



Universidad
de Granada

ESTUDIOS DE INGENIERÍA
DE TELECOMUNICACIÓN

PROYECTO FIN DE CARRERA

**DESPLIEGUE DE FEMTOCELDAS EN
ENTORNOS MULTIOPERADOR SOBRE
TV WHITE SPACE**

CURSO 2013/2014

Ana María López Pérez

El tribunal constituido para la evaluación del proyecto PFC titulado:

**Despliegue de femtoceldas en entornos multioperador
sobre TV White Space.**

Realizado por la alumna: **Ana María López Pérez**

Y dirigido por el tutor: **Jorge Navarro Ortiz**

Ha resuelto asignarle la calificación de:

- SOBRESALIENTE (9 - 10 puntos)
- NOTABLE (7 - 8.9 puntos)
- APROBADO (5 - 6.9 puntos)
- SUSPENSO

Con la nota: puntos.

El Presidente:

El Secretario:

El Vocal:

Granada, a de de 2013



Universidad
de **Granada**

ESTUDIOS DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIÓN

**DESPLIEGUE DE FEMTOCELDAS EN ENTORNOS
MULTIOPERADOR SOBRE TV WHITE SPACE.**

REALIZADO POR:

Ana María López Pérez

DIRIGIDO POR:

Jorge Navarro Ortiz

DEPARTAMENTO:

Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones.

Granada, Diciembre de 2013.

DESPLIEGUE DE FEMTOCELDAS EN ENTORNOS MULTIOPERADOR SOBRE TV WHITE SPACE.

Ana María López Pérez

PALABRAS CLAVE:

TV White Space (TVWS), Compartición de Espectro, Teoría de Juegos, Femtocelda, Interferencia Cocanal, Equilibrio de Nash, Negociación.

RESUMEN:

El avance de la tecnología y la creciente demanda de ubicuidad en las comunicaciones han hecho proliferar, en los últimos años, aplicaciones tecnológicas que requieren el uso del espectro radioeléctrico como recurso, conduciendo a una situación de escasez de dicho espectro. Por ello, son muchos los países (por ejemplo EEUU, UK) que han optado por permitir el uso sin licencia de zonas del espectro de los canales no utilizados en la banda de televisión (denominados TV White Spaces). Además hay otros países que ya lo están estudiando (por ejemplo la Unión Europea).

Este proyecto propone el uso de femtoceldas (por ejemplo LTE o LTE-Advanced) para realizar un traspaso de parte del tráfico en la banda de televisión. Para ello se ha diseñado e implementado un simulador extensible y reutilizable que supone una solución completa al problema de reparto y negociación de canales en redes multioperador operando sobre los TVWS: creación del escenario de operación, estimación del modelo de propagación, extracción de parámetros y características, y cálculo de medidas de calidad como la relación señal a ruido más interferencia (SINR) y la tasa de transferencia (*throughput*).

Para su desarrollo se ha escogido el entorno de programación Matlab, al ser una herramienta de cálculo intensivo muy potente y de uso extendido en el área de procesamiento de señales y comunicaciones.

DESPLIEGUE DE FEMTOCELDAS EN ENTORNOS MULTIOPERADOR SOBRE TV WHITE SPACE.

Ana María López Pérez

KEYWORDS:

TV White Space (TVWS), Spectrum-Sharing, Channel Allocation, Game Theory, Femtocells, Co-channel Interference, Nash Equilibrium, Bargaining.

ABSTRACT:

The advancement of technology and the growing demand for ubiquitous communications during the last years have increased the number of technological applications that require the use of the radio spectrum as a resource, causing spectrum scarcity. Consequently, many countries (for example USA, UK) are allowing the use of non-utilized channels in the television band, known as Television White Spaces (TVWS), to provide communication services to unlicensed users. There exist other countries (for example the European Union) that are studying this new spectrum opportunity.

This M.Sc. Thesis proposes the usage of femtocells (for example LTE or LTE-Advanced) to offload data traffic onto the television band. For this reason, an extensible and reusable simulator has been designed and implemented, which provides a complete solution to the channel allocation problem: creating the environment to be simulated, estimation of the radio propagation model, extraction of the main parameters and characteristics, and computation of some quality metrics, e.g. the signal to interference plus noise ratio (SINR) or the achieved *throughput*.

Matlab has been chosen as the programming environment because of its computational capabilities and since it is a tool widely used in the signal processing and communications areas.

D. Jorge Navarro Ortiz, profesor del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada, como director del Proyecto Fin de Carrera de Dña. Ana María López Pérez

Informa:

que el presente trabajo, titulado:

Despliegue de Femtoceldas en entornos multioperador sobre TV White Space.

Ha sido realizado y redactado por la mencionada alumna bajo mi dirección, y con esta fecha se autoriza a su presentación.

Granada, a de de 2013

Fdo. Jorge Navarro Ortiz

Los abajo firmantes autorizan a que la presente copia de Proyecto Fin de Carrera se ubique en la Biblioteca del Centro y/o departamento para ser libremente consultada por las personas que lo deseen.

Granada, a de de 2013

Fdo. Jorge Navarro Ortiz

Fdo. Ana María López Pérez

Agradecimientos

*La prueba más clara de sabiduría
es una alegría continua.*

“Montaigne”

Este proyecto representa la finalización de una fase muy importante en mi vida y, aunque gracias a él he tenido más de un quebradero de cabeza, observando el resultado final, tengo una sensación difícil de explicar. No sé si se debe a la alegría que me da el haberlo terminado o tal vez a que en realidad pienso que he realizado un trabajo digno.

Que me sienta orgullosa de este proyecto se lo debo en primer lugar a Jorge Navarro Ortiz, mi tutor, que gracias a la dedicación, atención, paciencia, dirección y comprensión que ha tenido conmigo durante la realización de este proyecto, han provocado que le admire aún más. Muchas gracias por todo.

También se lo debo agradecer por supuesto a mis padres, Felipe y Dolores, a mi familia, a Rubén, a mis compañeros y amigos surgidos durante todo el proceso de aprendizaje, que finaliza con la realización de este proyecto. Todos ellos han sido los que han sufrido el lado oscuro que tiene la creación de un proyecto fin de carrera.

Gracias a todos por apoyarme, soportarme y sobre todo por haberme animado, comprendido y ayudado.

ÍNDICE GENERAL

Índice de figuras.....	XIX
Índice de tablas.....	XXIII
Glosario	XXV
1. Introducción.....	1
1.1 Contexto.....	1
1.1.1 Entidades reguladoras.....	3
1.2 Motivación.....	4
1.3. Objetivos y alcance del proyecto.....	6
1.4 Estructura de la memoria	7
2. Planificación y estimación de costes	9
2.1 Recursos	9
2.1.1 Humanos	9
2.1.2 <i>Hardware</i>	9
2.1.3 <i>Software</i>	9
2.2 Fases de desarrollo.....	10
2.2.1 Revisión del estado del arte	10
2.2.2 Especificación de los requisitos.....	10
2.2.3 Diseño.....	10
2.2.4 Implementación.....	10
2.2.5 Evaluación y pruebas.....	10
2.2.6 Documentación	11
2.3 Estimación de costes.....	11

4.3.2	Existencia de NE.....	50
4.3.3	Equilibrio en estrategias mixtas.....	52
4.3.4	Óptimo de pareto.....	53
4.4	Juegos potenciales.....	54
4.4.1.	Relación entre clases potenciales	57
5.	Negociación.....	59
5.1	Introducción.....	59
5.2	Mecanismos de compartición de espectro TVWS existentes	60
5.2.1	Compartición de espectro entre sistemas inalámbricos heterogéneos....	61
5.2.2	Compartición de espectro entre operadores WiFi	63
5.3	Mecanismo de compartición de espectro desarrollado.....	66
5.3.1	Modelado de juego	67
5.3.2	Modelado de las negociaciones.....	71
6.	Entorno de evaluación	77
6.1	Topología.....	77
6.1.1	Modelo <i>dual stripe</i>	77
6.1.2	Modelo en <i>grid</i>	78
6.2	Modelos de propagación.....	79
6.2.1	Modelo <i>dual stripe</i>	80
6.2.2	Modelo de propagación en interiores para TVWS	82
6.3	Sistema de transmisión	85
6.3.1	Infraestructura de la red.....	87
6.3.2	EStandardización en el 3GPP	88
6.3.3	Limitaciones en los sistemas trasmisores y receptores.....	92
7.	Entorno de simulación.....	95
7.1	Estructura del simulador.....	95
7.2	Estructura detallada del simulador	98
7.2.1	Configurar el archivo de configuración	99

7.2.2 Selección de escenario	101
7.2.3 creación del escenario.....	101
7.2.4 Generar operadores y sus femtoceldas.....	101
7.2.5 Agregar femtoceldas al escenario.....	102
7.2.6 Representar femtoceldas sobre el escenario indicando el operador.....	102
7.2.7 Asignar canal inicial a cada femtocelda.....	103
7.2.8 Realizar modelos de propagación	104
7.2.9 Representación modelos de propagación y SINR.....	105
7.2.10 Realizar negociación.....	105
7.2.11 Cálculo SINR.....	109
7.2.12 Cálculo del <i>throughput</i>	110
7.2.13 Representación CDF de la SINR y del <i>throughput</i>	111
7.2.14 Cálculo del 5 y 95 percentil.....	111
8. Resultados	113
8.1 Escenario 1: Modelo <i>dual stripe</i>	113
8.1.1 Análisis del sistema completo.....	113
8.1.2 Análisis de la SINR, throughput, 5 percentil y 95 percentil de cada negociación.....	120
8.1.2.1 Topología 1: 1 operador con 30 femtoceldas.....	121
8.1.2.2 Topología 2: 3 operadores con 10 femtoceldas cada uno.....	123
8.1.2.3 Topología 3: 5 operadores con 6 femtoceldas cada uno.....	125
8.2 Escenario 2: Modelo en <i>grid</i>	129
8.2.1. análisis del sistema completo	129
8.2.2. Análisis de SINR, throughput, 5 percentil y 95 percentil de cada negociación.....	134
8.2.2.1 Topología 1: 1 operador con 30 femtoceldas.....	135
8.1.2.2 Topología 2: 3 operadores con 10 femtoceldas cada uno.....	137
8.1.2.3 Tpología 3: 5 operadores con 6 femtoceldas cada uno	139
9. Conclusiones.....	143

ÍNDICE GENERAL

Anexo I.....	145
Referencias.....	153

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1: Cuadro americano de asignación de frecuencias.....	2
1.2: Evolución en el uso del espectro.	5
2.1: Planificación temporal del proyecto.....	10
2.2: Coste monetario asociado a cada fase del proyecto.....	12
3.1: Estructura de bloques de un SDR.	16
3.2: Esquema general de funcionamiento de SDR.....	17
3.3: Espectro TVWS en Estados Unidos y Reino Unido.....	24
3.4: Clasificación de estándares IEEE 802 por área de cobertura.....	30
3.5: Ejemplo de sistema con topología centralizada 802.22.	31
3.6: Ejemplo de red TVWS incluyendo todos los elementos de la arquitectura 802.11af.....	32
3.7. Disponibilidad de canales de televisión en los Estados Unidos.	34
5.1: Interferencia potencial entre dos APs.	64
5.2: Zona de interferencia.....	65
5.3: Ejemplo de negociación <i>2-buyer-1-seller</i>	66
5.4: Ejemplo de negociación tipo 1.	73
5.5: Ejemplo de negociación tipo 2.	74
5.6: Ejemplo de negociación tipo 3.	75
5.7: Ejemplo de negociación tipo 4.	75
5.8: Ejemplo de negociación tipo 5.	76
6.1: Ejemplo de escenario 1.	78
6.2: Ejemplo de escenario 2.	78
6.3: Esquema general del despliegue de una red de femtocelda en una vivienda	87
6.4: Arquitectura típica del despliegue de una femtocelda en una vivienda.....	88
6.5: Punto de referencia Iuh.	90
6.6: Pila de protocolos de la interfaz Iuh.....	90

7.1: Diagramas de flujo de datos de alto nivel.....	97
7.2: Diagrama de expansión.....	97
7.3: Estructura completa del simulador.....	98
7.4: Sistema de carpetas y archivos del simulador.....	99
7.5: Estructura ficheros de configuración	100
7.6: Ejemplo de escenario tipo 1.....	103
7.7: Procedimiento para el cálculo de la SINR.....	110
8.1: Orden de ejecución del simulador.....	113
8.2: Red de femtoceldas creada en el escenario.....	114
8.3: Reparto inicial de canales.....	114
8.4: Distancia recorrida desde la femtocelda.....	116
8.5: Distancia recorrida por dentro de los <i>stripes</i> desde la femtocelda.....	116
8.6: Número de paredes atravesadas desde la femtocelda.	117
8.7: PL para todo punto del escenario desde la femtocelda.	117
8.8: SINR tras aplicar EVM para todo punto del escenario desde la femtocelda. ..	117
8.9: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 1.	119
8.10: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 2.	119
8.11: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 3.	119
8.12: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 4.	120
8.13: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 5.	120
8.14: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.	122
8.15: CDF del <i>Throughput</i> para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.	122
8.16: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.	124
8.17: CDF del <i>Throughput</i> para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.	124
8.18: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.	126
8.19: CDF del <i>Throughput</i> para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.	126
8.20: Red de femtoceldas creada sobre el escenario.	129
8.21: Reparto inicial de canales.....	130
8.22: Distancia recorrida desde la femtocelda.....	131
8.23: PL en todo punto del escenario desde la femtocelda.....	131

8.24: SINR tras aplicar EVM en todo punto del escenario desde la femtocelda.	132
8.25: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 1.....	133
8.26: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 2.....	133
8.27: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 3.....	133
8.28: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 4.....	134
8.29: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 5.....	134
8.30: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.....	136
8.31: CDF del <i>Throughput</i> para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.....	136
8.32: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.....	138
8.33: CDF del <i>Throughput</i> para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.....	138
8.34: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.....	140
8.35: CDF del <i>Throughput</i> para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.....	140

ÍNDICE DE TABLAS

2.1: Coste temporal del proyecto.	11
2.2: Coste temporal del proyecto.	12
2.3: Coste monetario del proyecto.	13
2.4: Presupuesto total del proyecto.	13
3.1: WSDs especificados por la FCC.	25
3.2: Mecanismos de reparto de espectro	38
4.1: Relación entre los elementos de juego y los componentes del proceso de decisión interactivo.	40
4.2: Relación entre los elementos de un juego y una red de radio cognitiva	44
5.1: Esquemas de compartición de espectro.	60
6.1: Modelo de propagación <i>Dual Stripe</i>	80
6.2: Modelo de propagación <i>Dual Stripe</i> adaptado a toda frecuencia	82
8.1: Ecuaciones PL modelo <i>Dual Stripe</i> .	115
8.2: Resultados obtenidos de SINR en las simulaciones para el escenario 1.	127
8.3: Resultados obtenidos de <i>throughput</i> en las simulaciones para el escenario 1	128
8.4: Resultados obtenidos de SINR en las simulaciones para el escenario 2	141
8.5: Resultados obtenidos de <i>throughput</i> en las simulaciones para el escenario	142

GLOSARIO

Símbolos

3GPP *3rd Generation Partnership Project*, es un acuerdo de colaboración entre diferentes organismos de estandarización para el desarrollo de especificaciones técnicas relacionadas con el ámbito de las telecomunicaciones.

A

ADC *Analog to Digital Converter* o conversor analógico digital.

ASE *Adaptative Spectrum Explotation* o explotación adaptativa de espectro.

ATSC DTV *Advanced Television System Commitee for Digital Television*, organización internacional, sin fines de lucro para el desarrollo de normas para la televisión digital.

ASIC *Application Specific Integrated Circuit*, circuito integrado diseñado específicamente para un propósito o aplicación especial

B

BB *Base Band* o banda base.

BER *Bit Error Rate* o tasa de error de bit.

BSS *Basic Service Sets*, proporciona el bloque de construcción básico de una LAN inalámbrica 802.11

BS *Base Station* o estación base.

C

CBP *Contention Beacon Protocol* o protocolo de contención de balizas.

- CCA** *Clear Channel Assessment* o mecanismos de evaluación de canal claro.
- CEPT** Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones.
- CER** Comité del Espectro Radioeléctrico.
- CPE** *Customer Premise Equipment* o equipos en las instalaciones del cliente.
- CFR** *Code of Federal Regulations*, es la codificación de las normas y reglamentos generales y permanentes publicadas en el Registro Federal por los departamentos ejecutivos y agencias del gobierno federal de los Estados Unidos.
- CNAF** Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias en España.
- COIT** Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación.
- CPT** *Control Power Transformers* o transformadores de control de potencia.
- CR** *Cognitive Radio* o Radio Cognitiva.
- CRAVE** *Singapore Cognitive Radio Venues*, banco de pruebas realizado por las entidades reguladoras de Singapur para evaluar las tecnologías de Radio Cognitiva sobre los TVWS.
- CSMA** *Carrier Sense Multiple Access*, protocolo de acceso múltiple por detección de portadora.

D

- DAC** *Digital to Analog Converter* o conversor digital a analógico.
- DARPA** *Defense Advanced Research Projects Agency*, agencia del Departamento de Defensa de los Estados Unidos responsable del desarrollo de nuevas tecnologías para uso militar.
- DCS** *Dinamic Channel Selection* o selección dinámica de canales.
- DDC** *Digital Down Conversion*, sistemas para la conversión de señales a banda base.
- DFS** *Dinamic Frequency Selection* o selección dinámica de frecuencias.
- DSA** *Dynamic Spectrum Access*. o acceso dinámico al espectro.
- DSP** *Digital Signal Processor* o procesador digital de señales.

DUC *Digital Up Conversion*, sistema para la conversión de señales a frecuencia intermedia.

E

ECC *Electronic Communication Committee o Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones*

ECMA *European Computer Manufacturers Association o Asociación Europea de Fabricantes de Equipos.*

EDT *Energy Detection Threshold* o umbral de detección de energía.

EU Equipo del Usuario.

EVM *Error Vector Magnitude.*

F

FAP *Femtocell Access Point* o femtocelda que actúa como punto de acceso.

FCC *Federal Communications Commission*, agencia estatal de Estados Unidos de América, encargada de la regulación de telecomunicaciones interestatales e internacionales por radio, televisión, redes inalámbricas, teléfonos, satélite y cable.

FEC *Forward Error Correction* o corrección de errores hacia adelante.

FFT *Fast Fourier Transform* o transformada rápida de Fourier.

FPGA *Field Programmable Gate Array*, dispositivos semiconductores que se basan en torno a una matriz de bloques lógicos configurables conectados a través de interconexiones programables

G

GDB *Geolocation Database* o base de datos de geolocalización.

GDDE *Geolocation-Database-Dependent-Entities* o entidades de geolocalización dependientes de la base de datos.

H

- HNB** *Home Node B*, término con el que el 3GPP's nombra a una femtocelda.
- HNB-GW** *Home Node B Gateway*, termino con el que el 3GPP denomina a la interfaz de una femtocelda
- HMS** *Home Node B Management System*, elemento definido por el 3GPP encargado de gestionar los recursos de los HNBs

I

- IDA** *Infocomm Development Authority* o Autoridad de Desarrollo de las Comunicaciones.
- IEEE** *Institute of Electrical and Electronics Engineers* o Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos. Asociación técnico-profesional mundial dedicada a la estandarización,
- IF** *Intermediate Frequency* o frecuencia intermedia.
- ITU** *International Telecommunications Union*, organismo especializado encargado de regular las telecomunicaciones a nivel internacional.

L

- LBT** *Listen Before Talk*, protocolo de comunicaciones para equipos de inalámbrico operativo que permite a muchos usuarios utilizar el mismo canal de radio sin coordinación previa.
- LDPC** *Low Density Parity Check*, código de corrección de error lineal.
- LR-WPAN** *Low-Rate Wireless Personal Area Networks* o redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos.

M

- MIC** Ministerio de Negociaciones Internas y Comunicaciones de Japón.

N

- NTIA** *National Telecommunications and Information Administration*, organismo del poder ejecutivo de Estados Unidos de América formado para asesorar al presidente en material de telecomunicaciones.
- NE** *Nash Equilibrium* o equilibrio de Nash.

O

- ODFC** *On-Demand Frame Contention* o trama de contención bajo demanda.
- OFDM** *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* o multiplexación por división de frecuencia ortogonal.
- OSI** *Open System Interconnection*, modelo de red descriptivo creado por la Organización Internacional para la Estandarización (ISO) en el año 1980
- OSS** *Opportunistic Spectrum Sharing*, sistema para la compartición de espectro.

P

- PIRE** Potencia isotrópica radiada equivalente.
- PL** *Path Loss*.

Q

- QAM** *Quadrature amplitude modulation* o modulación de amplitud en cuadratura.
- QPSK** *Quadrature Phase Shift Keying* o modulación por desplazamiento cuadrafásico.

R

- RS** Reed-Solomon, código de corrección de errores binario.
- RF** *Radio Frequency* o radiofrecuencia.
- RRBS** *Remote Rural Broadband Systems* o Sistema de banda rural a distancia.
- RSPG** *Radio Spectrum Policy Group*, grupo consultor de alto nivel que asiste a la Comisión Europea en el desarrollo de la política del espectro radioeléctrico.

S

- SDR** *Software Defined Radio*, sistema de radiocomunicaciones donde los componentes típicamente implementados en *hardware* (mezcladores, filtros, amplificadores, moduladores/demoduladores, detectores, etc) son implementados en *software*.
- SE** *Spectrum Etiquette* o etiquetado de espectro.

GLOSARIO

SINR *Signal to interferencia plus noise ratio* o relación señal a interferencia más ruido.

SR *Software Radio*.

SS *Spectrum Sensing* o testeo de espectro.

T

TDM *Time Division Multiplexing*, protocolo de multiplexación por división en el tiempo.

TDMA *Time Division Multiple Access*, protocolo de acceso múltiple por división en el tiempo.

TVWS *Television White Spaces*, espacios en blanco del espectro de televisión.

U

UHF *Ultra High Frequency*, banda del espectro electromagnético de televisión.

V

VHDL *Very High Speed Integrated Circuit Description Language*, lenguaje de programación para el diseño de circuitos integrados.

VHF *Very High Frequency*. banda del espectro electromagnético de televisión.

W

WSD *White Space Device*, dispositivos diseñados para operar sobre los White Space.

WSM *White Space MAP* o mapa de espacios en blanco.

X

xG *NeXt Generation* o nueva generación.

XXX

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

El rápido crecimiento de los servicios de comunicación inalámbricos está provocando que el espectro radioeléctrico sea cada vez más escaso. Para solucionar este problema, en muchos de los servicios de telecomunicaciones se están llevando a cabo mejoras en la codificación y modulación de la señal, como ha sido el caso de la televisión en la que se ha pasado de realizar una transmisión analógica a una digital. Sin embargo, a pesar de estas técnicas de compresión, los operadores no parecen dispuestos a dejar las frecuencias que les fueron asignadas aunque no hagan servicio de ellas. Esto se debe a que en la gran mayoría de países, las redes y aplicaciones inalámbricas están reguladas mediante una política de asignación de espectro fija: la asignación de espectro es controlada por el Estado, que se encarga de administrar y asignar la utilización de las diferentes bandas de frecuencia a los diferentes usuarios y/o servicios mediante autorización, permiso o licencia a largo plazo en amplias regiones geográficas. Todo esto conlleva a una infrautilización del espectro ya que, además de que existen espacios libres dentro de un rango asignado, su uso varía a lo largo del tiempo y del espacio.

Cada país tiene su propio cuadro nacional de asignación de bandas de frecuencias, que recoge la información acordada en las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU)[1]. Si se observa el CNAF (Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias de España) o su equivalente americano publicado por la NTIA (*National Telecommunications and Information Administration*) [2] mostrado en la figura 1.1, se puede confirmar que la mayor parte del espectro está asignado y que sólo quedan algunas pequeñas porciones de espectro libre para alojar productos y servicios *wireless*.

En este sentido, un ejemplo que ya empieza a tomar cuerpo, sobre todo en Estados Unidos (EEUU), es el de los denominados “espacios en blanco” de televisión (*Television White Spaces, TVWS*). Éstos tratan de aprovechar aquellas zonas dentro de las zonas teóricas de cobertura del servicio de televisión, donde, por una u otra razón no exista señal, lo que dejaría esas frecuencias disponibles para otros usos o servicios. Además, hay que tener en cuenta el hecho de que los TVWS se encuentran en zonas a priori estables, por lo que no cabe esperar que cambien con rapidez, puesto que vienen definidas por las estaciones de televisión desplegadas.

Todo ello está dando lugar a que hoy en día organismos reguladores de todo el mundo se dispongan a habilitar zonas del espectro de televisión para que usuarios secundarios, sin licencia, puedan utilizar de manera oportunista los recursos radio que no están siendo aprovechados por los usuarios primarios, con licencia, del espectro. Este proceso está comenzando por los canales de televisión en las bandas VHF y UHF, los cuales prometen ser la primera aplicación comercial extendida a este fin.

1.1.1 ENTIDADES REGULADORAS

Para explotar las zonas TVWS del espectro y mejorar su eficiencia, diferentes entidades reguladoras de todo el mundo se han puesto en marcha para desarrollar normas que permitan el uso de TVWS por dispositivos sin licencia siempre que no interfieran con los dispositivos primarios y legítimos de esa banda de frecuencias.

Con el objetivo de aumentar la eficiencia en la utilización del espectro disponible, la FCC propuso la apertura de ciertas bandas asignadas a la televisión para su uso por usuarios sin licencia, mediante técnicas de compartición de espectro (*Opportunistic Spectrum Sharing, OSS*). Con este objetivo publicaron un informe y una orden [7], en noviembre de 2008, que regula el acceso a la zona del espectro inutilizada entre los 5-698MHz.

Asimismo, a raíz de la NPRM (*Notice of Proposed Rulemaking*) emitida por la FCC, el IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) empezó a desarrollar el que probablemente sea el primer estándar en utilizar tecnología de radio cognitiva, denominado IEEE 802.22 WRAN (*Wireless Regional Area Network*). El principal objetivo de IEEE 802.22 WRAN es el desarrollo de técnicas de Radio Cognitiva que permitan el uso compartido del espectro geográfico libre del servicio de difusión de televisión (entre 54 MHz y 862 MHz). Por este motivo, muchas de las investigaciones y trabajos relacionados con la Radio Cognitiva se han centrado en el estudio de señales ATSC DTV (*Advanced Television System Comittee for Digital*

Television), cuyo ancho de banda es de 6 MHz, y de la modulación AM utilizada en los micrófonos inalámbricos, con un ancho de banda de 200 KHz. Sin embargo, dado que actualmente la mayor parte del espectro está asignado, cualquier iniciativa civil para la utilización compartida del espectro ha de tener como premisa fundamental la no interferencia con los usuarios primarios, por lo que resulta evidente que para el desarrollo de futuros dispositivos, aplicaciones o sistemas basados en la radio cognitiva es necesaria la detección de todo tipo de señales.

Posteriormente, la Oficina de Comunicaciones en Reino Unido, la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (CEPT) y el Ministerio de Negociaciones Internas y Comunicaciones de Japón (MIC) se pusieron en marcha para preparar sus regulaciones para el acceso a los TVWS.

Por otro lado, el comité del IEEE 802 LAN/MAN ha aprobado el proyecto de estandarización P802.19.1 para especificar los métodos de coexistencia en redes inalámbricas operando sobre los TVWS y facilitar la convivencia entre operadores distintos o independientes, formando en 2010 un grupo, el 802.19 TG1, para este fin. El foco principal de éste, es el proceso de estandarización, incluyendo sus requisitos y diseño del sistema, junto con los retos técnicos futuros de los TVWS.

Además de las entidades reguladores existen otras entidades que se han interesado en el estudio y uso de los TVWS. Por ejemplo, en Estados Unidos, DARPA (*Defense Advanced Research Projects Agency*) se puso en marcha en el desarrollo de nuevas tecnologías con las que posibilitar que múltiples sistemas de radiocomunicaciones compartan el mismo espectro mediante mecanismos adaptativos como DSA (*Dynamic Spectrum Access*), dentro del programa NeXt Generation (xG) [8, 9].

Por otro lado, el ejército americano también ha realizado investigaciones en el mismo sentido, desarrollando técnicas de explotación adaptativa del espectro (*Adaptive Spectrum Exploitation*, ASE) [10].

1.2 MOTIVACIÓN

La creciente demanda de tráfico de datos móviles de alta velocidad a bajo coste ha impulsado la necesidad de ampliar los recursos disponibles en el espectro. Todo esto, unido a que cada nueva generación de sistemas de comunicación inalámbrica espera proporcionar mayor calidad de servicio a un mayor número de usuarios, implica la necesidad de nuevos sistemas para conseguir una mayor eficiencia en el uso de los escasos recursos existentes, en especial, en el espectro.

Este crecimiento de tráfico es verdaderamente espectacular pues, según un informe presentado por Ericsson [11], se espera que entre 2011 y 2016 el tráfico de datos mundial en el móvil se multiplique por 10 (véase la figura 1.2). Además este informe indica que estos nuevos usuarios se concentrarán en el espacio ya que se estima que el 60% del tráfico total se generará en el 1% del territorio del planeta. Esto puede ser un problema para la calidad de las conexiones y será para las operadoras y los fabricantes de móviles un reto el poder garantizar la calidad del servicio a los usuarios.

