador de Propósito General): Circuito electrónico integrado que actúa como una unidad central de procesos (CPU) que interpreta instrucciones y procesa datos para diversos propósitos a una gran velocidad.

HCF (HYBRID COORDINATION FUCTION): una función de coordinación con el objetivo de incorporar garantías QoS y permitir aplicaciones de tiempo real.

HIPERLAN: Es un estándar global para anchos de banda inalámbricos LAN que operan con un rango de datos de 54 Mbps en la frecuencia de banda de 5 GHz. HIPERLAN/2 es una solución estándar para un rango de comunicación corto que permite una alta transferencia de datos y Calidad de Servicio del tráfico entre estaciones base WLAN y terminales de usuarios. La seguridad esta provista por lo último en técnicas de cifrado y protocolos de autenticación.

MODULACION: Conjunto de técnicas que se usan para transportar información sobre una onda portadora, típicamente una onda sinusoidal. Estas técnicas permiten un mejor aprovechamiento del canal de comunicación lo que posibilita transmitir más información en forma simultánea además de mejorar la resistencia contra posibles ruidos e interferencias.

Básicamente, la modulación consiste en hacer que un parámetro de la onda portadora cambie de valor de acuerdo con las variaciones de la señal moduladora, que es la información que queremos transmitir.

OFDM: (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), es una multiplexación que consiste en enviar un conjunto de ondas portadoras de diferentes frecuencias, donde cada una transporta información, la cual es modulada en QAM o en PSK. Normalmente se realiza la multiplexación OFDM tras pasar la señal por un codificador de canal con el objetivo de corregir los errores producidos en la transmisión, entonces esta multiplexación se denomina COFDM, del inglés Coded OFDM.

PDA: (Personal Digital Assistant), Es un computador de mano creado originalmente como una agenda electrónica, el cual combina un ordenador, teléfono móvil, conexiones de red, Internet, entre otras.

PORTADORA: señal analógica que puede utilizarse para la transmisión de información. La información se incorpora a la portadora mediante modulación de frecuencia (FM) o modulación de amplitud (AM). Por lo general, la portadora es mantenida a una frecuencia fija por el transmisor, y es detectada en el receptor por un circuito resonante a la frecuencia de la portadora. El mensaje se envía al cambiar la amplitud de la portadora o su fase proporcionalmente con la señal de transmisión deseada. Si cambia la amplitud, el resultado es la modulación de amplitud. Si cambia la fase, se produce una modulación de fase, una forma de modulación de frecuencia.

RADIOFRECUENCIA: El término radiofrecuencia, también denominado espectro de radiofrecuencia o RF, se aplica a la porción menos energética del espectro electromagnético, situada entre unos 3 kHz y unos 300GHz.

SHARED SPECTRUM COMPANY: tiene un amplio rango de medidas de ocupación del espectro en diferentes ciudades, las cuales se encuentran disponibles en <http://www.sharedspectrum.com/>

TDD: (Test-driven development), es una práctica de programación que involucra otras dos prácticas: *Escribir las pruebas primero (Test First Development)* y *Refactorización (Refactoring)*. Para escribir las pruebas generalmente se utilizan las pruebas unitarias.

TEMPERATURA DE INTERFERENCIA: Todos los objetos cuya temperatura está por encima del cero absoluto (0 grados Kelvin) generan ruido eléctrico en forma aleatoria debido a la vibración de las moléculas dentro del objeto. Este ruido es llamado ruido térmico. La potencia de ruido generada depende solo de la temperatura del objeto, y no de su composición. Ya que esta es una propiedad fundamental, el ruido frecuentemente definido por su *temperatura equivalente de ruido*. La temperatura de ruido puede darse tanto en grados Kelvin como en decibeles.

TDMA: Time Division Multiple Access, es una técnica que permite la transmisión de señales digitales y cuya idea consiste en ocupar un canal (normalmente de gran capacidad) de transmisión a partir de distintas fuentes, de esta manera se logra un mejor aprovechamiento del medio de transmisión. El Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA) es una de las técnicas de TDM más difundidas.

UHF: (Ultra High Frequency), banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 300 MHz a 3 GHz. En esta banda se produce la propagación por onda espacial troposférica, con una atenuación adicional máxima de 1 dB si existe despejamiento de la primera zona de Fresnel.

VHF: (Very High Frequency), banda del espectro electromagnético que ocupa el rango de frecuencias de 30 MHz a 300 MHz.

INTRODUCCION

Considerando el rápido avance y desarrollo de nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas en las bandas con y sin licencia, para diferentes demandas y aplicaciones tales como GPRS, 3G, UMTS, UWB, IEEE 802.11, HSPA, IEEE 802.16, etc., se exigirá una asignación dentro del espectro radioeléctrico con el fin de permitir el ingreso y operación de millones de nuevos dispositivos dentro de los próximos años, los cuales respondan a los desafíos de las nuevas tecnologías y avances en esta área.

De acuerdo a estudios realizados se ha encontrado que las entidades gubernamentales encargadas de la administración del espectro radioeléctrico no han hecho una adecuada asignación de este, ya que, la mayoría de frecuencias de radio se encuentran parcialmente ocupadas o no son ocupadas todo el tiempo, y las restantes bandas estarían totalmente en uso (dependiendo de las variantes geográficas y temporales), se puede afirmar que el espectro radioeléctrico como recurso natural limitado se estaría utilizando de una manera ineficiente; en otras palabras, se concluye que una gran parte del espectro se utiliza de forma casual y hasta esporádica, lo que conduce a una infrautilización de una importante cantidad del mismo; y a su vez, dada la continua demanda de espectro para servicios y aplicaciones móviles en frecuencias principalmente de radio por sus características de propagación, es necesario un nuevo esquema adicional de comunicaciones para explotar los espacios no utilizados del espectro radioeléctrico, lo cual puede ser resuelto mediante un acceso dinámico que permita acceder de una manera “oportunista” a bandas de frecuencias autorizadas o concesionadas a determinados usuarios (usuarios primarios), las cuales no están siendo utilizadas a ciertos instantes de tiempo.

Una de las claves para un acceso dinámico al espectro es la Radio Cognitiva, la cual ha surgido como una tecnología que promete una utilización más eficiente del espectro electromagnético y del ancho de banda disponible para frecuencias de radio en ambientes donde existen varios sistemas y transmisiones de comunicaciones inalámbricas, ofreciendo una nueva forma de resolver los problemas de la infrautilización del espectro.

Esto lo realiza mediante el conocimiento del entorno de radio en el que trabaja mediante el senso o detección del espectro con el fin de cumplir básicamente dos objetivos: identificar aquellas subbandas del espectro radioeléctrico que son subutilizadas por los usuarios legítimos o autorizados mediante concesión, y proporcionar los medios o recursos para poner a disposición aquellas subbandas a usuarios secundarios o no autorizados para su utilización de una manera temporal, de tal forma que no existan interferencias de señal de ningún tipo entre ambos. Para lograr aquellas metas de una manera autónoma, las redes Ad-hoc

con Radio Cognitivo deben ser autoorganizadas y estar previstas para proporcionar el ancho de banda necesario a usuarios móviles para diversos fines o aplicaciones, teniendo dentro de éstas, una interesante aplicación dentro del ámbito de las radiocomunicaciones para diferentes situaciones que se presenten.

El presente trabajo tiene como propósito definir la estructura básica de un sistema Radio cognitivo, detallar las tecnologías de competencia para crear una red ad-hoc y a su vez definir las limitantes, ventajas y desventajas que presenta esta tecnología.

1. MARCO TEORICO

En primer lugar, se va a hacer una revisión general acerca de la historia y de los factores que permitieron el surgimiento y potenciaron la necesidad de Radio cognitivo, para tener una idea clara de esta tecnología. A continuación, se va a definir algunos conceptos y aspectos básicos en torno a *CR* y *redes Ad-hoc* que son necesarios para entender su funcionamiento y capacidades dentro de las comunicaciones inalámbricas.

El continuo avance de las redes y el número de sistemas wireless ha crecido de forma exponencial durante las dos últimas décadas haciendo que el espectro sea limitado. En la actualidad la mayoría del espectro está asignado y sólo quedan algunas pequeñas porciones libres para productos y servicios wireless según la NTIA (National Telecommunications and Information Administration) [1]. Sin embargo, estudios recientes llevados a cabo por la FCC (Federal Communications Commission) [2] han demostrado que gran parte del espectro licenciado asignado está infrutilizado. Desde esta perspectiva, que muestra la ineficiencia de las actuales políticas de asignación de espectro, diferentes organismos empezaron a considerar la necesidad de introducir reformas, no sólo para mejorar su utilización sino también para intentar proveer nuevo espectro disponible para nuevas aplicaciones. En el 2003, la FCC emitió una NPRM (Notice of Proposed Rulemaking) [3], donde apremia por el replanteamiento de las actuales arquitecturas de redes inalámbricas. El principio básico para el diseño de estas nuevas redes propuesto por la FCC es Radio Cognitiva (Radio cognitivo , CR). Según la FCC [4], un dispositivo de CR es un sistema de radiofrecuencia capaz de variar sus parámetros de transmisión basándose en su interacción con el entorno en el que opera, este es un modelo oportunista que gestiona los recursos radio, llamado Radio cognitivo.

1.1 HISTORIA, DEFINICIÓN Y ASPECTOS BÁSICOS DE RADIO COGNITIVO [2], [5], [7], [8], [9], [12], [14]

A finales de los años noventa, casi todos los dispositivos de radiocomunicaciones en el mundo se habían construido utilizando un procesador digital de señal (Digital Signal Processor, DSP), para implementar funciones de procesamiento de señal y de modulación, y un procesador de propósito general (General Purpose Processor, GPP) para implementar la interfaz de operador, señalización de la red de comunicaciones y funciones generales del sistema. Este tipo de arquitectura permitió que la misma electrónica que la conlleva, pueda ir más allá y ser utilizada para crear nuevas y/o adicionales funcionalidades para aplicaciones específicas. A partir de entonces, en los años posteriores algunos fabricantes empezaron a adicionar sobre la capa de aplicación de los equipos nuevas funcionalidades,

como por ejemplo información del clima, del tiempo, ubicación geográfica, aplicaciones de entretenimiento (música, juegos), entre otros; pero manteniendo la capacidad principal de comunicación inalterada. Con hardware y software adicionales, y ya en el transcurso de estos años, se están fabricando dispositivos de radio con funcionalidades disponibles para diversas clases de adaptabilidad como manejo del espectro radioeléctrico y adaptación de los parámetros de operación.

Desde ese momento, empiezan a aparecer radios cuyas características y propiedades como la frecuencia de operación, modulación, ancho de banda de la señal y acceso a la red son definidas por software, a los cuales se les conoce como Radios definidos por Software (Software Defined Radios, SDRs). Mediante SDR se puede proveer funcionalidades de radio muy flexibles evitando el uso de componentes y circuitos analógicos fijos, y además, permite el soporte de las tres mayores aplicaciones que aumentan las capacidades de SDR: optimización y gestión del espectro, interfaz con redes inalámbricas (que lleva a la gestión y optimización de los recursos de red), e interfaz con el usuario; y así iniciar la generación de las denominadas Radio Cognitivas.

El Radio definido por Software (SDR) es la base para el desarrollo de las Radios cognitivas, y será tratado posteriormente con más detalle. En la *figura 1.1* se muestra la sinergia entre varias tecnologías que convergen para permitir el desarrollo de SDR, y a su vez, ésta se convierte en la plataforma para CR.

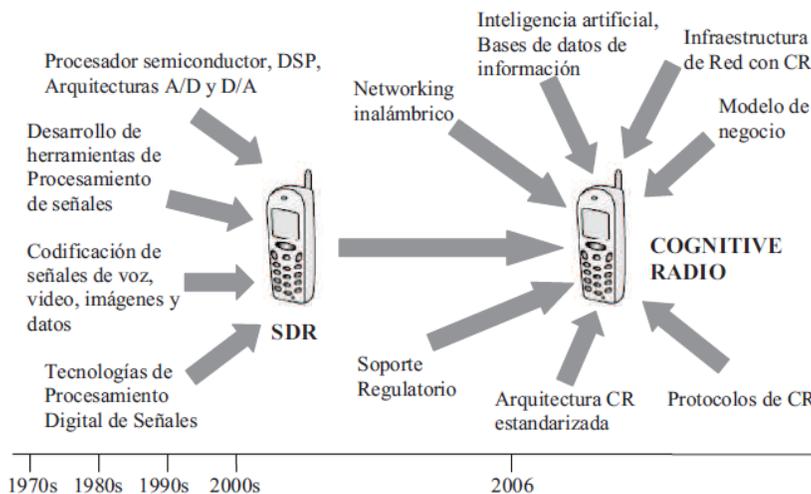


Figura 1.1. Convergencia a Radio cognitivo. Fuente: análisis de factibilidad para la utilización de Cognitive radio (radio cognoscitiva) en las radiocomunicaciones necesarias para casos de emergencia en el Ecuador. Autor David Antonio Segura Briones.

Comentario [E1]: OJO con la numeración. Indagar

El término Radio Cognitivo fue presentado oficialmente por primera vez por Joseph Mitola III y Gerald Q. Maguire en su artículo "COGNITIVE RADIO: MAKING SOFTWARE RADIOS MORE PERSONAL" [5] publicado en Agosto de 1999, en el cual se describe Radio Cognitivo como una radio que conoce el contexto en el cual se encuentra operando, y como resultado de aquello, puede adaptar su proceso de funcionamiento como una extensión natural de SDR. En su disertación, Mitola publicó que los denominados CR identifican el punto en que los Ayudantes Personales Digitales (Personal Digital Assitants, PDAs) inalámbricos y las redes conexas a ellas son lo suficientemente inteligentes (de una manera computacional) sobre los recursos de radio relacionados con las comunicaciones entre equipos para detectar las necesidades de comunicación del usuario en función del contexto de uso, y proveer los recurso de radio (frecuencia) y los servicios inalámbricos más apropiados para esas necesidades.

Por otra parte, algunos de los organismos reguladores del sector de las telecomunicaciones de varios países, entre ellos, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) en los Estados Unidos y la OFCOM en el Reino Unido, descubrieron que la mayor parte del espectro de frecuencias de radio es utilizado de manera ineficiente. Por ejemplo, por un lado evidenciaron que las bandas de la red celular están sobrecargadas, pero que la mayoría de frecuencias y aplicaciones de radio no lo están, concluyendo que la utilización de dicha porción del espectro depende fuertemente del tiempo y del lugar. Posteriormente, estos organismos se encuentran realizando estudios para determinar la factibilidad y capacidades de un acceso dinámico al espectro radioeléctrico.

Experimentos realizados por la empresa Shared Spectrum Company, indican que un 62% del espectro no utilizado o "espacio en blanco", se encuentra por debajo de la banda de 3 GHz, incluso sobre las zonas más concurridas y cercanas de ciudades como Washington DC, USA, en donde la utilización gubernamental y comercial del espectro es intensiva[14]. En dichas mediciones, una banda se consideró como un "espacio en blanco" si se encontraba a un nivel superior del 1 MHz y permanecía desocupada durante 10 minutos o más, encontrándose que el uso del espectro varió dramáticamente en el tiempo, ubicación geográfica y frecuencia.

En la Figura 1.2 se muestra un conjunto de medidas de ocupación del espectro realizadas por la Shared Spectrum Company, sobre un rango particular de frecuencias en una determinada ubicación en el centro de la ciudad de Dublín, Irlanda, en abril de 2007.