En este contexto de tecnología móvil, un enfoque efectivo para solucionar este problema es reducir la distancia entre el transmisor y el receptor, permitiendo decrementar la potencia de transmisión e incrementar el factor de reutilización de frecuencias. Varios estudios [12] han demostrado que cada vez es más frecuente el uso de datos móviles en zonas de interior, siendo las femtoceldas propuestas como estaciones base pequeñas desplegadas por el propio usuario para mejorar la cobertura móvil en zonas de interior. La idea es que el Equipo del Usuario (*User Equipment*, UE) pueda cambiar desde la estación base celular (propiedad del operador) hacia una Femtocelda que actúa de Punto de Acceso (*Femtocell Access Point*, FAP), instalada en casa o en la oficina, cuando el usuario opere en zonas de interior o cuando esté lo suficientemente cerca de la FAP.

El principal problema para las FAPs es que si dos o más FAPs se encuentran situadas de forma próxima transmitiendo sobre un mismo canal se producirá una alta interferencia entre ellas, lo que provocará una degradación o corte en la red. Ocurrirá del mismo modo si la FAP y la estación celular base comparten el mismo canal.

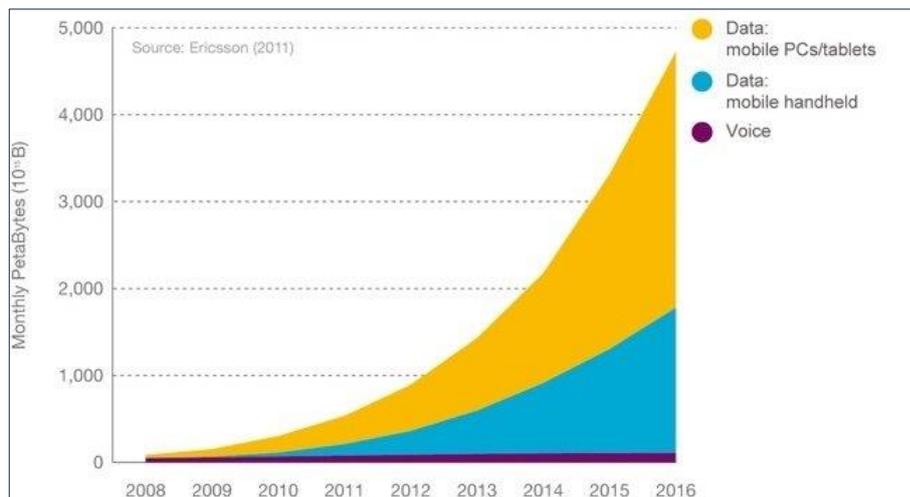


Figura 1.2: Evolución en el uso del espectro.

Otro problema que presentan las femtoceldas es que no existe ninguna normativa para controlar su despliegue. No realizándose ningún tipo de planificación en frecuencia ni en localización, puesto que cualquier usuario puede adquirirlas e instalarlas sin control alguno.

Por todo ello, es necesario el desarrollo de mecanismos que gestionen de forma ordenada la problemática de asignación de frecuencias a las femtoceldas evitando la interferencia entre ellas y asegurando, por tanto, la calidad en las comunicaciones.

1.3. OBJETIVOS Y ALCANCE DEL PROYECTO

El principal objeto del presente proyecto es el diseño y desarrollo de un algoritmo de asignación de frecuencias en entornos de interior para servir en apartamentos, zonas comerciales u oficinas, cobertura móvil mediante el uso de femtoceldas, evitando la posible interferencia entre ellas. La frecuencia de operación elegida para las femtoceldas son los espacios en blanco de la banda de televisión, es decir, los TVWS, ya que de esta forma se logra evitar la interferencia con las estaciones celulares base y se aumenta el ancho de banda disponible.

Además, el operar sobre los TVWS aporta un beneficio grandísimo, tanto para los operadores como para cualquier usuario, ya que se está adquiriendo una zona del espectro de forma gratuita.

En este proyecto se ha establecido que los usuarios potenciales son operadores independientes entre sí, que cuentan con un número de clientes propios. En una primera aproximación, se ha considerado que los operadores no tienen ningún aliciente para cooperar con el resto y actúan de forma egoísta para maximizar su beneficio. Por ello, para lograr esta coordinación entre femtoceldas del mismo operador, se ha utilizado una herramienta matemática que intenta resolver problemas de optimización de forma eficiente, la teoría de juegos.

Tras esto, se han revisado los algoritmos ya existentes y diseñado otros nuevos para realizar una negociación entre los diferentes operadores con la que realizar un intercambio de canales entre operadores con objeto de mejorar el rendimiento de los usuarios en la red y la calidad de las comunicaciones.

De esta manera, la motivación e importancia del presente proyecto se basa en que se consigue una solución positiva tanto para operadores como para usuarios a la hora de tratar la escasez de espectro. Desde el punto de vista de los operadores, éstos consiguen reducir la cantidad de tráfico en las macro y micro celdas, mejorando la

calidad de los servicios en zonas de exterior. Logrando por tanto abrir un nuevo mercado del que pueden surgir numerosas aplicaciones, relacionadas con la necesidad de introducir nuevos tipos de dispositivos a este fin. Desde el punto de vista de los usuarios finales, se consigue mejorar su experiencia de usuario al disponer de cobertura móvil propia en el hogar o en la oficina. Cabe destacar que la introducción de los sistemas femtocelda no pretende acabar con las redes tradicionales basadas en celdas de gran tamaño, sino que el objetivo es la convivencia de ambas tecnologías a fin de buscar el beneficio global, mejorando los servicios ofrecidos dentro de los edificios a la vez que aumenta la calidad de éstos en la calle.

1.4 ESTRUCTURA DE LA MEMORIA

La presente memoria de proyecto está formada por 9 capítulos, los cuales están constituidos por varios subapartados. Cada uno es independiente pero necesario para entender el siguiente. A continuación se realiza una breve descripción de cada uno de ellos:

- 1) **Introducción.** En este capítulo se tratan los motivos fundamentales que han suscitado la creación del proyecto.
- 2) **Planificación y estimación de costes.** Contiene el presupuesto del proyecto y la evolución temporal estimada para su realización.
- 3) **Estado del arte.** Se muestra un análisis de todos los aspectos relacionados con los sistemas de radio cognitiva y los TVWS. Realizando un estudio de su funcionamiento, un análisis de los estándares y entidades regulatorias y un repaso de su estado actual.
- 4) **Teoría de juegos.** Se recoge toda la información necesaria sobre teoría de juegos para entender los conceptos que se aplican en el resto de capítulos.
- 5) **Negociación.** Describe el modelo formal desarrollado para llevar a cabo la asignación y reparto de canales entre operadores, junto con un análisis de los mecanismos ya existentes.
- 6) **Entorno de evaluación.** Se describen los escenarios sobre los que se van a aplicar los métodos de reparto de canales confeccionados.
- 7) **Entorno de simulación.** Se muestra la estructura del simulador por medio de diagramas de flujo y de contexto, y se realiza una descripción detallada de todas las funciones que lo componen.
- 8) **Resultados.** Se expondrán los resultados obtenidos y se analizarán las gráficas y valores numéricos generados por el simulador.

- 9) **Conclusiones y Evolución Futura.** Se detallarán las “Conclusiones y el trabajo futuro” a seguir en esta vía de investigación.

Finalmente, se muestran las referencias bibliográficas que se han consultado para realizar el proyecto y un anexo en el que se detalla el modo de funcionamiento del simulador creado.

CAPÍTULO 2

PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN DE COSTES

En este capítulo se van a describir detalladamente los costes y planificación asociados a la realización de este proyecto. Se ha hecho teniendo en cuenta las horas que se prevé que es necesario dedicar y los recursos que son necesarios para su normal desarrollo. Los gastos se dividen en dos grupos:

1. Recursos de personal.
2. Recursos materiales.

Asimismo, se muestra la evolución temporal o cronograma con todas las actividades que se planificaron para el desarrollo y confección del proyecto.

2.1 RECURSOS

2.1.1 HUMANOS

- D. Jorge Navarro Ortiz, profesor del Departamento de Teoría de la Señal, Telemática y Comunicaciones de la Universidad de Granada, en calidad de tutor del proyecto.
- Dña. Ana María López Pérez, alumna de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Informática de Telecomunicación de la Universidad Granada, autora del proyecto.

2.1.2 *HARDWARE*

- Ordenador personal.

2.1.3 *SOFTWARE*

- MATLAB: herramienta matemática que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M).

- Microsoft Word: *software* destinado al procesamiento de textos.

2.2 FASES DE DESARROLLO

La distribución temporal que se planificó para el desarrollo de este proyecto, considerando una jornada laboral de 8 horas excluyendo los fines de semana y festivos. Puede verse de manera detallada en el diagrama de Gantt de la Figura 2.1

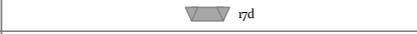
Id.	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Duración	2013											
					mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic		
1	REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE	20/06/2013	17/07/2013	20d												
2	ESPECIFICACIÓN DE REQUISITOS	18/07/2013	09/08/2013	17d												
3	DISEÑO	12/08/2013	27/09/2013	35d												
4	IMPLEMENTACIÓN	02/09/2013	21/10/2013	36d												
5	EVALUACIÓN Y PRUEBAS	01/11/2013	28/11/2013	20d												
6	DOCUMENTACIÓN	20/06/2013	28/11/2013	116d												

Figura 2.1: Planificación temporal del proyecto.

2.2.1 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE

Se hace un repaso de las soluciones existentes hasta el momento, totales o parciales, sobre el mismo ámbito de aplicación o relacionado, del problema a resolver con el objetivo de sentar una base que justifique la realización de este proyecto.

2.2.2 ESPECIFICACIÓN DE LOS REQUISITOS

Se analiza pormenorizadamente el problema en pos de una correcta especificación de requisitos, funcionalidades y restricciones que delimitan el posterior diseño de una solución.

2.2.3 DISEÑO

Se adopta justificadamente una solución previamente especificada y se procede a su diseño.

2.2.4 IMPLEMENTACIÓN

Se implementa el diseño anterior en el lenguaje de programación escogido.

2.2.5 EVALUACIÓN Y PRUEBAS

Tras la comprobación y puesta a punto, se procede a la evaluación de la solución, contrastando su funcionamiento y resultados, si procede, con otras soluciones vistas durante la revisión del estado del arte.

2.2.6 DOCUMENTACIÓN

La redacción de la documentación es una tarea que se lleva a cabo de forma paralela al resto.

2.3 ESTIMACIÓN DE COSTES

La duración total estimada para la realización del proyecto es de 6 meses. Haciendo un cómputo general, considerando una jornada laboral de 8 horas, de lunes a viernes, se tiene un total de 116 días. Esto hace un total de 928 horas de trabajo. Este tiempo es el referido al proyectando. Con respecto al tutor del proyecto, se estima que se concierten unas 10 tutorías de aproximadamente 1 hora de duración. Por lo tanto, el número total de horas consideradas para su completo desarrollo es de:

$$928h \text{ proyectando} + 10h \text{ tutor} = 938 h$$

El precio de cada hora del proyectando se ha calculado de acuerdo a los honorarios de un Ingeniero de Telecomunicación. Años atrás, la Junta General del Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación (COIT) ofrecía una cantidad a modo de ejemplo para que los profesionales libres ejercientes pudieran disponer de una referencia con la que estimar sus honorarios. Sin embargo, el Ministerio de Economía y Hacienda remitió a todos los colegios profesionales una nota [13], siguiendo directivas europeas, con la que se informó que no se debe, ni siquiera, publicar un baremo con los honorarios, ya que éstos son libres y responden al libre acuerdo entre el profesional y el cliente. Dada esta situación, los honorarios deben definirse en función de una serie de factores: costes del ingeniero, desplazamientos, volumen de la actividad, etcétera. Teniendo en cuenta estos elementos y, que por lo general un ingeniero no suele cobrar menos de 20 €/hora, ni más de 60 €/hora, se han definido unos honorarios de 20 €/hora. Con respecto a los honorarios del tutor (Dr. Ingeniero de Telecomunicación), se han fijado a 50 €/hora.

2.3.1 RECURSOS HUMANOS

En este apartado, se va a detallar el coste que representan los gastos personales.

Concepto	Coste/tiempo	Cantidad	Total
Trabajo proyectando	20€/hora	928 horas	18.560€
Tutorías	50€/hora	10 horas	500€
Total:			19.060€

Tabla 2.1: Coste temporal del proyecto.

Los gastos personales con el I.V.A. incluido son de 19.060€, DIECINUEVE MIL SESENTA EUROS.

En la Tabla 2.1 puede verse el coste temporal asociado a los diferentes paquetes de trabajo. El total se computa en días (jornadas de 8 horas a 20 €/hora), sin contar sábados, domingos y festivos. La Figura 2.2 refleja el coste monetario asociado a cada una de las fases del proyecto. El coste asociado al proceso de documentación no aparece por ser una tarea que se realiza en paralelo.

Fase	Tiempo empleado por el proyectando (días)	Tiempo empleado por el tutor (horas)
Revisión del estado del arte	20	3
Especificación de los requisitos	17	1
Diseño	16	2
Diseño + Implementación	24	1
Implementación	19	1
Evaluación y pruebas	20	2
Total	116	10

Tabla 2.2: Coste temporal del proyecto.

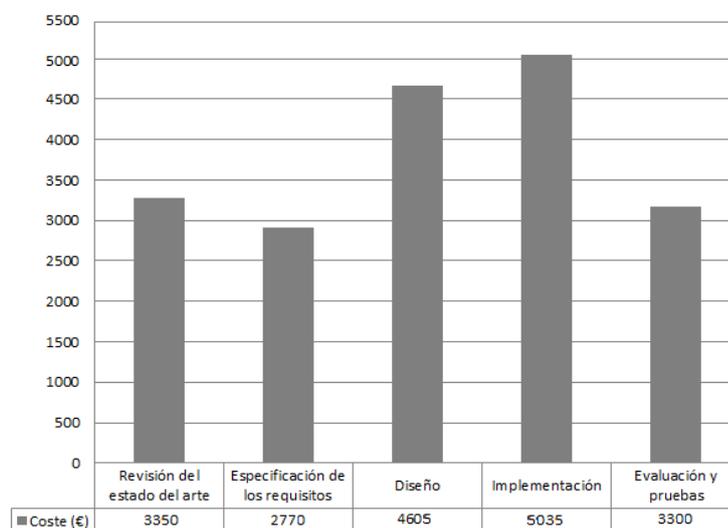


Figura 2.2: Coste monetario asociado a cada fase del proyecto.

2.3.2 RECURSOS MATERIALES

En la Tabla 2.3 se recoge el coste monetario de los recursos *software* y *hardware* empleados. Para estimar su coste se ha empleado el método de estimación directa simplificada publicado por Agencia Tributaria del Gobierno de España [14]. Éste es aplicable a todos los empresarios y profesionales cuando concurren las siguientes circunstancias:

- Que sus actividades no estén acogidas al régimen de estimación objetiva.
- Que, en el año anterior, el importe neto de la cifra de negocios para el conjunto de actividades desarrolladas por el contribuyente no supere los *600.000 euros*. Cuando en el año inmediato anterior se hubiese iniciado la actividad, el importe neto de la cifra de negocios se elevará al año.
- Que no se haya renunciado a su aplicación.
- Que ninguna actividad que ejerza el contribuyente se encuentre en la modalidad normal del régimen de estimación directa.

De modo que haciendo uso del baremo de amortizaciones vigentes para el presente año se ha tomado un coeficiente de amortización del 25% para los equipos de tratamiento de la información y sistemas y programas informáticos, durante un periodo de 4 años.

Concepto	Coste unitario (I.V.A incluido)	Amortización	Tiempo	Total
Ordenador personal	1000 €	25%	6 meses	125€
Conexión ADSL	40€	No amortizable	6 meses	240€
Paquetes de ofimática	600€	25%	6 meses	75€
Software de programación	1900€	25%	6 meses	237,7€
Total				677,5€

Tabla 2.3: Coste monetario del proyecto.

2.4 PRESUPUESTO TOTAL DEL PROYECTO

En presupuestos total, contando con los gastos de personal y de material, queda reflejado en la siguiente tabla:

Concepto	Cantidad (I.V.A incluido)
Recursos Humanos	19.060€
Recursos Materiales	667,5€
Total	19.737,5€

Tabla 2.4: Presupuesto total del proyecto.

El precio total del proyecto asciende a 19.737,50€, DIECINUEVE MIL SETECIENTOS TREINTA Y SIETE CON CINCUENTA EUROS.

CAPÍTULO 3

ESTADO DEL ARTE

En el presente capítulo se define cuál es el principio de funcionamiento de los sistemas de Radio Cognitiva, cuáles son y cuáles pueden ser sus futuras aplicaciones. Además se va a hacer un recorrido sobre la tendencia europea y estadounidense hacia la liberación de parte del espectro en la banda de televisión para la acogida de nuevos servicios, junto con una revisión de su estado actual.

3.1 INTRODUCCIÓN A LA RADIO COGNITIVA

3.1.1 SOFTWARE RADIO: PRINCIPIOS Y EVOLUCIÓN HACIA LA RADIO COGNITIVA

El termino *Software Radio* (SR), definido por Joseph Mitola III en el año 1991, hace alusión a dispositivos radio con capacidad para reprogramarse o reconfigurarse [15]. Se trata de instrumentos en los que un mismo elemento *hardware* es capaz de realizar funciones distintas en función del tiempo o del espacio. La definición exacta dada por Mitola fue:

“A Software Radio is a radio whose channel modulations waveforms are defined in software. That is, waveforms are generated as sampled digital signals, converted from digital to analog via wideband DAC (Digital to Analog Converter) and the possibly upconverted from IF (Intermediate Frequency) to RF (Radio Frequency). The receiver, similiary, employs a wideband ADC (Analog to Digital Converter) that captures all the channels of the software radio node. The receiver then extracts downconverts and demodulates the channel waveform using software on a general purpose processor”.

En un sistema SR la digitalización de la señal se realiza en el subsistema antena. Sin embargo, los recursos tecnológicos disponibles en la actualidad limitan la implementación de un sistema SR ideal. Por este motivo surgió el término SDR (*Software Defined Radio*), que se refiere a dispositivos SR implementables. Son

realizables gracias a que la digitalización se realiza en la etapa de frecuencia intermedia, tras un filtrado selectivo.

La estructura elemental de un sistema SDR se compone de las tres etapas o bloques mostrados en la figura 3.1. La primera etapa o etapa de radio frecuencia (*Radio Frequency*, RF) se encarga de controlar la transmisión y recepción de las señales. Para la transmisión su función es la de amplificar y modular las señales de IF para adecuarlas a su posterior transmisión vía radio. En la recepción se encargara de realizar el proceso inverso.

La etapa de IF también tiene dos funciones diferentes en función de si está operando en modo transmisión o recepción. En modo recepción esta etapa se encarga de digitalizar la señal de IF (ADC) y convertirla a banda base (*Digital Down Conversion*, DDC). En modo transmisión realiza el proceso inverso (*Digital Up Conversion*, DUC).

Por último, la etapa Banda Base (BB) es la encargada de todo el procesamiento digital en banda base de la señal y, en algunos casos, de la implementación de los protocolos del nivel de enlace del modelo OSI (Open System Interconnection).

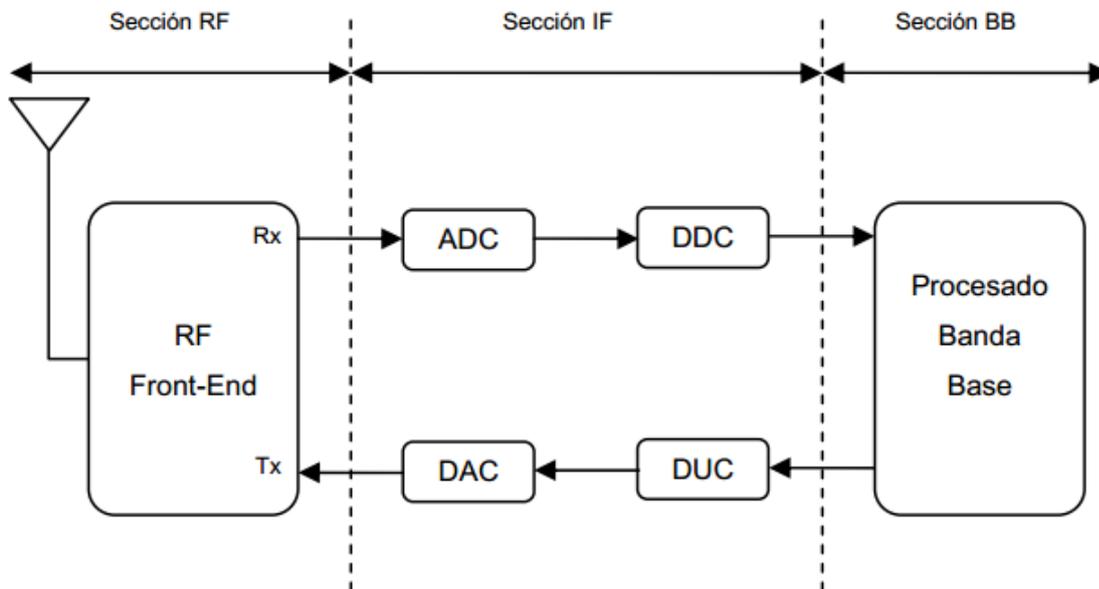


Figura 3.1: Estructura de bloques de un SDR.

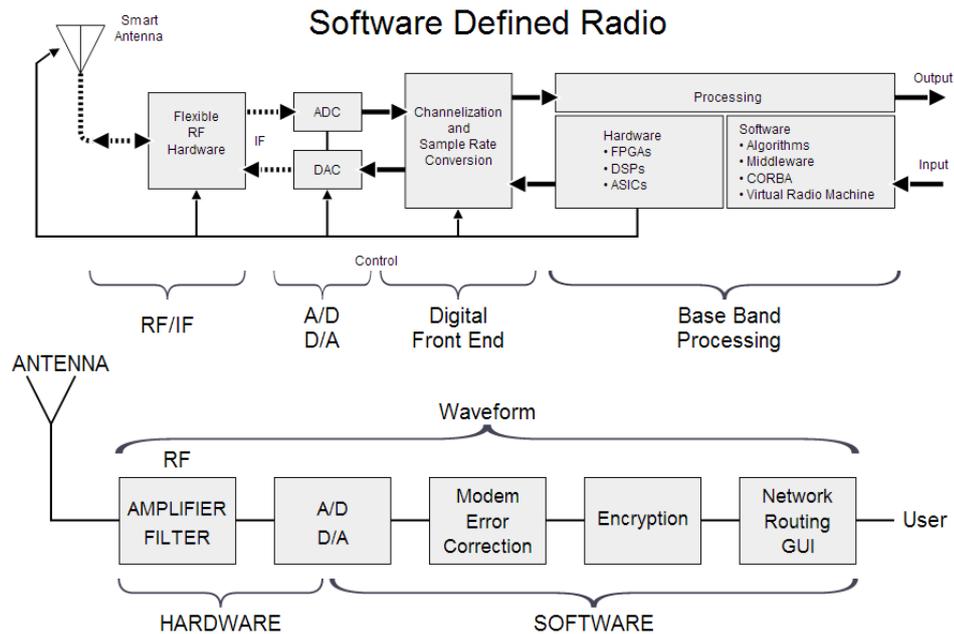


Figura 3.2: Esquema general de funcionamiento de SDR.

De las tres etapas, la de RF casi siempre opera con *hardware* analógico, mientras que las etapas de IF y BB se implementan con módulos *hardware* digitales. Este *hardware* normalmente está constituido por una combinación de DSP (*Digital Signal Processor*) con FPGA (*Field Programmable Gate Array*) y ASIC (*Application Specific Integrated Circuit*). La configuración o reconfiguración de dicho *hardware*, es decir, lo que realmente proporciona flexibilidad al sistema, se realiza mediante *software*. Este *software* se desarrolla utilizando diversas metodologías y herramientas para escritura de código y simulación de sistemas, tales como VHDL (*Very High Speed Integrated Circuit Description Language*) o similares.

En la figura 3.2 se muestra gráficamente el esquema general de funcionamiento de la tecnología SDR, anteriormente descrita [16].

3.1.2 DEFINICIÓN DE COGNITIVE RADIO

Un dispositivo *Cognitive Radio* o de *Radio Cognitiva* (CR) puede ser definido como un sistema SDR inteligente o cognitivo, como su propio nombre indica. Sin embargo, no existe ningún criterio de medida para determinar la inteligencia de un sistema radio. Esto ha generado una cierta controversia entre investigadores y organismos oficiales, que ha propiciado la aparición de múltiples definiciones diferentes para este término común. En los apartados párrafos se citan algunas de las definiciones más destacadas.

El término *Cognitive Radio* como tal fue acuñado por Joseph Mitola III en su tesis doctoral [17] en el año 1999. Definía un dispositivo CR como una herramienta capaz de detectar las necesidades de comunicación de su usuario y, mediante la adquisición de las características de su entorno, disponer los mecanismos para satisfacer dichas necesidades. La definición exacta dada por Mitola fue:

“Cognitive Radio is a radio that employs model based reasoning to achieve a specified level of competence in radio-related domains”.

Otras definiciones más recientes y detalladas son:

“An intelligent wireless communications system that is aware of its surrounding environment (i.e., outside world), and uses the methodology of understanding-by-building to learn from the environment and adapt its internal states to statistical variations in the incoming RF stimuli by making corresponding changes in certain operating parameters (e.g. transmit-power, carrier frequency and modulation strategy) in real time, with two primary objectives in mind: highly reliable communications whenever and wherever needed; efficient utilizations of the radio spectrum.” Simon Haykin [18].

“A radio that can change its transmitter parameters based on interaction with the environment in which operates.” FCC [19].

“A radio or system that senses its operational electromagnetic environment and can dynamically and autonomously adjust its radio operating parameters to modify system operation, such as maximize throughput, mitigate interference, facilitate interoperability, and access secondary markets.” NTIA [20].

“A radio frequency transmitter/receiver that is designed to intelligently detect whether a particular segment of the radio spectrum is currently in use, and to jump into (and out of, as necessary) the temporarily-unused spectrum very rapidly, without interfering with the transmissions of other authorized users.” IEEE USA [21].

“A type of radio that can sense and autonomously reason about its environment and adapt accordingly. This radio could employ knowledge representation, automated reasoning and machine learning mechanisms in establishing, conducting or terminating communication or networking functions with other radios. Cognitive radios can be trained to dynamically and autonomously adjust its operating parameters.” IEEE 1900.1 [22].

El SDR Forum ha creado dos grupos de trabajo para tratar este tema [23]. El primero de ellos, el *Cognitive Radio Working Group*, centrado en la parte más tecnológica, propuso la siguiente definición:

“A radio that has, in some sense, (1) awareness of changes in its environment and (2) in response to these changes adapts its operating characteristics in some way to improve its performance or to minimize a loss in performance”.

El segundo de ellos, el *Forum Special Interest Group for Cognitive Radio*, centrado en el desarrollo de aplicaciones para Cognitive Radio, lo define como:

“An adaptative, multi-dimensionally aware, autonomous radio (system) that learns from its experiences to reason, plan and decide future actions to meet user needs.”

Resumiendo, la Radio Cognitiva conforma una tecnología emergente que permite a los dispositivos determinar qué frecuencia de entre las disponibles no está siendo utilizada por los usuarios primarios del espectro y conectarse a ellas. Los dispositivos de Radio Cognitiva son capaces de modificar su frecuencia de operación para incrementar la eficiencia de la comunicación. Un requisito fundamental para estos dispositivos es que no deben obstaculizar la comunicación de los usuarios primarios. Consiguiéndose, por tanto, la capacidad necesaria para compartir el canal radio con los usuarios con licencia (usuarios primarios) de la manera más oportuna.

3.1.3 CARACTERÍSTICAS DE LA RADIO COGNITIVA

Las características básicas que debería poseer un sistema *Cognitive Radio* son:

- Capacidad para percibir el entorno en el que opera, mediante técnicas de testeo de espectro (*Spectrum Sensing*, SS). Esto permitirá identificar los huecos en el espectro (*White Spaces*) para posteriormente elegir el canal más idóneo en el que realizar una transmisión, sin interferir a los usuarios primarios.
- Poseer conciencia de dicho entorno, así como de sus propias capacidades y recursos.
- Capacidad para variar y adaptar, de forma inteligente, sus parámetros de transmisión/recepción. Esto será útil para seleccionar la mejor banda espectral y los parámetros de transmisión más apropiados en cada instante de tiempo, adecuándose a las necesidades del momento.
- Capacidad para funcionar como transmisor o receptor.

La FCC [24], establece a su vez que un dispositivo de radio cognitiva debe tener capacidad para:

- Operar a través de distintos sistemas de comunicación.
- Seleccionar el tipo de modulación en función de las características de canal y los requerimientos del usuario.
- Capacidad para seleccionar la frecuencia portadora más adecuada en función de la información recogida sobre el espectro radioeléctrico disponible y del tipo de transmisión a realizar.
- Si las características del medio lo permiten, variar la potencia de transmisión. Deberá ser capaz de reducirla hasta un cierto nivel de forma que se mantenga la calidad de la transmisión. Consiguiendo incrementar el número de usuarios que comparten esa porción de espectro y reduciendo el nivel de interferencia entre ellos.

En general, todos los parámetros de transmisión de un sistema de Radio Cognitiva deberían poder reconfigurarse no sólo al principio, sino también durante la transmisión, adaptándose a los cambios que se produzcan en su entorno. Para ello es necesaria otra serie de características adicionales:

- Incorporar un sensor de localización para lograr implementar el *Spectrum Sensing*.
- Incorporar algoritmos de inteligencia artificial, ya que el dispositivo debe monitorizar su entorno y aprender de él.
- Incluir protocolos de comunicación con el objetivo de reducir al mínimo las interferencias con los usuarios primarios o con otros dispositivos de CR.
- Incluir protocolos de negociación en entornos en los que varios dispositivos intenten acceder a los mismos recursos. En este sentido, diversos autores han sugerido u optado por la teoría de juegos como modelo matemático para llevar a cabo esta tarea [25].

3.1.4 APLICACIONES DE LA RADIO COGNITIVA

En este apartado se van a describir brevemente algunas de las aplicaciones más destacadas de la Radio Cognitiva.

USO MILITAR. La mayoría de los sistemas de comunicación de los ejércitos deben desplegarse en entornos desconocidos y hostiles de una forma rápida, enfrentándose a problemas de interferencias, conectividad y variaciones impredecibles de éstas. La

Radio Cognitiva puede ser una solución para este entorno, pues facilita la configuración autónoma de los equipos y garantiza la coexistencia, al operar sobre frecuencias desocupadas.

SEGURIDAD PÚBLICA. Las características de disponibilidad inmediata, rápido despliegue, uso eficiente del espectro disponible e interoperabilidad entre sistemas hacen que la Radio Cognitiva sea una herramienta de gran utilidad para bomberos, médicos o policías, que necesitan sistemas rápidos y funcionales en entornos variables.

EMERGENCIAS. Los sistemas de Radio Cognitiva posibilitarán que las frecuencias no utilizadas puedan ser captadas y usadas para la atención de emergencias y así facilitar la comunicación con los servicios de salud en cualquier momento y lugar.

En la actualidad, las organizaciones locales y regionales de los principales organismos que efectúan las operaciones de respuesta y socorro en un país utilizan sistemas de radiocomunicaciones en los modos de operación simplex y semiduplex, mediante equipos fijos, móviles y portátiles para desplegar sus actividades de ayuda y coordinación conjuntas. Dadas las características de reconfiguración dinámica de los parámetros de operación, los sistemas de radio cognitiva pueden dar soporte a determinadas capacidades técnicas que son cruciales en el momento de presentarse una emergencia.

Un sistema radio para emergencias debe proporcionar comunicaciones seguras, sin fallos y que sean accesibles en cualquier momento y lugar, con la máxima interoperabilidad y adaptación posible. Por ello los sistemas de radio cognitiva son una opción viable para alcanzar estas metas [26].

DETECCIÓN Y USO DE TVWS. Los sistemas de Radio cognitiva permiten detectar las zonas libres del espectro y transmitir sobre ellas sin dañar a los usuarios legítimos del espectro. De esta manera, los dispositivos que implemente esta tecnología, serán idóneos para operar en escenarios en los que se quiera operar sobre los TVWS sin interferir a los usuarios primarios de esa banda de frecuencias.

3.1.5 IMPLANTACIÓN DE SISTEMAS DE RADIO COGNITIVA EN LA BANDA DE TELEVISIÓN

La FCC en mayo de 2004, emitió un comunicado [27] en el que propusieron una serie de iniciativas a través de las cuales se permitía a los usuarios secundarios acceder al espectro asignado a los radiodifusores de televisión en los TVWS.

El objetivo de las propuestas presentadas era facilitar el desarrollo de nuevos e innovadores dispositivos y servicios que permitieran la operatividad sobre los TVWS, sin interferir con los usuarios primarios.

Tras el establecimiento de las condiciones mínimas que posibilitan el desarrollo de sistemas de radio cognitiva sobre los TVWS, el ECC (*Electronic Communication Committee*) publicó un informe [28] en el que se definen algunos de los requerimientos técnicos y operacionales para su futura implementación. En éste, se definieron dos técnicas básicas con las que implementar los sistemas de Radio Cognitiva: técnicas basadas en detección y técnicas basadas en bases de datos.

TÉCNICAS BASADAS EN DETECCIÓN. Para proteger a los servicios de radiodifusión se propusieron distintos métodos para el establecimiento del umbral de detección a partir del cual establecer si un canal está libre o no, así como métodos para establecer la potencia máxima de transmisión de un usuario secundario en un área geográfica determinada.

Para establecer los umbrales de detección utilizaron receptores con capacidad de detección de señal a niveles muy bajos, comprendidos entre -91 dBm y -155 dBm. No obstante a pesar de que estos niveles son bajos, no se asegura la detección fiable de la presencia o ausencia de señales de los radiodifusores.

Las conclusiones presentes en el informe indicaron que si un usuario sólo utiliza técnicas de detección, sin disponer de información de otros usuarios, no se puede garantizar la protección de los receptores de televisión cercanos.

TÉCNICAS BASADAS EN BASES DE DATOS. Una técnica más fiable que la anterior, es la de emplear bases de datos. Con éstas se proporcionará a los usuarios un listado con las frecuencias disponibles y los valores máximos de potencia isotropa radiada equivalente (PIRE) asociados a cada frecuencia, en función de su localización e instante temporal.

En este informe, se incluye una muestra de la información que debe ser transmitida entre los usuarios secundarios y la base de datos para garantizar un correcto funcionamiento. Asimismo, se proporciona a las administraciones gubernamentales una guía con información de cómo realizar la transferencia de datos. En cuanto a la forma de administrar las bases de datos no se especifica si éstas serán de nivel nacional o europeo, si habrá una o varias o si serán de ámbito público o privado.

3.2 LIBERACIÓN DE LOS TV WHITE SPACES EN EEUU Y EUROPA

En esta sección se va a describir la tendencia, estadounidense y europea, hacia la liberación de los espacios en blanco del espectro de televisión para conseguir que estos sean utilizados por usuarios no legítimos de esa banda de frecuencias.

En Estados Unidos, la FCC ha sido la encargada de proponer un conjunto de reglas para gestionar la operación sobre los TVWS incluyendo correcciones en las partes de la cero a la quince del tomo 47 del CFR (*Code of Federal Regulations*) [29]. Además de la FCC, son muchas las entidades reguladoras de todo el mundo que están confeccionando sus propias iniciativas hacia esta nueva oportunidad de espectro, se hablará de ellas más adelante. La norma propuesta por la FCC especifica las directrices a seguir para proteger a las emisoras de televisión y a los micrófonos inalámbricos. También proponen mecanismos para tratar el problema de la coexistencia entre dispositivos *White Space* (WSD) que usen tecnologías inalámbricas distintas y que puedan ser controlados por los operadores [30, 31].

Es destacable señalar que las iniciativas TVWS llevadas a cabo en Estados Unidos y en el resto del mundo componen los primeros pasos para conseguir una utilización del espectro más flexible, dinámica y eficiente. Este proceso de liberación de espectro solventará los problemas de escasez de espectro, marcados por la creciente demanda en el mercado de productos wireless.

A continuación, se va a hacer una revisión del estado de los estándares regulatorios para los TVWS en diferentes países, describiendo los retos técnicos encontrados durante su desarrollo.

Aunque muchos países han estudiado el uso de los TVWS, actualmente, sólo dos de ellos han llevado a cabo la liberación de los TVWS: Estados Unidos y Reino Unido. En la figura 3.3 se muestra el estado del espectro TVWS en estos dos países [32].

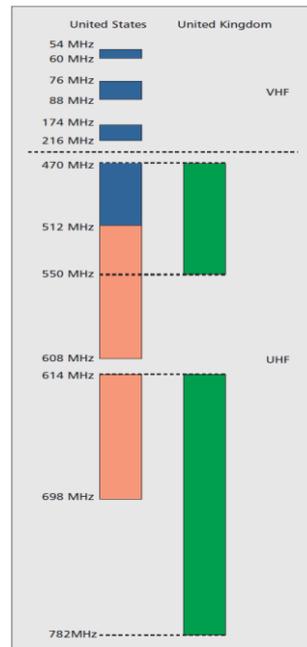


Figura 3.3: Espectro TVWS en Estados Unidos y Reino Unido. Azul: zonas de operación permitidas para dispositivos fijos en estados unidos. Naranja: zonas de operación permitidas para dispositivos personales/portables en estados unidos. Verde: zonas de operación permitidas en reino unido.

3.2.1 TVWS EN ESTADOS UNIDOS

La FCC ha definido tres mecanismos para proteger la interferencia en la banda de televisión de los WSD:

- Geolocalización de WSD con acceso a la base de datos de la banda de televisión.
- Limitaciones en la potencia de transmisión de los WSDs.
- Detección de canales radio de los usuarios primarios.

El primer tipo de metodología propuesto se basa en el acceso a unas bases de datos que contendrán información de todos los usuarios primarios de la banda de televisión (frecuencias de operación, localización, áreas y reglas de operación). De manera que, antes de realizar una transmisión, los WSDs deberán acceder a dicha base de datos y proveer su información de geolocalización (su posición actual) para obtener la lista de canales TVWS disponibles en su posición. De forma alternativa, un WSD que no tenga capacidad para acceder a esa base de datos podrá realizar la misma operación, de manera indirecta, con ayuda de un dispositivo maestro. El dispositivo maestro será capaz de estimar la localización del WSD y acceder a la base de datos para posteriormente proporcionar al WSD la lista de canales TVWS disponibles.

Tipo de dispositivo	Movilidad	Potencia de transmisión	Geolocalización y acceso a la base de datos	Detección	Capacidad de habilitación	Posibilidad de transmisión en canales adyacentes a los primarios.
Fijo	Fijo	$\leq 4W$	Requerido ($\pm 50m$)	No requerido	Máster	No
Portable Modo II	Fijo y móvil	$\leq 100W$	Requerido ($\pm 50m$)	No requerido	Máster	Sí, pero $\leq 40W$
Portable Modo I	Fijo y móvil	$\leq 100W$	No requerido	No requerido	Esclavo	Sí, pero $\leq 40W$
Detección	Fijo y móvil	$\leq 50W$	No requerido	Requerido -114dB	-	Sí, pero $\leq 40W$

Tabla 3.1: WSDs especificados por la FCC.

La FCC ha definido cuatro clases de WSDs, cuyas características y requerimientos básicos aparecen en la tabla 3.1.

Un *dispositivo fijo* es aquel que opera sobre un área específica a través de una antena exterior. Puede transmitir una potencia máxima de 1W en uno o más canales TVWS. Utiliza antenas con ganancias de 6dBi, lo que posibilita una PIRE de 4W. La densidad de potencia espectral conducida desde el WSD fijo hasta la antena no podrá ser mayor de 12.2dB/100kHz. Debido al alto valor de potencia de transmisión, un dispositivo fijo no podrá operar en algún canal adyacente a los utilizados por una señal de televisión.

Un *dispositivo personal/portable* es un dispositivo de baja potencia, restringido a operar en las bandas de frecuencia comprendidas entre los 512-698Mhz (canales 21-36 de televisión) y entre 614-698Mhz (canales 38-51 de televisión). Su nivel de PIRE máximo no podrá superar los 100mW (20dBm), y su densidad de potencia espectral no podrá ser mayor de 2.2dB/100kHz. Si uno de estos dispositivos opera sobre un canal adyacente a uno utilizado por los usuarios primarios, el nivel de potencia de transmisión permitido será de 40mW y la densidad de potencia espectral se reducirá a -1.8dBm/100kHz. Existen dos tipos de dispositivos personales/portables: *modo I* y *modo II*. Un dispositivo *modo I* no dispondrá de capacidad de geolocalización para acceder a la base de datos de televisión. Un dispositivo *modo II* si tendrá capacidad de geolocalización con una precisión de $\pm 15m$, y deberá contar con acceso directo o indirecto a la base de datos de televisión. Los dispositivos *modo I* obtendrán la lista de los TVWS disponibles a través de los dispositivos *modo II*. Éstos a su vez enviarán confirmaciones periódicas para asegurar que el dispositivo *modo I* permanece en el área asociada a la lista de canales TVWS disponibles.

La última clase de WSD la conforman los *dispositivos de detección*. Estos utilizan mecanismos de detección radio para detectar a los usuarios primarios y evitar la interferencia con ellos. Un dispositivo de detección limita su potencia de transmisión a 50mW y es capaz de detectar señales de televisión digitales ATSC y analógicas NTSC con niveles de señal de hasta -114dBm. Una vez detectada una señal de televisión tienen la capacidad de cesar la comunicación tras 2s de detección de la señal.

3.2.2 TVWS EN REINO UNIDO

En Reino Unido, la Oficina de Comunicaciones es la entidad encargada de la gestión de la industria de comunicaciones. De acuerdo a las normas especificadas por esta oficina, el mecanismo idóneo para proteger a los usuarios bajo licencia a corto y medio plazo es el acceso a las bases de datos en las bandas de televisión [33, 34, 35, 36]. Para realizar esta tarea proponen dos tipos de dispositivos: maestro y esclavo. Los dispositivos maestro son los encargados de acceder a la base de datos para obtener una lista con las frecuencias disponibles en un área e instante dado. También se encargan de controlar a los dispositivos esclavos. Los dispositivos esclavo reciben la información de los dispositivos maestro y no cuentan con acceso a la base de datos. Un dispositivo esclavo cesará la transmisión cuando se lo comunique un dispositivo maestro o cuando no reciba respuestas del maestro durante 5s. La máxima potencia de transmisión para un dispositivo viene determinada por los niveles de protección. Para asegurar el funcionamiento cocanal entre un receptor de televisión y un WSD, se establece que el nivel de señal de este último debe ser al menos 33dB más bajo que el del receptor de televisión. De acuerdo con la oficina de comunicaciones, la implementación de dispositivos que funcionen mediante detección es muy lejana aún y no prevén soportar este tipo de dispositivos hasta que se haya conseguido la operación utilizando geolocalización y bases de datos.

3.2.3 TVWS EN OTROS PAÍSES

Las entidades reguladoras de Canadá han establecido las normas para la operación de usuarios sin licencia sobre los TVWS siguiendo el marco principal y técnico establecido por la FCC [37]. El primer paso llevado a cabo fue el establecimiento del denominado Sistema de Banda Rural a Distancia (*Remote Rural Broadband Systems*, RRBS), concebido por el Centro de Investigación de Comunicaciones en 2003. Esta norma se destina a establecer las directrices reguladoras para la operación y uso de los TVWS. Se puso en marcha a principios de 2010. Para su confección Canadá contó con la ayuda del IEEE y otras partes interesadas. En particular, el

IEEE propuso varias opciones para mejorar la absorción en el mercado de los servicios TVWS, modificando varias de las normas aprobadas por la FCC [38]. Actualmente, Canadá sigue adelante con los cambios normativos para dar cabida a una mejor utilización del TVWS.

Existen otras entidades reguladoras que están realizando estudios sobre los TVWS. En Singapur, la normativa está siendo confeccionada por la Autoridad de Desarrollo de las Comunicaciones (*Infocomm Development Authority*, IDA) proporcionando un paquete de información para facilitar la realización de pruebas técnicas sobre los TVWS [39]. Estos ensayos fueron denominados Lugares de Radio Cognitiva (*Cognitive Radio Venues* (CRAVE)). Estos tuvieron comienzo a principio de 2010. La IDA diseñó estos ensayos para poder obtener medidas del mundo real y facilitar el desarrollo de WSDs.

En Europa, el Grupo de Política del Espectro Radio (*Radio Spectrum Policy Group*, RSPG) publicó un informe y posterior dictamen sobre la Radio Cognitiva, incluyendo secciones que trataban los TVWS. Este informe sienta las primeras bases hacia la regulación de los TVWS, que serán dirigidas por el Comité del Espectro Radioeléctrico (CER) [40].

La oficina de comunicación Europea publicó el informe ECC 159 sobre los sistemas de Radio Cognitiva en los TVWS en el rango de los 470-790MHz, que se completó en el informe denominado WGSEPT43 [41]. Este informe señala que los dispositivos que funcionan mediante mecanismos de detección de espectro no son lo suficientemente fiables para garantizar la protección de los receptores de televisión cercanos. Advierten que esta técnica se puede mejorar realizando la detección mediante sistemas colaborativos. Establecen que en la actualidad la opción más fiable es la de utilizar dispositivos que cuenten con acceso a una base de datos.

Todas las indicaciones de estos desarrollos muestran que los TVWS constituirán una banda importante para la comunicación inalámbrica sin licencia, en la que la coexistencia entre las redes será un factor importante para mejorar la calidad de las comunicaciones.

3.3 ESTÁNDARES INALÁMBRICOS TVWS

En esta sección se ofrece un resumen de los diferentes estándares desarrollados con objeto de permitir el uso compartido de los TVWS, haciendo el uso de sistemas de Radio Cognitiva.

El primero de ellos es el ECMA-392, publicado por la Asociación Europea de Fabricantes de Equipo (*European Computer Manufacturers Association*, ECMA) [42, 43]. Su primera edición se publicó en diciembre de 2009 y se actualizó en Junio 2012. El principal objetivo de éste es la creación de normas para las capas MAC y física que permitan la operación sobre los TVWS. Está pensado para su uso en redes ad-hoc y para entornos confinados tales como redes de interiores (ej. “*home networks*”), zonas vecinales, etcétera. Es compatible tanto con redes malladas como centralizadas. Define un esquema de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) con esquemas de modulación por desplazamiento cuadrafásico (*Quadrature Phase Shift Keying*, QPSK), con modulación de amplitud en cuadratura (*Quadrature amplitude modulation*, QAM) con 16 y 64 cuantos (16-QAM y 64-QAM). Para la corrección de errores hacia adelante (*Forward Error Correction*, FEC), utiliza la concatenación de un código *Reed-Solomon* (RS) externo y un código convolucional interno, proporcionando cinco velocidades de codificación diferentes. Soporta anchos de banda de 6, 7 y 8 MHz, compatibles con los canales de TV de cualquier dominio regulador. La velocidad de datos máxima especificada es de 31,64 Mbps. Para proteger a los titulares, se definen mecanismos de selección dinámica de frecuencias y transmisión de control de potencia.

En 2004, el grupo de trabajo IEEE 802.22 se embarcó en un proyecto para desarrollar un estándar con el que especificar las capas física y MAC de una red regional inalámbrica, operando sobre los TVWS, mediante el uso de dispositivos CR. Éste estándar se publicó en 2011, bajo el nombre “WRAN: Acceso a los espacios blancos en las bandas de TV basado en Radio Cognitiva” [44]. Se trata del primer estándar inalámbrico comercial basado en tecnologías de SDR/CR (*Software Defined Radio/Cognitive Radio*) para prestar servicios de acceso banda ancha operando en la banda de UHF (*Ultra High Frequencies*) bajo un principio de no interferencia con los servicios/redes incumbentes, que en este caso son las de TV [45, 46, 47]. Esta interferencia se evita implementando técnicas de DSA (*Dynamic Spectrum Access*). Para ello realizan un censado del espectro antes de su ocupación, con objeto de determinar qué porciones de espectro no están siendo utilizadas por la red primaria y asignan los recursos a los usuarios del sistema secundario, permitiendo incluso que varios sistemas WRAN convivan en una misma zona geográfica.

El estándar IEEE 802.22 especifica una topología centralizada punto a multipunto (ver figura 3.3) en la que una estación base (*Base Station*, BS) puede servir hasta 512 equipos en las instalaciones del cliente (*Customer Premise Equipment*, CPE). La

BS se encarga tanto de gestionar su celda y todos los CPE asociados, como de gestionar la percepción del espectro de los CPE. Los CPE contarán con dos antenas: una direccional y otra omnidireccional. La antena direccional se suele utilizar para comunicar el CPE con la BS. La antena omnidireccional se usa para observar el espectro y realizar medidas sobre él. El CPE enviará la información recogida a la BS, que en función de la información recibida modificará sus parámetros y los de los CPE de forma dinámica para minimizar las interferencias.

Este estándar define que una BS puede alcanzar velocidades de hasta 22 Mbps. Se diferencia con otros estándares por el área de cobertura que ofrece, que puede llegar a ser de hasta 100 Km, dependiendo del tipo de modulación que use. Este rango se reduce a 33 Km cuando CPE transmite con una PIRE de 4 W.

De modo que con este estándar se consigue ampliar la oferta de la familia de estándares inalámbricos publicados por el estándar IEEE 802. Éstos se representan en la figura 3.4 [48].

A continuación se describirán las características básicas de este estándar.

La transmisión en el radio enlace descendente se realiza mediante multiplexación por división de tiempo (*Time Division Multiplexing*, TDM), mientras que en el enlace ascendente se realiza mediante multiplexación por división de frecuencias ortogonales (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, OFDM) para soportar la transmisión simultánea de múltiples CPEs.

Se utiliza OFDM con un tamaño de transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform*, FFT) de orden 2048 para hacer frente a la dispersión del retardo para los enlaces de largo alcance. En función de la distancia a cubrir se emplearán modulaciones 16-QAM, 64-QAM y QPSK, con anchuras de canal de 6,7 u 8 MHz (ver figura 3.5). Incluye opciones de corrección de errores hacia delante (*Forward Error Correction*, FEC) de código convolucional binario y comprobación de paridad de baja densidad (*Low Density Parity Check*, LDPC).

El estándar 802.22 incorpora funciones cognitivas, tanto para proteger a los usuarios legítimos del espectro de televisión, como para asegurar la convivencia entre las redes 802.22. Algunas de las técnicas empleadas para ello son la clasificación y gestión del conjunto de canales, la programación periódica de canales para la detección del espectro, compartición de la información detectada y la creación y gestión de una base de datos.

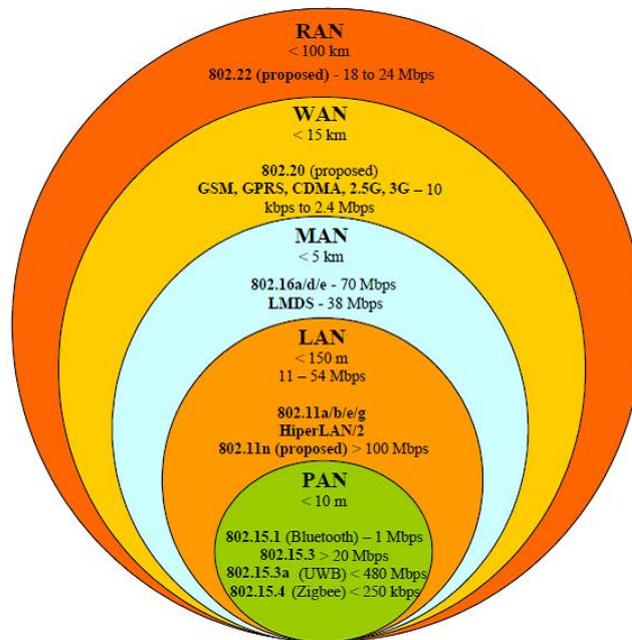


Figura 3.4: Clasificación de estándares IEEE 802 por área de cobertura.

Por otro lado, en septiembre de 2009, el popular grupo de trabajo IEEE 802.11 puso en marcha el desarrollo de un estándar, denominado IEEE 802.11af, para la gestión de los TVWS. Este estándar se desarrolla en base a ser compatible con los distintos parámetros de funcionamiento de los dispositivos de Radio Cognitiva y con los dominios reguladores de todo el mundo.

Los componentes básicos de este estándar [49] son:

- **BASE DE DATOS DE GEOLOCALIZACION (*Geolocation Database, GDB*).**- Se encarga de almacenar, según la ubicación geográfica, las frecuencias libres y los parámetros de operación para los WSDs. El modo de operación de esta base de datos dependerá de los requisitos de seguridad impuestos por cada organismo regulador.
- **SERVIDOR DE REGISTRO DE LOCALIZACION (*Registered Location Secure Server, RLSS*).**- Esta entidad funciona como una base de datos local, que contiene la ubicación y los parámetros de operación de un número pequeño de BSS (*Basic Service Sets*). Se encarga de distribuir los parámetros de funcionamiento permitidos para los puntos de acceso y estaciones que se encuentren bajo su custodia.
- **ENTIDADES DE GEOLOCALIZACION DEPENDIENTES DE LA BASE DE DATOS (*Geolocation-Database-Dependent-Entities, GDDE*).**- Existen varias entidades de este tipo:

- GDD-Enabling Station.- Esta entidad controla el funcionamiento de las estaciones. Puede acceder de forma segura a la GDB para obtener las frecuencias disponibles y los parámetros de operación en su región de cobertura para cualquier instante de tiempo. Por tanto, tiene la autoridad para controlar el funcionamiento de las estaciones en virtud de asegurar su correcto servicio. Los parámetros obtenidos de la GDB son representados a través de un mapa de espacios en blanco (*White Space MAP*, WSM).
- GDD-Dependent Station.- Esta entidad se encarga de obtener las frecuencias y parámetros de operación en forma de WSM.
- **REGISTERED LOCATION QUERY PROTOCOL (RLQP)**.- Funciona como protocolo de comunicación entre la estación *GDD-Enabling* y la estación *GDD-Dependent*. Se utiliza para compartir los canales entre los distintos WSDs. A través de esta comunicación las estaciones pueden seleccionar la potencia y frecuencia de operación de acuerdo a las especificaciones establecidas por cada organismo regulador.

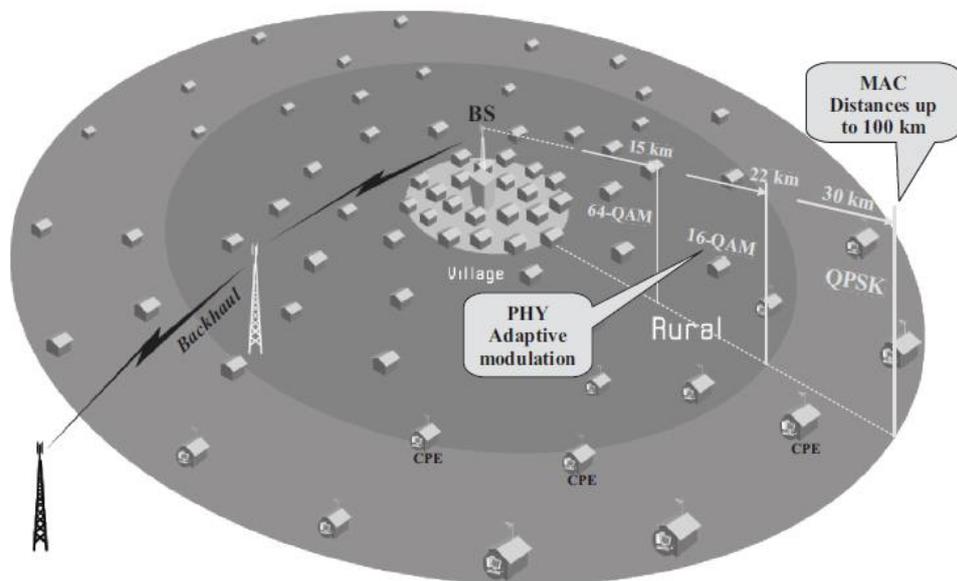


Figura 3.5: Ejemplo de sistema con topología centralizada 802.22 [48].

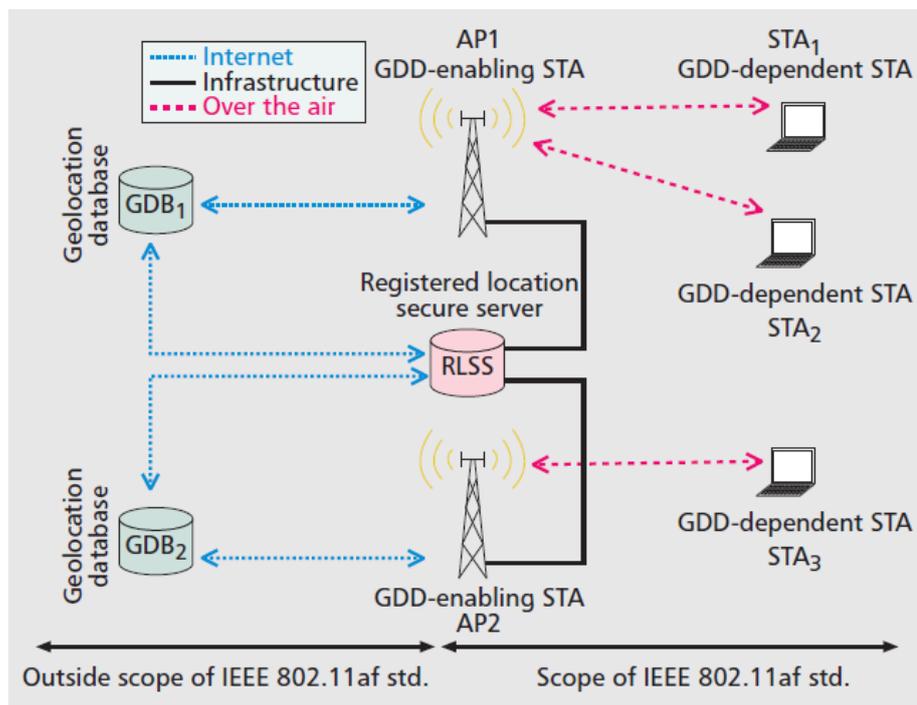


Figura 3.6: Ejemplo de red TVWS incluyendo todos los elementos de la arquitectura 802.11af

En la figura 3.6 se muestra un ejemplo de infraestructura que cumple con el estándar IEEE 802.11af. En ésta se puede observar como el RLSS y la estación *GDD-Enabling* obtienen la lista de los espacios en blanco disponibles a través de Internet. La comunicación entre el RLSS y las estaciones *GDD-Enabling* se realiza mediante infraestructura física y es bidireccional. La comunicación entre las estaciones *GDD-Enabling* y las estaciones *GDD-Dependent* se realiza a través del medio físico aire en alguna de las bandas TVWS o ISM.