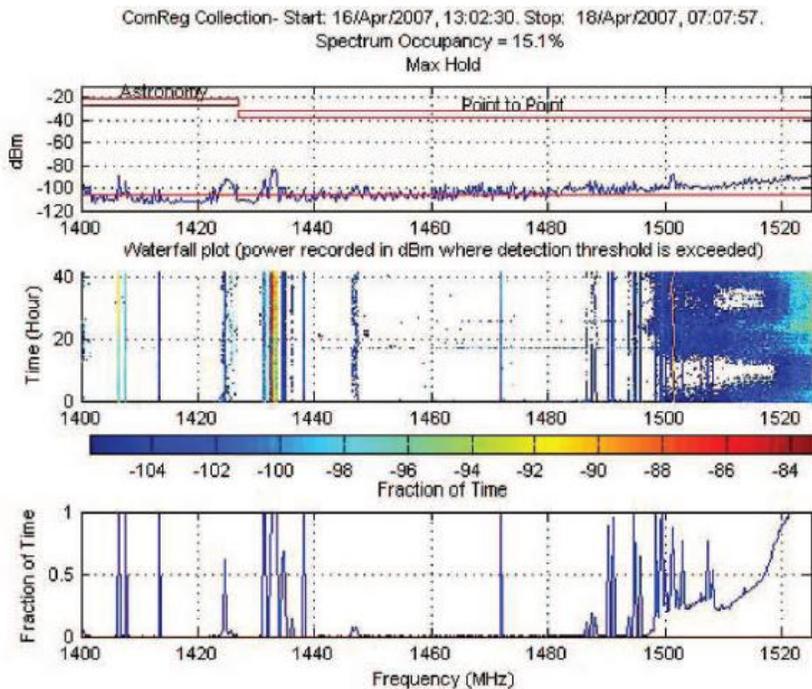


Figura 1.2. Medidas de ocupación del espectro efectuados por la Shared Spectrum Company, en Dublín, Irlanda. Abril 2007.
<http://www.sharespectrum.com/>

Se puede observar la naturaleza temporal de las transmisiones, especialmente en el rango de 1500 a 1520 MHz, que evidencia la existencia de algunas frecuencias que no son ocupadas, calculando que el nivel de ocupación del espectro es de tan sólo del 15.1%, reflejando el real de uso del recurso radioeléctrico [15]. El punto clave que debe hacerse es que, a pesar de que todas las frecuencias en la banda mostrada han sido asignadas a determinados servicios, no están totalmente ocupadas. La gran proporción de “espacio en blanco” en este tipo de mediciones indica que un uso oportunista o dinámico del espectro puede mitigar de manera significativa la escasez de este recurso para abastecer o incrementar nuevas aplicaciones en comunicaciones inalámbricas. Éstas y otras fueron las razones para concebir un nuevo paradigma de comunicaciones que permita que usuarios sin licencia puedan utilizar las bandas licenciadas de otros usuarios siempre que no implique ninguna interferencia (permitiendo la desocupación de la frecuencia cuando los usuarios legítimos sean percibidos). Este paradigma para las comunicaciones inalámbricas puede ser resuelto con Radio Cognitivo.

Comentario [E2]: Esta referencia inicia o termina?

Trabajos realizados por la FCC, en conjunto con la Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa (DARPA) del Departamento de Defensa de Estados Unidos, desarrollaron varios programas para demostrar las posibilidades y la importancia de una radio reconfigurable por software (SDR). Posteriormente la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), grupo de estudio de la IEEE y agencias de la Unión Europea han puesto en marcha varios estudios importantes en los aspectos técnicos y económicos de la capacidad cognitiva.

1.1.1 USUARIOS PRIMARIOS Y SECUNDARIOS

Anteriormente se mencionó que la facultad principal de esta tecnología es ocupar las subbandas de frecuencias del espectro radioeléctrico que son infrautilizadas por parte de los denominados usuarios primarios mediante un acceso dinámico al espectro (Spectrum Dynamic Access, SDA), es decir, que no son ocupadas y se encuentran libres durante ciertos instantes de tiempo.

El objetivo principal de este procedimiento corresponde a que los usuarios no licenciados o secundarios obtengan una disponibilidad efectiva de estas bandas o subbandas de frecuencias evitando interferencias con los usuarios primarios. Es por ello que se debe tener en claro el concepto y rol de los denominados usuarios primarios y secundarios [12].

En la gran mayoría de países, para el caso de los sistemas de radiocomunicaciones, se puede afirmar que los usuarios primarios son los que obtienen un título habilitante y operan legalmente en una o varias frecuencias mediante la concesión de uso del espectro radioeléctrico. En otras palabras, los usuarios primarios son los que solicitan, obtienen, utilizan y pagan por el recurso radioeléctrico.

Por otro lado, el término de usuario secundario es referido a los usuarios que ocupan o van a ocupar las frecuencias que los usuarios primarios no están utilizando en un determinado instante y duración de tiempo, lo cual va a variar según la localización geográfica y aplicación de sistema de radiocomunicaciones principalmente. Se puede afirmar entonces que los usuarios de Radio Cognitivo van a ser secundarios, ya que van a ocupar los denominados “agujeros en el espectro”, o las frecuencias desocupadas o infrautilizadas por los primarios. De esta manera se aprovecha de forma más eficiente al espectro radioeléctrico para favorecer el establecimiento de nuevos sistemas y redes en diversas aplicaciones.

Un aspecto importante consiste en que al momento que un usuario primario requiera utilizar la banda de frecuencias que tiene autorizada pero que está siendo ocupada por un usuario secundario, lo podrá hacer ya que la CR se encuentra sensando el espectro y será capaz de determinar esta situación y buscar otras frecuencias libres para operar. Se debe garantizar que los usuarios secundarios

no interfirieran con las señales y/o comunicaciones de los primarios, en virtud de que estos tienen licenciadas o autorizadas dichas frecuencias, por lo que tienen el privilegio para la utilización de las mismas en cualquier momento.

1.1.2 DEFINICION DE RADIO COGNITIVO

Un Radio cognitivo es un terminal que utiliza tecnologías avanzadas de procesamiento de señal y políticas de localización de espectro para dar soporte a nuevos usuarios wireless en un espectro que actualmente se encuentra saturado, esto sin degradar las prestaciones de los usuarios ya establecidos. Este debe recoger y procesar información sobre los usuarios dentro del espectro, lo cual requiere una avanzada capacidad de detección de actividad y procesamiento de señal.

La tecnología Radio cognitivo es aquella que permite usar el espectro de manera dinámica a partir de la utilización de técnicas que proporcionan la capacidad de usar y compartir los recursos espectrales disponibles. La definición formal se expresa de la siguiente manera:

Radio cognitivo es un terminal que cambia sus parámetros de transmisión utilizando de manera inteligente la información extraída del entorno de radio sobre la actividad, condiciones del canal, códigos o mensajes de otros nodos con los cuales comparte espectro.

Los Radio cognitivos son usuarios secundarios, sin licencia, que utilizan de manera oportunista los recursos radio que no están siendo aprovechados por los usuarios primarios, con licencia, del espectro. Así que se acaba definiendo un modelo jerárquico según el cual los Radio cognitivos son usuarios con una prioridad inferior para la utilización de los recursos radio, respecto a los usuarios no cognitivo. [5]

1.1.3 CARACTERÍSTICAS

Las dos características principales de los dispositivos Radio cognitivo son:

- i. Capacidad Cognitiva
- ii. Reconfigurabilidad

En las siguientes secciones se explica cada una de estas características de manera detallada.

1.1.3.1 CAPACIDAD COGNITIVA

La capacidad cognitiva hace referencia a la habilidad de la tecnología radio de capturar y procesar la información del entorno radio. Para poder obtener la información del entorno radio no es suficiente monitorizar las bandas de frecuencia de interés, además se necesitan técnicas sofisticadas para capturar las variaciones espaciales y temporales del entorno radio. A partir de la información obtenida, el objetivo del Radio cognitivo es operar en determinadas bandas de frecuencia evitando causar interferencia a los usuarios principales de dichas frecuencias.

Con esta capacidad se pueden identificar las porciones de espectro que no están siendo utilizadas en un determinado instante y posición. Como resultado, el Radio cognitivo selecciona la mejor banda de frecuencia y los mejores parámetros de comunicación para optimizar su condiciones de comunicación, bajo la condición de no causar interferencia a los usuarios principales.

Además, esta capacidad permite la interacción con el entorno en tiempo real con tal de determinar los parámetros más apropiados para la comunicación y así adaptarse al entorno. El conjunto de operaciones para la adaptabilidad se denomina ciclo cognitivo y consta de 3 pasos:

- i. **Spectrum sensing:** Un Radio cognitivo monitoriza las bandas de frecuencia disponibles, captura la información y extrae la localización de los huecos espectrales.
- ii. **Spectrum management:** Esta operación corresponde a la funcionalidad de los Radio cognitivo de gestionar de manera adecuada el espectro radio, para obtener un uso más inteligente. En esta operación están incluidas las siguientes:
 - **Spectrum analysis:** Se estiman las características de los huecos espectrales detectados por el spectrum sensing.
 - **Spectrum decision:** El Radio cognitivo determina la tasa de datos, el modo de transmisión y el ancho de banda. Se selecciona la banda de frecuencia más apropiada de acuerdo con las características espectrales y los requisitos de Radio cognitivo.
- iii. **Spectrum handoff:** En esta operación el Radio cognitivo debe abandonar el canal cuando un PU es detectado, con el objetivo de no interferir con su comunicación.

Una vez que el Radio cognitivo ha determinado la banda de espectro más apropiada para la transmisión, la comunicación se efectúa en el canal de frecuencia seleccionado. Si durante el uso del slot seleccionado éste queda

inservible debido a la activación de un usuario principal, deberá llevarse a cabo la operación spectrum handoff.

1.1.3.2 RECONFIGURABILIDAD

La característica de reconfigurabilidad permite que un Radio cognitivo pueda modificar sus parámetros de transmisión sin realizar modificaciones en el hardware del dispositivo [9]. El resultado que se obtiene con esta característica es que un Radio cognitivo puede estar programado para transmitir y recibir en diferentes frecuencias y utilizar distintas tecnologías de acceso y transmisión dependiendo de las condiciones del entorno radio. Es decir, esta característica permite que los Radio cognitivo se adapten al escenario.

Los parámetros reconfigurables de un Radio cognitivo son:

- i. **Frecuencia de trabajo:** A partir de la información obtenida del entorno radio se determina cual es la frecuencia de trabajo más conveniente.
- ii. **Modulación:** Un Radio cognitivo es capaz de reconfigurar el esquema de modulación adaptándose a las condiciones del canal y los requisitos del usuario.
- iii. **Potencia de transmisión:** La potencia a la que transmite el dispositivo puede ser variada.
- iv. **Tecnología de comunicación:** Un Radio cognitivo puede ser usado para dar interoperabilidad entre distintos sistemas de comunicaciones y tecnologías de acceso radio.

Los parámetros de transmisión de un Radio cognitivo pueden ser configurados tanto al principio de la transmisión como durante la comunicación si, por ejemplo, se tiene que realizar un spectrum handoff [9].

1.1.4 EVOLUCIÓN

La introducción de la idea de Radio cognitivo fue presentada oficialmente por primera vez en el artículo de Joseph Mitola III y Gerald Q. Maguire Jr. en 1999 [5].

La presentación del paradigma del Radio cognitivo provocó tanto entusiasmo en la Federal Communications Comision (FCC), que ésta creó una política de recomendaciones para dar soporte a las innovaciones del Radio cognitivo. A partir del interés inicial surgieron varias ideas que se desarrollaron en diferentes direcciones, lo que ha llevado a la variedad de visiones que se encuentran disponibles hoy en día en la literatura. Sin embargo, detrás de las diversas

interpretaciones de Radio cognitivo, todas tienen un objetivo final común: es evitar interferir a los usuarios principales del espectro.

Una barrera que frena la evolución de las redes Radio cognitivo es la actitud frente al uso oportunista del espectro. Desafortunadamente, hasta principios de los años 90 los cuerpos de regulación del espectro no mostraron su interés por el uso oportunista del espectro. Hasta hace poco tiempo, los cuerpos regulatorios como el FCC en Estados Unidos o el European Telecommunication Standards Institute (ETSI) en Europa, siempre han asignado bloques frecuenciales para usos específicos, licenciando estos bloques para tecnologías específicas, grupos o compañías.

El hecho de dividir y asignar rangos de frecuencia provoca:

- i. División del espectro en distintas bandas**, cada una definida en un rango de frecuencias.
- ii. Asignación de bandas acotadas para usos específicos según el tipo de comunicaciones.**
- iii. Asignación de licencia a cada banda**, generalmente, otorgando un uso exclusivo a la banda frecuencial.

La ventaja principal del acceso con licencia es que se puede controlar completamente el espectro asignado y gestionar, entre otras cosas, la interferencia creada entre los usuarios activos. El control total sobre una banda de frecuencias con licencia permite ofrecer Calidad de Servicio (QoS).

A parte de las bandas con licencia, también existen bandas frecuenciales libres, como la banda ISM 2.4 GHz, que pueden ser utilizadas siguiendo unas normas. El objetivo de estas bandas sin licencia es fomentar la innovación de nuevos sistemas wireless sin el alto coste que significaría obtener una licencia. Sin embargo, debido al aumento de diferentes tecnologías wireless que hacen uso de estas bandas, en la actualidad hay un gran número de dispositivos que hacen uso de ellas, de manera que se causan mucha interferencia entre ellos.

Por ejemplo, la banda ISM 2.4 GHz se encuentra actualmente compartida por diferentes aplicaciones como:

- La tecnología WLAN (Wireless Local Area Network).
- Las redes mesh.
- Las redes ad-hoc.
- La tecnología Bluetooth.
- Las radiaciones de los hornos de microondas, etc.

Por esta razón, las prestaciones de las diferentes aplicaciones operativas en las bandas sin licencia se están viendo perjudicadas por la sobrecarga existente en dichas bandas. Se ha demostrado, por ejemplo, que las prestaciones de las WLAN están empeorando debido a la coexistencia con otras tecnologías [13]. En consecuencia a estas consideraciones, la comunidad científica se está concentrando en extender el paradigma del Radio cognitivo a diferentes tecnologías, En este proyecto nos centraremos en Redes Ad-hoc cognitivas.

1.1.5 PARADIGMAS

Dependiendo de la información que explotan los SU para operar en bandas con licencia, los sistemas *Radio cognitivo* se pueden clasificar en tres tipos: *underlay*, *overlay* y *interweave*. Los tres paradigmas tienen el objetivo común de utilizar de forma oportunista los recursos radio disponibles sin interferir las comunicaciones de los PU.

El paradigma *underlay* permite a los SU operar si la interferencia que crean sobre los PU está por debajo de un nivel predeterminado. En los sistemas *overlay*, los dispositivos SU utilizan sofisticados sistemas de procesado de señal, codificación y cooperación para mantener o mejorar la comunicación de los dispositivos PU y además conseguir ancho de banda adicional para sus comunicaciones. En los sistemas *interweave*, los SU aprovechan de manera oportunista los huecos espectrales para sus transmisiones sin interferir en las ya existentes.

1.1.5.1 UNDERLAY

El paradigma *underlay* engloba técnicas que permiten la comunicación de los SU asumiendo el conocimiento del nivel de interferencia causado por el transmisor SU a los receptores PU. Específicamente, en el paradigma *underlay* sólo pueden tener lugar transmisiones simultáneas PU y SU si la interferencia creada por los SU sobre los PU no sobrepasa un límite.

En 2002, el FCC propuso la *Temperatura de interferencia* [13] como un indicador de la interferencia causada por los transmisores SU a los receptores PU. Para hacer una estimación de esta temperatura de interferencias, la interferencia creada por un transmisor SU sobre un receptor PU se puede aproximar por reciprocidad. Es decir, la interferencia creada por los SU sobre los PU es aproximadamente igual a la creada por los PU sobre los SU.

Temas abiertos de investigación son el estudio de cómo esta temperatura de interferencia puede ser evaluada por el transmisor primario y si la indicación que proporciona es suficiente para garantizar la protección del PU frente a la interferencia causada por el SU.

1.1.5.2 OVERLAY

La condición para permitir sistemas *overlay* es que los transmisores SU tengan conocimiento de los códigos o del mensaje de los PU. La información de los códigos se puede obtener, por ejemplo, si los PU siguen un estándar uniforme de comunicación basado en publicar los códigos. Otra alternativa es que los PU envíen los códigos a los usuarios de la misma banda de forma periódica.

En cuanto al mensaje, para aplicar el paradigma *overlay*, se requiere que el SU tenga conocimiento del mensaje del PU antes de su transmisión. Esta hipótesis puede tener sentido en un escenario multi-salto donde los SU ofrecen cooperación a los PU a través de la retransmisión de sus mensajes a cambio de poder utilizar sus bandas de frecuencia.

El conocimiento de los mensajes y códigos utilizados por los PU puede ser explotado de diferentes formas con la finalidad de mitigar o reducir la interferencia de los SU sobre los PU. Por una parte, esta información puede ser utilizada para cancelar totalmente la interferencia. Si el SU conoce el código utilizado por el PU para transmitir, el SU puede utilizar un código ortogonal al del PU cancelando así la interferencia entre ambas comunicaciones. Por otra parte, los SU pueden utilizar el conocimiento de los mensajes para dedicar parte de los recursos radio que están utilizando para retransmitir la señal de los PU. La parte restante se dedicaría a las transmisiones propias de los SU [7].

Hay que tener en cuenta que el paradigma *overlay* puede ser aplicado tanto en bandas con o sin licencia. En las bandas licenciadas, los SU deben compartir la banda con los PU sin interferir en sus comunicaciones. En las bandas sin licencia, los SU aumentan la eficiencia espectral y explotan el conocimiento de los mensajes y códigos con tal de reducir la interferencia.

1.1.5.3 INTERWEAVE

El paradigma *interweave* se basa en la idea de la comunicación oportunista y fue la motivación original del *Radio cognitivo*. La idea surgió al observar medidas espectrales realizadas por la FCC y las industrias que mostraron que, en determinados instantes y en determinadas posiciones, porciones de espectro no están adecuadamente aprovechadas. En otras palabras, existen huecos temporales, a los que nos referiremos como huecos espectrales, que no están en uso constantemente por los PU tanto en bandas con o sin licencia.

Estos huecos cambian con el tiempo y la posición geográfica y pueden ser explotados por SU para sus comunicaciones. La utilización del espectro mejora con la utilización oportunista de estos huecos por parte de los SU. La técnica *interweave* requiere el conocimiento de la información de la actividad en el espectro de los PU. Algo a considerar es que si en una banda frecuencial donde

todos los usuarios son PU y entran nuevos usuarios, que son SU, éstos no deben interferir en las comunicaciones de los PU activos.

En resumen, el paradigma *interweave* es un sistema de comunicación *wireless* que monitoriza periódicamente el espectro radio y que de manera inteligente detecta la ocupación de las diferentes bandas de frecuencia y que de manera oportunista utiliza los huecos espectrales para transmitir creando la mínima interferencia sobre los usuarios ya existentes.

1.2 AD HOC

También conocidas como MANET “Mobile ad hoc networks”. AD HOC viene del latín y se refiere a algo improvisado, mientras que en comunicaciones el propósito de ad hoc es proporcionar flexibilidad y autonomía aprovechando los principios de auto-organización. Una red móvil ad hoc es una red formada sin ninguna administración central o no hay un nodo central, sino que consta de nodos móviles que usan una interface inalámbrica para enviar paquetes de datos.

Una red “Ad hoc”, consiste en un grupo de ordenadores que se comunican cada uno directamente con los otros a través de las señales de radio si usar un punto de acceso. Las configuraciones “Ad hoc”, son comunicaciones de tipo punto a punto. Solamente los ordenadores dentro de un rango de transmisión definido pueden comunicarse entre ellos. La tecnología es utilizada en varios campos como en el ejército, celulares y juegos de videos. En fin, en la tecnología “Ad hoc”, cada terminal de comunicación se comunica con sus compañeros para hacer una red “peer to peer”[10].

1.2.1 APLICACIONES TÍPICAS

Aplicaciones Militares, donde una configuración de red descentralizada es una ventaja operativa o incluso una necesidad.

En el sector comercial, los equipos para informática inalámbrica móvil no han estado disponibles a un precio atractivo para los grandes mercados.

1.2.2 FUNCIONES DE MOVILIDAD

En una red ad hoc, pueden moverse los nodos del centro de la red o más bien, la totalidad de la red está basada en las idea del dispositivo que sirven al mismo tiempo tanto de encaminadores como de anfitriones. En una red ad hoc, la movilidad es gestionada directamente por el algoritmo de encaminamiento.

2 ARQUITECTURA DE UN SISTEMA RADIO COGNITIVO

Comentario [E3]: Cuando se inicia un nuevo capítulo el margen superior

En este capítulo explicaremos la arquitectura del sistema, los pasos que deben realizar los usuarios secundarios para poder utilizar los huecos espectrales y el protocolo que controla el acceso a los recursos radio de forma oportunista.

Los Usuarios Secundarios con tal de escoger el canal más apropiado, frecuencia y slot, donde realizar la transmisión, siguen cinco pasos que se detallan a continuación:

1. *Spectrum sensing*: el SU monitoriza continuamente el espectro para identificar los canales disponibles, sus características y detectar la presencia de PU.
2. *Spectrum decision*: en función de las características del espectro se escogen los recursos radio, canal de frecuencia y time slot, más apropiados.
3. *Spectrum sharing*: controla el acceso al medio de los SU. Hemos tomado como base el protocolo MAC (*Medium Access Control*) [14], el cual describiremos en la sección 2.2.
4. *Transmisión de datos*: Los paquetes de datos enviados por los SU suelen tener más bits de los permitidos en un slot, por lo que deben ser fragmentados y enviados en varios slots, que no necesariamente serán consecutivos.
5. *Spectrum handoff*: el SU debe abandonar los recursos radio que está utilizando cuando un PU es detectado en el mismo canal [18].

2.1 ESTABLECIMIENTO DE UNA CONEXIÓN

2.1.1 Spectrum Sensing

Como se dijo anteriormente, los SU deben monitorizar continuamente el espectro para identificar los canales disponibles, sus características y detectar la presencia de los PU, ya que cuando un SU está utilizando un hueco espectral un PU puede iniciar la transmisión en el mismo canal.

La operación de spectrum sensing se activa en los SU al comienzo de una sesión con el objetivo de determinar y caracterizar los recursos radio disponibles en los diferentes canales de frecuencia disponibles. Primero, el SU debe adquirir el conocimiento de la estructura de comunicaciones de los PU y sincronizarse para determinar los límites de los slots. Esto se realiza a través de los canales de señalización, es decir, a través del canal de corrección de frecuencia FCCH

(Frequency Correction Channel). Por otro lado, escaneando los canales de control BCCH (Broadcast Control Channel) y SCH (Synchronization Channel), los SU obtienen la información sobre las frecuencias de trabajo que utiliza la estación base GERAN. Una vez determinadas las frecuencias y la sincronización de los slots, los SU tienen que llevar a cabo el proceso de spectrum sensing durante una trama con tal de detectar y caracterizar los recursos radio disponibles en la celda. Para detectar la presencia de un PU, es suficiente que en la operación de sensing se detecte

Si existe una señal de comunicación al inicio de cada slot de cada canal de frecuencia. Durante un corto periodo de tiempo μ , al principio de cada slot, el módulo sensing detecta si se está realizando una transmisión de un PU. Este valor de μ asumimos que es menor de $15\mu\text{s}$, como se especifica en IEEE utilizando ese slot. De esta manera, si el slot no utilizado por un PU está siendo utilizado por un SU, no habrá colisión con tráfico PU.

2.1.2 Spectrum Decision

Una vez que los SU han “sentido” correctamente los canales de frecuencia disponibles de la estación base, los SU conocen cuales son los recursos radio disponibles de esos canales de frecuencia, es decir, saben que slots no están siendo utilizados por los PU. Los slots libres son analizados y los más apropiados son seleccionados con el fin de optimizar el uso espectral de los recursos radio.

2.1.3 Spectrum Handoff

El *spectrum handoff* es el proceso que ocurre cuando un SU cambia de canal. Esto suele ocurrir cuando las condiciones del canal empeoran o cuando un PU se activa en el canal donde estaba transmitiendo el SU. En este segundo caso, con tal de no crear interferencia al PU, el SU debe abandonar rápidamente el canal y la operación de *sensing* se vuelve a realizar con tal de encontrar un nuevo hueco espectral y volver a tomar una decisión (*spectrum decision*).

Como resultado, en cada trama el SU debe activar el *spectrum sensing* para controlar que los slots utilizados por los SU aún continúan inutilizados por los PU. Esto se realiza durante un tiempo μ al inicio de cada slot seleccionado. Hay que tener en cuenta que la operación de *spectrum handoff* degrada la comunicación de los SU, por lo que el esquema de decisión más eficiente será aquel que reduzca el porcentaje de *spectrum handoff* producidos en el escenario.

Para ver de forma más clara este proceso, podemos observar el diagrama de flujo que representa el proceso que lleva a cabo un usuario secundario desde el inicio de una sesión.

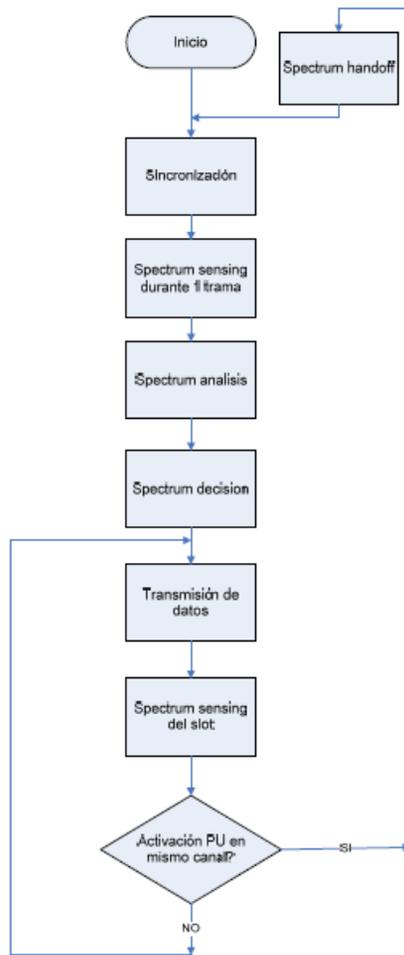


Figura 2.1. Diagrama de Flujo para establecer una conexión. Fuente: Spectrum Management in Cognitive radio Networks AUTOR: Lara Marín Vinuesa. 9 de Mayo de 2008, pág. 15.

2.2 PROTOCOLO MAC

Una vez obtenida la información sobre los recursos radio disponibles, el protocolo MAC propuesto en [14] permite la comunicación entre dos SU, respectivamente el SU emisor y el SU receptor. Básicamente, a través de este protocolo los dos SU

llegan a un acuerdo sobre el canal que van a utilizar para su comunicación. Para llegar a este acuerdo, inicialmente, hay que realizar un *handshake* en el que toman parte 3 mensajes de control, transmitidos en el siguiente orden:

- i. ***Request to Send (RTS)***
- ii. ***Clear to Send (CTS)***
- iii. ***Reservation (RES)***

El SU emisor (SU1) envía en un slot libre un mensaje RTS. El mensaje RTS contiene un resumen con los canales que prefiere y el número de slots que necesita para enviar el paquete de datos, que como hemos mencionado anteriormente, suele ser mayor que el número de bits permitido en un sólo slot y debe ser dividido en varios fragmentos. El número de slots libres necesarios para la transmisión completa del paquete se especifica en la variable NAV (Network Allocation Vector).

Por su parte, el SU receptor (SU2) cuando recibe el RTS envía el mensaje CTS. En el mensaje CTS se incluyen los identificadores (ID) del emisor y receptor, NAV y el canal de comunicación. El canal seleccionado para la comunicación depende del esquema de selección utilizado. Si el SU1 no recibe el CTS, vuelve a retransmitir el RTS. La retransmisión tiene un número limitado de intentos. El canal elegido es aquel que hayan “sentido” libre o que sepan que va a quedar libre debido a que otro SU les haya enviado el mensaje de CTS o RES.

Un mensaje RES contiene las ID del emisor y receptor, NAV y el canal elegido. Cabe resaltar, que el emisor no reserva un canal durante un periodo determinado de tiempo ya que el SU no conoce el uso que los PU harán de ese slot y por lo tanto, no puede definir la duración de la transmisión.

Cuando se completa el *handshake* con éxito, es decir, SU1 y SU2 han llegado a un acuerdo sobre el canal que van a utilizar para su comunicación, el SU1 comienza la transmisión de los fragmentos. Una vez se ha completado la transmisión de los fragmentos, el SU1 espera recibir un ACK enviado por SU2.

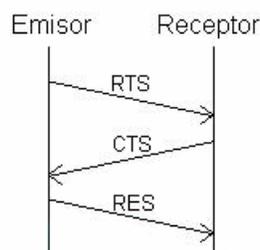


Figura 2.2. Esquema de intercambio de mensajes. Fuente: Spectrum Management in Cognitive radio Networks AUTOR: Lara Marín Vinuesa. 9 de Mayo de 2008, pág. 16.

En la cabecera de cada fragmento existe el campo *AckCount*, el cual se va decrementando en cada fragmento enviado e indica el número de fragmentos que faltan por enviar. De esta manera, SU2, el receptor de los fragmentos, sabe cuándo termina la transmisión y por lo tanto, cuando debe enviar el ACK. La inserción del campo *AckCount* en la cabecera de todos los fragmentos proporciona robustez al sistema frente a la pérdida de fragmentos.

El mensaje ACK contiene una lista con el ID de los fragmentos recibidos, con lo que SU1 sólo debe retransmitir los fragmentos perdidos. La retransmisión parcial de los fragmentos perdidos reduce la carga de la red en comparación con la retransmisión completa de todos los fragmentos. En este caso, igual que con el mensaje RTS, también existe un límite de retransmisiones de un fragmento. Si se supera el límite y el SU2 no recibe todos los fragmentos que forman el paquete, éste se desecha. Lo mismo ocurre en el caso de que no se pueda llevar a cabo la transmisión completa de todos los fragmentos debido a la activación de un PU en el canal. En este caso, los dos SU tendrían que empezar el proceso de nuevo.

2.3 SOFTWARE RADIO

La arquitectura del sistema de radio cognitiva es una plataforma independiente, definida por un paquete de algoritmos mediante software, llamado motor cognitivo, con una interfaz general de radio. Dentro del motor cognitivo los módulos funcionales son diferentes y están definidos para tener en cuenta las capacidades cognitivas como conciencia, razonamiento, creación de soluciones óptimas y control adaptable del radio.



Figura 2.3. Modelo de un sistema de Radio Cognitivo. Fuente: http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/item/5283/1/Revista%20S%26T%20Vol%209%20N%2016%20-%20Radio%20cognitiva.pdf

Una solución general del radio cognitivo está definida en la forma del paquete del software que pueda trabajar con plataformas de radio reconfigurable para proveer funcionalidad cognitiva. Este paquete de software, llamado motor cognitivo, consta de un conjunto de mecanismos generales de aprendizaje y algoritmos de aplicaciones específicas, que puede ser aplicado para plataformas de radio con implementación de hardware. Como se muestra en el bloque de la arquitectura del sistema del radio cognitivo representado en forma de diagrama en la *figura 2.3*, el motor cognitivo maneja recursos y adapta la operación del radio para optimizar su función. La interacción entre el motor cognitivo y la plataforma de radio se da a través de un estándar de interface entre ellos como se muestra en la figura [8].

Un paquete de software de algoritmos, llamado el motor cognitivo (CE, Cognitive Engine), se diseña y superpone sobre la plataforma de hardware de radio. El CE maneja los recursos de la radio para llevar a cabo funciones cognitivas, de tal manera que adapta su operación para un óptimo rendimiento. El CE le da a la radio funcionalidades cognitivas combinando los procesos de aprendizaje de maquina con la radio operación.

- Un núcleo de aprendizaje de maquina se desarrolla para dotar de capacidades cognitivas a aplicaciones inalámbricas. El refuerzo en el aprendizaje y la optimización evolutiva son los principios claves del diseño del núcleo de aprendizaje. Un ciclo doble de conocimientos queda integrado al núcleo de aprendizaje.

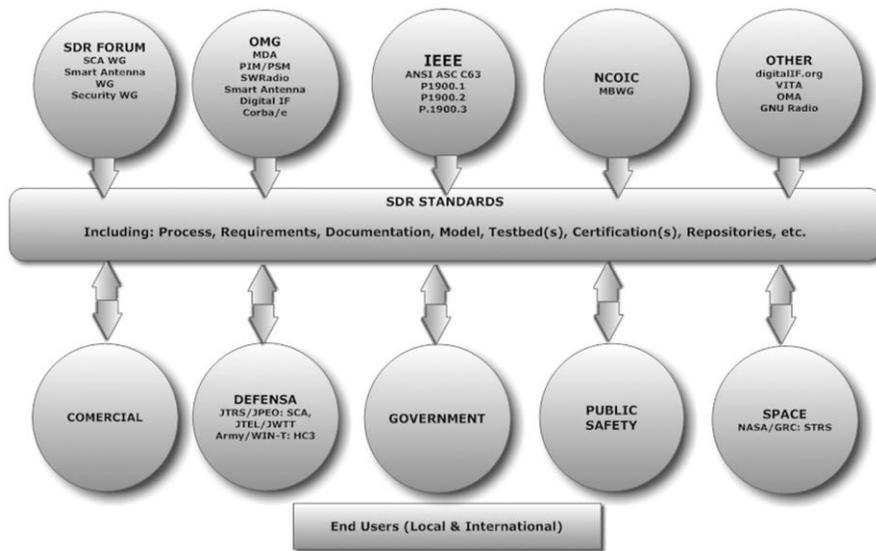


Figura 2.4. Arquitectura que soporta aplicaciones actuales y futuras. Fuente: http://bibliotecadigital.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/item/5283/1/Revista%20S%26T%20Vol%209%20N%2016%20-%20Radio%20cognitiva.pdf

- Cualquier radio con un nivel apropiado de capacidad de reconfiguración puede soportar y ser controlado por el CE, a través de la plataforma de una interface de radio independiente. Gracias a que el CE no es una plataforma específica, es posible implementar conocimientos generales y aprendizaje en la solución de una variedad de problemas de aplicativos.
- La funcionalidad cognitiva se enfoca en las capas 1 a 3, para asegurar optimización entre ellas. Los algoritmos de cognición generales pueden ser extendidos a las capas altas y configurados para reunir los requerimientos específicos de varias aplicaciones.
- Como un nodo de red, por naturaleza un CR puede trabajar de manera individual o acompañado de gestores de recursos y optimizadores de desempeño. La estructura de aprendizaje de CR consta de tres pasos: reconocimiento, razonamiento y adaptación. Se puede implementar con flexibilidad. Tanto de manera centralizada, como un nodo CR totalmente funcional, o ser distribuido a través de la red, donde cada parte de ella va a

requerir un nivel distinto de inteligencia y diferentes capas de optimización [8].