En 2011, el IEEE 802.15 formó un nuevo grupo de trabajo para añadir la capacidad de operación sobre los TVWS al estándar IEEE 802.15.4. Este estándar define el nivel físico y las técnicas de control de acceso al medio para redes inalámbricas de área personal con tasas bajas de transmisión de datos (*Low-Rate Wireless Personal Area Network*, LR-WPAN).

Por último, el Comité de Normas IEEE DySPAN (DySPAN-SC), que se ocupa de la radio cognitiva y el acceso dinámico al espectro creó un nuevo grupo de trabajo con objeto de diseñar una norma con la que poder gestionar la operación de las capas MAC y física sobre los TVWS [50]. De acuerdo a las características presentadas, las nuevas capas físicas y MAC permitirán la operación fija y móvil en los TVWS, evitando la interferencia con los usuarios primarios.

3.4 ANÁLISIS DEL PROBLEMA DE COEXISTENCIA EN LOS TVWS

En esta sección se van a examinar seis aspectos del problema de la convivencia en los TVWS.

El primer aspecto problemático se debe a la utilización de los TVWS como recursos públicos sin licencia. Cualquier recurso público y gratuito que esté disponible para cualquier persona tiende a ser utilizado indiscriminadamente hasta ser agotado. En el caso de las comunicaciones inalámbricas este hecho se manifiesta en la congestión del espectro en las bandas sin licencia. Un ejemplo particularmente sombrío de esto ocurrió durante el lanzamiento del iPhone 4 de Apple. El problema surgió cuando se detectó que este dispositivo, ya en el mercado, no podía establecer una conexión WiFi satisfactoria. El análisis del problema concluyó que esta situación fue provocada por la presencia de otros 570 puntos de acceso WiFi en el mismo rango del espectro.

El segundo aspecto está relacionado con el gran número de redes inalámbricas distintas que se desplegarán en los TVWS. En el momento que estas redes soporten estándares diferentes y no se puedan comunicar entre ellas, será muy difícil su coexistencia. Esto provocará que las redes se interfieran entre sí, produciendo errores y colisiones, y como consecuencia se reducirá el caudal y se incrementará el retardo de los paquetes.

Un tercer aspecto se debe a la forma en que las redes TVWS serán desplegadas. Todos los usuarios y los proveedores de servicio de red podrán competir para desplegar redes en la misma zona. Cada entidad podrá desplegar su red de forma independiente y sin coordinación e incluso sin conocer a los otros operadores de la zona.

Un cuarto aspecto es provocado por el rendimiento espectral de los WSDs comerciales de bajo coste. Si dos redes están muy cerca y funcionan en canales adyacentes, la interferencia también puede causar la degradación en la red. Esto se debe a la posible presencia de fugas de banda de los WSDs.

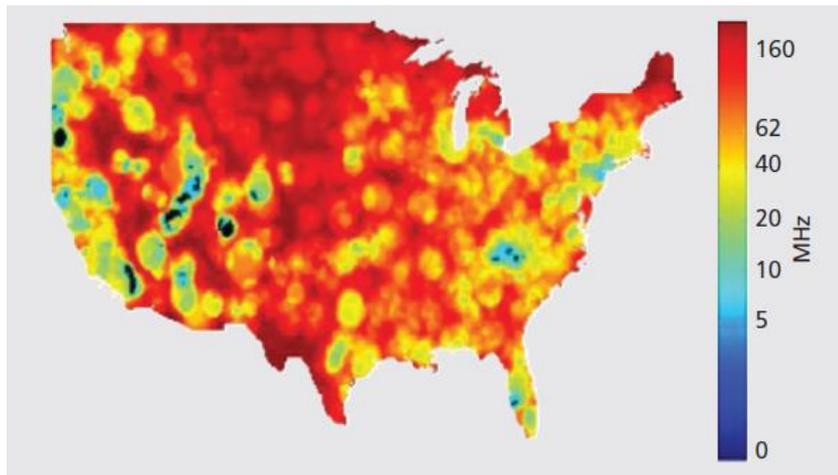


Figura 3.7. Disponibilidad de canales de televisión en los Estados Unidos basándose en medidas recogidas con ayuda del método descrito en [51].

Un quinto aspecto se debe al área de cobertura que se quiera proporcionar. Las redes podrán ser desplegadas tanto por grandes operadores que desplieguen redes de amplia potencia y cubran grandes regiones, como por consumidores particulares que desplieguen redes de baja potencia para cubrir áreas pequeñas. Las redes de largo alcance con alta potencia tienden a usar receptores de alta sensibilidad, mientras que las redes de corto alcance tienden a usar receptores de baja sensibilidad. De forma que, un nivel de interferencia dado, puede ser inofensivo para redes de largo alcance, pero altamente perjudicial a las redes de corto alcance.

El sexto aspecto del problema de la convivencia es la escasez de TVWS en las zonas pobladas. La operación TVWS sólo se permite en los canales de televisión no utilizados a nivel local por los sistemas primarios (emisiones de televisión y micrófono inalámbrico con licencia). En las zonas urbanas con alta densidad de población hay numerosas estaciones de televisión locales, lo que provoca que el número de canales TVWS disponibles sea muy limitado. Se han realizado pruebas sobre la disponibilidad de canales de TV para el funcionamiento sin licencia en el Estados Unidos. La figura 3.7 muestra el resultado de uno de estos estudios.

3.5 MECANISMOS DE COEXISTENCIA

En esta sección se ofrece un panorama detallado de los mecanismos de coexistencia existentes. Generalmente, estos se pueden dividir en dos grandes grupos dependiendo del nivel de cooperación existente entre las redes. Los mecanismos no-cooperativos, que se enumeran en la tabla 3.2, pueden utilizarse de forma autónoma por cualquier red o dispositivo para lograr su coexistencia con otras redes y dispositivos [52]. Estos se pueden utilizar de manera unilateral y no requieren acciones de otros

equipos o sistemas para funcionar. La mayoría de estos mecanismos puede emplearse por cualquier sistema radio de la capa MAC o física. No obstante existen otros mecanismos como la detección de portadora de acceso múltiple (*Carrier Sense Multiple Access*, CSMA), son específicos de uno o varios diseños de la capa MAC o física.

Hay que tener en cuenta que con mecanismos de coexistencia, nos referimos a mecanismos que posibilitan la comunicación y cooperación entre los usuarios del espectro. Esta colaboración no se relaciona con el uso cooperativo de protocolos para mejorar la operación dentro de una red. Por ejemplo, el uso de transformadores de control de potencia (*Control Power Transformers*, CPT) se define como un mecanismo que posibilita el aumento en la vida de la batería mediante la reducción en los niveles de potencia transmitidos [53]. El uso eficaz de los CPT requiere de la cooperación dentro de la red. Si la red que utiliza el CPT opera en la misma frecuencia que otra red cercana, podrá disminuir la potencia de transmisión, reduciendo la interferencia y logrando mejorar la convivencia. Dado que el uso de CPT dentro de la red no requiere la comunicación o la colaboración con otra red, se considera un mecanismo de coexistencia no cooperativo.

La selección dinámica de frecuencias (*Dinamic Frequency Selection*, DFS) permite que los sistemas u operadores puedan compartir el espectro disponible con los sistemas protegidos por la normativa, tales como radares, satélites, sistemas de radiodifusión de televisión, etcétera. A grandes rasgos, su funcionamiento consiste en detectar el canal de operación de los dispositivos protegidos y en caso de hacerlo, cambiar la frecuencia a otro canal o cambiar el sistema de codificación por otro más robusto [54]. Se considerará que un canal es inutilizable cuando se haya superado un cierto umbral de interferencia o la tasa de error de bit (*Bit Error Rate*, BER) sea alta.

La selección dinámica de canales (*Dinamic Channel Selection*, DCS) se utiliza para reducir al mínimo o evitar la interferencia con otras redes. Para ello monitoriza el nivel de interferencia de todos los canales y selecciona el más apropiado para garantizar la calidad de servicio de la comunicación.

La escucha antes de hablar (*Listen Before Talk*, LBT) es un mecanismo eficaz de compartición el espectro ampliamente utilizado en sistemas 802.11 [54]. Su funcionamiento se basa en comprobar si un canal está libre o no antes de realizar una transmisión sobre él. Para ello utilizan mecanismos de evaluación de canal claro (*Clear Channel Assessment*, CCA). Durante el tiempo de observación se mide la

energía en el canal y se compara con un umbral de detección de energía (*Energy Detection Threshold*, EDT). Si el nivel de energía del canal excede el umbral predefinido, el transmisor no realizará la transmisión y esperará un tiempo arbitrario para volver a comprobar si el canal está libre. La LBT, además, limita el tiempo máximo de transmisión sobre un canal, igualando el número de oportunidades de transmisión entre los transmisores.

La modificación del EDT también constituye un mecanismo de coexistencia autónomo que afecta al rendimiento de CSMA y LBT. La variación del EDT provoca una modificación en la capacidad de detección de los equipos. A medida que el EDT aumenta es más difícil detectar los paquetes de otras redes, apareciendo nuevos canales libres. El crecimiento de canales libres incrementará el tiempo de transmisión para una red. Sin embargo, estamos ante un arma de doble filo, ya que si el EDT crece demasiado se producirá un decremento en el rango cobertura. Esto es debido al aumento de la probabilidad de que se produzcan interferencias con otras redes vecinas que transmitan paquetes que se reciben con niveles de energía por debajo del EDT establecido. Esto provocará además, una reducción del número de nodos que pueden servirse y de la capacidad de carga.

Otro mecanismo para facilitar la coexistencia es el despliegue de redes con nodos equipados con antenas direccionales. La transmisión mediante antenas direccionales disminuye la interferencia en comparación con el uso de antenas omnidireccionales. Una antena omnidireccional irradia energía en todas las direcciones, no sólo en la dirección del receptor previsto. Cuando se transmite con una antena direccional, la energía se irradia sólo en la dirección del receptor, disminuyendo de este modo la interferencia en el resto de direcciones. Este mecanismo de división espacial se puede aplicar de forma autónoma para reducir las interferencias entre las redes.

Los mecanismos no cooperativos son generalmente suficientes por sí solos para facilitar la convivencia entre redes en zonas del espectro en las que el número de canales disponibles es suficiente para cubrir la demanda. El reto real de convivencia se materializa cuando el espectro TVWS disponible es insuficiente para proporcionar frecuencias de operación distintas para cada red. En las bandas TVWS, este es un escenario probable, debido a la proliferación de diseños de dispositivos sin licencia y a una alta adopción por los consumidores, sobre todo en áreas metropolitanas densas donde muchos canales de televisión están ocupados por emisoras con licencia. Con la excepción de CSMA, los mecanismos de coexistencia no colaborativos no son válidos para facilitar la coexistencia sobre los TVWS.

El reparto del espectro requiere que todas las partes implicadas en el proceso se pongan de acuerdo en los parámetros de funcionamiento para permitir su uso compartido. Este proceso es complejo y debe tener en cuenta de manera equitativa la demanda individual de tráfico de red, la prioridad y los escenarios de los usuarios [55]. Los mecanismos de coexistencia colaborativos mejoran el rendimiento de todas las redes en el espectro compartido.

Un ejemplo de mecanismo de coexistencia colaborativo mediante multiplexación por división de tiempo (*Time-Division Multiple Access*, TDMA) es el protocolo de contención de balizas (*Contention Beacon Protocol*, CBP), presente en el estándar IEEE 802.22. Se trata de un protocolo de mejor esfuerzo basado en la transmisión de balizas para facilitar la asignación y compartición de canales entre los sistemas 802.22. Define dos modos de funcionamiento diferentes: el etiquetado de espectro (*Spectrum Etiquette*, SE) y la trama de contención bajo demanda (*On-Demand Frame Contention*, ODFC) [56]. En el modo SE, cada sistema 802.22 que accede al espectro elige el canal que minimiza la interferencia con los vecinos. Cuando no existan canales suficientes para cada sistema, se inicia el modo de ODFC. En éste,

los sistemas podrán compartir un mismo canal mediante el envío de tramas de forma alternada. Para definir qué sistema realiza la transmisión se asigna un número de contención aleatorio a cada uno de ellos, permitiendo en cada momento la transmisión al sistema que posea el valor más pequeño.

Los mecanismos colaborativos dependen de la capacidad para intercambiar información entre las redes. Las redes podrán compartir los canales de forma cooperativa cuando estén dispuestas a negociar sus parámetros de operación [57]. El intercambio de información entre las redes requerirá de mecanismos para gestionar la comunicación. En la tabla 3.2 se listan diferentes posibilidades para llevar a cabo este intercambio de información o comunicación. Por ejemplo, se puede incrementar la potencia de transmisión para alcanzar una tasa de datos más alta, en casos en los que el tiempo de canal se comparta con otra red.

	MECANISMO	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
MECANISMOS NO COOPERATIVOS	Selección dinámica de frecuencias (DFS) /Selección dinámica de canales (DCS)	DFS: evitar los canales que ya están ocupados. DCS: cambiar hacia el mejor canal	Ampliamente implementado en muchas redes para la selección de canal inicial	Ineficaz cuando el número de canales disponibles es reducido
	Control de la potencia de transmisión (TPC)	Control de la potencia de transmisión para evitar interferencias.	La mayoría de los protocolos proporcionan una retroalimentación adecuada para TPC	Para ser justo debe ser utilizado por todos usuarios de la red. No aborda mecanismos de intercambio de canales.
	CSMA/LBT	Protocolos para el control de acceso al medio	Ya está implementado en sistemas 802.11. Permite la libre convivencia y el intercambio de canales entre las redes CSMA.	Incompatible con el protocolo TDM. Calidad de servicio limitada.
	Detección del umbral de energía (EDT)	Establece un umbral de detección para decidir si se está detectando el canal libre o no.	Disminuir el EDT disminuye las interferencias en las redes vecinas	Aumentar el EDT incrementa las interferencias en las redes vecinas. Disminuir EDT disminuye el área de cobertura de red.
MECANISMOS COOPERATIVOS	TDMA	El ancho de banda total del medio de transmisión es asignado a cada canal durante una fracción del tiempo total (intervalo de tiempo)	Permite compartir los canales	Complejo de aplicar a menos que dos redes están de acuerdo en la velocidad de trama.
	FDMA	El ancho de banda disponible se divide en canales, asignando éstos a los distintos usuarios y comunicaciones a realizar, sin producir interferencias entre sí.	Permite compartir los canales	Menos eficiente que TDMA, puede requerir bandas de guarda.
	CDMA	División de código compartido coordinada de canal común.	Ampliamente utilizado sistemas móviles 3G. Permite el intercambio de canales.	No es utilizado en ninguna norma sin licencia.
	Sistemas híbridos	Combinaciones de los mecanismos se implementan normalmente, Tales como DFS / TPC / TDMA	El uso de múltiples técnicas permite una mejor convivencia en más tipos de escenarios.	La complejidad de la implementación crece al aumentar el número de canales disponibles.

Tabla 3.2: Mecanismos de reparto de espectro

CAPÍTULO 4

TEORÍA DE JUEGOS

En este capítulo se va a realizar un estudio sobre la teoría de juegos [58]. Se van a describir los componentes principales de los modelos de juego, los tipos de juego básicos y las técnicas para la caracterización de redes estacionarias.

4.1 ELEMENTOS BÁSICOS DE TEORÍA DE JUEGOS

Para comenzar este apartado, vamos a definir qué significa el término *juego* y *teoría de juegos*.

Definición 4.1: *Juego*

Un *juego* es un modelo de un *proceso de decisión interactiva*.

De forma resumida, un proceso de decisión interactiva es un proceso cuyo resultado es una función que depende de las entradas de diferentes entidades encargadas de la toma de decisiones que tienen los mismos objetivos en relación a la salida del proceso.

Definición 4.2: *Teoría de Juegos*

La *teoría de juegos* es el conjunto formado por los modelos (*juegos*) y las herramientas analíticas utilizadas para estudiar los procesos de decisión interactivos.

Se trata, por tanto, de una herramienta matemática que permite modelar y analizar las interacciones entre los agentes racionales encargados de la toma de decisiones, tanto en contextos egoístas como con cierto grado de cooperación. De modo que es un mecanismo que puede ser utilizado, por ejemplo, para realizar el reparto de canales en redes de Radio Cognitiva en la que los dispositivos compitan por la obtención de un canal. Permitiendo así modelar las interacciones entre todos los nodos de una red [59].

4.1.1 ELEMENTOS BÁSICOS DE MODELADO DE UN JUEGO

Ya sea explícita o implícitamente, cada juego incluye los siguientes componentes:

- Conjunto de jugadores.
- Acciones de cada uno de los jugadores.
- Métodos para la determinación de los resultados de acuerdo con las acciones elegidas por los jugadores.
- Preferencias para cada uno de los jugadores definidas sobre todos los posibles resultados.
- Reglas específicas del modelo, por ejemplo, orden de juego.

Cada uno de los elementos de modelado mostrados se relaciona con un componente específico de un proceso de decisión interactiva siguiendo la relación que se muestra en la Tabla 4.1.

Juego	\longleftrightarrow	Proceso interactivo de decisión
Jugadores	\longleftrightarrow	Toma de decisión
Acciones	\longleftrightarrow	Entradas
Salidas	\longleftrightarrow	Salidas
Preferencias	\longleftrightarrow	Objetivos de la toma de decisión
Reglas	\longleftrightarrow	Tiempos de decisión, capacidades radio

Tabla 4.1: Relación entre los elementos de juego y los componentes del proceso de decisión interactivo.

JUGADORES

Los jugadores son las entidades encargadas de la toma de decisiones en el proceso de decisión interactiva. De aquí en adelante denotaremos al conjunto de jugadores como N y a un jugador individual como i o j . Como regla general, los juegos sólo consideran situaciones donde hay dos o más jugadores ya que, en el caso de existir un único jugador, por definición, no puede ser un proceso interactivo.

ACCIONES Y SALIDAS

Las acciones son las adaptaciones disponibles para los jugadores, donde los resultados se determinan por las acciones y el sistema particular en el que los jugadores están operando.

PREFERENCIAS Y FUNCIONES DE UTILIDAD

En un juego, cada jugador, j , tiene una relación de preferencia, \prec_j , que describe las preferencias de ese jugador con respecto a todos los posibles resultados en el espacio resultado, O . Escribimos, $o^2 \succeq_j o^1$ si la preferencia del jugador j hacia la salida o^1 es mayor o igual que hacia la salida o^2 , $o^2 \prec_j o^1$ si la salida estrictamente preferente es la o^1 y $o^2 \sim_j o^1$ si la preferencia hacia las salidas o^1 y o^2 es indistinta.

Por ejemplo, supongamos que el jugador j se enfrenta a dos salidas posibles, una en la que recibe manzanas y otra en la que recibe naranjas. Si el jugador j prefiere manzanas entonces tendríamos la relación, naranjas \prec_j manzanas, que implica que j es al menos tan satisfecho mediante la recepción de las manzanas como lo sería mediante la recepción de las naranjas. Si j es indiferente entre las dos salidas, escribiríamos la relación naranjas \sim_j manzanas.

Para juegos pequeños, es posible enumerar todas las relaciones de preferencia para todos los jugadores sobre todos los resultados posibles. Sin embargo, cuando el tamaño del juego crece, éste puede convertirse con gran rapidez en una situación difícil de manejar. Por ejemplo, en un juego donde cada jugador tiene m posibles acciones podríamos encontrar $m \times n$ resultados diferentes. En consecuencia, una lista completa de todas las preferencias para un solo jugador requiere definir $(m^n)(m+1)/2$ relaciones de preferencia; una lista de todos los jugadores requiere definir $n(m \times n)(m+1)/2$ relaciones de preferencia.

Para captar estas relaciones de preferencia de una forma más compacta, con frecuencia se suelen emplear las funciones de utilidad (a veces llamadas objetivos de los jugadores o funciones de coste), donde cada jugador asigna un número real (llamado recompensa) a cada resultado (por el rigor matemático: $u_j : O \rightarrow \mathbb{R}$) de tal manera que, si $o^2 \prec_i o^1$ entonces $u(o^2) < u(o^1)$, si $o^2 \sim_i o^1$ entonces $u(o^2) = u(o^1)$, y si $o^2 \succeq_i o^1$ entonces $u(o^2) \geq u(o^1)$.

Existen escenarios en los que se tiene información sobre las funciones de utilidad explícitas en lugar de sobre las funciones de preferencia. Afortunadamente, es sencillo pasar de funciones de utilidad a funciones de preferencia ya que, para ello sólo se tiene que utilizar la relación $u(o^2) \succeq_i u(o^1) \Rightarrow o^2 \succeq_i o^1$. Incluso para

algoritmos donde no exista un claro objetivo, conociendo las reglas de decisión, se pueden deducir algunas relaciones de preferencia mediante un análisis de las adaptaciones. Asumiendo que las adaptaciones de jugadores son fijas, si una adaptación del jugador j provoca un cambio de o^1 a o^2 , entonces es razonable asumir que $o^1 \succ_i o^2$, es decir, el algoritmo prefiere o^2 frente a o^1 .

Como las funciones de utilidad pretenden captar la relación de preferencia de un jugador de una manera compacta, los números exactos asignados a las funciones de utilidad son generalmente de importancia secundaria, en el supuesto, claro está, de que las funciones de utilidad conserven las relaciones de preferencia. Por ejemplo, supongamos que el jugador j prefiere las manzanas en vez de las naranjas. Desde el punto de vista de las relaciones de preferencia, si definimos $u(\text{manzanas}) = 1$ y $u(\text{naranjas}) = 0.5$ es lo mismo que escribir las relaciones $u(\text{manzanas}) = 1000$ y $u(\text{naranjas}) = \pi^e$, ya que frente a la elección entre una manzana y una naranja el jugador j sigue prefiriendo la manzana y se prevé que elegirá la manzana. Esta reasignación de números es del todo adecuada para el comportamiento humano, donde las funciones de utilidad en realidad son simulaciones útiles que permiten un análisis más elegante que el que proporcionaría una dependencia exclusiva de las relaciones de preferencia.

En el lenguaje de la teoría de juegos, un jugador que actúa en su propio interés (o actúa de manera que aumente su rentabilidad) se dice que es *racional* [60]. En el proyecto asumiremos que todos los jugadores son racionales, ya que consideraremos que los jugadores son máquinas reprogramables que se encargan de evaluar sus funciones de utilidad. También se asumirá que los jugadores actúan autónomamente, de manera que los jugadores o sus reglas de actuación son *autónomamente racionales*.

Definición 4.3: *Autónomamente racional.*

Una regla de decisión, $d_i : A \rightarrow A_i$ se dice que es autónomamente racional si $b_i \in d_i(a)$ con $b_i \neq a_i$, y cumpliendo que $u_i(b_i, a_{-i}) > u_i(a_i, a_{-i})$.

Tradicionalmente, la utilidad se define como una función del espacio de acción, bajo el supuesto implícito de que existe una correlación clara entre las acciones y los resultados. Esto permite eliminar un paso en el proceso de análisis y en lugar de estudiar funciones de utilidad de la forma $u_i : A \rightarrow \mathbb{R}$ se estudien de la forma

$u_i : O \rightarrow \mathbb{R}$. En el resto del capítulo las funciones de utilidad se expresarán como funciones del espacio de acción en lugar del espacio de resultado.

Los diferentes jugadores participantes en un juego, pueden atribuir diferentes costes a un mismo vector de acción. Por ello, es conveniente hacer uso de un vector que muestre la utilidad que cada jugador asigna a un vector de acción particular. Por ejemplo, en vez de escribir $u_1(a) = 1$, $u_2(a) = -3$ y $u_3(a) = 4$, podemos escribir $u(a) = (1, -3, 4)$.

REGLAS DE MODELADO

Diferentes modelos de juego generan situaciones diferentes, donde la mayoría de las diferencias son capturadas por la variación de los jugadores, las acciones y las funciones de utilidad. Sin embargo, las diferentes situaciones tienen reglas distintas sobre cuándo se permite "jugar" (elegir o cambiar una acción) a los jugadores.

Dependiendo del sistema que estemos modelando, puede ser apropiado asumir diferentes funciones del dispositivo, como puede ser el conocimiento de los objetivos o acciones del resto de jugadores (o no), observaciones perfectas (o no), e información del comportamiento en el pasado (o no).

4.1.2 MAPEO DEL CICLO COGNITIVO EN UN JUEGO

La teoría de juegos se puede aplicar al análisis de las adaptaciones interactivas de cualquier conjunto de agentes inteligentes, y el ciclo de la cognición representa los procesos que tienen lugar en cualquier ser inteligente, incluyendo los seres humanos. Así que no es de extrañar que podamos establecer conexiones entre los componentes de un juego y el ciclo de la cognición.

A modo de ejemplo, se va a detallar la relación entre el ciclo de la cognición en redes de Radio cognitiva y un juego. Cada nodo de una red que implemente la etapa de decisión del ciclo de la cognición es un jugador (siendo por tanto un ente encargado de la toma de decisiones en el proceso de decisión interactiva). Las adaptaciones disponibles para cada jugador forman el conjunto de acciones de éste, y el producto cartesiano de las adaptaciones de los radios forma el espacio de acción. De modo que durante la etapa de observación, se ofrece a los jugadores los argumentos necesarios para evaluar la función de utilidad, y durante la etapa de orientación se evalúa la función de utilidad. Estas relaciones son resumidas en la tabla 4.2.

Juego	↔	Red de radio cognitiva
Jugadores	↔	Radio Cognitiva
Acciones	↔	Acciones
Funciones de utilidad	↔	Metas
Espacio de salida	↔	Salidas posibles
Argumentos de la función de utilidad	↔	Observaciones
Orden de juego	↔	Tiempos de adaptación

Tabla 4.2: Relación entre los elementos de un juego y una red de radio cognitiva

4.2 MODELOS BÁSICOS DE JUEGO

Dependiendo del proceso de decisión interactiva que se esté modelando, un juego tratará los componentes de los jugadores, las acciones, los resultados, las preferencias y las disposiciones referentes al sistema de orden de juego de diferentes maneras. Estos componentes varían de un proceso a otro pero es posible considerar clases o tipos de modelos de juego genéricos. A continuación se van a describir los tres tipos de juegos más representativos: el juego normal, el juego repetido, y el juego repetido con miopía.

4.2.1 JUEGO EN FORMA NORMAL

El modelo de juego más simple para describir un proceso de toma de decisiones interactiva es el juego en forma normal. Un juego en forma normal asume las siguientes reglas de modelado:

- Juego síncrono de disparo único: todos los jugadores toman sus decisiones de forma simultánea y sólo pueden tomar una sola decisión.
- Información perfecta: los jugadores conocen sus propias funciones de utilidad usándolas como funciones del espacio de acción y conocen las funciones de utilidad de todos los otros jugadores implicados en el juego.
- Aplicación perfecta: todos los jugadores efectúan la ejecución que les corresponde, es decir, un jugador no ejecuta accidentalmente la acción a_j^1 en lugar de la a_j^2 .

Utilizando estas reglas, un juego en forma normal se completa con la definición del conjunto de jugadores, el espacio de acción y las funciones de utilidad. Con sólo estos tres componentes el juego queda especificado por la tupla, $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$, donde N representa el conjunto de jugadores, A es el espacio de acción y $\{u_i\}$ el

conjunto de funciones de utilidad de cada jugador $j \in N$, el cual dispone de sus propias funciones de utilidad $u_j : A \rightarrow \mathbb{R}$.

4.2.2 JUEGO REPETIDO

Un juego repetido es una secuencia de etapas, donde cada etapa es la repetición de un mismo juego en forma normal. Debido a que se está reiterando un juego de forma normal, esta forma de juego es también síncrona. Cuando un juego tiene un número infinito de etapas, se dice que el juego es de horizonte infinito; si un juego tiene un número finito de etapas, se dice que el juego es de horizonte finito. Además, puede ser el caso de que el juego termine después de un número aleatorio y desconocido de etapas. Este tipo de juego puede ocurrir cuando se realiza el modelado de las adaptaciones de un algoritmo de hand-off en sistemas móviles, donde existe alguna probabilidad distinta de cero de que el sistema salga de la red.

Los jugadores eligen sus estrategias en cada etapa basándose en su conocimiento del juego, es decir, en las acciones pasadas, en las expectativas futuras, y en las observaciones actuales. Estas estrategias pueden ser fijas, pueden depender de las estrategias de los otros jugadores o se pueden adaptar en función de las acciones observadas en cada etapa.

Cuando los jugadores consideran las expectativas futuras, emplean las funciones de utilidad que incorporan la rentabilidad de la etapa más reciente y una expectativa de tiempo de descuento de la utilidad recibida de todas las etapas futuras. Como las estimaciones de valores futuros de u_i pueden ser erróneos, muchos juegos repetidos modifican las funciones objetivas originales mediante el descuento del coste esperado en futuras etapas multiplicado por un factor de descuento δ , donde $\delta \in (0, 1]$. Resultando que el valor esperado en la etapa k al jugador i viene dada por (4.1), donde a^k denota el vector de acción del jugador en la etapa k . Hay que tener en cuenta que si $\delta = 1$, todos los pagos futuros tendrán igual peso que en la repetición actual del proceso.

$$(Pago descontado en la etapa k) \quad \hat{u}_i((a^k)) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta^k u_i(a^k) \quad (4.1)$$

Suponiendo que las posibles elecciones de estrategias de todos los jugadores se recogen en una secuencia de vectores de acción (a^k) , un jugador, i , que tenga en

cuenta las expectativas futuras para un horizonte infinito valoraría esta secuencia como se muestra en (4.2).

$$(\text{Pago esperado durante todas las etapas}) \quad \hat{u}_i((a^k)) = \sum_{k=0}^{\infty} \delta^k u_i(a^k) \quad (4.2)$$

Con estos componentes, podemos representar un juego repetido por la tupla $\langle N, A, \{\hat{u}_i\}, \{d_i\} \rangle$ donde \hat{u}_i evalúa la secuencia de acción tupla generada por la estrategia d_i .