La *figura 2.4* muestra un modelo general en el cual se ve la independencia del hardware del diseño principal de la solución del radio cognitivo. Esto posibilita tender un puente sobre los mecanismos de aprendizaje con el funcionamiento del radio. La plataforma de interfaz independiente tiene dos flexibilidades de diseño o propósito: dar soporte a los mecanismos generales de aprendizaje y a los algoritmos específicos de aplicación; y dar soporte y reconfigurabilidad a las plataformas de radio como las del RDS.

2.4 ESTANDARIZACIÓN Y REGULACIÓN DE LA RADIO COGNITIVA

IEEE 802.22 [9, 10] es el primer estándar mundial basado en tecnología CR. Se pretende que sea un estándar para redes inalámbricas de área regional (WRAN, *Wireless Regional Access Network*), centrándose en la construcción de redes WRAN punto-multipunto fijas, que utilizarían las bandas UHF/VHF de televisión entre los 54MHz y los 862MHz.

En IEEE 802.22 se propone el uso tanto de los canales de televisión como de las bandas de guarda. En el proyecto se especifica una interfaz inalámbrica fija punto-multipunto, donde una estación base controla su celda y los usuarios presentes en la misma, a los que se denomina CPE (*Consumer Premise Equipments*). Esta estación base se ocupa de realizar el *spectrum sensing*, dando instrucciones a los distintos CPE para que tomen las medidas necesarias.

El grupo de trabajo IEEE 802.22 se formó en 2004. La principal diferencia entre el 802.22 y los anteriores estándares IEEE 802 es el radio de cobertura de las estaciones base. Actualmente, se continúa trabajando en el proceso de estandarización. Por ejemplo, puesto que está pensado para operar en bandas asignadas a sistemas de televisión, en dicho estándar se especifican los umbrales para desocupar un canal ante la presencia de las siguientes señales:

- Televisión Digital: -116dBm sobre un canal de 6MHz.
- Televisión Analógica (NTSC): -94dBm en el pico de la portadora.
- Micrófonos inalámbricos: -107dBm en un ancho de banda de 200kHz.

Para mitigar la interferencia sobre estas señales, el protocolo 802.22 considera la utilización de tablas de ocupación de espectro, las cuáles serían actualizadas vía software, tanto por el propio CR como por el administrador del sistema. Además, también establece límites sobre la máxima potencia transmitida e interferencias sobre bandas adyacentes.

2.5 TIPOS DE RADIO COGNITIVAS

Existen varios tipos de radios cognitivas que en particular pueden adaptar su tecnología de comunicaciones para interactuar con una variedad de redes existentes de radio [11].

2.5.1 Adapt4 XG1

El XG1 es la primera adaptación, de dispositivo inteligente, se ajusta a la expresión, "Cognitive Radio". El *Automatic spectrum adaptation Protocol* administra el tiempo, espacio, frecuencia y potencia para proporcionar comunicaciones fiables, sin causar interferencia a otros usuarios con licencia.

¿Cómo funciona? Una característica patentada permite a todos los radios cognitivos XG1 dentro de una red monitorear la actividad de otros usuarios en una banda especificada y determinar el ancho de banda no utilizado. La red genera un conjunto de caminos paralelos y transmite en estos canales, si no están en uso. Cuando otro usuario con licencia se detecta, la red deja de utilizar esa frecuencia hasta que vuelven a estar inactivos.

Dos características adicionales se emplean para reducir aún más la probabilidad de interferencia a otros usuarios. Una técnica de salto de frecuencia, que reduce al mínimo la cantidad de tiempo que cualquier frecuencia única utiliza; y el poder de las radios para transmitir de forma dinámica regulada, de manera que se use la cantidad mínima de energía necesaria para establecer una comunicación.

De momento, opera en la banda de 217 a 220 MHz, aunque en un futuro se espera añadir más bandas de funcionamiento. La información se transmite a través de 45 radiocanales de 4 kbps.

2.5.2 Corvus

Las premisas básicas del sistema *Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum (Corvus)* son las siguientes:

- La abundancia de espectro, que está disponible, utilizada de manera compartida por los usuarios secundarios.
- Utilizar técnicas de radio cognitiva para evitar interferir con los usuarios primarios cuando están presentes.

Se presentó con el objetivo de explotar bandas licenciadas sin ocupar. En CORVUS, basado en spectrum sensing a nivel local, la detección del usuario primario y la asignación de espectro se realizan de forma coordinada. El funcionamiento del sistema es el siguiente: los usuarios no licenciados se agrupan formando lo que denominan un "grupo de usuarios secundarios". Cada miembro del grupo analiza el espectro, el cual está dividido en sub-canales. Un canal de control universal es utilizado por todos los grupos para tareas de coordinación en

el acceso al medio. Además, existen canales de control para cada uno de los grupos, con el objetivo de intercambiar información y/o establecer enlaces entre los usuarios del grupo. El hecho de trabajar de forma cooperativa incrementa de forma notable la capacidad del sistema para la detección de los usuarios primarios. El funcionamiento del sistema ha sido evaluado mediante el CORVUS testbed [12].

2.5.3 CR1

Es una arquitectura desarrollada por Mitola, como parte de su tesis doctoral. Se basa en *case-based machine learning* y *natural language reasoning*, guiados mediante el ciclo cognitivo y una descripción ontológica de las capacidades del sistema, como es el RKRL.

2.5.4 DARPA xG

Investiga aspectos de la tecnología Radio Cognitivo como parte del programa *NeXt Generation (xG) Networks*, también conocido como *DSAN (Dynamic Spectrum Access Networks)*.

DARPA ha desarrollado un sensor capaz de procesar frecuencias a 5 GHz/segundo y detectar señales hasta 20 dB por debajo del nivel del ruido, mediante técnicas que explotan las propiedades cicloestacionarias de las mismas.

2.5.5 E2R Project

El E2R (End-to-End Reconfigurability), Es una iniciativa europea en la que participan numerosas universidades y empresas. La idea es que los sistemas reconfigurables end-to end permitan la aparición de plataformas y entornos de ejecución comunes para múltiples interfaces inalámbricas, protocolos y aplicaciones ya existentes, lo cual se espera que repercutirá en la creación de una infraestructura escalable y reconfigurable (vía software) que optimizará la utilización de los recursos (como el espectro o los diferentes equipos necesarios) basándose en la utilización de métodos cognitivos. Así, los usuarios finales se beneficiarán al conseguir el servicio deseado en cualquier instante o lugar, cuando y donde lo necesiten, a un precio razonable.

2.5.6 Nautilus

El proyecto Nautilus presenta un marco de trabajo para el desarrollo de redes ad hoc, en el cual se plantea una coordinación distribuida que permite el acceso y la compartición de espectro sin necesidad de establecer ningún canal de control

común predefinido para los distintos usuarios. Para ello, se proponen tres esquemas de de acceso cooperativo.

Se propone un esquema de acceso cooperativo basado en técnicas de graph coloring, diseñándose un algoritmo para optimizar la asignación de espectro teniendo en cuenta la topología de la red (siendo esta una red fija) por un servidor central. Los resultados experimentales demuestran que dicho algoritmo permite reducir drásticamente la interferencia y aumentar la capacidad. Sin embargo, en las redes móviles, la topología de la red varía constantemente. Utilizar en este caso el algoritmo anterior supone un excesivo incremento del coste computacional, ya que, después de cada cambio en su topología, la red debería volver a calcular la asignación óptima de espectro.

Por este motivo, se propone realizar la asignación de espectro de forma distribuida, basándose en una negociación a nivel local entre los diferentes nodos o usuarios que forman la red. Para ello, los distintos usuarios se agrupan de forma local para organizar y negociar la asignación de espectro. Los resultados demuestran que el funcionamiento de este sistema es similar al anterior, pero con un 50% menos coste computacional.

Por último, se propone un esquema en el que los usuarios no licenciados acceden al espectro de forma independiente, de acuerdo a sus observaciones locales y a unas reglas predeterminadas. El objetivo de estas reglas es reducir la complejidad del sistema, procurando mantener un buen funcionamiento del mismo.

2.5.7 KNOWS

El proyecto KNOWS (*Kognitiv Networking Over White Spaces*), ha generado una serie de prototipos funcionales cuyos componentes incluyen hardware, un mecanismo para asignación de espectro, y un protocolo MAC (Media Access Control), Parte del desarrollo está basado en el estándar 802.11 del IEEE.

2.5.8 Spectrum Pooling

Spectrum pooling, es una estrategia de compartición de recursos en la que el espectro disponible se organiza en lo que se denomina “fondo de espectro”, el cual se optimiza para determinadas aplicaciones.

Se basa en una arquitectura OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), que se plantea con una estación base CR y usuarios CR móviles, sin asumir ningún tipo de cambio sobre los usuarios primarios (con licencia). La elección de OFDM se basa en que esta modulación posee la ventaja de que “colocar” ceros en alguna de las sub-portadoras. Este hecho tiene como consecuencia la no emisión

de señal alguna en dichas portadoras, que se asumen ocupadas por los usuarios primarios de la red.

La detección de los usuarios primarios se realiza en la estación base mediante frames de detección, que son periódicamente transmitidos por la misma. Durante estos intervalos, los CR móviles realizan el spectrum sensing, modulando un símbolo complejo a máxima potencia en cada una de las sub-portadoras donde detectan a un usuario primario. De esta forma, la estación base recibe una señal amplificada en todas las portadoras con usuarios primarios. Finalmente, la información recopilada por la estación base se transmite a todos los usuarios móviles.

Uno de los principales problemas de esta arquitectura es que, utilizando las técnicas tradicionales de acceso al medio, todo este proceso es demasiado lento [11].

2.6 ARQUITECTURA AD-HOC

Esta arquitectura se caracteriza en que no existe el *backbone* o red troncal, como se muestra en la Figura 2.5, la red se configura sobre la marcha. Si un TM reconoce que existen otros TMs cercanos, éstos se pueden conectar a través de ciertas normas o protocolos de comunicación, y pueden establecer enlaces para formar una red ad-hoc.

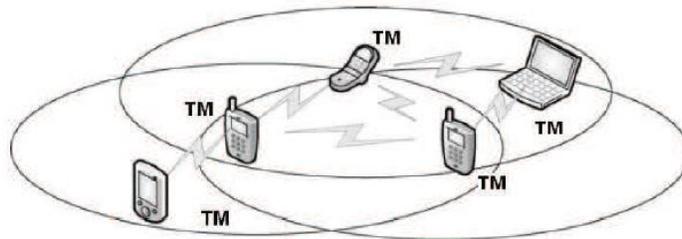


Figura 2.5. Arquitectura Ad-hoc de CR. Fuente: análisis de factibilidad para la utilización de Cognitive radio (radio cognoscitiva) en las radiocomunicaciones necesarias para casos de emergencia en el Ecuador. Autor David Antonio Segura Briones.

3 LIMITACIONES PARA LA IMPLEMENTACION DE RADIO COGNITIVO

En este capítulo se presentan a continuación las limitantes que ha tenido implementar la tecnología Radio cognitivo.

3.1 LIMITACIONES TECNICAS

La teoría plasmada por Joseph Mitola en su tesis doctoral de 1999. Defendía que mejoraría la eficiencia del espectro si se creaba un sistema de radiocomunicación capaz de observar los espacios libres en las bandas de frecuencia y adaptar automáticamente sus parámetros de forma dinámica, según la demanda de la red y los usuarios. "Es decir, el sistema cognitivo no opera en una única frecuencia, sino que de manera inteligente elige la banda más adecuada para comunicarse". Esto en la práctica no es tan fácil porque "implica que debe detectar la aguja (espacio libre) en el pajar (espectro). Para ello, el terminal cognitivo debe rastrear constantemente el espectro y no se debe equivocar casi nunca. Es decir, deben ser suficientemente pequeñas las probabilidades de pérdida (hay señal, pero no la detecta) y de falsa alarma (no hay señal, pero la detecta), que evitan interferencias con los usuarios y servicios que operan bajo licencia".

Al reto de la búsqueda de agujeros espectrales, técnicamente denominado *sensado*, se añade el de evitar que el servicio original no se vea afectado por interferencias provocadas por la radio cognitiva. Para ello hay que garantizar no solo que el terminal cognitivo que va a emitir no detecte señal del servicio originalmente licenciado en la banda, sino también que el receptor de la emisión no se encuentre en su zona de cobertura. La solución, sería dejar "zonas de protección" creadas a partir no solo de los resultados del *sensado*, sino también de bases de datos con información sobre las características de la emisión o el servicio que tiene asignada la licencia.

No todos los servicios de telecomunicaciones pueden beneficiarse de esta tecnología por igual a corto plazo. La televisión, que emite de forma regular y en horarios definidos, cuenta con un estándar IEEE 802.22. En Europa diversos organismos reguladores, como OFCOM en Gran Bretaña o el European Telecommunication Standard Institute (ETSI, en inglés), estudian la viabilidad de aplicaciones similares, para que puedan iniciarse en pocos años.

En cambio, aplicar la radio cognitiva en bandas de telefonía móvil es más complejo, porque "su comportamiento es más dinámico, transmiten de forma discontinua y las llamadas se pueden producir en cualquier lugar del territorio siempre que haya cobertura" [13].

Además el tiempo de configuración de los dispositivos hardware aumenta con la complejidad del sistema de radio Cognitivo, los procesos de estandarización van a un ritmo más lento que los procesos de investigación y desarrollo.

El hecho de que el sistema de radio esté basado en software aumenta la vulnerabilidad de los sistemas frente a virus y otras amenazas.

El volumen de software descargado para los dispositivos reconfigurables es cada vez mayor y exige complejidad en los componentes, y como primera consecuencia los tiempos de descarga aumentan considerablemente.

3.2 LIMITACIONES POLITICAS Y LEGALES

El espectro radioeléctrico puede ser considerado, a todos los efectos, como un recurso natural limitado [14]. Es por esto que el uso que de él hacen los diferentes sistemas de comunicaciones se encuentra regulado de manera local en cada país. Si analizamos actualmente porciones de este espectro encontraríamos con que el grado de ocupación de las bandas que lo conforman es muy diferente. Algunas bandas se encuentran desocupadas buena parte del tiempo mientras que en otras el nivel de ocupación es extremadamente elevado.

Para la regulación del espectro radioeléctrico, dos han sido las políticas que de manera tradicional se han venido aplicando: la asignación a operadores de derechos exclusivos de uso sobre algunas bandas frecuenciales (bandas licenciadas), y la declaración de otras como bandas de uso libre por parte de operadores y/o usuarios particulares (bandas no licenciadas), la percepción de que el espectro radioeléctrico es un bien escaso, o la baja eficiencia espectral de los esquemas de acceso al medio en bandas no licenciadas (debida en gran medida a la ausencia de coordinación entre usuarios y a los elevados niveles de interferencia), sugieren la necesidad de considerar otras políticas complementarias. El principal problema radica en que las políticas actuales de asignación de bandas frecuenciales son demasiado estrictas y no permiten un uso óptimo del espectro radioeléctrico disponible. Por ejemplo, a pesar de que el espectro se percibe como un bien escaso, el uso de buena parte de las bandas licenciadas es muy bajo o nulo. A consecuencia de ello, no es infrecuente encontrar bandas frecuenciales terriblemente congestionadas (como, por ejemplo, las de telefonía móvil celular) y bandas contiguas completamente infrautilizadas.