4.2.3 JUEGO REPETIDO CON MIOPIA

En lugar de considerar las acciones pasadas, las expectativas futuras y las observaciones de los jugadores participantes existe una modalidad de juego repetido en la que los jugadores pueden comportarse de manera miope. En este caso no existirá comunicación entre los jugadores, memoria de los acontecimientos pasados o especulaciones sobre acontecimientos futuros. Cualquier adaptación realizada por un jugador miope se basa en la observación de la etapa más reciente del juego. Como los jugadores no tienen en cuenta las posibles rentabilidades futuras, no son posibles las complejas estrategias multi-etapa.

Los juegos repetidos con miopía son representados por una tupla compacta $\langle N, A, \{u_i\}, \{d_i\} \rangle$, donde $\{u_i\}$ es una función de utilidad de la repetición de una jugada en donde se asume que las actualizaciones se realizan de manera síncrona.

4.2.4 JUEGOS REPETIDOS CON MIOPIA NO SÍNCRONOS

Como se define normalmente en la literatura de teoría de juegos, todas las decisiones en cada etapa de un juego repetido se realizan simultáneamente. La reproducción simultánea, sin duda, tiene algunos problemas en el proceso de decisión interactivo, a la vez que la sincronización implícita es difícil de lograr en redes de radio cognitivas donde los procesos de toma de decisiones al azar o asíncrono se encuentran con alta frecuencia.

Un juego repetido miope no síncrono es un juego miope repetido en el que las decisiones no tienen que ser realizadas sincrónicamente. Esto tiene el efecto de modelado de limitar el número de jugadores permitidos para actualizar su estrategia en cada etapa. Este tipo de juegos se representa por la tupla $\langle N, A, \{u_i\}, \{d_i\}, T \rangle$.

4.3 JUEGOS NO COOPERATIVOS Y EQUILIBRIO DE NASH

Un juego no cooperativo es aquel en el que cada jugador sólo se preocupa de su propio beneficio e ignora al resto de jugadores, por lo cual intenta elegir la estrategia óptima para maximizar su función de utilidad. Uno de los resultados más utilizados en el contexto de juegos no cooperativos es el llamado Equilibrio de Nash (*Nash Equilibrium*, NE).

Informalmente, un vector de acción no es un elemento de red si ningún jugador puede mejorar su rendimiento sin complicidad con otro jugador. Formalmente, el NE se define como:

Definición 4.4: *Equilibrio de Nash.*

Se dice que un vector de acción a^* es un NE si y solo si se cumple la relación $u_i(a) \geq u_i(b_i, a_{-i}^*) \forall_i \in N, b_i \in A_i$.

En otras palabras, se puede decir que el juego ha llegado a un Equilibrio de Nash cuando ningún jugador puede mejorar su propia utilidad al cambiar su estrategia cuando el resto de jugadores mantienen las suyas. Por lo tanto, el Equilibrio de Nash define la estrategia con mejor respuesta (*Best Response*, BR) de cada jugador.

En [60] se interpreta un NE como "un estado de equilibrio donde cada jugador tiene una expectativa correcta de la conducta de los otros jugadores y actúa racionalmente". Esta interpretación es razonable para juegos de forma normal en donde se puede suponer el conocimiento perfecto. De modo que para aplicar los modelos de juego, es razonable suponer que cada jugador individual conoce la forma de las funciones de utilidad del resto de jugadores del sistema. Siendo útil en casos en los que todos ellos tengan el mismo objetivo (por ejemplo, la maximización de SINR). Sin embargo, el número infinito de posibles condiciones de salida hace que sea poco probable que se conozcan los valores exactos de las funciones de utilidad del resto de jugadores. Incluso sin ninguna habilidad para inferir otras funciones de utilidad de los jugadores, el concepto NE tiene una implicación importante en ambientes no cooperativos modelándolos como un juego repetido.

Teorema 4.1: *NE y estado estacionario.*

Dada un juego $\langle N, A, \{u_i\}, \{d_i\}, T \rangle$ donde todos los jugadores son autónomamente racionales, si el juego $\langle N, A, \{u_i\} \rangle$ tiene un NE a^* , entonces a^* es un punto fijo para d .

Demostración: suponga que a^* no es un punto fijo. Entonces para algún $i \in N$ debe haber alguna $b_i \in d_i(a^*)$ con $b_i \neq a_i^*$ tal que $u_i(b_i, a_{-i}^*) > u_i(a_i^*, a_{-i}^*)$. Y esto contradice la suposición de que a^* es un NE. Además, a^* debe ser un punto fijo para d .

Definición 4.5: *Punto fijo.*

Sea f una función de un conjunto A en sí mismo. Decimos que $x \in A$ es un punto fijo de f si $f(x) = x$.

Si se aplica una función a un conjunto, podemos imaginar que la función desplaza a los puntos del conjunto. Por ejemplo, la función $f(x) = 1 + x$, provoca que los puntos se trasladen una unidad a la derecha. Con esta idea de movimiento, un punto fijo es un punto que no se mueve, se mantiene fijo donde está independientemente del valor de entrada. Así, un punto fijo es invariante bajo la función, permanece inalterado sin importar cuántas veces se aplique ésta. Aplicando esto a un juego, se corresponde con la situación en la que da igual que éste se vuelva a repetir, ya que la salida será invariante.

Así que, sin saber nada del juego, salvo que los jugadores son autónomamente racionales, sabemos que un NE debe ser un punto fijo para todas las normas de decisión que satisfagan la racionalidad individual. Esto no imposibilita la existencia de otros puntos fijos sin que se alcance el NE, bajo ciertas normas de decisión autónomamente racionales. A continuación se muestran las condiciones para las cuales un conjunto de puntos fijos coinciden con los NE de un juego con temporizaciones round-robin, al azar, asíncrona, y síncrona:

- Mejor respuesta, i.e., $d_i(a) = \{b_i \in A_i : u_i(b_i, a_{-i}) \geq u_i(a_i, a_{-i}) \ \forall a_i \in A_i\}$
- Mejor respuesta aleatoria, i.e. $d_i(a) = \text{rand}(\{u_i(b_i, a_{-i}) \geq u_i(a_i, a_{-i})\})$
- Mejor respuesta exhaustiva en un espacio de acción finita, es decir, si existe una $b_i \in A_i : u_i(b_i, a_{-i})$ entonces $d_i(a) = \{b_i \in A_i : u_i(b_i, a_{-i}) > u_i(a_i, a_{-i})\}$

Como hemos visto hasta ahora, el Equilibrio de Nash es el resultado esperado del juego; pero el problema que ahora nos surge es verificar que dicho equilibrio existe. Además, el Equilibrio de Nash no tiene por qué ser único, es más, sólo para ciertos casos especiales se cumple esta propiedad. De hecho, incluso probada su existencia, sigue abierto el problema de cómo alcanzar esta situación de equilibrio.

4.3.1 IDENTIFICACIÓN DE NE

La identificación de los estados estacionarios en juegos en forma normal o repetida es bastante difícil. La única forma genérica para identificar el NE en un juego es la de realizar una búsqueda aplicando en cada repetición del juego la definición de NE hasta alcanzar la convergencia. Este proceso de búsqueda se puede ver reducido en algunos juegos especiales, pero no todos los juegos cumplen estas propiedades. Alternativamente algunos análisis se realizan mediante simulación, en estos se intenta reducir al máximo el número de pasos necesario para alcanzar el equilibrio. Por ejemplo en [61] se usa una simulación exhaustiva que dura varios días para mostrar que en una red GPRS empleando adaptaciones velocidad-potencia presenta 4 NEs, incluso en casos en los que el sistema incluya solo 7 jugadores.

Para juegos finitos, un algoritmo válido para identificar los NE es la Eliminación Iterativa de Estrategias Dominantes (*Iterative Elimination of Dominated Strategies*, IEDS).

Definición 4.6: *Estrategia dominante.*

Se dice que una acción (estrategia) a_i es dominada por una acción b_i si $u_i(b_i, a_{-i}) \geq u_i(a_i, a_{-i})$ con $a_{-i} \in A_{-i}$ y $u_i(b_i, b_{-i}) > u_i(a_i, b_{-i})$ con $b_{-i} \in A_{-i}$.

En las siguientes secciones se utilizarán los siguientes términos:

- Estrategia no dominante- una acción (estrategia) a_i tal que no exista ninguna acción $b_i \in A_i$ que domine a a_i .
- Estrategia dominante- una acción (estrategia) a_i que domina todos los $b_i \in A_i \setminus a_i$.

De forma resumida el algoritmo general para encontrar el NE en un juego en forma normal $\Gamma = \langle N, A \{ \hat{u}_i \} \rangle$ es el siguiente:

1. Asignamos $k = 0, A^k = A$
2. $k = k + 1$.
3. Formamos A^k eliminando todas las estrategias dominantes (acciones) $\forall_i \in N$.
4. Si $A^k = A^{k-1}$, terminamos el algoritmo. En otro caso volvemos al punto 2.

Si este algoritmo termina con A^k como un único vector de acción a^* , entonces a^* es un NE ([62], proposición 5.3]) y se dice que es IEDS resoluble o resoluble dominante. No obstante no todos los juegos son IEDS resolubles.

Definición 4.7: *Estrategia estrictamente dominante.*

Una acción (estrategia) a_i se dice que estrictamente dominada por la acción b_i si $u(b_i, a_{-i}) > u(a_i, a_{-i})$ para todo $a_{-i} \in A_{-i}$.

Consideramos que una estrategia es estrictamente dominante si estrictamente domina a todas las otras estrategias y podemos definir un algoritmo mediante el requerimiento de que las estrategias estrictamente dominantes sean eliminadas en cada iteración. Los pasos de este algoritmo son los siguientes:

1. Asignamos $k = 0, A^k = A$
2. $k = k + 1$.
3. Formamos A^k eliminando todas las estrategias estrictamente dominantes (acciones) $\forall_i \in N$.
4. Si $A^k = A^{k-1}$, terminamos el algoritmo. En otro caso volvemos al punto 2.

Si este algoritmo termina con A^K como un único vector de acción a^* , entonces a^* es aún un NE y este NE es el único existente en el juego.

4.3.2 EXISTENCIA DE NE

Como hemos visto en el apartado anterior no todos los juegos con NE son IEDS resolubles y no todos los juegos tienen NE.

Para identificar si un juego tiene NE se puede utilizar la teoría del punto fijo. Definimos una función de mejor respuesta para un jugador i , $\hat{B}_i(a)$, la cual devuelve un conjunto de acciones que maximizan la utilidad para un jugador i en un vector de acción a dado. Formalmente:

$$\text{(mejor respuesta)} \quad \hat{B}_i(a) = \{b_i \in A_i : u_i(b_i, a_{-i}) \geq u_i(a_i, a_{-i}) \forall a_i \in A_i\} \quad (4.3)$$

Ahora definimos la función de mejor respuesta síncrona para todos los jugadores en el juego, $\hat{B}(a)$ como la aplicación simultánea de (4.3) $\forall_i \in N$ como se muestra en (4.4).

$$\text{(mejor respuesta síncrona)} \quad \hat{B}(a) = \times_{i \in N} \hat{B}_i(a) \quad (4.4)$$

Ahora consideremos un vector de acción a^* tal que $a^* \in \hat{B}(a^*)$. Si se examina la definición de NE, podemos ver que a^* puede ser un NE. Por tanto si $\hat{B}(a)$ tiene un punto fijo, entonces el juego tiene un NE. Para determinar que $\hat{B}(a)$ tiene un punto fijo requiere la introducción del teorema del punto fijo de Kakutani.

Teorema 4.2: *Punto fijo de Kakutani [60].*

Dado $f : X \rightarrow X$, un semiconjunto convexo evaluado en un conjunto no vacío convexo compacto $X \subset \mathbb{R}^n$, entonces hay algún $x^* \in X$ tal que $x^* \in f(x^*)$.

Asumiendo que conocemos que $\hat{B}(a)$ es una función semi-continua superior y que A es un subconjunto de un espacio euclídeo no vacío, compacto y convexo, sabemos que un juego tiene un NE. Mientras verificar que A es un subconjunto no vacío, compacto y convexo es trivial verificar que $\hat{B}(a)$ es una función semi-continua superior parece ser bastante difícil. Afortunadamente, el teorema 1.2 en [63] proporciona lo siguiente.

Teorema 4.3: *punto fijo de Glicksberg-Fan-Debreu.*

Dada una forma normal del juego $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$, donde A_i es un subconjunto de $\mathbb{R}^m \forall_i \in N$ no vacío, compacto y convexo, y u_i es continuo y cuasi cóncavo en a_i , entonces Γ tiene un NE de estrategia pura.

Como se mencionó en el párrafo anterior, la demostración del teorema del punto fijo de Kakutani y de que la parte superior del semi-continuo $\hat{B}(a)$ está implícito en todos los u_i continuos en a y cuasi-cóncavos en a_i donde la cuasi-concavidad se define formalmente como sigue.

Definición 4.8: *Cuasi-Concavidad.*

Una función $f : X \rightarrow \mathbb{R}$ se dice que es cuasi cóncava si $\forall x^1, x^2 \in X$, $\alpha \in (0,1)$ la siguiente relación se satisface: $f(\alpha x^1 + (1 - \alpha)x^2) > \min\{f(x^1), f(x^2)\}$.

La función f será estrictamente cuasi cóncava si se cumple la relación: $f(\alpha x^1 + (1 - \alpha)x^2) > \min\{f(x^1), f(x^2)\}$. Una definición equivalente para la cuasi concavidad es una función para la que todos sus conjuntos de nivel superior sean convexos. Dado un punto a^* y una función $f : A \rightarrow \mathbb{R}$, el conjunto de nivel superior para un a^* viene dado por $U(a^*) = \{a \in A : f(a) \geq a^*\}$.

4.3.3 EQUILIBRIO EN ESTRATEGIAS MIXTAS

Para superar las limitaciones existentes en algunos juegos finitos en forma normal, los cuales no pueden alcanzar un NE, muchos autores han sugerido el uso de extensiones mixtas de los juegos en forma normal. En ésta los jugadores emplean estrategias mixtas en lugar de acciones discretas.

Definición 4.9: *Estrategias Mixtas.*

Dado un conjunto de acción A_i , una estrategia mixta para el jugador i , $\alpha_i = (p_i(a_i^1), p_i(a_i^2), \dots, p_i(a_i^{|A_i|}))$, es una asignación de probabilidades, $p_i(a_i^k)$, tal que $p_i(a_i^k) \in [0,1]$ y $\sum_{k=1}^{|A_i|} p_i(a_i^k) = 1$.

Aquellos $a_i^k \in A_i$ para los cuales $p_k > 0$ se dice que están en el soporte de α_i . Dado un espacio de acción A y un conjunto de jugadores N , el conjunto de todas las posibles estrategias mixtas i se denotan por el símbolo $\Delta(A_i)$ y $\Delta(A) = \prod_{i \in N} \Delta(A_i)$ se usa para hacer referencia al conjunto de todas las posibles estrategias mixtas tupla donde $\alpha_i \in \Delta(A_i)$. Para completar la terminología necesaria para la extensión mixta de un juego en forma normal, $\Gamma = \langle N, A, \{U_i\} \rangle$ se tiene: dado el vector de estrategia mixto $\alpha_i \in \Delta(A_i)$, el jugador i tiene una utilidad esperada $U_i(a)$ dada por (4.5) donde $p(a) = \prod_{i \in N} p_i(a_i)$.

$$U_i(\alpha) = \sum_{a \in A} p(a)u_i(a) \tag{4.5}$$

Con la terminología precedente en mente, dada una forma de un juego, $\Gamma = \langle N, A, \{U_i\} \rangle$, su extensión mixta viene dada por $\Gamma = \langle N, \Delta(A), \{U_i\} \rangle$. La mejor respuesta mixta para el jugador i al vector de una estrategia mixta se muestra en la ecuación (4.6) y la mejor respuesta síncrona a un vector de estrategia α se muestra en la ecuación (4.7).

$$\hat{B}_i^\alpha(\alpha) = \{ \beta_i \in \Delta(A_i) : U_i(\beta_i, \alpha_{-i}) \geq u_i(\alpha_i, \alpha_{-i}) \forall \alpha_i \in \Delta(A_i) \} \quad (4.6)$$

$$\hat{B}^\alpha(\alpha) = \prod_{i \in N} \hat{B}_i^\alpha(\alpha) \quad (4.7)$$

([60], (p. 32)) afirma que (4.5) es una función multilinear lo que implica que es continua y cóncava (y por tanto cuasi-concava) lo que implica que (4.7) es superior y semi-continua.

Teorema 4.4: *Teorema del punto fijo de Nash* ([63], Teorema 1.1).

Cada forma normal del juego $\Gamma = \langle N, A, \{U_i\} \rangle$ tiene un subconjunto no vacío, compacto y convexo A_i de $\mathbb{R}^m \forall i \in N$. Si $u_i \forall i \in N$ es continuo y cuasi-concavo en a_i , entonces Γ tiene una estrategia pura de NE.

Como se ha comentado anteriormente, hay ciertos tipos particulares de juego en los que, por sus características, se puede afirmar que existe el equilibrio de Nash y que se puede converger a él de forma iterativa. Uno de esos casos es el juego potencial, cuyas características se definen a continuación.

4.3.4 ÓPTIMO DE PARETO

Cabe destacar que los NE no son los únicos puntos con los que se obtiene una situación de equilibrio. Uno de los más representativos en ámbito de teoría de juegos es el equilibrio de Pareto, el cual introduce la idea de justicia.

Una situación pareto óptima es aquella en la cual se cumple que no es posible beneficiar a una persona sin perjudicar a otra. Si una acción genera o produce provecho, comodidad, fruto o interés sin perjudicar a otro, despertará un proceso natural de optimización que permitirá alcanzar un punto óptimo. Ese punto óptimo, es el conocido como Óptimo de Pareto.

Formalmente queda definido por:

Definición 4.10: *Óptimo de Pareto*

Un vector de acción, a^* , se dice que es un Óptimo de Pareto si existe un vector de acción tal que para al menos un jugador.

4.4 JUEGOS POTENCIALES

Un juego potencial es un juego en la forma normal que tiene la propiedad de que existe una función denominada función potencial, que refleja el cambio en el valor acumulado de la desviación unilateral de cada jugador. Los juegos potenciales se dividen en 5 clases o tipos: juegos potenciales exactos, juegos potenciales pesados, juegos potenciales ordinales, juegos potenciales ordinales generalizados y juegos ε -potenciales generales. A continuación definiremos cada uno de estos juegos.

JUEGOS POTENCIALES EXACTOS

Definición 4.11: *Juego potencial exacto.*

Un juego en forma normal, $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$, se dice que es un juego potencial exacto si existe una función, $V : A \rightarrow \mathbb{R}$, conocida que tiene una función potencial exacta que satisface la condición $u_i(b_i, a_{-i}) - u_i(a_i, a_{-i}) = V(b_i, a_{-i}) - V(a_i, a_{-i}) \forall a \in A$.

Para toda función de utilidad diferencial, una condición equivalente es la existencia de una función potencial, V , que satisface la ecuación (4.8) $\forall i \in N, \forall a \in A$.

$$\frac{du_i(a)}{da_i} = \frac{dV(a)}{da_i} \quad (4.8)$$

JUEGOS POTENCIALES PESADOS

Un juego potencial ponderado relaja las condiciones en un juego potencial exacto de modo que la relación diferencial de la igualdad se escala por un peso asociado a cada jugador.

Definición 4.12: *Juego potencial pesado.*

Un juego en forma normal, $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$, se dice que es un juego potencial pesado si existe una función, $V : A \rightarrow \mathbb{R}$, conocida como función potencial pesada que satisface la condición:

$$u_i(b_i, a_{-i}) - u_i(a_i, a_{-i}) = \alpha_i [V(b_i, a_{-i}) - V(a_i, a_{-i})] \quad \forall a \in A, \alpha_i > 0.$$

Igual que en el caso de los juegos potenciales exactos, se puede realizar una formulación equivalente para los juegos potenciales pesados siempre que la función de utilidad sea diferencial en todos los casos. De manera que un juego en la forma normal es una función de utilidad pesada si existe una función, V que satisface la ecuación (4.9) $\forall i \in N, \forall a \in A$.

$$\frac{du_i(a)}{da_i} = \alpha_i \frac{dV(a)}{da_i} \quad (4.9)$$

JUEGO POTENCIAL ORDINAL

Si nos relajamos aún más en la relación existente entre V y la función de utilidad de manera que solo se conserven los cambios de signo, entonces tendremos un juego potencial ordinal.

Definición 4.13: *Juego potencial ordinal.*

Un juego en forma normal, $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$, se dice que es un juego potencial ordinal si existe una función, $V : A \rightarrow \mathbb{R}$, conocida como función potencial ordinal que satisface la condición $u_i(b_i, a_{-i}) - u_i(a_i, a_{-i}) > 0 \Leftrightarrow V(b_i, a_{-i}) - V(a_i, a_{-i}) > 0 \quad \forall i \in N, \forall a \in A$.

Como en los casos previos, se puede definir una formulación alternativa para funciones de utilidad diferenciables, definiendo un juego potencial ordinal en aquellos casos en los que existe una función $V : A \rightarrow \mathbb{R}$ que satisface la ecuación (4.10) $\forall i \in N, \forall a \in A$.

$$\text{sgn} \left\{ \frac{du_i(a)}{da_i} \right\} = \text{sgn} \left\{ \frac{dV(a)}{da_i} \right\} \quad (4.10)$$

Curiosamente, si un juego es un juego exacto o un juego potencial pesado con funciones de utilidad diferenciables, entonces su función potencial también debe ser diferenciable. Sin embargo si un juego es un juego potencial ordinal con una función de utilidad diferenciable, entonces la función potencial no tiene por qué ser diferenciable.

JUEGOS POTENCIALES ORDINALES GENERALIZADOS.

Definición 4.14: *Juego potencial ordinal generalizado.*

Un juego en forma normal, $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$, se dice que es un juego potencial ordinal generalizado si existe una función, $V : A \rightarrow \mathbb{R}$, conocida como función potencial ordinal que satisface la condición $\varepsilon_2 > 0 = \min_{i \in N} \{\alpha_i, \varepsilon_i\} \forall i \in N, \forall a \in A$

JUEGOS ε -POTENCIALES ORDINALES

A continuación presentamos una clase más de juegos potenciales, los juegos ε -potenciales ordinales, que son especialmente útiles para establecer la convergencia de juegos potenciales con un conjunto infinito de acciones.

Definición 4.15: *Juegos ε -potenciales ordinales.*

Un juego en forma normal, $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$, se dice que es un juego ε -potencial generalizado si existe una función, $V : A \rightarrow \mathbb{R}$, conocida como función ε -potencial generalizada que dado $\varepsilon_1 > 0$ y $\varepsilon_2 > 0$ satisface la condición $u_i(b_i, a_{-i}) > u_i(a_i, a_{-i}) + \varepsilon_1 \Rightarrow V(b_i, a_{-i}) > V(a_i, a_{-i}) + \varepsilon_2 \forall i \in N, \forall a \in A$.

De este modo, de acuerdo a la definición, un juego potencial es un tipo de juego caracterizado por la función potencial V y la relación entre ésta y las funciones de utilidad u_i . En el caso concreto de los juegos potenciales exactos, que serán el tipo de juego que va a considerarse en este proyecto, se cumple que las desviaciones unilaterales en la función de utilidad (cambio de u_i de un único jugador, al modificar únicamente éste su estrategia) se traducen en una desviación equivalente en la función potencial (V cambia en la misma medida). Otra propiedad importante es que los equilibrios de Nash son máximos de la función potencial V .

Un juego potencial en el que sus jugadores toman las decisiones mediante una política mejor respuesta de forma secuencial (elección de la mejor estrategia posible frente al perfil observado de sus oponentes) acabará alcanzando el equilibrio de Nash en un número finito de pasos. Además, maximizará la función potencial.

Teniendo en cuenta esta propiedad, si en una red inalámbrica cognitiva podemos modelar el proceso iterativo de decisión de los recursos a utilizar mediante un juego potencial, podremos asegurar la existencia de soluciones de equilibrio. Si además, esta función potencial se corresponde con la función objetivo a maximizar en la red

(la utilidad), conseguiremos que jugando dicho juego, se pueda resolver el problema de la asignación de recursos.

4.4.1. RELACIÓN ENTRE CLASES POTENCIALES

Mediante la aplicación de las definiciones de la sección anterior, es evidente que todos los juegos potenciales exactos son un caso del juego potencial pesado (en el que $\alpha_i = 1 \forall i \in N$); todos los posibles juegos pesados son un juego potencial ordinal; y todos los juegos potenciales ordinales son juegos potencial ordinales generalizados. Además todos los juegos potenciales pesados son también un juego ε -potencial generalizado.

Teorema 4.5: *Juegos ε -potenciales pesados y generalizados.*

Si $\Gamma = \langle N, A, \{u_i\} \rangle$ es un juego potencial pesado, entonces Γ es también un juego ε -potencial generalizado.

Demostración: como $u_i(b_i, a_{-i}) - u_i(a_i, a_{-i}) = \alpha_i [V(b_i, a_{-i}) - V(a_i, a_{-i})] \forall i \in N$,
 $u_i(b_i, a_{-i}) > u_i(a_i, a_{-i}) + \varepsilon_1 \Rightarrow V(b_i, a_{-i}) > V(a_i, a_{-i}) + \varepsilon_2$. Si se ajusta el valor
 $\varepsilon_2 = \min_{i \in N} \{\alpha_i, \varepsilon_1\}$ entonces tenemos el requisito $\varepsilon_2 > 0$ de la definición 4.13 correspondiente al juego ε -potencial generalizado.

CAPÍTULO 5

NEGOCIACIÓN

Desde comienzos del siglo 20, las frecuencias del espectro de comunicaciones han sido controladas por las entidades reguladoras del gobierno. En respuesta a los crecientes avances en las tecnologías radio, los reguladores han abierto algunas partes del espectro disponible y las han puesto a disposición de usuarios sin licencia. Además, han reformado las políticas de control tradicionales y han permitido transmisiones oportunistas sobre las zonas no utilizadas de las bandas del espectro con licencia. Este paradigma nos desplaza hacia la necesidad de diseñar nuevos mecanismos para repartir las frecuencias libres, de una manera más flexibles y eficiente. En este capítulo, se hace un repaso de las técnicas existentes para abordar la problemática del reparto de espectro entre operadores de red y redes de Radio Cognitiva, así como de los problemas que estos presentan. Igualmente se mostraran los mecanismos que se han desarrollado en este proyecto fin de carrera para realizar el reparto y negociación de canales entre los diferentes operadores de red, que logran solucionar muchos de los problemas encontrados en las técnicas existentes.

5.1 INTRODUCCIÓN

Las comunicaciones *wireless* dependen de las frecuencias del espectro como principal fuente. A medida que el número de tecnologías de comunicación y redes *wireless* aumenta, crece la necesidad de utilizar esquemas para regular el acceso al espectro.

Debido a la naturaleza dinámica del problema de reparto de espectro, es difícil analizar y proporcionar esquemas de control de acceso a éste. Existen varias técnicas apropiadas para abordar este problema: por un lado, la teoría de juegos y la teoría de subastas conforman herramientas útiles para estudiar el comportamiento estratégico de los participantes de la red. Por otro lado, la teoría de grafos sirve para evaluar los sistemas y encontrar la solución óptima, en problemas tales como la asignación de canal. En este proyecto se ha apostado por la teoría de juegos, al ser una herramienta apropiada para el modelado de las interacciones estratégicas entre entidades tomadoras de decisión racionales.

5.2 MECANISMOS DE COMPARTICIÓN DE ESPECTRO TVWS EXISTENTES

Actualmente son muchos investigadores que están involucrados en el diseño de esquemas de reparto del espectro. En este apartado se mostrará un conjunto de las contribuciones más destacadas en este campo. Con ello, se quiere proporcionar una visión general del estado del arte actual. Ya que es imposible mencionar todos los resultados de los trabajos seleccionados, por motivos de extensión se va a describir brevemente su modelo de juego y resultados principales.

Tal y como se muestra en la tabla 5.1 el problema de compartición de espectro se puede dividir en tres grupos principales, dependiendo de quienes van a ser los jugadores: operadores transmitiendo en bandas bajo licencia, operadores transmitiendo en bandas sin licencia y redes de Radios Cognitivas. Nos centraremos en el segundo tipo de escenario.

ESQUEMA DE COMPARTICIÓN DE ESPECTRO	JUGADORES	ESTRATEGIA	RESULTADO
<i>Asymmetric Network Operators</i> [64]	Operadores WAN y WiFi	Selección del operador	Equilibrio de Nash
<i>National Border Spectrum Sharing</i> [65]	Operadores celulares	Potencia piloto	Equilibrio de Nash
<i>Network Operators' Spectrum Sharing</i> [66]	Operadores celulares	Potencia piloto	Equilibrio de Nash
<i>Heterogeneous Wireless Systems</i> [67]	Sistemas inalámbricos de alta y baja potencia	Densidad de potencia espectral	Óptimo de Pareto
<i>WiFi Operators' Spectrum Sharing</i> [68]	Operadores WiFi	Selección de canal	Equilibrio de Nash
<i>Opportunistic Spectrum Sharing</i> [69, 70, 71, 72]	Radios Cognitivas	Selección de canal	Equilibrio
<i>Auction-Based Spectrum Sharing</i> [73]	Radios Cognitivas	SNR y potencia	Equilibrio de Nash y óptimo de Pareto
<i>Multi-Cell OFDMA Spectrum Sharing</i> [74]	Radios Cognitivas	Rate	Equilibrio de Nash

Tabla 5.1: Esquemas de compartición de espectro.