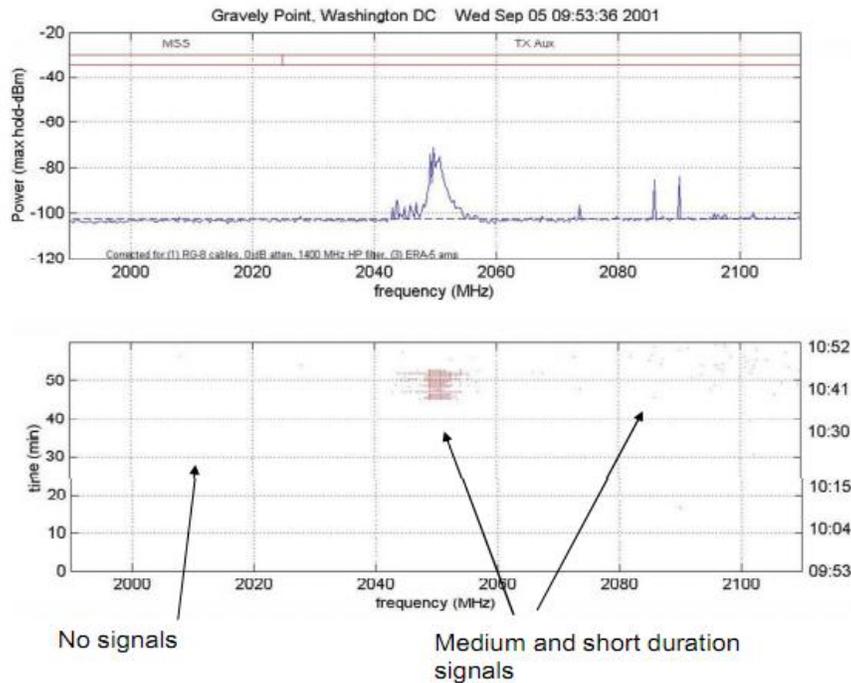


Figura 3.1. Ocupacion espectral medida en Washington DC por la empresa Shared Spectrum Company.

La *Figura 3.1* muestra la ocupación del espectro frecuencial en Washington DC un día laborable cualquiera a las 10:00 de la mañana (medidas llevadas a cabo por la empresa Shared Spectrum Company, www.sharedspectrum.com). En el gráfico inferior, se detalla la evolución temporal de la ocupación dicha banda frecuencial y de él se desprende que (1) una parte muy significativa del espectro no se usa; y (2) que la ocupación, cuando se produce, es a ráfagas, es decir, con señales intermitentes de baja y media duración. En resumen, el uso del espectro asignado de manera estática puede ser muy ineficiente lo que, en última instancia, podría acarrear serias dificultades a la hora de desplegar nuevos sistemas de comunicaciones inalámbricas.

Todo ello sugiere que deberían explorarse otras políticas más flexibles y dinámicas de asignación de recursos radioeléctricos como las que se derivan del uso de las denominadas técnicas de radio cognitivo [15].

En Colombia según la constitución política de 1991 existen leyes para la utilización y asignación del espectro:

Artículo 75 [24]

El espectro electromagnético es un bien público enajenable e imprescriptible sujeto a la gestión y control del Estado. Se garantiza la igualdad de oportunidades en el acceso a su uso en los términos que fije la ley.

Para garantizar el pluralismo informativo y la competencia, el Estado intervendrá por mandato de la ley para evitar las prácticas monopolísticas en el uso del espectro electromagnético.

Artículo 76 [24]

La intervención estatal en el espectro electromagnético utilizado para los servicios de televisión, estará a cargo de un organismo de derecho público con personería jurídica, autonomía administrativa, patrimonial y técnica, sujeto a un régimen legal propio. Dicho organismo desarrollará y ejecutará los planes y programas del Estado en el servicio a que hace referencia el inciso anterior.

En Estados Unidos en el año 1934, bajo la Ley de Comunicaciones que estipuló la creación de la FCC, el Congreso le otorgó a la Comisión un amplio poder para la regulación del espectro radioeléctrico “para el interés del público”. En consecuencia, la FCC trabaja constantemente para asegurar que el espectro radioeléctrico se encuentre asignado y administrado de una manera que minimice o elimine las interferencias, para que todos los ciudadanos estadounidenses puedan recibir los máximos beneficios de la tecnología y servicios inalámbricos.

La FCC comparte las responsabilidades de la gestión y funciones del espectro con la Administración Nacional de Telecomunicaciones e Información (NTIA). La FCC tiene autoridad sobre la utilización comercial del espectro radioeléctrico y también de la de los gobiernos locales y estatales, la NTIA está a cargo de la gestión de la utilización del espectro radioeléctrico para temas de defensa y otros propósitos federales. Dado que el espectro radioeléctrico es un recurso limitado y que las decisiones tomadas por una agencia pueden a menudo afectar a la otra, las dos agencias trabajan estrechamente ligadas para garantizar que la compensación pública nacional reciba el máximo de beneficios derivados de los recursos del espectro radioeléctrico [18].

Mediante estas normas que se rigen en el mundo para la asignación y el uso del espectro radioeléctrico, encontramos una gran limitación para la implementación de Radio cognitivo, ya que estas técnicas permiten la utilización de algunos rangos de frecuencia de usuarios principales (licenciadas), cuando no sean utilizadas por estos, lo cual podría ocasionar conflictos legales.

Legalmente no es factible la utilización, operación, despliegue y comercialización de sistemas y Radios cognitivos, debido a que la legislación correspondiente al régimen del espectro radioeléctrico no contempla la utilización dinámica y oportunista de frecuencias, existiendo un vacío legal referente a la autorización o concesión previa por parte del Estado.

3.3 LIMITACIONES ECONOMICAS

Con el fin de compartir el espectro con los usuarios primarios sin interferirlos, y adicionalmente, cumplir con los diversos requisitos de calidad de servicio para aplicaciones, cada usuario en una red Ad-hoc con Radio cognitivo debe cumplir básicamente lo siguiente.

- Determinar la porción del espectro que se encuentra disponible, lo que se conoce como **detección del espectro** (*Spectrum sensing*).
- Seleccionar el mejor canal disponible, lo que se conoce como **decisión de espectro** (*Spectrum decision*).
- Coordinar el acceso a este canal con otros usuarios, lo que se conoce como **compartición del espectro** (*Spectrum sharing*).
- Desalojo del canal cuando se detecta a un usuario primario, lo que se conoce como **movilidad de espectro** (*Spectrum mobility*).

Teniendo en cuenta las funciones que debe cumplir un dispositivo radio cognitivo, se debe adicionar hardware capaz de hacer un barrido del espectro y un software adicional en cada uno de estos dispositivos que pueda seleccionar el mejor canal disponible para establecer la conexión y crear una red Ad-hoc cognitiva y. Esto incrementaría el costo en la producción y venta de los dispositivos.

4 RADIO CONGNITIVA Y TECNOLOGIAS INALAMBRICAS PARA REDES AD HOC

En este capítulo se detalla las tecnologías inalámbricas para crear redes Ad-hoc, además de presentar las ventajas y desventajas que posee Radio cognitivo para crear dichas redes.

4.1 ESPECIFICACIONES INALÁMBRICAS 802.11

Es un miembro de la familia IEEE 802 que es una serie de especificaciones para las tecnologías de redes de área local. Esta especificación lleva a la red tradicional a un medio de comunicación inalámbrico en donde los dispositivos de este medio usan radio frecuencia en lugar de cables para establecer una conexión y comunicación entre ellas. Wi-Fi, WiMax, Bluetooth y ZigBee son estándares desarrollados para diferentes tipos de necesidades [16].

La diferencia primordial entre la mayoría de los estándares inalámbricos es su definición.

- Definición de las especificaciones técnicas.
- Definición de los productos actuales.
- Definición de las aplicaciones

Para muchos, Wi-Fi, Bluetooth y Zig-Bee están todas agrupadas en la misma categoría, cuando en realidad representan muy diferentes etapas de desarrollo y ofrecen varios niveles de funcionalidad.

4.1.1 Wi-Fi

Wi-Fi, técnicamente tiene el mismo significado que WLAN (Wireless Local Area Network), red local sin hilos. Es un estándar robusto, maduro y bien establecido que continúa creciendo y evolucionando. Existen diversos tipos de Wi-Fi, basado cada uno de ellos en un estándar IEEE 802.11 aprobado. Son los siguientes:

Los estándares IEEE 802.11b, IEEE 802.11g e IEEE 802.11n disfrutan de una aceptación internacional debido a que la banda de 2.4 GHz está disponible casi universalmente, con una velocidad de hasta 11 Mbps , 54 Mbps y 300 Mbps, respectivamente.

En la actualidad ya se maneja también el estándar IEEE 802.11a, conocido como WIFI 5, que opera en la banda de 5 GHz y que disfruta de una operatividad con canales relativamente limpios. La banda de 5 GHz ha sido recientemente habilitada y, además, no existen otras tecnologías (Bluetooth, microondas, ZigBee, WUSB) que la estén utilizando, por lo tanto

existen muy pocas interferencias. Su alcance es algo menor que el de los estándares que trabajan a 2.4 GHz (aproximadamente un 10%), debido a que la frecuencia es mayor (a mayor frecuencia, menor alcance).

Una de las ventajas de la tecnología 802.11g es que es totalmente compatible con los productos desarrollados en la versión anterior 802.11b, de los cuales existen muchos instalados y muy pronto esa compatibilidad incluirá a los sistemas 802.11a, de modo que soportara todos los equipos antiguos y modernos [16].

Existe también el estándar IEEE 802.11n que trabaja a 2.4 GHz a una velocidad de 108 Mbps. Aunque estas velocidades de 108 Mbps son capaces de alcanzarse ya con el estándar 802.11g gracias a técnicas de aceleramiento que consiguen duplicar la transferencia teórica.

En los Estados Unidos y Japón, se maneja también el estándar IEEE 802.11a, en otras zonas, como la Unión Europea, 802.11a no está aprobado todavía para operar en la banda de 5 GHz, y los reguladores europeos están todavía considerando el uso del estándar europeo *Hiperlan*.

La tecnología inalámbrica Bluetooth también funciona a una frecuencia de 2.4 GHz por lo que puede presentar interferencias con Wi-Fi, sin embargo, en la versión 1.2 y mayores del estándar Bluetooth se ha actualizado su especificación para que no haya interferencias en la utilización simultánea de ambas tecnologías.

Uno de los problemas más graves a los cuales se enfrenta actualmente la tecnología Wi-Fi es la seguridad. Un muy elevado porcentaje de redes son instaladas por administradores de sistemas y redes por su simplicidad de implementación sin tener en consideración la seguridad y, por tanto, convirtiendo sus redes en redes abiertas, sin proteger la información que por ellas circulan[20].

Los estándares 802.11b y 802.11g utilizan bandas de 2,4 gigahercios (Ghz) que no necesitan de permisos para su uso. El estándar 802.11a utiliza la banda de 5 GHz. Las redes que trabajan bajo los estándares 802.11b y 802.11g pueden sufrir interferencias por parte de hornos microondas, teléfonos inalámbricos y otros equipos que utilicen la misma banda de 2,4 Ghz.

4.1.1.1 PROTOCOLOS

- 802.11legacy[25]
La versión original del estándar IEEE 802.11 publicada en 1997 especifica dos velocidades de transmisión teóricas de 1 y 2 mega bit por segundo (Mbit/s) que se transmiten por señales infrarrojas (IR) en la banda ISM a 2,4 GHz. IR sigue siendo parte del estándar, pero no hay implementaciones disponibles.

El estándar original también define el protocolo CSMA/CA (Múltiple acceso por detección de portadora evitando colisiones) como método de acceso. Una parte importante de la velocidad de transmisión teórica se utiliza en las necesidades de esta codificación para mejorar la calidad de la transmisión bajo condiciones ambientales diversas, lo cual se tradujo en dificultades de interoperabilidad entre equipos de diferentes marcas. Estas y otras debilidades fueron corregidas en el estándar 802.11b, que fue el primero de esta familia en alcanzar amplia aceptación entre los consumidores.

- 802.11b

La revisión 802.11b del estándar original fue ratificada en 1999. 802.11b tiene una velocidad máxima de transmisión de 11 Mbit/s y utiliza el mismo método de acceso CSMA/CA definido en el estándar original. El estándar 802.11b funciona en la banda de 2.4 GHz. Debido al espacio ocupado por la codificación del protocolo CSMA/CA, en la práctica, la velocidad máxima de transmisión con este estándar es de aproximadamente 5.9 Mbit/s sobre TCP y 7.1 Mbit/s sobre UDP.

- 802.11a

El estándar 802.11a utiliza el mismo juego de protocolos de base que el estándar original, opera en la banda de 5 GHz y utiliza 52 subportadoras orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM) con una velocidad máxima de 54 Mbit/s, lo que lo hace un estándar práctico para redes inalámbricas con velocidades reales de aproximadamente 20 Mbit/s. La velocidad de datos se reduce a 48, 36, 24, 18, 12, 9 o 6 Mbit/s en caso necesario. 802.11a tiene 12 canales no solapados, 8 para red inalámbrica y 4 para conexiones punto a punto. No puede interoperar con equipos del estándar 802.11b, excepto si se dispone de equipos que implementen ambos estándares.

Dado que la banda de 2.4 GHz tiene gran uso (usada por los teléfonos inalámbricos y los hornos de microondas, entre otros aparatos), el utilizar la banda de 5 GHz representa una ventaja del estándar 802.11a, dado que se presentan menos interferencias. Sin embargo, la utilización de esta banda también tiene sus desventajas, dado que restringe el uso de los equipos 802.11a a únicamente puntos en línea de vista, con lo que se hace necesario la instalación de un mayor número de puntos de acceso; Esto significa también que los equipos que trabajan con este estándar no pueden penetrar tan lejos como los del estándar 802.11b dado que sus ondas son más fácilmente absorbidas.

- 802.11g
En Junio de 2003, se ratificó un tercer estándar de modulación: 802.11g. Este utiliza la banda de 2.4 Ghz (al igual que el estándar 802.11b) pero opera a una velocidad teórica máxima de 54 Mbit/s, o cerca de 24.7 Mbit/s de velocidad real de transferencia, similar a la del estándar 802.11a. Es compatible con el estándar b y utiliza las mismas frecuencias. Buena parte del proceso de diseño del estándar lo tomó el hacer compatibles los dos estándares. Sin embargo, en redes bajo el estándar g la presencia de nodos bajo el estándar b reduce significativamente la velocidad de transmisión. .

Los equipos que trabajan bajo el estándar 802.11g llegaron al mercado muy rápidamente, incluso antes de su ratificación. Esto se debió en parte a que para construir equipos bajo este nuevo estándar se podían adaptar los ya diseñados para el estándar b.

- 802.11n
En enero de 2004, la IEEE anunció la formación de un grupo de trabajo 802.11 (Tgn) para desarrollar una nueva revisión del estándar 802.11. la velocidad real de transmisión podría llegar a los 500 Mbps (lo que significa que las velocidades teóricas de transmisión serían aún mayores), y debería ser hasta 10 veces más rápida que una red bajo los estándares 802.11a y 802.11g, y cerca de 40 veces más rápida que una red bajo el estándar 802.11b. También se espera que el alcance de operación de las redes sea mayor con este nuevo estándar. Existen también otras propuestas alternativas que podrán ser consideradas y se espera que el estándar que debía ser completado hacia finales de 2006, se implante hacia 2008, puesto que no es hasta principios de 2007 que no se acabe el segundo boceto. No obstante ya hay dispositivos que se han adelantado al protocolo y ofrecen de forma no oficial éste estándar (con la promesa de actualizaciones para cumplir el estándar cuando el definitivo esté implantado).
- 802.11e
Con el estándar 802.11e, la tecnología IEEE 802.11 soporta tráfico en tiempo real en todo tipo de entornos y situaciones. Las aplicaciones en tiempo real son ahora una realidad por las garantías de Calidad de Servicio (QoS) proporcionado por el 802.11e. El objetivo del nuevo estándar 802.11e es introducir nuevos mecanismos a nivel de capa MAC para soportar los servicios que requieren garantías de Calidad de Servicio. Para cumplir con su objetivo IEEE 802.11e introduce un nuevo elemento llamado Hybrid Coordination Function (HCF) con dos tipos de acceso:

- (EDCA) Enhanced Distributed Channel Access.
 - (HCCA) Controlled Channel Access.
- Protocolo propietario 802.11 Super G
Hoy en día el estándar 802.11 Super G, con una banda de 2.4 Ghz y 5 Ghz, alcanza una velocidad de transferencia de 108 Mbps. De la empresa D-Link.

4.1.2 WIMAX[19]

Está diseñado como una alternativa wireless al acceso de banda ancha DSL y cable, y una forma de conectar nodos Wi-Fi en una red de área metropolitana (MAN). Sus siglas en ingles vienen a decir “*Worldwide Interoperability for Microwave Access*” o Interoperabilidad mundial de acceso por microondas. Podemos también definirlo como un sistema de comunicación digital, también conocido como IEEE 802.16.

WiMAX puede proveer de acceso de banda ancha Wireless de hasta 50 Kilómetros. Si lo comparamos con el protocolo Wireless 802.11, el cual está limitado en la mayoría de las ocasiones a unos 100 Metros.

4.1.2.1 CARACTERÍSTICAS

El estándar 802.16 puede alcanzar una velocidad de comunicación de más de 100 Mbit/s en un canal con un ancho de banda de 28 MHz (en la banda de 10 a 66 GHz), mientras que el 802.16a puede llegar a los 70 Mbit/s, operando en un rango de frecuencias más bajo (<11 GHz). Es un claro competidor de LMDS.

Comparativa de WiMAX frente a otras tecnologías					
	WiMAX 802.16	Wi-Fi 802.11	Mobile-Fi 802.20	UMTS cdma2000	y
Velocidad	124 Mbit/s	11-54 Mbit/s	16 Mbit/s	2 Mbit/s	
Cobertura	40-70 km	300 m	20 km	10 km	
Licencia	Si/No	No	Si	Si	
Ventajas	Velocidad Alcance	y Velocidad y Precio	y Velocidad y Movilidad	y Rango y Movilidad	y
Desventajas	Interferencias?	Bajo alcance	Precio alto	Lento y caro	

Tabla 4.1. Características de WIMAX frente a otras tecnologías.

Estas velocidades tan elevadas se consiguen gracias a utilizar la modulación OFDM con 256 subportadoras, la cual puede ser implementada de diferentes formas, según cada operador, siendo la variante de OFDM empleada un factor diferenciador del servicio ofrecido. Esta técnica de modulación es la que también se emplea para la TV digital, sobre cable o satélite, así como para Wi-Fi (802.11a) por lo que está suficientemente probada. Soporta los modos FDD y TDD para facilitar su interoperabilidad con otros sistemas celulares o inalámbricos.

Soporta varios cientos de usuarios por canal, con un gran ancho de banda y es adecuada tanto para tráfico continuo como a ráfagas, siendo independiente de protocolo; así, transporta IP, Ethernet, ATM etc., y soporta múltiples servicios simultáneamente ofreciendo Calidad de Servicio (QoS) en 802.16e, por lo cual resulta adecuado para voz sobre IP (VoIP), datos y vídeo.

Otra característica de Wi-Max es que soporta las llamadas antenas inteligentes (smart antenas), propias de las redes celulares de 3G, lo cual mejora la eficiencia espectral, llegando a conseguir 5 bps/Hz, el doble que 802.11a. Estas antenas inteligentes emiten un haz muy estrecho que se puede ir moviendo, electrónicamente, para enfocar siempre al receptor, con lo que se evitan las interferencias entre canales adyacentes y se consume menos potencia al ser un haz más concentrado. Permite, por ejemplo, la comunicación entre una comunidad de usuarios dispersos a un coste muy bajo y con una gran seguridad al disponerse de rutas alternativas entre ellos.

En cuanto a seguridad, incluye medidas para la autenticación de usuarios y la encriptación de los datos mediante los algoritmos Triple DES.(128 bits) y RSA (1.024 bits).

4.1.3 Bluetooth[22]

Bluetooth está detrás de Wi-Fi en un proceso evolutivo, pero ahora cada vez mejor. Las especificaciones están completas. La nueva versión 1.2, incorpora la función de salto de frecuencia adaptiva, la cual minimiza la interferencia mutua con sistemas de frecuencia estática (802.11) y hace posible la coexistencia de diferentes sistemas inalámbricos en el mismo entorno. Esta función permite a los dispositivos Bluetooth, operar más efectivamente en donde existen redes inalámbricas, como en los grandes supermercados y en muchos almacenes. La versión 1.2 también ha corregido los problemas asociados con la transmisión de voz, y soporta mejor los audífonos inalámbricos, como los de los teléfonos celulares y los sistemas basados en voz utilizados en los almacenes.

Bluetooth es la norma que define un estándar global de comunicación inalámbrica, que posibilita la transmisión de voz y datos entre diferentes equipos mediante un enlace por radiofrecuencia.

La tecnología Bluetooth comprende hardware, software y requerimientos de interoperabilidad, por lo que para su desarrollo ha sido necesaria la participación de los principales fabricantes de los sectores de las telecomunicaciones y la informática, tales como: Ericsson, Nokia, Toshiba, IBM, Intel y otros. Posteriormente se han ido incorporando muchas más compañías, y se prevé que próximamente lo hagan también empresas de sectores tan variados como: automatización industrial, maquinaria, ocio y entretenimiento, fabricantes de juguetes, electrodomésticos, etc., con lo que en poco tiempo se nos presentará un panorama de total conectividad de nuestros aparatos tanto en casa como en el trabajo.

4.1.3.1 Descripción

Bluetooth proporciona una vía de interconexión inalámbrica entre diversos aparatos que tengan dentro de sí esta tecnología, como celulares, computadoras de mano (Palm, Pocket PC) , cámaras, computadoras portátiles, impresoras y simplemente cualquier aparato que contenga esta tecnología, usando por supuesto una conexión segura de radio de muy corto alcance. El alcance que logran tener estos dispositivos es de 10 metros. Para mejorar la comunicación es recomendable que nada físico (como una pared) se interponga.

El primer objetivo para los productos Bluetooth de primera generación eran los entornos de la gente de negocios que viaja frecuentemente. Por lo que se debería pensar en integrar el chip de radio Bluetooth en equipos como: PCS portátiles, teléfonos móviles, PDAs y auriculares. Esto originaba una serie de cuestiones previas que deberían solucionarse tales como:

- El sistema debería operar en todo el mundo.
- El emisor de radio deberá consumir poca energía, ya que debe integrarse en equipos alimentados por baterías.
- La conexión deberá soportar voz y datos, y por lo tanto aplicaciones multimedia.

La especificación de Bluetooth define un canal de comunicación de máximo 720Kb/seg con rango óptimo de 10 metros (opcionalmente 100m).

La frecuencia de radio con la que trabaja está en el rango de 2.4 a 2.48Ghz con amplio espectro y saltos de frecuencia con posibilidad de transmitir en Full Duplex con un máximo de 1600 saltos/seg. Los saltos de frecuencia se dan entre un total de 79 frecuencias con intervalos de 1Mhz; esto permite dar seguridad y robustez.

La potencia de salida para transmitir a una distancia máxima de 10 metros es de 0dBm (1 mW), mientras que la versión de largo alcance transmite entre -30 y 20dBm (100 mW).

Para lograr alcanzar el objetivo de bajo consumo y bajo costo, se ideó una solución que se puede implementar en un solo chip utilizando circuitos CMOS. De esta manera, se logró crear una solución de 9x9mm y que consume aproximadamente 97% menos energía que un teléfono celular común.

El protocolo de banda base (canales simples por línea) combina switching de circuitos y paquetes. Para asegurar que los paquetes no lleguen fuera de orden, los slots pueden ser reservados por paquetes síncronos, un salto diferente de señal es usado para cada paquete. Por otro lado, el switching de circuitos puede ser asíncrono o síncrono. Tres canales de datos síncronos (voz), o un canal de datos síncrono y uno asíncrono, pueden ser soportados en un solo canal. Cada canal de voz puede soportar una tasa de transferencia de 64 Kb/s en cada sentido, la cual es suficientemente adecuada para la transmisión de voz. Un canal asíncrono puede transmitir como mucho 721 Kb/s en una dirección y 56 Kb/s en la dirección opuesta, sin embargo, para una conexión asíncrona es posible soportar 432,6 Kb/s en ambas direcciones si el enlace es simétrico[18].

4.1.3.1.1 Arquitectura Hardware

El hardware que compone el dispositivo Bluetooth está compuesto por dos partes. Un dispositivo de radio, encargado de modular y transmitir la señal; y un controlador digital. El controlador digital se compone por una CPU, un procesador de señales digitales (DSP - Digital Signal Processor) llamado Link Controller (o controlador de Enlace) y de los interfaces con el dispositivo anfitrión.

El LC o Link Controller está encargado de hacer el procesamiento de la banda base y del manejo de los protocolos ARQ y FEC de capa física. Además, se encarga de las funciones de transferencia (tanto asíncrona como síncrona), codificación de Audio y encriptación de datos.

El CPU del dispositivo se encarga de atender las instrucciones relacionadas con Bluetooth del dispositivo anfitrión, para así simplificar su operación. Para ello, sobre el CPU corre un software denominado Link Manager que tiene la función de comunicarse con otros dispositivos por medio del protocolo LMP.

Entre las tareas realizadas por el LC y el Link Manager, destacan las siguientes:

- Envío y Recepción de Datos.
- Empaginamiento y Peticiones.

- Determinación de Conexiones.
- Autenticación.
- Negociación y determinación de tipos de enlace.
- Determinación del tipo de cuerpo de cada paquete.
- Ubicación del dispositivo en modo sniff o hold.

4.1.3.1.2 Arquitectura Software

Buscando ampliar la compatibilidad de los dispositivos Bluetooth, los dispositivos que se agregan al estándar utilizan como interfaz entre el dispositivo anfitrión (Pc, teléfono celular, etc.) y el dispositivo Bluetooth como tal (chip Bluetooth) una interfaz denominada HCI (Host Controller Interface).

Los protocolos son una forma consensuada en la que los dispositivos intercambian información. Para cada tipo de red incluida la especificación Bluetooth existe un conjunto de protocolos o reglas que definen exactamente como se pasan los mensajes por el enlace[25].

4.1.4 ZigBee

Esta tecnología es la más nueva en este ambiente. ZigBee es la especificación definiendo las aplicaciones de red capaces de soportar esos dispositivos.

ZigBee está diseñado para operaciones de baja potencia. Un dispositivo ZigBee puede dejarse en sin utilizarse por un periodo largo de tiempo sin necesidad de volver a cargar la batería de ese dispositivo. Esto elimina la necesidad del operador de recargar la batería frecuentemente. ZigBee también ofrece mayor rango que Bluetooth. Está diseñado para dar servicio a dispositivos con baja transmisión de datos, en comparación de dispositivos que requieren banda ancha para transmitir video y gráficos.

ZigBee es un protocolo de comunicaciones inalámbrico similar al Bluetooth.

- Una red ZigBee puede constar de un máximo de 65535 nodos distribuidos en subredes de 255 nodos, frente a los 8 máximos de una subred Bluetooth.
- Menor consumo eléctrico que el de Bluetooth. En términos exactos, ZigBee tiene un consumo de 30 mA transmitiendo y de 3 uA en reposo, frente a los 40 mA transmitiendo y 0,2 mA en reposo que tiene el Bluetooth. Este menor consumo se debe a que el sistema ZigBee se queda la mayor parte del tiempo

dormido, mientras que en una comunicación Bluetooth esto no se puede dar, y siempre se está transmitiendo y/o recibiendo.

- Tiene una velocidad de hasta 250 kbps, mientras que en Bluetooth es de hasta 3 Mbps.
- Debido a las velocidades de cada uno, uno es más apropiado que el otro para ciertas cosas. Por ejemplo, mientras que el Bluetooth se usa para aplicaciones como los teléfonos móviles y la informática casera, la velocidad del ZigBee se hace insuficiente para estas tareas, desviándolo a usos tales como la Domótica, los productos dependientes de la batería, los sensores médicos, y en artículos de juguetería, en los cuales la transferencia de datos es menor.
- Existe una versión que integra el sistema de radiofrecuencias característico de Bluetooth junto a una interfaz de transmisión de datos vía infrarrojos desarrollado por IBM mediante un protocolo ADSI y MDSI[26].

4.1.4.1 Protocolos

Los protocolos se basan en investigaciones recientes sobre algoritmos de red (*ad hoc on-demand distance vector*, vector de distancias bajo demanda; neuRFon) para la construcción de redes ad-hoc de baja velocidad. La mayoría de redes grandes están pensadas para formar un cluster de clusters. También puede estructurarse en forma de malla o como un solo cluster. Los perfiles actuales de los protocolos soportan redes que utilicen o no facilidades de balizado.

En general, los protocolos ZigBee minimizan el tiempo de actividad de la radio para evitar el uso de energía. En las redes con balizas los nodos sólo necesitan estar despiertos mientras se transmiten las balizas (además de cuando se les asigna tiempo para transmitir). Si no hay balizas, el consumo es asimétrico repartido en dispositivos permanentemente activos y otros que sólo no están esporádicamente.

4.2 APOORTE DE LA RADIO COGNITIVA A LAS REDES INALÁMBRICAS

Lo que se pretende lograr mediante Radio Cognitivo es hacer que un dispositivo que contenga esta tecnología, pueda reconocer su medio ambiente, y utilizar los recursos disponibles en frecuencias y ancho de banda, independientemente de la tecnología que ofrezca el servicio, y de la que se utilice.

Así por ejemplo, en un futuro podríamos tener dispositivos que si detectan que estamos en un ambiente en donde es imposible comunicarnos por Wi-Fi, que este automáticamente lo haga por tecnología inalámbrica o si nota que muchas frecuencias de Wi-Fi no están siendo utilizadas, empezar a utilizarlas todas para aumentar el ancho de banda. Por ejemplo, si no podemos realizar una llamada por motivos de señal, porque no hay una torre de un operador de celular cerca, hacer

un ruteo de la llamada por medio de Wi-Fi de manera automatizada. Sin embargo, la tecnología de Radio Cognitiva no está limitada a utilizar frecuencias conocidas para servicios conocidos, sino que en teoría se crearían redes múltiples Ad-hoc, utilizando cualquier tipo de frecuencia encontrada para maximizar el flujo de datos.

Se pretende que nuestros dispositivos se comuniquen mediante cualquier recurso inalámbrico de comunicación, en todas las frecuencias conocidas, sin importar el lugar, lo cual sería algo sumamente beneficioso ya que aumentaría la eficiencia en redes Ad-hoc de manera exponencial.

4.2.1 Ventajas de Radio Cognitivo

- Las Radios cognitivas tienen la facilidad de detectar el espectro desperdiciado y utilizarlo sin causar interferencias negativas en otros usuarios.
- Administra el espectro, de manera que utiliza el ancho de banda que encaje mejor con la calidad de servicio que necesite el usuario entre todos los anchos de banda disponibles.
- Capacidad para movilizarse por todo el espectro para transmitir o recepcionar, cambiando de banda constantemente, de tal manera que sea transparente para el usuario.
- Debido a que se utiliza el protocolo lógico de alto nivel (por ejemplo TCP/IP) y no la parte físico en el nivel más bajo del protocolo, nos permite comunicarnos con cualquier recurso inalámbrico en todas las frecuencias conocidas.

4.2.2 Desventajas de Radio Cognitivo

- Encontrar un método esquemático de distribución del espectro que sea equitativo y justo para todos los usuarios de radio cognitiva sin interferir en las transmisiones de los usuarios legítimos.
- La seguridad es un aspecto sumamente importante en esta tecnología, ya que al estar basadas en software, las de uso civil pueden ser atacadas fácilmente por hackers o, en caso de aplicaciones militares, por sus oponentes.

- Asignan a los operadores los derechos exclusivos de uso sobre algunas bandas frecuenciales (bandas licenciadas), que les dan plena libertad de restringir el uso del mismo.

5 APLICACIONES DE RADIO COGNITIVO [28], [24], [27], [26]

Existen varios enfoques dentro del tema de los posibles usos de *CR*, pero debido a que la regulación y estandarización de esta tecnología se encuentra todavía en desarrollo, no están definidas aplicaciones concretas. Sin embargo, se debe destacar sus prometedoras potencialidades en las áreas descritas a continuación, teniendo en cuenta que puede existir un mayor número de diferentes aplicaciones.