5.2.1 COMPARTICIÓN DE ESPECTRO ENTRE SISTEMAS INALÁMBRICOS HETEROGÉNEOS

En primer lugar, vamos a estudiar la situación en la que varios sistemas inalámbricos heterogéneos (por ejemplo, dispositivos Bluetooth o dispositivos WiFi IEEE 802.11), comparten una banda del espectro sin licencia. Éstos actuarán de forma egoísta, tratando de maximizar su tasa transmisión. *Etkin* modeló esta situación como un juego no cooperativo, y propuso varias normas y protocolos para que los dispositivos inalámbricos pudieran compartir el ancho de banda de forma justa y eficiente [67].

MODELO DE JUEGO DE UN SOLO DISPARO.

Supongamos que M sistemas inalámbricos, compuestos por un transmisor y un receptor, comparten una misma banda sin licencia de ancho de banda W Hz. Sea $p_i(f)$ con $f \in [0, W]$ la densidad espectral de potencia del sistema i , con $i = 1, \dots, M$, entonces la potencia total para cada sistema no excederá P_i :

$$\int_0^W p_i(f) df \leq P_i$$

De acuerdo con esto, cada sistema elegirá la potencia de operación que maximice su tasa o velocidad de transmisión. En esta operación se tendrá en cuenta la asignación de energía de todos los participantes. Para conseguir esto, *Etkin* estableció que el sistema i , deberá elegir la densidad espectral de potencia $p_i(f), f \in [0, W]$ que maximice su tasa de transferencia:

$$R_i = \int_0^W \log\left(1 + \frac{|h_{i,i}|^2 p_i(f)}{n_o + \sum_{i \neq j} |h_{j,i}|^2 p_j(f)}\right) df$$

Donde $h_{j,i}$, representa la ganancia del canal entre el transmisor j y el receptor i y n_o es la potencia del ruido.

Suponiendo que cada sistema tiene información perfecta, *Etkin* demostró que el reparto de frecuencias equitativo entre todos los sistemas viene dado por:

$$p_i(f) = \frac{P_i}{W}, \quad i = 1, \dots, M$$

Esta ecuación es siempre un NE para el juego. Además, si $\sum_{i,j} \frac{|h_{j,i}|^2}{|h_{i,i}|^2} < 1$, este reparto conforma el único NE del sistema. Sin embargo esta asignación de potencias generalmente no alcanza el óptimo de Pareto, y el resultado del juego empeora el rendimiento global del sistema.

MODELO DE JUEGO REPETIDO

Para mejorar el rendimiento del sistema anterior, Etkin realizó repeticiones del juego de un único disparo.

En el instante de tiempo t , con $t > 0$, cada sistema i elige su densidad espectral de potencia $p_i(f)$, con $f \in [0, W]$ respetando la restricción de que la potencia total no puede exceder P_i . El rendimiento u_i del sistema viene dado por:

$$u_i = (1 - \delta) \sum_{t=0}^{\infty} \delta^t R_i(t)$$

Donde $R_i(t)$ es la velocidad máxima que el sistema i puede alcanzar en el instante t , y $\delta \in (0, 1)$ es un factor relacionado con la sensibilidad de retardo del sistema.

Definimos la región R como la tasa de transferencia alcanzable del sistema anterior. Sea (R_1, \dots, R_M) un vector de tasas de transferencias existentes en la región R y sean $p_i(f)$, $i = 1, \dots, M$ las correspondientes densidades espectrales de potencia de cada sistema i . Entonces:

- (i) En $t = t_0$ el sistema i usará la asignación de potencia $p_i(f)$ anterior.
- (ii) Si en $t = t_0 - 1$ cada sistema j , $j = 1, \dots, M$ usa $p_j(f)$ entonces el sistema i usará $p_i(f)$ en el instante $t = t_0 - 1$ y $\frac{P_i}{W}$ en otro caso, con $f \in [0, W]$.

Etkin demostró que para cada vector de tasa de transferencia $(R_1, \dots, R_M) \in R$ existe un umbral $\delta_o < 1$ tal que si el factor de descuento δ es menor que δ_o , entonces la estrategia anterior alcanza el NE para los juegos repetidos.

De esta manera los sistemas podrán cooperar siempre y cuando no se desvíen de las condiciones impuestas. En casos en los que se produzca una desviación del sistema,

se activará un "castigo", por el que los sistemas deberán adaptarse a la asignación de potencia alcanzada con el modelo de juego de un solo disparo

5.2.2 COMPARTICIÓN DE ESPECTRO ENTRE OPERADORES WIFI

A continuación, se considera una situación en la que varios operadores WiFi comparten una banda sin licencia común que se puede dividir en un número fijo de canales. Cada operador WiFi poseerá varios puntos de acceso y tendrá que decidir que canal utilizará cada uno de ellos. Si dos puntos de acceso (del mismo o diferente operador) se encuentran próximos se interferirán entre si cuando ambos operen sobre el mismo canal.

Halldorsson modela este problema como un juego entre los operadores, donde cada operador decidirá la asignación de canales de sus puntos de acceso con el fin de maximizar el número total de usuarios móviles que puede servir [68]. El resultado del juego se evalúa por medio del precio de la anarquía (PoA). El PoA mide hasta qué punto el resultado del juego conforma una asignación de canales óptima, es decir, una asignación de canal que maximiza el número total de usuarios móviles que los puntos de acceso pueden servir.

Modelo de juego

Para cada punto de acceso u se definen dos regiones alrededor de él, $R_t(u)$ y $R_s(u)$ (ver figura 5.1). La circunferencia más pequeña, denotada como $R_t(u)$ representa el rango de transmisión de u . Todos los mensajes enviados por u pueden recibirse correctamente dentro de ese radio. La circunferencia grande, denotada como $R_s(u)$ representa el rango de detección de u . En la practica el radio de $R_s(u)$ suele ser el doble que el radio de $R_t(u)$. Dicho esto, Halldorsson define como criterio para evitar interferencias entre dos puntos de acceso u y v que compartan el mismo canal, que la distancia de separación entre ellos $d(u,v)$ sea mayor que $R_t(u) + R_t(v) + \max\{R_s(u), R_s(v)\}$.

En cada banda sin licencia existen k canales. Los operadores encenderán o activaran los puntos de acceso de forma secuencial. El orden de encendido vendrá dado por un proceso exógeno, es decir, los operadores no decidirán cuándo activar un AP. Además, no tendrán conocimiento del orden de encendido elegido para los puntos de acceso y solo conocerán la información de los canales asignados de los puntos de acceso que se encuentren dentro de su zona de detección.

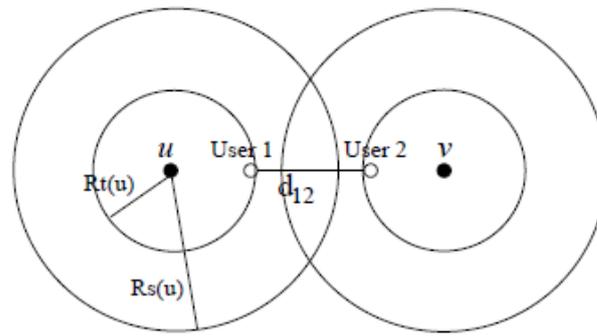


Figura 5.1: Interferencia potencial entre dos APs [68].

Cada vez que un punto de acceso se active, el operador correspondiente elegirá un canal entre los disponibles que no interfiera con cualquiera de los puntos de acceso ya activos dentro de la zona de detección. En el caso de no existir ese canal, el punto de acceso no se encenderá.

El beneficio que un operador recibe para la creación de un punto de acceso es igual al número esperado de usuarios móviles que puede servir con el AP, donde diferentes puntos de acceso pueden tener diferentes ganancias. El objetivo de cada operador es elegir canales con el fin de maximizar la rentabilidad global de sus puntos de acceso.

Resultado de la asignación de canales

Halldorsson utiliza los resultados de la teoría de grafos para calcular el precio de la anarquía en el juego anterior. Para el caso general donde los puntos de acceso puede tener diferentes potencias de transmisión y diferentes rentabilidades, demuestran que el precio de la anarquía es potencialmente ilimitado, es decir, $PoA = \infty$ (véase la fig. 5.6). Demuestra a su vez que el precio de la anarquía también está acotado para el caso en el que los puntos de acceso tienen diferentes potencias de transmisión, aunque todos tengan la misma ganancia. Si todos los puntos de acceso tienen la misma potencia de transmisión (es decir, el gráfico de la interferencia es un gráfico unidad de disco) y la misma ganancia, el precio de la anarquía es como máximo $5 + \max(0, 1 - 5/k)$ y al menos 5.

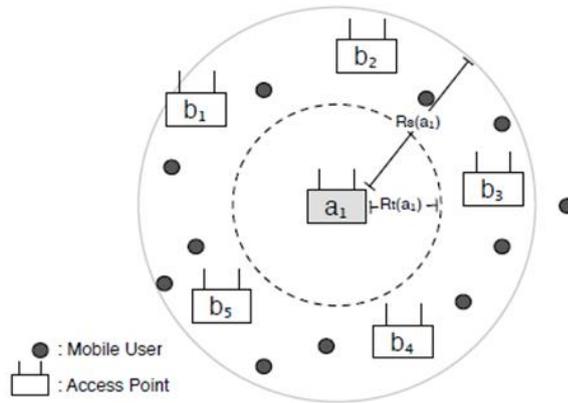


Figura 5.2: Zona de interferencia. Los operadores de red A y B proporcionan acceso a Internet a los usuarios móviles con los APs $a_i, b_i \in V$. Los usuarios móviles no tendrán acceso a Internet puesto que se encuentran en una zona de interferencia. El PoA se incrementa con el número de usuarios móviles y es potencialmente infinito.[68]

Negociación local:

Los resultados anteriores muestran que si los operadores se ven obligados a elegir un canal tan pronto como se enciendan y sólo se les permite volver a asignar los canales entre los puntos de acceso que controlan, el juego anterior proporciona un mal rendimiento. Un enfoque para mejorarlo, consiste en permitir que los operadores puedan negociar cambios en las asignaciones de canales de los puntos de acceso que controlan. *Halldorsson* propone en [68] un mecanismo en el que los operadores pueden realizar negociaciones de canales para optimizar localmente su rendimiento total. En particular, definen dos esquemas de negociación denominados *local 2-buyer-1-seller* y *local 1-buyer-multiple-seller*. La Fig. 5.3 ilustra un ejemplo de negociación de tipo *local 2-buyer-1-seller*.

Resultados del juego:

Halldorsson muestra que para el caso general en que los puntos de acceso utilizan diferente potencia de transmisión y diferentes pagos, el precio de la anarquía no tiene límites, incluso si se realizan negociaciones de tipo *local 2-buyer-1-seller* o de tipo *local 1-buyer-multiple-seller*.

Para el caso en el que todos los APs utilizan la misma potencia de transmisión y tienen la misma ganancia, el precio de la anarquía obtenido para negociaciones del tipo *local 2-buyer-1-seller* es como máximo $3 + \max(0, 1 - 3/k)$ y al menos 3. Para el caso en el que todos los APs utilicen la misma potencia de transmisión, pero tengan diferentes pagos el precio de la anarquía en negociaciones de tipo *local 1-buyer-multiple-seller* es a lo sumo $5 + \max(0, 1 - 5/k)$ y al menos 5.

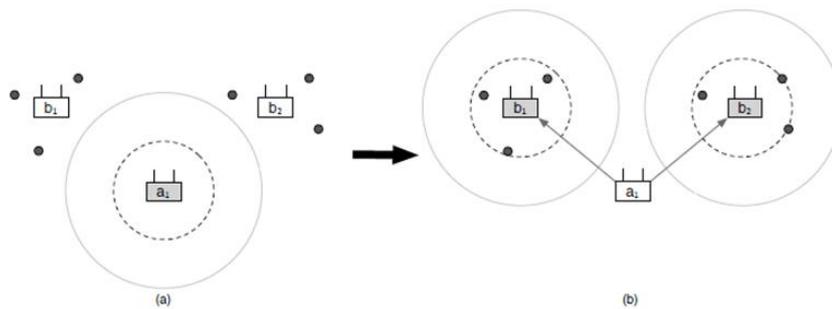


Figura 5.3: Ejemplo de negociación 2-buyer-1-seller. (a) a_1 controla el canal, pero la suma de recompensas de b_1 y b_2 es mayor que la recompensa de a_1 . (b) b_1 y b_2 negocian con a_1 para adquirir el canal y mejorar el rendimiento total. [68]

Halldorsson también muestra que los esquemas de negociación anteriores convergen a un NE después de un número polinómico de pasos. Este valor es función del número de puntos de acceso. No obstante refleja que este tipo de negociaciones locales puede llevar a un mal rendimiento, siendo mejorable cuando la asignación de canales entre los puntos de acceso se pueda modificar (es decir, la negociación global) en cada etapa de negociación.

Problemas encontrados:

En este artículo existen diversas aproximaciones que no darán buenos resultados en una situación real:

- i. Establecen un área circular alrededor del punto de acceso para delimitar las zonas en las que se produce interferencia de las que no. En un caso real esto no sucederá así, puesto que no existe un punto exacto a partir del que no se produce interferencia sino que esta se producirá en menor medida.
- ii. En el caso de producirse interferencia, optan por apagar el punto de acceso lo que da lugar a situaciones muy buenas en cuanto a cobertura, pero no consiguen dar cabida a todos los puntos de acceso existentes en el sistema.

5.3 MECANISMO DE COMPARTICIÓN DE ESPECTRO DESARROLLADO

Para el desarrollo del sistema consideraremos una situación donde varios operadores comparten una banda del espectro sin licencia, que se divide en un número fijo de canales. La banda elegida para la operación es la zona del espectro de televisión, concretamente los TVWS. Cada operador es propietario de varias femtoceldas que deben elegir los canales sobre los que operarán. Se tendrá en cuenta que si dos femtoceldas (del mismo o diferente operador) están lo suficiente cerca operando sobre un mismo canal, se interferirán entre sí. Con objeto de asegurar un nivel de

servicio aceptable para los usuarios móviles, las femtoceldas vecinas deberán ser utilizar canales diferentes.

Nosotros modelamos éste problema como un juego entre los operadores donde cada operador decide su propia asignación de canales sobre las femtoceldas de las que es propietario con el objetivo de mejorar su rendimiento. Además se proponen cinco mecanismos de negociación diferentes para realizar un proceso de reasignación de canales con el resto de operadores con el fin de reducir al mínimo la interferencia entre femtoceldas.

5.3.1 MODELADO DE JUEGO

En este subapartado vamos a describir la formulación matemática que hemos utilizado para decidir qué canal asignar a cada femtocelda. Se ha optado por utilizar las funciones de utilidad planteadas en [75]. Este artículo propone un trabajo de teoría de juegos con el que analizar el comportamiento de los nodos en redes de Radio Cognitiva, realizando una asignación de canales adaptativa. Definen dos funciones diferentes con las que capturar la utilidad de usuarios egoístas y usuarios cooperativos. Basándose en la definición de usuarios cooperativos, demuestran que el problema de la asignación de canales puede ser formulado como un juego potencial que converge hacia un equilibrio de Nash.

Gracias a que una red de Radio Cognitiva se puede modelar mediante la definición de agentes autónomos que son capaces de captar el ambiente y optimizar su rendimiento, sus interacciones se pueden modelar mediante una estructura de teoría de juegos. En este modelo, los dispositivos de Radio Cognitiva son los jugadores y sus acciones son la selección de los nuevos parámetros de transmisión, e.g. como las frecuencias de transmisión, los cuales influyen en su propio rendimiento y en el de los jugadores vecinos.

Para poder aplicar la teoría de juegos a los dispositivos de Radio Cognitiva es necesario suponer que éstos son capaces de sentir al resto de dispositivos y de cambiar sus canales de operación.

Para medir la calidad del enlace de transmisión se suele utilizar la tasa de error de bit (*Bit Error Rate*, BER) requerida o la relación señal a interferencia (*Signal To Interference Ratio*, SIR). Este último parámetro tiene en cuenta el tipo de modulación y la codificación del canal.

La SIR medida por el receptor j asociada al trasmisor i puede expresarse como:

$$SIR_{ij} = \frac{p_i G_{ij}}{\sum_{k=1, k \neq i}^N p_k G_{kj} I(k, j)} \quad (5.1)$$

Donde p_i es la potencia de transmisión del trasmisor i , $G_{i,j}$ es la ganancia del enlace entre el trasmisor i y el receptor j . $I(i, j)$ es la función de interferencia que caracteriza la interferencia creada por el nodo i hasta el nodo j y queda definida como:

$$I(i, j) = \begin{cases} 1 & \text{si los transmisores } i \text{ y } j \text{ transmiten sobre el mismo canal} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Si analizamos (5.1) observamos que para mantener un cierto requisito BER el nodo puede ajustar tanto los parámetros de transmisión de la capa física. A nivel de red, los nodos pueden minimizar la interferencia mediante una selección adecuada de la frecuencia de transmisión del canal. A nivel físico podemos reducir la interferencia mediante el control de potencia. Alternativamente, también se puede modificar (reducir o incrementar) el SIR objetivo para alcanzar diferentes niveles de modulación y tasas de codificación de canal.

La teoría de juegos representa un conjunto de herramientas matemáticas desarrolladas con el propósito de analizar las interacciones en los procesos de toma de decisiones. Particularmente podemos modelar nuestro problema de reparto o asignación de canales como un juego, donde los jugadores son las radios cognitivas, sus acciones o estrategias son los canales de transmisión disponibles y sus preferencias están asociadas a la calidad requerida para los canales.

De manera que el problema del reparto de canales se modela como una forma normal del juego, que matemáticamente puede ser definido por la tupla $\Gamma = \left\{ N, \left\{ S_i \right\}_{i \in N}, \left\{ U_i \right\}_{i \in N} \right\}$, donde N es un conjunto finito de jugadores (tomadores de decisión), y S_i son un conjunto de estrategias asociadas con el jugador i . Definimos $\mathbb{S} = \times S_i, i \in N$ como un espacio de estrategia y $U_i : \mathbb{S} \rightarrow \mathbb{R}$ como un conjunto de funciones de utilidad asociadas a las estrategias de los jugadores. Para cada jugador i en el juego Γ , la función de utilidad U_i es una función de S_i , la estrategia seleccionada por el jugador i , y el perfil de estrategia de sus oponentes S_{-i} .

Analizando la salida del juego y considerando que los jugadores toman decisiones independientemente y son influenciados por las decisiones de los otros jugadores, se busca definir si existen puntos de convergencia en un algoritmo de selección adaptativa en el que los jugadores no pueden desviarse (ya que bajaría su utilidad), por ejemplo en un equilibrio de Nash. Un perfil de estrategia para los jugadores, $S = [s_1, s_2, \dots, s_N]$, es un equilibrio de Nash si y sólo si:

$$U_i(S) \geq U_i(s'_i, s_{-i}), \forall_i \in N, s'_i \in S_i \quad (5.2)$$

Si el equilibrio en el perfil de estrategia (5.2) es determinista, existe una estrategia pura de equilibrio de Nash.

Como se demostrará en el siguiente apartado, el rendimiento del algoritmo de adaptación depende significativamente de la elección de la función de utilidad que caracteriza la preferencia de los usuarios en un canal particular. La elección de la función de utilidad no es única, debe tener significado físico en una aplicación concreta y tener propiedades matemáticas atractivas que garanticen la convergencia al equilibrio. En este artículo se proponen dos funciones de utilidad diferentes, que capturan la calidad del canal, así como el nivel de cooperación y justicia en las fuentes compartidas en la red.

FUNCIONES DE UTILIDAD

La primera función de utilidad propuesta (U_i) se adapta a escenarios en los que los usuarios actúan de forma egoísta. Ésta se define como:

$$U_i(s_i, s_{-i}) = - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ij} f(s_j, s_i) \quad \forall_i = 1, 2, \dots, N \quad (5.3)$$

Donde $P = [p_1, p_2, \dots, p_N]$ es la potencia de transmisión para los N radios, $S = [s_1, s_2, \dots, s_N]$ es el perfil de estrategia y $f(s_i, s_j)$ es la función de interferencia. Éste último parámetro tomará valores:

$$f(s_i, s_j) = \begin{cases} 1 & \text{si } s_j = s_i \text{ los transmisores } i \text{ y } j \text{ eligen la misma estrategia (mismo canal)} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

La segunda función de utilidad tiene en cuenta tanto la interferencia vista por un usuario en un canal particular, como la interferencia creada por los vecinos al elegir un canal particular. Está pensada para utilizarse en escenarios donde los jugadores

operen de manera cooperativa. Matemáticamente esta utilidad (U_2) queda definida por:

$$U_i(s_i, s_{-i}) = - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ij} f(s_j, s_i) - \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ji} f(s_i, s_j) \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (5.4)$$

Si comparamos la complejidad de la implementación de algoritmos basados en estas funciones de utilidad, queda claro que será mayor si se utiliza la segunda función. Esto se debe a que en este caso es necesario realizar un sondeo antes de seleccionar el canal. Con éste se medirá y estimará la interferencia creada por las radios de las femtoceldas vecinas.

DEFINICIÓN DE LA FUNCIÓN POTENCIAL

En la sección previa, se ha discutido la elección de una función de utilidad u otra basándonos en criterios de significado físico. Sin embargo, con objeto de conseguir funciones que garanticen la convergencia, necesitamos imponer algunas propiedades matemáticas a esas funciones. Concretamente se necesitan funciones en las que el juego resultante sea potencialmente exacto y garantice la convergencia hacia el equilibrio de Nash. A continuación se demuestra que con la segunda función de utilidad planteada esto es posible.

Una función potencial exacta se define como:

$$\begin{aligned} P: \mathbb{S} &\rightarrow \Gamma, \text{ si para todo } i \text{ y } s_i, s'_i \in S_i \\ U_i(s_i, s_{-i}) - U_i(s'_i, s_{-i}) &= P(s_i, s_{-i}) - P(s'_i, s_{-i}) \end{aligned} \quad (5.5)$$

Si en un juego se puede definir una función potencial exacta, el juego también será potencialmente exacto. En éstos, un cambio en las acciones de un único jugador, provocará un cambio en la función potencial. Cada vez que un jugador realiza un movimiento, aumentará el valor que toma la función potencial y nos acercaremos hacia el equilibrio de Nash.

La función potencial, asociada a la segunda función de utilidad planteada, puede formularse como:

$$Pot(S) = Pot(s_i, s_{-i}) = \sum_{i=1}^N \left(-\frac{1}{2} \sum_{j \neq i, j=1}^N p_j G_{ij} f(s_j, s_i) - \frac{1}{2} \sum_{j \neq i, j=1}^N p_i G_{ji} f(s_i, s_j) \right) \quad \forall i = 1, 2, \dots, N \quad (5.6)$$

Esta función refleja el beneficio total cubriendo todos los usuarios.

Cuando se juega a este juego potencial, los dispositivos de la red deben decidir secuencialmente la frecuencia de transmisión. La decisión única tomada en cada iteración no sólo maximiza su propia utilidad sino que también mejora la función potencial, gracias a las propiedades matemáticas de U_2 . Una asignación de canal estable mejora los beneficios de todos los jugadores, obteniendo la mejor secuencia de respuesta unilateral en una solución de compartición de frecuencias.

5.3.2 MODELADO DE LAS NEGOCIACIONES

En este apartado se van a describir los cinco modelos de negociación desarrollados con objeto de coordinar el reparto de canales entre los diferentes operadores. Con objeto de seleccionar el canal más idóneo para cada femtocelda se hará uso de las funciones de utilidad definidas en 5.3.1.

Para el desarrollo de este proyecto se ha establecido que los niveles de potencia de transmisión son fijos para todas las femtoceldas, dada la baja potencia de transmisión permitida en los TVWS. Se ha supuesto que el SR es capaz de ajustar su tasa de transmisión y consecuentemente el nivel de SIR requerido. Se establece que todos los usuarios tienen paquetes que transmitir todo el tiempo (peor escenario posible). Se permite que múltiples usuarios puedan transmitir al mismo tiempo sobre el mismo canal. Se supone que todos los usuarios de la red son idénticos, lo que significa que tienen funciones de utilización idénticas asociadas con las posibles acciones.

A la hora de llevar a cabo la distribución de frecuencias se ha utilizado la segunda función de utilidad propuesta en [75]. El modelo de juego se basa en definir un orden de encendido aleatorio entre las femtoceldas del escenario, con el que se consigue emular la situación en la que los operadores encienden las femtoceldas en instantes de tiempo distintos y adquieren un canal tan pronto como se encienden. De esta manera establecemos un sistema de turnos, en los que, por cada turno, solo hay una femtocelda seleccionando un canal. Esta femtocelda seleccionará el canal, entre los disponibles, que maximice la función de utilidad y por tanto que minimice la interferencia con el resto de femtoceldas. Este proceso se repetirá hasta alcanzar la convergencia, es decir, aquel punto en el que todas las femtoceldas estén conformes con el canal que tienen asignado. Este reparto de canales se corresponde con la un máximo local (ninguna desviación unilateral mejora la utilidad de un jugador). Esto es posible a que, como se demostró en el apartado anterior, esta función de utilidad alcanza el equilibrio de Nash.

Se supone que los nodos de la red son los puntos de acceso o estaciones base, cuya posición es fija. Los nodos móviles no se incluyen en el juego. Esto es una simplificación que implica que la interferencia que verían los nodos móviles es similar a la que vería su estación base, lo cual no es cierto en casos reales. Sin embargo se ha realizado así puesto no existe ningún modelo con el cual estimar la posición que ocupan los nodos móviles en cada instante de tiempo. Además si no fuera así, se tendría que realizar un proceso de reparto y negociación de canales cada vez que un usuario cambiará su posición. .

Por otro lado, se supone que hay K canales disponibles para la transmisión, con $K < N$, y que cada nodo selecciona un único canal para su transmisión/recepción. Para una selección distribuida de la frecuencia de transmisión, el juego es capaz de construir eficazmente el mapa de distribución de canales con una interferencia cocanal reducida.

Un reto para implementar este juego potencial es que el proceso selección de mejor respuesta definido requiere de un coordinador para controlar las órdenes de juego de los usuarios. Con la falta de una infraestructura de control central en nuestro sistema, este proceso se debe implementar de forma distribuida. En nuestro caso, como se mencionó en el párrafo anterior, esto se alcanza mediante el permiso de tomar decisiones siguiendo el orden de encendido de las femtoceldas en la red. Para poder simular este tipo de situaciones se ha establecido una variable para controlar el orden de encendido, estableciendo éste de manera aleatoria. De esta manera el número esperado de usuarios que toman decisiones concurrentemente en una única iteración es 1, simulando por tanto un proceso de toma de decisiones secuencial. Para decidir que femtocelda es la que tiene permiso para seleccionar un canal en cada iteración se ha supuesto que cada operador dispondrá de entidad coordinadora encargada de gestionar el sistema de turnos.

A continuación vamos a describir cada una de las formas de operar de los operadores y el modo de negociar entre ellos.

NEGOCIACIÓN TIPO 1:

En este tipo de negociación los operadores actúan de forma cooperativa compartiendo toda la información entre sí. De manera que la forma de proceder en el juego es establecer un orden de encendido común para todos los operadores, los cuales irán encendiendo sus femtoceldas y eligiendo un canal entre los disponibles, que maximice la función de utilidad.

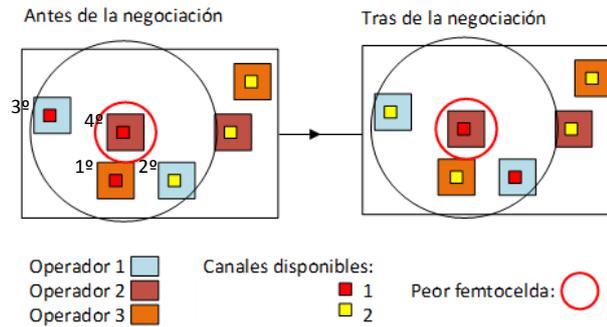


Figura 5.6: Ejemplo de negociación tipo 3.

NEGOCIACIÓN TIPO 4:

En este tipo de negociación se procede del mismo modo que en la negociación tipo 3, salvo que se establece que dentro del área definida, sólo podrán jugar las femtoceldas propiedad del operador que le toque el turno, si bien conocen la información de femtoceldas de otros operadores dentro de esa área.

En la figura 5.7 podemos ver un ejemplo con la forma de proceder en una de estas negociaciones. Para ejecutar éste partimos de la situación resultado del ejemplo de negociación tipo 2 (figura 5.5). Sólo se va a mostrar una de las negociaciones que se pueden realizar en el escenario. Para ello hemos seleccionado la peor femtocelda del operador 2. En este caso, la peor femtocelda de este operador podría ser cualquiera de las dos que posee, ya que para elegir ésta sólo se tiene en cuenta las femtoceldas propiedad del operador y ambas operan sobre un canal diferente. Una vez elegida, establecemos un área alrededor que ella y procedemos con la negociación. Como se puede observar se logra resolver los conflictos dentro de esa área, aunque con menos eficiencia que en el caso de la negociación tipo 3. Esto se debe a que dentro del área de operación sólo podrán jugar las femtoceldas del operador 2.