5.1 ÁMBITO MILITAR

El ejército, especialmente en países del primer mundo, es un gran usuario de diferentes sistemas inalámbricos, y por ende ocupa grandes secciones del espectro. La logística militar se basa en sus sistemas de comunicaciones que incluyen geolocalización, aéreo navegación, radares, sensores y numerosos otros que dependen de acceso de frecuencias de radio. Existe una amplia gama de dispositivos y sistemas de comunicaciones heterogéneos que necesitan ser conectados para poder operar entre sí, por ejemplo, para establecer operaciones tácticas entre las diferentes ramas de la fuerza militar, habiendo una mezcla de redes centralizadas y descentralizadas.

Dadas sus características de movilidad, la gran mayoría de estos sistemas de comunicación deben desplegarse rápidamente en entornos desconocidos y potencialmente hostiles, enfrentando problemas de interferencias y conectividad, con enlaces que pueden ser temporales o de larga duración, así como variaciones impredecibles de éstas que pueden requerir de un ancho de banda variable.

CR potencialmente puede ser una solución para este entorno o condiciones de operación. Una red de estos dispositivos facilitaría la configuración autónoma de los mismos para garantizar la coexistencia al utilizar subbandas de frecuencias desocupadas, en donde puede ser posible una mezcla de redes Cognitivas y no-cognitivas. Esta coexistencia resulta de gran importancia en términos de coalición de fuerzas, ya que un sistema de *CR* puede actuar como puente entre los diferentes sistemas para facilitar la interoperabilidad.

Según datos del Departamento de Defensa de USA, las necesidades de espectro para sus operaciones militares, solo en su territorio nacional, están creciendo en un 25% anualmente, mientras que su uso temporal y espacial en sus emisores regulares es inferior al 1%. [12] Ya en el campo de batalla, el espectro disponible puede variar dramáticamente con la ubicación geográfica y con los patrones de tráfico en las comunicaciones a corto y a largo plazo. Obviamente no es posible realizar una cuidadosa planificación del manejo espectro en estas condiciones. Las técnicas de acceso dinámico al espectro se prestan muy bien para este tipo de escenarios, tanto para hacer uso del espectro disponible, como para convivir con los usuarios permanentes (que pueden ser de otra rama de la fuerza armada).

Sin duda, existe una gama mucho más amplia de las funciones tanto generales como más específicas de las Radio Cognitivas en el entorno militar que van más allá de los simples ejemplos citados. El área militar es un área de aplicación muy diversa en lo que respecta a las comunicaciones vía radio.

5.2 ÁMBITO DE SEGURIDAD PÚBLICA

Muchas de las cuestiones que se plantean en los escenarios militares son aplicables en los escenarios de este campo, como el despliegue rápido, auto-organización de sistemas, disponibilidad inmediata y uso eficiente del espectro disponible, interoperabilidad entre varios sistemas de comunicaciones (bomberos, paramédicos, policía, ambulancia, etc.), diferentes y variadas demandas de ancho de banda, entre otros, con el fin de disponer de todos estos recursos radioeléctricos para estos casos.

Las Radios cognitivas, una vez desarrolladas y desplegadas, permitirán que las frecuencias no utilizadas sean ocupadas para fines de emergencia. Los ambientes con interferencia en radiocomunicaciones para aplicaciones en estos casos pueden ser tan difíciles de tratar; por ejemplo, los entornos con estructuras altas de acero y hormigón y los entornos subterráneos (comunes en desastres) pueden presentar grandes dificultades para los sistemas de comunicación convencionales, por lo que es necesario un sistema de comunicaciones que ponga a disposición de los usuarios los recursos radioeléctricos necesarios.

Uno de los puntos importantes en el ámbito militar y de seguridad pública es la noción de la interrupción del espectro, lo que significa que determinadas bandas del espectro destinadas para el uso comercial (usuarios primarios) podrán ser interrumpidas y ocupadas por motivos de seguridad pública. Esto no ocurre en la mayoría de casos en el mundo, ya que los sistemas de comunicación para estos fines se han desarrollado en forma aislada de la infraestructura comercial. El escenario contrario también se puede contemplar, en donde la regulación asigna subbandas de frecuencias para servicios de emergencias o seguridad pública, el cual estaría disponible para los servicios comerciales sólo si es posible recuperarlas inmediatamente al presentarse una emergencia grave. Al tratarse de seguridad pública, que generalmente es y debe ser un ámbito de alta prioridad, es necesario disponer de servicios de comunicaciones rápidas y fiables con los servicios de salud y el personal de ayuda local implicada en la toma de decisiones para salvaguardar vidas humanas, por ende, la compartición de bandas y/o subbandas de frecuencias con otros usuarios (dada la subutilización del espectro en general), es un pequeño precio a pagar por conseguir estas metas. De este modo, se puede afirmar que para el caso de emergencias y/o seguridad pública, el despliegue de CR ofrece una serie de potenciales ventajas para mejorar considerablemente los servicios de radiocomunicaciones en distintos países.

5.3 ÁMBITO COMERCIAL

En este aspecto en particular, existen muchas oportunidades para la Radio Cognitiva en operar bajo nuevos regímenes de administración del espectro y brindar varios servicios de inalámbricos de interés al acceder a más sub bandas de frecuencias; así como también existen oportunidades de mejorar los diferentes sistemas actuales de radio con redes cognitivas. Es posible imaginar toda una serie de escenarios que pueden hacer uso de esta tecnología, pero a continuación, se va a considerar tres áreas específicas que prometen ser beneficiadas de una manera especial.

5.3.1 DIVIDENDO DIGITAL Y ESPACIOS DE TELEVISIÓN ABIERTA

Una de las grandes posibilidades a mediano y largo plazo para la Radio Cognitiva está en la provisión de banda ancha inalámbrica utilizando las subbandas de frecuencias de televisión actual. El dividendo digital es el nombre dado a la porción del espectro radioeléctrico que quedará libre cuando se migre o cambie los canales de televisión analógica actual, a la operación digital, debido a que se asignará otra banda de frecuencias para aquel servicio.

Considerando que el servicio de televisión analógica utiliza grandes cantidades de espectro (6 MHz de ancho de banda para la norma NTSC32), la utilización de esta banda libre de televisión permitirá un aumento considerable en la eficiencia de uso de esta valiosa banda del espectro, que puede utilizarse para aumentar o mejorar los servicios de radiocomunicaciones actuales.

Para apreciar más de cerca el impacto de la transición al sistema digital, se toma como ejemplo la experiencia de Estados Unidos, en donde se tiene canales de televisión analógica de 6 MHz cada uno, que van desde 54 hasta 806 MHz del espectro (bandas VHF y UHF). Con televisión digital, se requerirá menor ancho de banda para los canales dado que este sistema de transmisión es seis veces más eficiente, por lo tanto se podrá disponer de una buena parte esa banda para otras posibles aplicaciones. En la *Figura 5.1.*, se puede apreciar el espectro disponible o "en blanco" que queda en la ciudad de San Francisco, USA, después de la transición a televisión digital ocurrida hace pocos años.

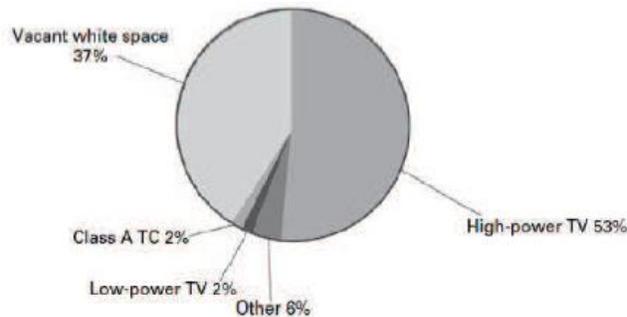


Figura 5.1. Espacio en blanco del espectro en la ciudad de San Francisco, USA, después de la transición a Televisión Digital. Fuente: análisis de factibilidad para la utilización de Cognitive radio (radio cognoscitiva) en las radiocomunicaciones necesarias para casos de emergencia en el Ecuador. Autor David Antonio Segura Briones.

CR pueden superponer sus transmisiones en los espacios en blanco de televisión después de la transición a televisión digital, para lo cual debe ser capaz de detectar la presencia de las estaciones de televisión. Actualmente, muchos entes reguladores de varios países (como el OFCOM del Reino Unido) están proponiendo la utilización de CR para utilizar el dividendo digital de las bandas de televisión desocupadas, y organismos internacionales de regulación como la IEEE han presentado recomendaciones para ello.

5.3.2 SISTEMAS DE COMUNICACIÓN UWB

Los sistemas de comunicaciones inalámbricas con tecnología de Ultra Wide Band (UWB) serían mejorados con la aplicación de técnicas de Radio Cognitivo, ya que es una tecnología de radio que utiliza un ancho de banda muy grande (aproximadamente de 500 MHz) pero a un nivel de potencia bajo, justo por encima del nivel de ruido, por lo tanto, es utilizado en comunicación de corto alcance. El enfoque del funcionamiento de UWB puede apreciarse mejor en la *Figura 5.2*.

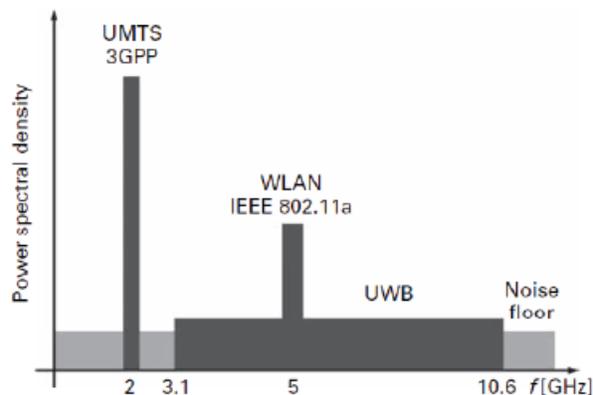


Figura 5.3. Operación de UWB. Fuente: análisis de factibilidad para la utilización de Cognitive radio (radio cognoscitiva) en las radiocomunicaciones necesarias para casos de emergencia en el Ecuador. Autor David Antonio Segura Briones.

Por lo tanto, UWB podría coexistir con otros sistemas de comunicaciones con señales más fuertes y no interferir de una manera significativa con éstos, proveyendo tasas de transmisión altas en distancias más cortas (en el rango de metros). A pesar de ello, UWB posee algunos inconvenientes de interferencia con sistemas de baja potencia, como receptores GPS (*Global System Positioning*), lo que ha limitado la operación de UWB en ciertas bandas. Con capacidades cognitivas, UWB sería capaz de determinar cuándo y dónde podría realizar sus transmisiones, inclusive, en qué bandas de frecuencias si se dispone de los anchos de banda apropiados, de una manera más dinámica y así superar las limitaciones de UWB.

5.3.3 PUESTA EN COMÚN DEL ESPECTRO (POOLING)

El manejo del espectro es un concepto que se ha manejado dentro del funcionamiento de *CR*, y uno de los que más se utiliza para diversas aplicaciones inalámbricas es el *pooling* del espectro, lo que significa poner los recursos radioeléctricos dentro de un fondo común (*pool*), para compartirlo con otros usuarios con beneficio para todos.

En este caso, todo el espectro disponible es puesto en un *pool* mediante un mecanismo de redistribución adecuada, se utiliza por un cierto periodo de tiempo, y es puesto de nuevo en el *pool* para redistribuirlo nuevamente. Este mecanismo puede ser visto como una alternativa a la asignación del espectro que actualmente se realiza en la mayoría de países, y permite reaccionar dinámicamente a las

demandas de este recurso. Por ejemplo, un grupo de operadores de comunicaciones (como sistemas celulares 3G) podrían usar un fondo común o *pool* de espectro, para posteriormente pasar a la fase de distribución entre los operadores en proporción al espectro que cada uno puso a disposición del *pool*. Un terminal de Radio Cognitivo tiene el potencial para actuar por el usuario (como un agente autónomo), realizando ofertas y accediendo al *pool* para obtener los recursos. Esta forma de manejo dinámico del espectro mediante el uso de un fondo común compartido, requiere de nuevos protocolos de comunicación más complejos para una sincronización, pero en escenarios donde hay una cantidad limitada de espectro disponible, y a su vez, con un reducido número de entidades con derecho a las subbandas del espectro, este método de acceso al espectro sería viable para satisfacer las demandas de los usuarios y aplicaciones inalámbricas.

5.4 CASOS DE EXITO

5.4.1 SPEAKEASY

La primera implementación conocida del concepto CR fue en el proyecto militar estadounidense SpeakEasy, cuyo objetivo principal era implementar más de 10 tipos de tecnologías de comunicaciones inalámbricas – que en el momento eran las más usadas por las Fuerzas Armadas de Estados Unidos – en un equipo programable, el cual operaría en una banda de frecuencias desde los 2MHz hasta los 200MHz.

Un objetivo adicional del proyecto era que el prototipo debía tener la posibilidad de actualizar su código para que así se pudieran tener en cuenta los estándares futuros. Dicho proyecto empezó en 1991 y solo en 1995 fue posible lograr todos los objetivos planteados. Sin embargo hubo cierto descontento debido a que sólo se podía mantener una comunicación a la vez, por lo cual se modificaron sus alcances llevándolo así a una segunda fase en la cual se trabajarían aspectos como disminución de peso y costo, incremento en su capacidad de procesamiento, simultaneidad de comunicaciones, diseño basado en arquitecturas de software libre, entre otros.

La nueva fase del proyecto sólo necesito 15 meses para lograr sus objetivos, obteniendo así importantes resultados que llevaron a la producción del dispositivo diseñado, el cual trabajó en el rango de 4MHz a 400MHz SpeakEasy es el primer proyecto que se conoce que haya trabajado con FPGA para procesamiento de datos digitales radiados, pero en la actualidad SDR es una tecnología que ha tomado gran auge en el mundo.

5.4.2 USRP (UNIVERSAL SOFTWARE RADIO PERIPHERAL)

Implementada en los Estados Unidos por la compañía Ettus Research. Cuando se combina con el software de código abierto GNU Radio, se obtiene un sistema de software de radio completamente abierto que permite el procesamiento de señales basado en host en las plataformas de los productos básicos. [20] El USRP es lo suficientemente flexible para dar cabida a otras opciones. Algunos usuarios han creado sus propios entornos de SDR para el USRP, mientras que otros han integrado el USRP en el LabView y Matlab/Simulink.

En la Universidad de Kansas, en 2007, se implementó un prototipo de dispositivo SDR denominado KUAR (Kansas University Agile Radio). Este dispositivo, compatible también con el software GNU Radio, supera considerablemente a la USRP, pues puede funcionar en un amplio rango de frecuencias, al igual que la implementación de la compañía Ettus Research, sin necesidad de acoplar distintos Front-Ends de RF.

Los siguientes aspectos técnicos son necesarios para la operación de esta tecnología:

1. Garantizar que los dispositivos disponen de las suficientes características técnicas para evitar interferir con las señales de los usuarios primarios.
2. Garantizar técnicas de detección rápidas, adaptativas y fiables, de modo que se tenga un conocimiento en tiempo real de la ocupación espectral en un determinado entorno geográfico, para minimizar interferencias en los usuarios primarios.
3. Definir las bandas o sub-bandas de frecuencias en las que operarían las tecnologías de acceso al espectro basado en oportunidad, teniendo en cuenta la aplicación. Es fundamental que CR acceda a aquellas frecuencias desocupadas en determinadas bandas que deben definirse para un acceso dinámico. Este aspecto corresponde al ámbito regulatorio, a la administración del espectro.
4. Definir las características técnicas y modos de operación de los sistemas y equipos cognitivos.

5.4.3 CAMBRIDGE TV WHITE SPACES [26]

<http://www.microsoft.com/presspass/emea/presscentre/pressreleases/June2011/CambridgeTVWhiteSpacesConsortium.msp>

Microsoft es una de las empresas implicadas en la prueba de Cambridge TV White Spaces, una iniciativa diseñada para explorar la conectividad en cualquier momento y en cualquier lugar al optimizar el uso del espectro de emisión.

La nueva prueba iniciada en Cambridge podría resultar clave en resolver el problema cada vez más crítico de proporcionar conectividad a ordenadores portátiles, tabletas, teléfonos inteligentes y otros dispositivos conectados, no sólo en el Reino Unido, sino también en todo el mundo.

Pero para que la visión de radio cognitiva y banda ancha dinámica se convierta en realidad, hay que eliminar las limitaciones del actual modelo de asignación de espectro de emisión.