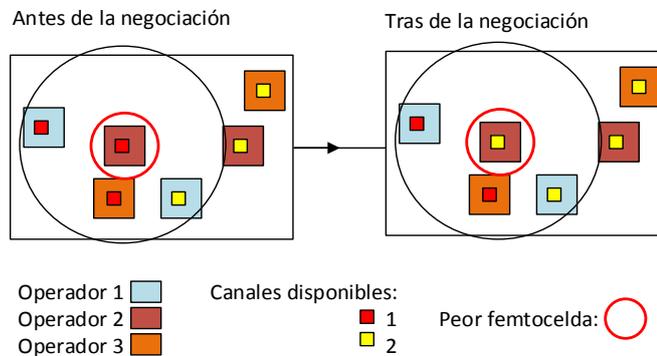


Figura 5.7: Ejemplo de negociación tipo 4.

NEGOCIACIÓN TIPO 5:

En este tipo de negociación emulamos situaciones en las que una entidad superior, en la que confían todos los operadores, conoce la información de todos ellos y se encarga de gestionar la selección de los canales. La forma de juego parte de situaciones en las que se ha realizado una negociación de tipo 2 y se permite el intercambio de canales entre operadores dentro de un área alrededor de dicha femtocelda. Esta femtocelda se corresponderá con la peor de cada operador considerando todas las femtoceldas del escenario. Dentro de esa área se realizará una negociación de tipo 1 gestionada por la entidad superior.

En la figura 5.8 podemos ver un ejemplo con la forma de proceder en una de estas negociaciones. Para ejecutar éste partimos un nuevo escenario formado por 5 femtoceldas, 3 de un operador y 2 de otro. Sobre éste, se realizará una negociación de tipo 2. Sólo se va a mostrar una de las negociaciones que se pueden realizar en el escenario. Para ello hemos seleccionado la peor femtocelda del operador 2. Una vez elegida la peor femtocelda establecemos un área alrededor que ella y procedemos con la negociación. Como se puede observar se logra resolver los conflictos dentro de esa área teniendo en cuenta las necesidades del sistema completo.

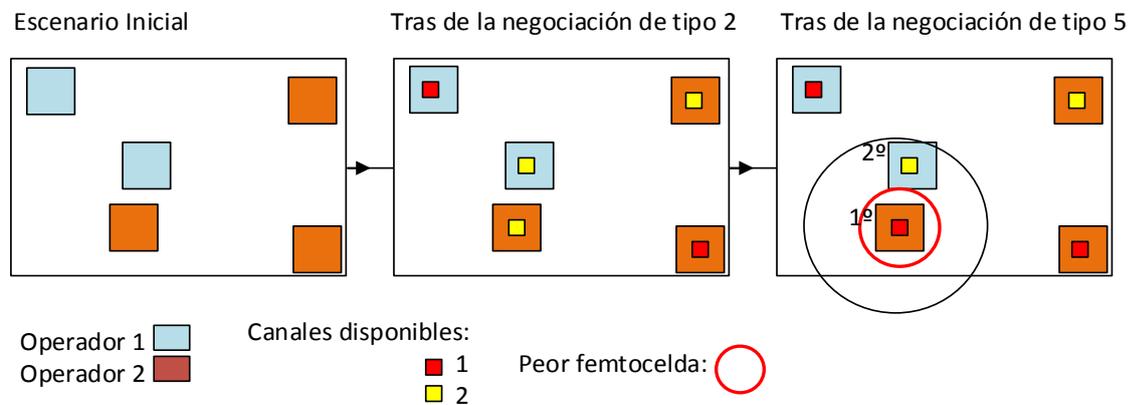


Figura 5.8: Ejemplo de negociación tipo 5.

CAPÍTULO 6

ENTORNO DE EVALUACIÓN

En este capítulo se va a realizar la descripción de los escenarios sobre los cuales se van a realizar las diferentes pruebas de reparto y negociación de canales descritos en el capítulo 5. El objetivo del desarrollo de estos escenarios es el de proporcionar un entorno realista sobre el que permitir un análisis detallado de las interacciones entre los diferentes usuarios.

Asimismo, se realiza una breve descripción de los modelos de propagación utilizados a lo largo de todo el estudio y una exposición de los sistemas de transmisión empleados, en la que además se tratan sus limitaciones.

6.1 TOPOLOGÍA

En este apartado se va a describir la topología de los dos escenarios confeccionados: modelo *dual stripe* y modelo en *grid*.

6.1.1 MODELO DUAL STRIPE

Se trata de un sistema propuesto en el informe 3GPP TR 36.814 V9.0.0 [76] para modelar escenarios formados por femtoceldas en entornos urbanos de alta densidad. El modelo está formado por dos bandas de apartamentos cada una con dos líneas de N apartamentos. Las dimensiones de cada apartamento son 10m x 10m y existe una calle entre las dos bandas con un ancho de 10m. De manera que el escenario completo tendrá un tamaño total de $10(N+2)m \times 70m$. Un ejemplo de escenario puede verse en la figura 6.1, estableciendo $N=10$.

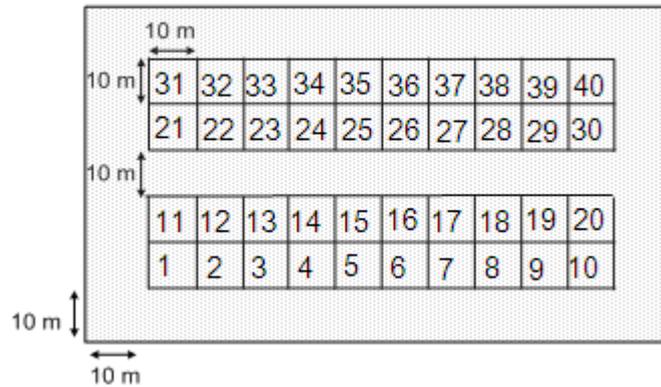


Figura 6.1: Ejemplo de escenario 1.

Sobre este escenario se ha definido que es posible colocar una femtocelda en cada apartamento en cualquier posición del mismo. De esta forma resulta un escenario muy interesante para simular redes de aprovisionamiento de servicios celulares en zonas de interior para dar cobertura a un usuario específico, de forma similar a como se proporciona en un hogar cualquiera el servicio de Internet a través de routers inalámbricos WiFi.

6.1.2 MODELO EN GRID

Un modelo alternativo más sencillo se ha definido de la siguiente manera. Consideramos un espacio constituido por una sola planta sobre la cual se definen zonas de $n \times m$ metros cuadrados en las que está permitido colocar una femtocelda. Un ejemplo de este escenario se muestra en la figura 6.2.

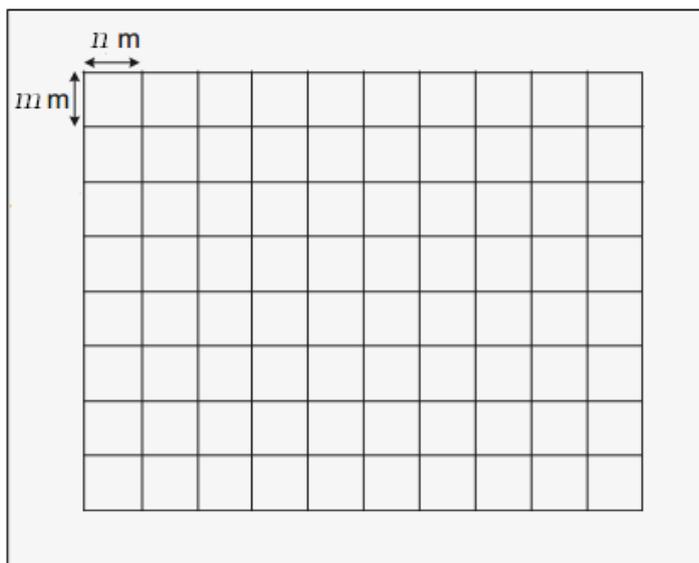


Figura 6.2: Ejemplo de escenario 2.

Este escenario toma especial transcendencia cuando se quieren simular espacios abiertos, zonas de oficinas o comerciales sobre las cuales se quiera proporcionar cobertura celular a través de femtoceldas.

6.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN

En este apartado realizaremos una breve descripción de los modelos de propagación utilizados a lo largo de todo el estudio. Los modelos de propagación son la herramienta que utilizamos para predecir de manera aproximada las pérdidas que se producen en un ambiente determinado. Estos modelos se basan en mediciones realizadas en lugares de interés. Es decir, se realizan miles de medidas y se obtiene un promedio de éstas. Una vez determinada la expresión a utilizar, se pueden fijar unos valores a cada uno de los parámetros. Por lo tanto, cada modelo sirve para un tipo de entorno, e.g. para escenarios interiores, residenciales o comerciales, escenarios urbanos de alta densidad, edificios de oficinas, para distancias superiores a 1 kilómetro, etcétera. Sin embargo dada la complejidad de los mecanismos que intervienen en la propagación, es literalmente imposible cuantificar los efectos de cada uno de ellos. Por lo tanto con los modelos de propagación lo que se pretende conseguir es una estimación razonable que permita el dimensionamiento adecuado de los sistemas radioeléctricos de comunicaciones, siendo tarea del ingeniero elegir cuál es el que mejor se adapta a sus necesidades.

En la actualidad existen curvas muy utilizadas para realizar simulaciones en ambientes de exterior como pueden ser las de Okumura [77], o las de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) [78], y también existen modelos tales como el de Hata [79] desarrollado para predecir el nivel de señal recibida a grandes distancias, es decir, a varios cientos de kilómetros, en zonas urbanas, suburbanas y abiertas. Sin embargo estos modelos imponen un límite en el rango de transmisión de la antena que oscila entre decenas y cientos de metros, siendo modelos útiles para modelar servicios de radiodifusión y celulares. Posteriormente se desarrollaron otros modelos, como por ejemplo el ITU-R [80] o el COST 231 [81], que incluían el modelado de distancias más cortas y una gama de frecuencias más amplia. Sin embargo, existía una limitación en la altura de la antena, estableciendo que para cumplir el modelo, éstas se deben colocar por encima de la altura media del terreno.

En el contexto TVWS, los modelos propuestos anteriormente podrían ser útiles para predecir el nivel de potencia recibida por los dispositivos de usuario al aire libre de una estación base fija al aire libre en escenarios rurales, suburbanos y urbanos. Sin

embargo, con éstos, no se puede predecir con exactitud el nivel de interferencia entre WSDs ya que éstos se pueden encontrar muy próximos entre sí pudiendo existir sólo unos pocos metros de distancia el uno del otro. Por otra parte, una gran cantidad de WSDs transmiten a baja frecuencia siendo utilizados para trabajar en zonas de interior, tal como hoy en día se utilizan los puntos de acceso WiFi a 2.4 GHz, esperando en un tiempo no muy lejano poder utilizar puntos de acceso en el hogar operando en las bandas VHF/UHF.

Por ello, para cumplir todos los requisitos planteados en el proyecto se han elegido dos modelos de propagación distintos con los cuales se pueden predecir las pérdidas de propagación para escenarios operando sobre TVWS con capacidad para simular entornos urbanos en zonas de interior. Éstos se describen en los apartados siguientes.

6.2.1 MODELO DUAL STRIPE

En esta sección llevamos a cabo una descripción del modelo de propagación para zonas urbanas densas formulado por el 3GPP para la evaluación de femtoceldas [76].

Este modelo está asociado al escenario descrito en la sección 6.1.1 y, de acuerdo a las características de éste, se establece una formulación diferente dependiendo de la zona del escenario en la que nos encontremos. Ésta viene recogida en la tabla 6.1.

Misma banda de apartamentos que la femtocelda	$PL(dB) = 38.46 + 20\text{Log}_{10} R + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw}$ <p>R y $d_{2d,indoor}$ expresado en metros q es el número de paredes de separación entre apartamentos atravesadas</p>
Fuera de la zona de apartamentos	$PL(dB) = \max(15.3 + 37.6\text{Log}_{10} R, 38.46 + 20\text{Log}_{10} R) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw} + L_{ow}$ <p>R y $d_{2d,indoor}$ expresado en metros q es el número de paredes de separación entre apartamentos atravesadas</p>
Distinta banda de apartamentos que la femtocelda	$PL(dB) = \max(15.3 + 37.6\text{Log}_{10} R, 38.46 + 20\text{Log}_{10} R) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw} + L_{ow} + L_{ow}$ <p>R y $d_{2d,indoor}$ expresado en metros q es el número de paredes de separación entre apartamentos atravesadas</p>

Tabla 6.1: Modelo de propagación *Dual Stripe*

Donde:

L_{iw} representa las pérdidas por penetración de las paredes de separación entre dos apartamentos, con un valor de 5dB.

El término $0.7d_{2d,indoor}$ tiene en cuenta las pérdidas por penetración debidas a las paredes interiores de un apartamento.

L_{ow} representa las pérdidas por penetración de las paredes externas, con una atenuación de 20dB.

$L_{ow,1}$ y $L_{ow,2}$ son las pérdidas por penetración de las paredes externas de los dos apartamentos.

Cabe señalar que estas fórmulas están caracterizadas para una frecuencia de operación de 2GHz. En nuestro caso se van a simular frecuencias del espectro de televisión por lo que es necesaria una reformulación de las mismas.

Para realizar esta reformulación tenemos que dividir el problema en dos casos:

- Pérdidas de propagación en espacio libre.

En el 3GPP TR 36.814 se establece que: $PL(dB) = 38.46 + 20Log_{10}R$ para frecuencias de 2GHz, con R expresada en metros.

Esta fórmula viene de la expresión de las pérdidas por propagación en espacio libre:

$$PL = \left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{4\pi}{c}\right)^2 f^2 d^2 \Rightarrow PL(dB) = 32.44 + 20Log_{10}d(m) + 20Log_{10}f(GHz)$$

- Pérdidas de propagación en macroceldas

En el 3GPP TR 36.814 se establece que: $PL(dB) = 15.3 + 37.6Log_{10}R$ para frecuencias de 2GHz, con R expresada en metros.

Esta fórmula viene de la expresión de las pérdidas por propagación en macroceldas [96]:

$$PL(dB) = I + 37.6Log_{10}R(Km)$$

Donde I=128.1 a 2GHz y I=120.9 a 900MHz.

Para un caso general tendremos:

$$PL(dB) = 40(1 - 4 \cdot 10^{-3} \cdot Dhb) \cdot \text{Log}_{10} R(Km) - 18 \log_{10} Dhb(m) + 21 \log_{10} f(MHz) + 80dB$$

donde Dhb es la altura de la estación base de antena, que es fijada a 15 m en el 3GPP TR 36.814.

De manera que ya tendremos las fórmulas caracterizadas para la operación a cualquier frecuencia. El resultado puede verse en la tabla 5.2.

Misma banda de apartamentos que la femtocelda	$PL(dB) = 32.44 + 20 \log_{10} d(m) + 20 \log_{10} f(GHz) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw}$
Fuera de la zona de apartamentos	$PL(dB) = \max(38.8 + 37.6 \log_{10} R + 21 \log f(GHz), 32.44 + 20 \log_{10} d(m) + 20 \log_{10} f(GHz)) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw} + L_{ow}$
Distinta banda de apartamentos que la femtocelda	$PL(dB) = \max(38.8 + 37.6 \log_{10} R + 21 \log f(GHz), 32.44 + 20 \log_{10} d(m) + 20 \log_{10} f(GHz)) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw} + L_{ow,1} + L_{ow,2}$

Tabla 6.2: Modelo de propagación *Dual Stripe* adaptado a toda frecuencia

Cabe destacar que este modelo ha sido utilizado en la norma [96] para 900 MHz, que no está lejos de la banda de TV usada.

6.2.2 MODELO DE PROPAGACIÓN EN INTERIORES PARA TVWS

En esta sección se presenta un modelo desarrollado por Gabriel P. Villardi, que permite la estimación rápida y precisa de la interferencia potencial entre dispositivos vecinos que operan sobre los TVWS para realizar simulaciones por ordenador [82].

Diversos experimentos realizados en las zonas suburbanas y urbanas de Tokio, Japón han determinado las características de propagación de teléfonos sin cables en las bandas de 250MHz y 400MHz [83]. Si se modelan matemáticamente las curvas propuestas en [83] basándonos en una suposición de tierra plana [84], tenemos:

$$Pr = 10 \log_{10} P_t + 20 \log_{10} h_t + 20 \log_{10} h_r - 40 \log_{10} d - \bar{A} \quad (6.2)$$

donde Pr es la potencia recibida, en dB, como una función dependiente de la distancia d . h_t y h_r son respectivamente las alturas de las antenas de transmisión y recepción y \bar{A} es el factor de atenuación que toma un valor de 20dB para zonas suburbanas y de 25dB para zonas urbanas. Hay que tener en cuenta que (6.2) es independiente de la frecuencia, como se puede observar a partir de las mediciones en [83].

Las medidas realizadas en [83] tienen en cuenta la potencia radiada efectiva (*Effective Radiated Power*, ERP), producida cuando se utilizan dipolos de media onda en el transmisor y el receptor. A continuación mostramos la reformulación de la ecuación (6.1) ajustada para considerar los efectos potencia radiada isotrópica equivalente (PIRE) y las ganancias Tx y Rx de la antena:

$$Pr = 10 \log_{10} P_t + 10 \log_{10} G_t + 10 \log_{10} G_r + 20 \log_{10} h_t + 20 \log_{10} h_r - 40 \log_{10} d - A - 2B - C \quad (6.2)$$

donde B es el valor medio de la atenuación de casa o edificio. Según numerosas mediciones realizadas en [85], se establecen valores de B de 17,7 dB para edificios comerciales (estructura de hormigón con refuerzo de acero) y de 5,4 dB para casas suburbanas (casa de madera estándar con revestimiento de papel y revestimiento de ladrillos en el exterior). Los valores especificados para B están caracterizados para una frecuencia de operación específica de 900 MHz. Sin embargo, en [86] se ha demostrado que la variación de estos valores es inferior a 1 dB cuando se opera en los TVWS. Por lo tanto, los valores de atenuación proporcionados se pueden utilizar directamente en el modelo propuesto sin perder su independencia en frecuencia. Por otro lado, C es una variable aleatoria gaussiana que tiene en cuenta los efectos de *shadowing* en el receptor en interiores. En [85] se establecen valores para C de 9,3 dB y de 6,4 dB, para edificios comerciales y para residencia suburbana, respectivamente.

Para fundamentar este modelo, aparte de la campaña de medición realizada en [83], se realizaron medidas del nivel de señal en las casas suburbanas a 815 MHz en Nueva Jersey mediante la utilización de un dispositivo de mano y un receptor montado en la parte superior de un camión situado a unos cientos de metros de distancia [87]. Después se realizó un experimento similar también a 850 MHz, esta vez con un dispositivo de mano para la transmisión y recepción colocados sobre un trípode. En [88] se proponen mejores ajustes tanto en su propio experimento y en el realizado en [87], realizando regresiones lineales con el fin de proporcionar curvas de propagación, las cuales pueden ser reproducidas por:

$$\bar{P} = 19.7 - 45.1 \log_{10} d \quad (6.3)$$

$$\begin{array}{c} \text{y} \\ \bar{\bar{P}} = 18.6 - 45 \log_{10} d \quad (6.4) \end{array}$$

Dónde \bar{P} y $\bar{\bar{P}}$ es el nivel de la señal recibida en dB y d es la distancia entre el transmisor y el receptor en metros. Se debe observar que tanto (6.3) y (6.4) sólo predicen el nivel de señal de los sistemas con la misma configuración utilizada en las mediciones de [87, 88].

Sin embargo, debido a la escasez de mediciones de propagación cerca de tierra, en [82] se muestra una propuesta útil para mejorar aún más (6.3) a fin de proporcionar un modelo más afinado, lo que minimiza las diferencias en la atenuación inherente a diferentes ubicaciones en el sentido de mínimos cuadrados.

Para los parámetros de entrada antes mencionados, el modelo ajustado puede ser dado por:

$$P_r = 13.92 - 43.36 \log_{10} d \quad (6.5)$$

que incluyéndola en la forma generalizada se obtiene:

$$P_r = 10 \log_{10} P_t + 10 \log_{10} G_t + 10 \log_{10} G_r + 20 \log_{10} h_r + 20 \log_{10} h_t - 43.36 \log_{10} d - A - B \quad (6.6)$$

El nuevo factor de atenuación suburbana A, se puede obtener fácilmente a partir de la ecuación (6.5). Para una distancia de 10 metros se obtiene que $P_r = 29.44$ dB. Aplicando esto tenemos que:

$$-29.44 = 10 + 0 + 0 + 19.18 + 5.1 - 43.36 - A - 5.4 \quad (6.7)$$

Donde se obtiene que $A = 14.96$ dB. Cabe señalar que nuestro objetivo es modelar la interferencia entre los puntos de acceso de radio portátil que operan en los TVWS, por lo que estamos interesados en la PIRE. El factor de atenuación suburbana resultante es $A = 2.15 + 2.15 + 14.96 = 19.26$ dB.

El modelo totalmente generalizado teniendo en cuenta la situación en que se encuentran tanto en los puntos de acceso interiores como efectos de sombras, independientemente de la zona suburbana específica, viene dado por:

$$P_r = 10 \log_{10} P_t + 10 \log_{10} G_t + 10 \log_{10} G_r + 20 \log_{10} h_r + 20 \log_{10} h_t - 43.36 \log_{10} d - A - 2B - C \quad (6.8)$$

Debe tenerse en cuenta que este ajuste sólo podría hacerse desde la propagación cerca del suelo donde la dependencia de con la frecuencia es muy pequeña [83]. En cuanto a las zonas urbanas, no se pudieron realizar una mejora importante con

respecto a la presentada en (6.3) debido a la falta de mediciones de propagación cerca de tierra.

6.3 SISTEMA DE TRANSMISIÓN

Hasta ahora las comunicaciones móviles han estado basadas en grandes estaciones base dedicadas a ofrecer servicios de voz y datos en una determinada zona, ya sea en escenarios urbanos cubriendo superficies de un radio de centenares de metros o en escenarios rurales en zonas con varios kilómetros de radio. Sin embargo, los escenarios planteados para el proyecto se caracterizan porque todos están definidos como zonas de interior en entornos urbanos, necesitando por tanto, de otro tipo de dispositivos para proporcionar la cobertura. Los dispositivos elegidos para ello son las femtoceldas.

Una femtocelda es una pequeña estación base de baja potencia con la que proporcionar servicios de voz y datos móviles en el hogar la oficina. Dicha estación base se integra en la red móvil mediante una conexión de banda ancha, normalmente ADSL, de modo que cuando el usuario entre en su casa, sea su propia red la encargada de ofrecerle cobertura 3G o 4G. De esta forma se sustituye automáticamente la cobertura ofrecida por el operador móvil correspondiente por la propia del usuario. Esto permitirá reducir la carga de las estaciones del operador móvil, a la vez que se mejora la experiencia de los usuarios al gozar de cobertura propia y exclusiva para él. Respecto al producto final, éste tendrá el aspecto de un router Wi-Fi tradicional. De hecho, fabricantes como NetGear han comenzado a crear *hardware* incorporando ambas tecnologías.

A continuación mostramos las principales ventajas del uso de femtoceldas:

Aumento en la cobertura y capacidad

A pesar de la baja potencia de transmisión de un punto de acceso femtocelda, la relación señal a ruido más interferencia, SINR, será elevada, debido a la cercanía entre transmisor y receptor. El beneficio inmediato será realizar llamadas y utilizar servicios de alta velocidad con cobertura máxima, además de otras ventajas subyacentes de la baja distancia del enlace, como un aumento en la duración de las baterías de los terminales o la creación de grupos cerrados en torno al punto de acceso.

Incremento global en la capacidad de la red

Respecto a los escenarios interiores, el aumento en la capacidad resulta inmediato al utilizar femtoceldas. Sin embargo desde el punto de vista global de la red móvil, ofrece otros beneficios. El primero de ellos es el aumento en la eficiencia espectral, ya que al utilizar celdas cubriendo superficies muy pequeñas, el usuario accede a un ancho de banda mayor. La siguiente ventaja consiste en que el tráfico generado en hogares y oficinas sería absorbido por la red IP correspondiente, reduciendo la utilización de la red móvil clásica. Por lo tanto, debido a la reducción de usuarios de las macroceldas, al poder utilizar los TVWS, también es de esperar un aumento en las velocidades ofrecidas a todos los usuarios macrocelda.

Aumento del volumen de negocio

En el plano económico las femtoceldas abren una nueva fuente de ingresos en el sector de las telecomunicaciones. Por un lado los fabricantes de *hardware* acceden a un nuevo tipo de dispositivo, de modo que podrán crear una gama de puntos de acceso femtocelda con diferentes parámetros y calidades. Una vez comprobado el buen funcionamiento de estos sistemas, los operadores podrán lanzar paquetes promocionales para atraer usuarios, además de poder prestar servicios de voz y datos en zonas en las existía mala cobertura. Por último, las empresas dedicadas a la creación de *software* tienen la posibilidad de crear nuevas aplicaciones específicas para la nueva tecnología. En definitiva, la aparición de los sistemas femtocelda supone un abanico de posibilidades para aumentar los ingresos, no solo de los operadores, sino también de las empresas relacionadas.

Tecnología verde

Teniendo en cuenta los datos revelados en las referencias [85] y [86], el sector de las telecomunicaciones consume entre el 1% y el 3% de toda la energía consumida en el planeta y suponen una contribución similar en la emisión de gases invernadero. Las redes celulares típicas necesitan un gran número de estaciones base (en torno a diez mil), para ofrecer cobertura global a un país como España y se estima que cada una de estas antenas realiza un consumo eléctrico de 2,7 KWh. Por otro lado, este despliegue era suficiente en el pasado para ofrecer cobertura en llamadas de voz y tráfico de baja velocidad. Sin embargo, resulta ineficiente aplicado a nuevos sistemas como UMTS y HSPA. Por ejemplo, una macrocelda solamente puede mantener 39 usuarios activos utilizando un caudal HSDPA de 5 Mbps, de modo que la creación de nuevas celdas resulta inevitable. La aplicación de sistemas femtocelda permite reducir el uso de macroceldas derivando el tráfico que antes circulaba por éstas a

través de pequeñas estaciones base de bajo consumo eléctrico. De esta forma se lograría reducir este consumo y la emisión de gases nocivos en los próximos años.

Nuevas oportunidades

Finalmente, el ya comentado aumento del volumen de negocio supone una oportunidad única para la creación de nuevas empresas y aplicaciones. Durante el *Mobile World Congress* de 2009, empresas como Airvana, picoChip u Orange presentaron numerosas aplicaciones y posibilidades derivadas del uso de femtoceldas. Una de estas propuestas consistía en establecer un sistema de envío automático de mensajes de texto a través de la red móvil propia de la que dispondríamos en casa. De manera que, por ejemplo, en una familia con varios miembros, la femtocelda podrá mandar un mensaje de texto al terminal de los padres cuando su hijo entre en casa. Estas nuevas oportunidades se traducen en un aumento de la competitividad y de la posibilidad de crear nuevos negocios en torno a las femtoceldas.

6.3.1 INFRAESTRUCTURA DE LA RED

A continuación se realizará una breve descripción de cómo sería la infraestructura completa de un sistema formado por femtoceldas instaladas en el hogar. En la Figura 6.3 encontramos un ejemplo en el que existe un punto de acceso femtocelda en el centro de la vivienda, ofreciendo servicios de voz y datos a multitud de dispositivos. Este punto se encuentra conectado con el router encargado de ofrecer conectividad DSL mediante el operador contratado por el usuario. Una vez dentro de la red IP, ésta se podrá conectar con la capa macrocelda del operador móvil, de modo que sea esta red la encargada de gestionar la propia red femtocelda.

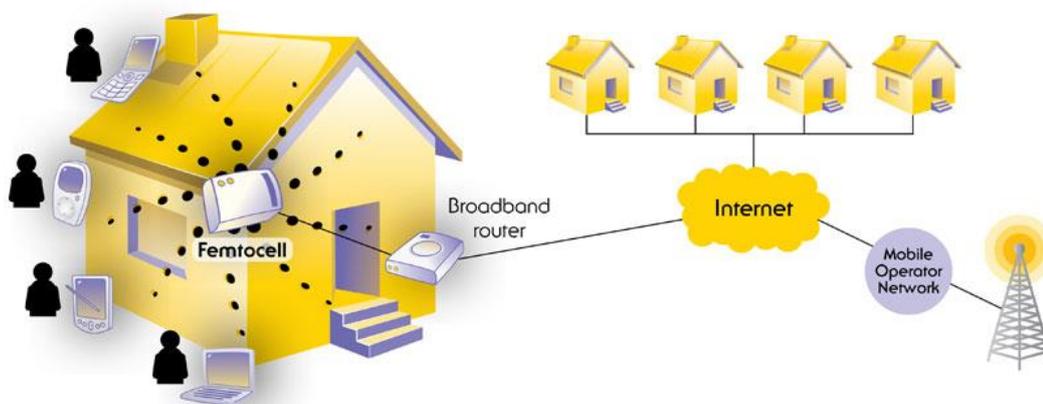


Figura 6.3: Esquema general del despliegue de una red de femtocelda en una vivienda [89].