"Algunas de las empresas que participan en la prueba de Cambridge han trabajado en estas tecnologías durante años. En cuanto a nosotros, hemos trabajado duro para tratar de compartir el espectro y diseñar un sistema que permite que las radios cognitivas se conecten perfectamente sin interferencias," reveló Dan Reed, vicepresidente corporativo de Technology Policy Strategy & Extreme Computing Group en Microsoft.

Un primer paso muy importante en la dirección correcta implica dar luz verde a la utilización sin licencia de espacios en blanco de TV. Esto ya ha ocurrido en los Estados Unidos, pero se necesita más flexibilidad de regulación en todo el mundo.

Una revolución en cuanto a la conectividad está en juego, y el mayor número de beneficios será para los consumidores, pero habrá también ventajas adicionales, especialmente cuando se trata nuevos servicios y oportunidades de negocio.

"Las redes inalámbricas que utilizan los espacios en blanco de TV pueden proporcionar conectividad similar al Wi-Fi, pero con áreas de cobertura que se miden en kilómetros en lugar de metros," explicó Reed.

"Radio también es igualitaria en que el costo para vincular un usuario que está a 30 metros es el mismo que el costo de atender a un usuario que se encuentra a varios kilómetros de distancia. Una vez que se enciende una estación base, todo el mundo dentro del rango tiene acceso.

"Además, cuanto más rural sea el usuario, menos intensamente se utiliza el espectro radioeléctrico, que permite mayores velocidades de datos para los usuarios rurales que no tienen acceso directo a fibra u otras conexiones de banda ancha con cables."

En la prueba de Cambridge TV White Spaces, Microsoft se une a empresas como BBC, BSkyB, BT, Cambridge Consultants, Neul, Nokia, Samsung, Spectrum Bridge Inc., TTP, Adaptrum y KTS, con el regulador de transmisión Ofcom de Reino Unido ofreciendo al consorcio una licencia de prueba en múltiples sitios.

5.4.4 SISTEMA DE PRUEBA OFRECE LLAMADAS, MENSAJES DE TEXTO, Y DATOS ENVIANDO SEÑALES A TRAVÉS DE LOS INTERCOMUNICADORES PARA BEBÉS Y LOS TELÉFONOS INALÁMBRICOS

<http://www.laflecha.net/canales/moviles/noticias/un-sistema-de-prueba-ofrece-llamadas-mensajes-de-texto-y-datos-enviando-senales-a-traves-de-los-intercomunicadores-para-bebes-y-los-telefonos-inalambricos>

Una red de prueba de teléfonos móviles en Fort Lauderdale, Florida, se las arregla para funcionar sin algo que todos los proveedores de servicios inalámbricos necesitan: su propia señal. En cambio, XG Technology, creadora de la red, utiliza las estaciones base y terminales de su propio diseño que dirigen las señales a través de la banda libre de 900 MHz, utilizada por los teléfonos inalámbricos y otros dispositivos de corto alcance.

Sus radios cognitivas están integradas tanto en las estaciones base de la red de prueba, llamada xMax, como en los teléfonos creados para ella. Cada radio busca un espectro claro 33 veces por segundo. Si otra señal es detectada, la terminal y la estación base se vuelven a sintonizar para evitar la otra señal, manteniendo la conexión con vida. Cada una de las seis estaciones base en la red de XG pueden dar servicio a dispositivos en un radio de 2,5 kilómetros, algo comparable a la media de una torre de teléfonos móviles.

Aunque la mayoría de las radios sólo pueden utilizar las frecuencias que son completamente claras, las radios de xG pueden desbloquear más espacio libre mediante el análisis de canales cuyo uso varíe con el tiempo, asegura Rotondo. Las señales pueden entonces ser insertadas entre estallidos de actividad desde un dispositivo que use ese canal.

5.4.5 SISTEMAS DE RADIOCOMUNICACIONES UTILIZADOS PARA CASOS DE EMERGENCIA EN EL ECUADOR. [28]

Se presenta la descripción de un sistema de radiocomunicaciones con tecnología Radio cognitiva, su distribución para servir a la ciudad de Quito-Ecuador.

El sistema que se implementó se realizó con el fin de crear redes cognitivas utilizando bandas de frecuencia desocupadas para interconectar dispositivos de radiocomunicaciones en casos de emergencia como inundaciones y deslizamientos de tierra. Este se implementó en Diciembre de 2010.

Ecuador, debido a su situación y ubicación geográfica ha tenido que afrontar una serie de desastres y catástrofes debido a varios factores naturales como el clima,

orografía, topografía, hidrografía, etc.; así como también a factores humanos que han provocado emergencias y accidentes de diversa índole, por lo cual se considera que presenta un alto grado de vulnerabilidad y riesgo ante diversas amenazas o factores externos potencialmente peligrosos de origen natural y provocados, tal como se lo ha evidenciado con los múltiples eventos ocurridos a lo largo de su historia.

Determinadas comunicaciones inalámbricas generalmente dejan de trabajar en situaciones extremas debido al daño de infraestructuras, congestión causada por la demanda abrumadora de comunicaciones y parámetros anormales como cambios drásticos en la interfaz de aire a causa de las condiciones climáticas durante algún desastre natural o emergencia grave. Establecer transmisiones de radio bajo este tipo de condiciones extremas es crucial para que los organismos encargados efectúen las acciones de respuesta.

La actual infraestructura de radiocomunicaciones utilizada para emergencias en el Ecuador se encuentra lejos de satisfacer todos los requerimientos necesarios para estas eventualidades. Además, no existe una infraestructura común o tecnología definida en la mayoría de entidades de seguridad pública lo que resulta difícil y demoroso el establecimiento de comunicaciones entre éstas. Entonces, se puede afirmar que existe una pérdida de tiempo vital en las primeras horas de un siniestro, lo que puede costar vidas humanas.

Acorde con la Dirección Nacional de Defensa Civil de Perú, en su publicación "*Terremoto de Pisco de 2007: Lecciones Aprendidas*", se manifestó, entre varios aspectos, que al ocurrir este desastre natural de tal magnitud, la mayoría de los sistemas de comunicaciones colapsaron, especialmente las redes de telefonía celular las cuales no funcionaron después del siniestro debido a la congestión y daño de su infraestructura. Adicionalmente se recomienda que debe existir una mejor planificación entre los organismos de ayuda, lo que incluye una mejor comunicación y coordinación entre ellos durante desastres de este tipo. Así mismo, luego de los efectos devastadores sucedidos en las costas del Golfo de México en Estados Unidos provocados por el paso del Huracán Katrina, la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) tomó algunas medidas relacionadas a los problemas de interoperabilidad entre los organismos de ayuda, sobre las cuales se estaba trabajando desde los ataques terroristas ocurridos el 11 de septiembre de 2001, y que les fueron evidentes durante el paso de este huracán.

Adicionalmente, la FCC resolvió asignar 108 MHz de espectro dentro de la banda de 700 MHz para seguridad pública, darle prioridad a organismos de seguridad para el uso de frecuencias comerciales y de su plataforma tecnológica en situaciones de emergencia para fomentar la interoperabilidad, y finalmente, se ordenó que los transmisores de televisión abierta analógica completen la transición a tecnologías de transmisión digital hasta febrero de 2009, de modo que

dejen libres las frecuencias en las bandas VHF y UHF para ubicar servicios inalámbricos comerciales y de seguridad pública.

Acorde con lo anteriormente mencionado, durante el transcurso de una emergencia grave, catástrofe o desastre natural, se identifican los siguientes problemas principales de carácter técnico en los sistemas de radiocomunicaciones utilizados para emergencias:

- Falta del recurso del espectro radioeléctrico, debido a la congestión y crecimiento sostenido de nuevos usuarios especialmente durante emergencias, o en otras palabras, una utilización más apropiada de este recurso.
- Utilización de otras tecnologías inalámbricas emergentes para lograr una comunicación más eficiente y segura.
- Problemas de Interoperabilidad entre los organismos de seguridad pública y emergencias, dada la incompatibilidad de equipos de radio y asignación de varias subbandas de frecuencias, de modo que exista un sistema coordinado de acción.

En resumen se puede afirmar que la congestión de las comunicaciones dada la naturaleza de las situaciones extremas y la interoperabilidad son los principales problemas que hacen insuficientes los actuales sistemas de radiocomunicaciones para garantizar unas comunicaciones más eficientes, y así efectuar de mejor manera las actividades de rescate en emergencias y poder salvar más vidas.

Adicionalmente, para situaciones catastróficas, muchos autores han establecido que las comunicaciones de voz en tiempo real no constituyen la única aplicación para efectuar las acciones de respuesta. Con CR, se puede incorporar fácilmente otros servicios de banda ancha o multimedia como transmisión de vídeo, datos y servicios basados en localización, tomando en cuenta la capacidad de añadir nuevas aplicaciones en radios basados en software como SDR y en las capacidades Cognitivas en sí.

CONCLUSIONES

- El despliegue de sistemas Cognitivos en general, a primera vista plantea un entorno de liberalización y nueva gestión del espectro radioeléctrico para lograr un acceso dinámico y compartido por varios usuarios. Sin embargo, la regulación de servicios y restricciones en el funcionamiento de los sistemas que utilizan el espectro no puede ser descartado ya que una normalización es fundamental para asegurar el buen desempeño de los diferentes dispositivos acorde con las leyes y reglamentos vigentes de acuerdo a cada país. Esto implica que *Radio Cognitivo* debe cumplir alguna de las especificaciones y estándares que se están investigando y que definen conceptos, alcances, aplicaciones y servicios para este tipo de sistemas.
- Legalmente no es factible la utilización y despliegue de sistemas cognitivos debido a que las distintas legislaciones actuales establecen la concesión de frecuencias como requerimiento obligatorio para la utilización del espectro radioeléctrico, sin amparar la utilización esporádica, temporal u “oportunista” de aquellas que se encuentran desocupadas, tal como se define la operación de Radio cognitivo.
- Como se apreció en el capítulo 5 Casos de éxito. Podemos concluir que en ciertos casos es viable la implementación de redes Ad-hoc Cognitivas, por ejemplo en casos de emergencia, mediante esta tecnología será más útil la utilización del espectro y permitiría la conexión de distintos dispositivos, Además, dada la vulnerabilidad de emergencias graves o catástrofes , es necesario que se efectúen estudios técnicos y regulatorios para la operación de los sistemas de radiocomunicaciones utilizados por los servicios de emergencias, catástrofes y protección pública en general, orientados a establecer una banda o subbanda de frecuencias del espectro para su uso exclusivo acorde con las recomendaciones y normas internacionales, así como también una norma que garantice su mejor operación y despliegue.
- Debido a que Radio cognitivo es una tecnología que todavía se encuentra en desarrollo y proceso de estandarización, y por ende todavía no existe equipos en el mercado para su libre utilización, no fue posible dar una especificación referente al análisis económico para la implementación de esta tecnología en el capítulo 3, Limitaciones económicas.
- Existen distintas tecnologías inalámbricas para la creación de redes Ad-hoc, el beneficio que ofrece radio cognitivo para su implementación, es realizar

el mejor uso del espectro posible, y utilizar los recursos disponibles en frecuencias y ancho de banda, independientemente de la tecnología que ofrezca el servicio, y de la que se utilice.

- los equipos que implementan tecnología Radio cognitiva, necesitan seguir un proceso de estandarización y comercialización, a fin de garantizar que cumplan con las especificaciones técnicas necesarias de modo que no afecten a otras redes de telecomunicaciones, no existan interferencias perjudiciales y aseguren un nivel de calidad de comunicación aceptable.

BIBLIOGRAFIA

- [1] National Telecommunications and Information Administration (NTIA), "FCC Frequency Allocation Chart," 2003.
- [2] FCC, Spectrum Policy Task Force Report, ET Docket No. 02-155. Nov. 2002.
- [3] FCC, "Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies" ET Docket No. 03 108, Dec. 2003.
- [4] Joseph Mitola, III, "Radio cognitivo for Flexible Multimedia Communications", Mobile Multimedia Communications, 1999. (MoMuC '99) 1999 IEEE International Workshop on, pp. 3 –10, 1999.
- [5] CHEN, Kwang-Cheng; PRASAD, Ramjee: "COGNITIVE RADIO NETWORKS". Editorial Wiley. Chippenham, England. 2009.
- [6] Commission for Communications Regulation (ComReg). "DYNAMIC SPECTRUM ACCESS – Briefing Note". Document No. 07/22. 13th, April 2007. <http://www.comreg.ie/>
- [7] DOYLE, Linda; "ESSENTIALS OF COGNITIVE RADIO". Cambridge University Press, Cambridge Wireless Essentials Series. New York, USA. 2009.
- [8] ERPEK, Tugba; STEADMAN, Karl; JONES, David; "SPECTRUM OCCUPANCY MEASUREMENTS, Dublin, Ireland". Technical Report (Apr. 16-18, 2007). Shared Spectrum Company. <http://www.sharespectrum.com/>
- [9] FETTE, Bruce; "COGNITIVE RADIO TECHNOLOGY". Editorial Academic Press AP, Segunda Edición. Burlington, MA. USA. 2009. (8)
- [10] HAYKIN, Simon; "COGNITIVE RADIO: BRAIN-EMPOWERED WIRELESS COMMUNICATIONS". IEEE Journal on Selected Areas in Communications. February 2005.
- [11] HOSSAIN, Ekram; BHARGAVA, Vijay: "COGNITIVE WIRELESS COMMUNICATION NETWORKS". Editorial Springer. New York, USA. 2007.
- [12] HU, Fei; XIAO, Yang; "COGNITIVE RADIO NETWORKS". Editorial CRC Press. Boca Raton, FL. USA. 2009. (7)
- [13] Narayan B. Mandayam. Talk of Radio cognitivo Networks & The Future Internet DIMACS workshop on Next Generation Networks, August, 2007, Rutgers University, US

[14] S. Sankaranarayanan, P. Papadimitratos, A. Mishra, S. Hershey, "A bandwidth sharing approach to improve licensed spectrum utilization", in Proc. IEEE Dyspan 2005, PP. 279-288, Nov. 2005.

[15] J. Neel, R. Gilles, "The Role of the Game Theory in the Analysis of Software Radio Networks", Proc. Software Defined radio Forum Technical Conference and Product Exhibition (SDR'02), vol. 2

[16] http://www.crtwireless.com/files/LeB_2.pdf

[17] http://www.fcc.gov/Bureaus/Engineering_Technology/Documents/cognitive_radio/fcc_cognitive_radio_fette_v8.ppt

[18] J. Mitola, "Cognitive Radio," Licentiate proposal, KTH, Stockholm, Sweden, Dec. 1998.

[19] R. W. Brodersen et al., "CORVUS: A Cognitive Radio Approach for Usage of Virtual Unlicensed Spectrum," White Paper, Berkeley Wireless Research Center, 2004.

[20] http://www.elpais.com/articulo/Pantallas/radio/busca/huecos/evitar/interferencias/elpepirtv/20110427elpepirtv_3/Tes

[21] http://www.gradiant.org/index.php?option=com_content&view=article&id=199%3Aradio-cognitiva-nuevos-usos-del-espectro&catid=1%3Anoticias&Itemid=7&lang=es

[22] http://www.idi.aetic.es/eMOV/CLI_AETIC/ftpportalweb/documentos/2_eMOV_A_El_Radio_Redes_cognitivas_web.pdf

[23] Niels Aakvaag, Jan-Erik Frey "Redes de sensores inalámbricos: Nuevas soluciones de interconexión para la automatización industrial". Revista ABB 2/2006.

[http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A019E9833DCF2819C1257199004E5DD2/\\$File/39-42%202M631_SPA72dpi.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot271.nsf/VerityDisplay/A019E9833DCF2819C1257199004E5DD2/$File/39-42%202M631_SPA72dpi.pdf)

[24] http://cms-static.colombiaaprende.edu.co/cache/binaries/articles-186370_constitucion_politica.pdf?binary_rand=1416

[25] <http://transition.fcc.gov/ib/initiative/files/cg/spanish/10.pdf>

[26] <http://news.softpedia.com/es/Microsoft-esta-implicado-en-la-prueba-de-Cambridge-TV-White-Spaces-208248.html>

[27] <http://www.wired.com/science/discoveries/news/2006/06/70933&ei=8q8jTtW6JpS30AHe->

[4idAw&sa=X&oi=translate&ct=result&resnum=10&ved=0CHQQ7gEwCQ&prev=/se
arch%3Fq%3DUSRP%26hl%3Des%26prmd%3Divns](#)

[28]David Antonio Segura Briones “análisis de factibilidad para la utilización de *Cognitive radio* (radio cognoscitiva) en las radiocomunicaciones necesarias para casos de emergencia en el ecuador”2010.