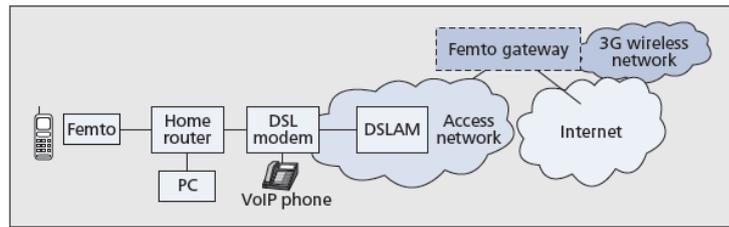


Figura 6.4: Arquitectura típica del despliegue de una femtocelda en una vivienda [89].

En la figura 6.4, se muestra la arquitectura de una red de telefonía móvil en el hogar, proporcionando el servicio con una femtocelda. En ésta, la femtocelda se encarga de prestar servicio 3G a los terminales móviles, mientras que la conexión DSL permite que el ordenador personal del usuario haga uso de la red WiFi, y el teléfono fijo mediante voz sobre IP.

6.3.2 ESTANDARIZACIÓN EN EL 3GPP

Los dispositivos femtocelda comenzaron a despertar curiosidad entre finales de 2007 y principios de 2008. Se presentaron como puntos de acceso inalámbrico de baja potencia con los que ofrecer servicios UMTS y 3G en entornos de interior. Como ocurre con todas las nuevas tecnologías que van a ser introducidas en el mercado, es necesario llevar a cabo un proceso de estandarización con el que conseguir una economía de escala y sobre todo la aceptación de los fabricantes y consumidores.

A continuación se muestra una revisión de las normativas y estandarizaciones llevadas a cabo por el 3GPP en relación con las femtoceldas [90, 91, 92, 93, 94].

Aspectos radioeléctricos

Actualmente son pocas las redes que tienen un funcionamiento similar al de una red de femtoceldas. Las más parecidas son las redes WiFi, que operan en un área reducida ofreciendo una extensión del servicio ADSL. Sin embargo este tipo de redes no tienen que convivir con una red de gran tamaño, como es el caso de las macroceldas con las que los operadores ofrecen servicios de voz y datos a sus clientes. Los problemas radioeléctricos con los que se encuentran los sistemas femtocelda son los siguientes:

- **Gestión de Interferencias.-** La tecnología femtocelda tiene que convivir con multitud de dispositivos. Esto implica, que la gestión de interferencias sea un aspecto crucial para su correcto funcionamiento.

- **Aspectos Regulatorios.-** Una femtocelda se puede reducir a una pequeña estación base o punto de acceso transmitiendo sobre el espectro de telefonía. Por lo tanto debe cumplir las leyes y regulación de cada país.
- **Instalación.-** Se espera que sean los propios usuarios los que realicen su instalación. Por tanto, deberán poder instalarse en cualquier lugar, sin que se vea afectada la calidad de servicio que ofrecen.

Arquitectura y Terminología

Desde el punto de vista de la arquitectura, una femtocelda es una extensión de la infraestructura de la red móvil que hace uso de la red IP para ofrecer los servicios de telefonía móvil y datos en entornos de interior. Con esta arquitectura el tráfico generado en hogares y oficinas sería absorbido por la red IP correspondiente, reduciendo la utilización de la red móvil clásica. De modo que, para garantizar la convivencia o coexistencia entre estas dos redes se hace necesario regular los mecanismos destinados a este fin. También existe la posibilidad de que el suministrador de DSL sea distinto al contratado en nuestros dispositivos móviles.

Antes de comenzar con los distintos aspectos propuestos por el 3GPP, vamos a realizar un breve resumen de la terminología utilizada por dicho organismo.

- **HNB (*Home Node B*).**- Es el nombre que asigna el 3GPP a las femtoceldas. El equipo local del usuario se comporta como un nodo a través de la interfaz Uu (interfaz aérea) y se conecta en la red móvil a través de la red IP mediante una interfaz a la que denominaron Iuh. El encargado de este traspaso es el HNB.
- **HNB-GW (*Home NodeB Gateway*).**- Es la interfaz de la femtocelda. Se encarga de concentrar un número grande de HNBs en una interfaz IuCS/PS, para introducir la información en el núcleo central de la red IP.
- **HMS (*Home Node B Management System*).**- Es el elemento encargado de gestionar los recursos de los HNBs

En la Figura 6.5 se muestra la arquitectura del acceso a la red a partir de un HNB. Éste se conecta a la red IP a través del HNB-GW que actúa como concentrador para agregar un gran número de HNBs, esta es la interfaz es conocida como Iuh. Para añadir seguridad a este esquema, el 3GPP propone un mecanismo, al que denominaron SeGW “*Security Gateway*”, con el que añadir IPSec en modo túnel a la arquitectura.

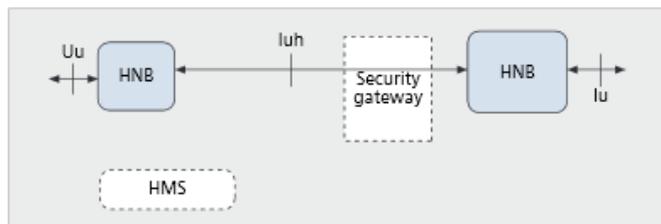


Figura 6.5: Punto de referencia Iuh [94].

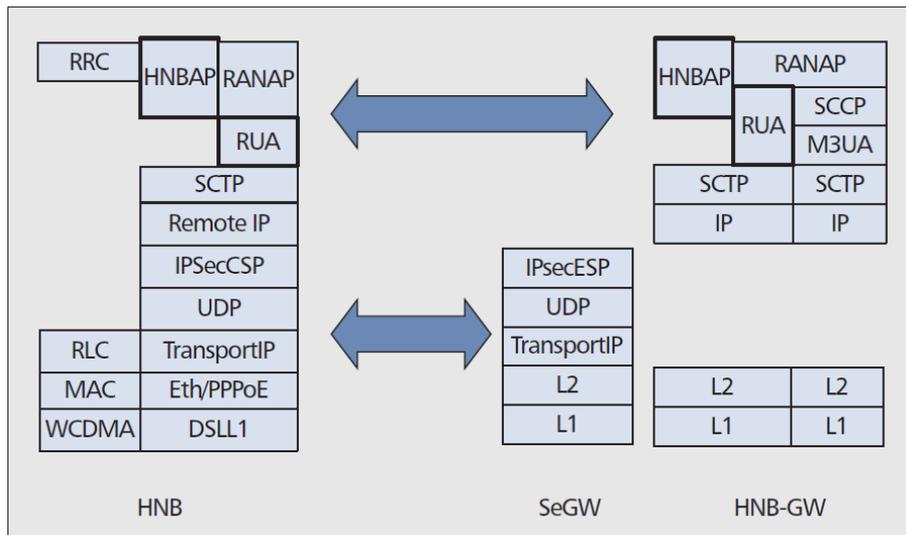


Figura 6.6: Pila de protocolos de la interfaz Iuh [94].

La conexión entre el HNB-GW y el núcleo de la red se realiza mediante la interfaz IuCS/IuPS. Este hecho implica que aunque existan múltiples HNBs, la información se concentrará en una sola interfaz a través del HNB-GW.

Respecto a la interfaz radio entre el HNB y los terminales femtocelda se mantienen los estándares actuales, salvo por alguna pequeña modificación como la inclusión de los grupos cerrados de suscriptores. En la figura 6.5 se muestra la pila de protocolos de la interfaz Iuh, entre el HNB, SeGW y HNB-GW. Cabe destacar dos de ellos:

- **HNB Application Protocol (HNBAP).**- Se trata de un protocolo que proporciona un control específico para el despliegue de las femtoceldas dentro de la red de operadores.
- **RANAP User Adaptation (RUA).**- Se trata de una pequeña adaptación a RANAP (*Radio Access Network Application Part*) para transportar los mensajes e información de señalización a través de SCTP (*Stream Control Transport Protocol*) antes de pasar por la interfaz Iu.

Configuraciones

En la referencias [90] y [93] encontramos los diferentes tipos de configuraciones propuesto por el 3GPP para desplegar un sistema femtocelda.

A continuación se listan las propiedades de las femtoceldas:

- **Acceso abierto o Grupo cerrado.-** Determina si una femtocelda se comporta de manera pública o privada. Si el HNB está configurado en modo acceso abierto, puede ofrecer servicio a cualquier terminal cercano. Si está configurado en modo grupo cerrado, lo ofrecerá sobre un número cerrado de usuarios que pertenecen a un grupo determinado.
- **Canal dedicado o Canal compartido.-** La femtoceldas podrán operar en canales separados o compartidos con las redes móviles cercanas.
- **Potencia máxima de transmisión fija o adaptativa.-** La potencia de transmisión de las femtoceldas podrá ser fija o variable. Permittedose realizar un control adaptativo de potencia, se minimizarían los efectos nocivos hacia otras redes cercanas.

De acuerdo con estas propiedades, 3GPP define las siguientes configuraciones para una red basada en femtoceldas:

Configuración A: Grupo cerrado, canal dedicado y potencia de transmisión fija.-

En este tipo de configuración se restringe el acceso a la femtocelda a un número reducido de usuarios. El canal de operación no se compartirá con la macro red del operador que preste el servicio. La potencia de transmisión será fija durante toda la comunicación. Este valor será fijado por el operador.

Configuración B: Grupo cerrado, canal dedicado, potencia de transmisión adaptativa.- Se basa en el mismo principio funcionamiento que la configuración A con la salvedad, de que se puede variar la potencia de transmisión a fin de reducir las interferencias entre sistemas. Esta potencia estará acotada entre dos límites, uno superior y otro inferior.

Configuración C: Grupo cerrado, canal compartido, potencia de transmisión adaptativa.- Se caracteriza por ser una configuración en la que el canal se comparte con una macrocelda. Por lo que se trata del peor caso en términos de interferencias. Esto hace necesario disponer de mecanismo de gestión de potencias para minimizarlas. Por ello en este tipo de configuración no se incluye la posibilidad de utilizar sistemas con potencia de transmisión fija.

Configuración D: Canal compartido parcial.- Se trata de una solución híbrida entre las configuraciones de canal dedicado y de canal compartido. En este caso la femtocelda trabaja en la misma banda de frecuencias que la macrocelda, pero hay ancho de banda suficiente para que cada una de ellas opere sobre un canal distinto. De este modo, si se detectan problemas de interferencia, la femtocelda dejará libre el canal sobre el que opera.

Configuración E: Acceso abierto, canal dedicado o compartido.- En este caso el acceso a las femtoceldas es libre para todos los usuarios.

Interacción entre macro y femto celdas

A continuación se muestran las situaciones, contempladas por el 3GPP, en las que un usuario podrá hacer uso de femtoceldas para obtener cobertura móvil sin estar conectado a una macrocelda:

- i. HNB fuera de cobertura GSM o UMTS ofrecido por macroceldas
- ii. HNB dentro de cobertura GSM suministrada por una macrocelda
- iii. HNB dentro de cobertura UMTS suministrada por una macrocelda, ambos entre la misma frecuencia
- iv. HNB dentro cobertura UMTS suministrada por una macrocelda utilizando distintas frecuencias

Para controlar la interacción entre macro y femto celdas, el 3GPP, propone una estructura jerárquica, en la que los terminales móviles del usuario podrán buscar cobertura a través de una femtocelda incluso en casos en los que la obtenida a través de la macrocelda fuese adecuada. Establecen a su vez que los dispositivos del usuario sólo comenzarán a buscar soluciones más allá de las femtoceldas, cuando la cobertura ofrecida por éstas sea muy débil o nula.

6.3.3 LIMITACIONES EN LOS SISTEMAS TRANSMISORES Y RECEPTORES

Para tener en cuenta las imperfecciones en la implementación de los componentes de RF y evitar un valor alto y no realista de SINR, se introduce un modelo EVM (*Error Vector Magnitude*), que impone un límite suave en el valor de SINR obtenido [95]. El EVM constituye una de las figuras de mérito más aceptadas para evaluar la calidad de un sistema de comunicaciones. En términos simples, hace alusión a cómo de lejos están los símbolos de la constelación recibidos de la constelación ideal que hubiera sido enviada por un transmisor ideal. EVM se define como un porcentaje del

nivel máximo de SINR y se calcula como: $SINR_{max} = -20\log_{10}(EVM / 100)$. Como resultado de esto, la SINR viene limitada por el EVM:

$$\frac{1}{SINR_{evm}} = \frac{1}{SINR_{max}} + \frac{1}{SINR_{ideal}}$$

Un aspecto importante a señalar, debido a la inherente deficiencia de los sistemas de RF, es que las mejoras potenciales de SINR no se pueden conseguir completamente. Esto se debe a que, como se ha comentado, existen límites que vienen impuestos por las no idealidades, de los sistemas de transmisión y recepción.

CAPÍTULO 7

ENTORNO DE SIMULACIÓN

Para evaluar el funcionamiento de los algoritmos de asignación y negociación de canales en entornos multioperador desarrollados en este proyecto, se ha tenido que implementar previamente un simulador para generar los escenarios de acción, distribuir las femtoceldas y evaluar los modelos de propagación propuestos a lo largo del mismo. Una de las características de este simulador es que presenta flexibilidad en cuanto a parámetros de entrada con el objetivo de poder simular diferentes situaciones del sistema. Este simulador también será el encargado de llevar a cabo la asignación y negociación de canales entre los diferentes operadores.

En este capítulo se va a realizar una descripción de los elementos y funciones que constituyen el simulador desarrollado cuyo cometido principal es la generación de escenarios multioperador para realizar una posterior asignación y negociación de canales, confeccionando por tanto un simulador que permite el estudio de las interacciones entre sistemas femtocelda. La descripción se va a realizar en dos pasos: en primer lugar se va a realizar una descripción general y en segundo lugar se realizará una descripción detallada de cada uno de los bloques o clases que lo componen. Asimismo se van a detallar las soluciones adoptadas a la hora de realizar la implementación del sistema planteado.

7.1 ESTRUCTURA DEL SIMULADOR

A la hora de representar la estructura del simulador en un sentido más genérico, se ha optado por un diagrama de flujo de datos en tres niveles: diagrama de contexto, diagrama de nivel superior y diagrama de expansión.

El diagrama de contexto define las relaciones del sistema con el exterior. Para el caso de nuestro simulador, esto se traduce en las entradas y salidas del mismo. Como se aprecia en la figura 7.1a, requiere de una entrada que incluirá las especificaciones de los requisitos de configuración para la simulación a realizar y

ofrece dos salidas: la representación del estado del reparto de canales sobre el escenario en cualquier instante de tiempo y las medidas calculadas.

A un nivel de abstracción más bajo, la herramienta constará de una única aplicación que podrá lanzarse para generar la simulación partiendo desde el escenario 1 (modelo *Dual Stripe*) o desde el escenario 2 (modelo en *grid*), como se ilustra en la figura 7.1b.

Por último, se describen los flujos de datos y los principales procesos involucrados presentes en el diagrama de expansión (véase la Figura 7.2):

Generación de escenario, operadores y femtoceldas Una vez especificados los requisitos de configuración para el sistema, se realiza la creación del escenario sobre el que se va a operar. Se generan los diferentes operadores que van a participar y se crean las femtoceldas asociadas a cada operador sobre el escenario.

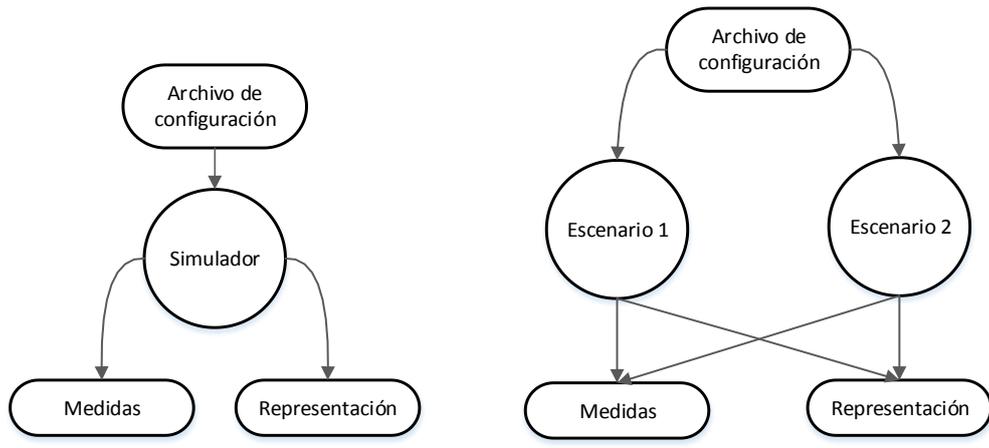
Reparto de canales inicial Para cada una de las femtoceldas del sistema se realizará una asignación inicial de canales.

Generación del modelo de propagación Se realiza el cálculo del modelo de propagación de todas las femtoceldas existentes en el escenario en todas las posiciones de éste.

Realizar las negociaciones Se realiza la asignación de canales utilizando cada uno de los modelos de reparto de canales entre operadores propuestos.

Medidas Una vez efectuado el reparto de canales se procederá a extraer los parámetros relacionados con el estado del reparto de canales. Con ayuda de estos se calcularán parámetros tales como el *throughput*, utilidad o relación portadora a ruido (*Carrier to Interference Ratio*, CIR). Estos serán útiles para medir la calidad de la comunicación.

Representación En este proceso se realiza una representación gráfica del escenario, modelos de propagación, estado de reparto de canales sobre el escenario y de las medidas calculadas.



(a) Diagrama de contexto

(b) Diagrama de nivel superior

Figura 7.1: Diagramas de flujo de datos de alto nivel.

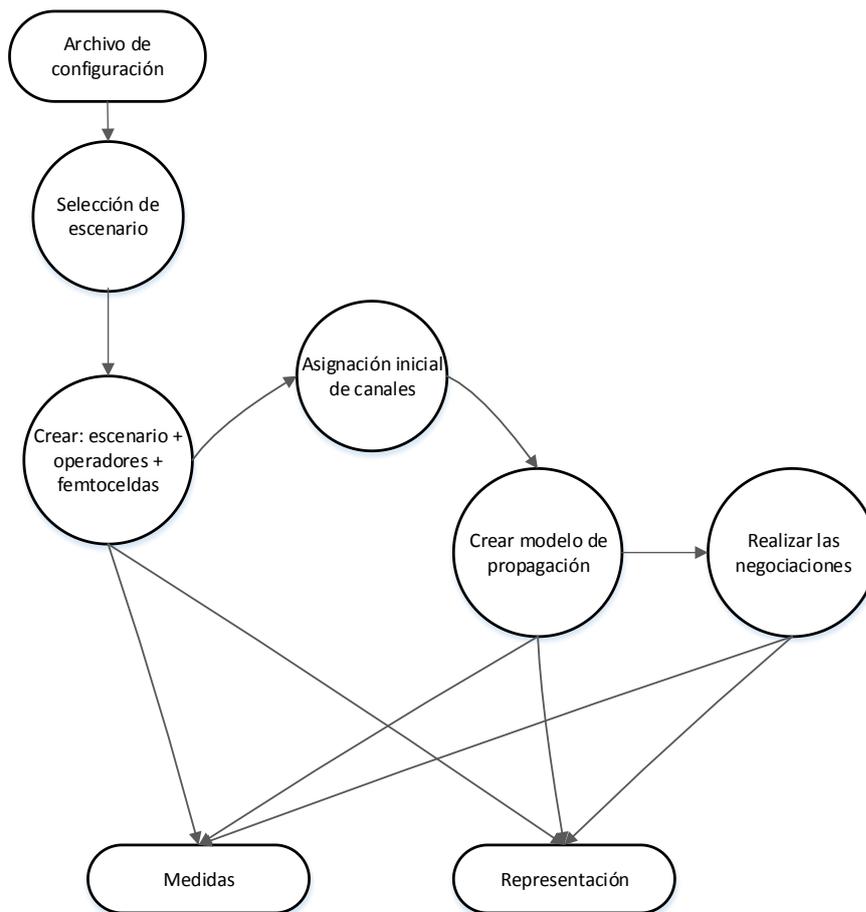


Figura 7.2: Diagrama de expansión.

7.2 ESTRUCTURA DETALLADA DEL SIMULADOR

Tal y como se ha especificado anteriormente, el simulador desarrollado cuenta con una única aplicación que podrá lanzarse para operar sobre el escenario 1 o 2. Indistintamente del escenario seleccionado, las operaciones que se pueden realizar sobre ellos no difieren. En el anexo I se realiza una descripción detallada del modo de funcionamiento del simulador. Por otro lado, en la figura 7.3 se representan un diagrama de flujo en el que se incluyen todas las funciones o métodos desarrollados para el funcionamiento del simulador.

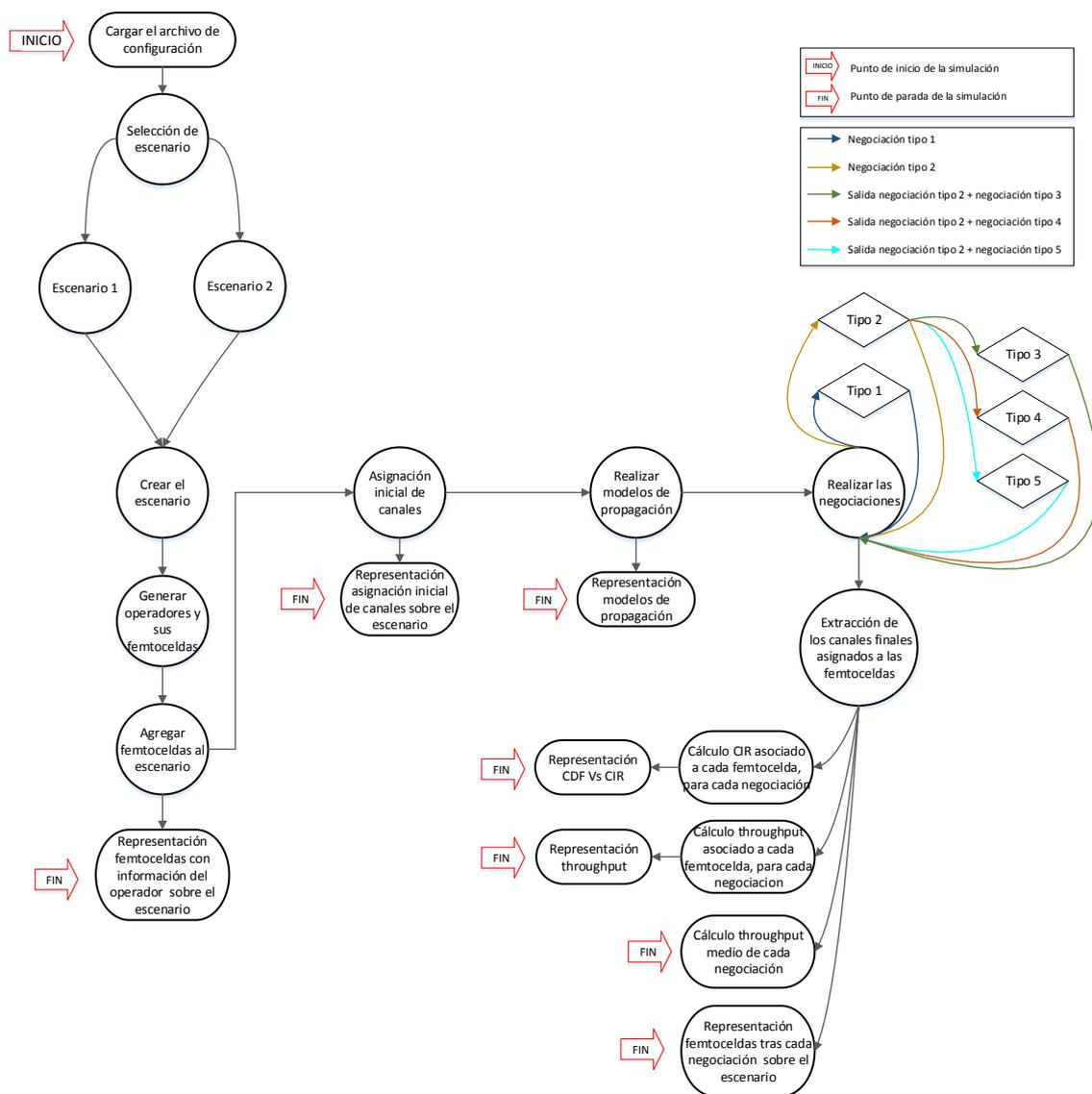


Figura 7.3: Estructura completa del simulador

El simulador se ha realizado completamente en el lenguaje de programación Matlab. De cara al usuario el proyecto se ha presentado en forma de carpeta de archivos. Dentro de esta carpeta se pueden encontrar dos carpetas que contienen las funciones desarrolladas para cada escenario, una carpeta para las funciones comunes y tres archivos con extensión '.m'. Dos de estos archivos se corresponde con los ficheros de configuración de cada escenario y el tercero se ellos es el fichero base de control de la simulación. Desde este último se podrán controlar y efectuar las simulaciones deseadas. En la figura 7.4 se muestra el esquema general del sistema de archivos y carpetas del simulador.

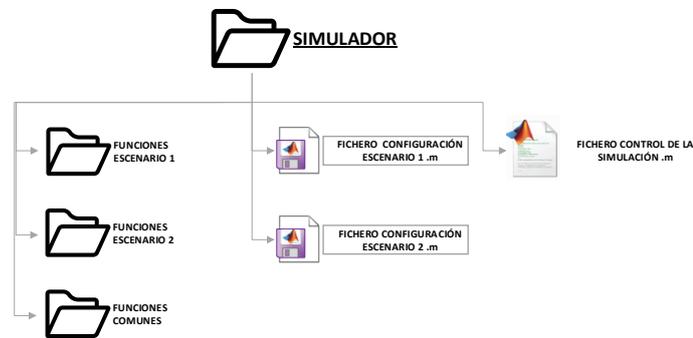


Figura 7.4: Sistema de carpetas y archivos del simulador.

7.2.1 CONFIGURAR EL ARCHIVO DE CONFIGURACIÓN

Los archivos de configuración se componen de secciones que determinan el contexto al que se aplican las diferentes variables de configuración. Cada sección comienza con un nombre encerrado entre dos líneas de comentarios de Matlab. A continuación y hasta el siguiente nombre de sección, se considera el contenido de la misma. Si una línea comienza por un signo de tanto por ciento, será considerada un comentario.

De modo que el primer paso a realizar, es adaptar los archivos de configuración del simulador a las características del escenario y redes que queremos simular. Se han confeccionado dos tipos de archivo diferentes, adaptados a las necesidades de los dos tipos de escenario propuestos. Posteriormente se procederá a cargar estos ficheros en el simulador.

En la figura 7.5 se muestra la estructura de cada uno de estos archivos de configuración, junto con el valor que puede tomar cada una de las variables que lo componen. Como se puede observar la mayoría de los parámetros de configuración son genéricos para ambos escenarios. Los parámetros específicos de cada uno de ellos están relacionados con las dimensiones y estructura del escenario.

FICHERO CONFIGURACIÓN ESCENARIO 1	FICHERO CONFIGURACIÓN ESCENARIO 2
----- VARIABLES ASOCIADAS AL ESCENARIO -----	----- VARIABLES ASOCIADAS AL ESCENARIO -----
<p>lado: Indica las dimensiones (ancho y largo) de un apartamento lado = Valor numérico</p> <p>numApartamentos: indica el número de apartamentos que existirán en cada Stripe del modelo: numApartamentos = Valor numérico</p>	<p>ladoX/ladoY: Indica las dimensiones (ancho y largo) de un Grid del escenario ladoX = Valores numéricos ladoY =</p> <p>numApartamentosX/numApartamentosY: indica el número de cuadrículas que existirán en la dirección horizontal y vertical del modelo numApartamentosX = Valores numéricos numApartamentosY =</p>
----- VARIABLES ASOCIADAS A LOS OPERADORES -----	----- VARIABLES ASOCIADAS A LOS OPERADORES -----
<p>numOperadores: indica el número de operadores distintos que van a participar en la simulación numOperadores = número entero</p>	<p>numOperadores: indica el número de operadores distintos que van a participar en la simulación numOperadores = número entero</p>
----- VARIABLES ASOCIADAS A LAS FEMTOCELDAS -----	----- VARIABLES ASOCIADAS A LAS FEMTOCELDAS -----
<p>estacionesOpeAleatorio: Variable para controlar si el número de femtoceldas que colocamos por operador es fijo o variable de acuerdo a una distribución gaussiana estacionesOpeAlea= 0-asignación de femtoceldas fija 1-asignación de femtoceldas variable</p> <p>numeroFemtoceldas: indica el número de Femtoceldas asociadas a cada operador (sólo tendrá efecto si la variable estacionesOpealeatorio=0) numeroFemtoceldas = número entero</p> <p>posFemtoceldaX/posFemtoceldaY: Conjunto de coordenadas (X,Y) que indicarán la posición que ocupara una femtocelda dentro de un apartamento. posFemtoceldaX = Tomarán valores comprendidos desde 1 hasta 10. Los pares de coordenadas (posFemtoceldaX, posFemtoceldaY)=(1,1) se corresponde con la esquina superior izquierda de contraseña y la coordenada (10,10) con la esquina inferior derecha del mismo</p>	<p>estacionesOpeAleatorio: Variable para controlar si el número de femtoceldas que colocamos por operador es fijo o variable de acuerdo a una distribución Uniforme estacionesOpeAlea= 0-asignación de femtoceldas fija 1-asignación de femtoceldas variable</p> <p>numeroFemtoceldas: indica el número de Femtoceldas asociadas a cada operador (sólo tendrá efecto si la variable estacionesOpealeatorio=0) numeroFemtoceldas = número entero</p> <p>posFemtoceldaX/posFemtoceldaY: Conjunto de coordenadas (X,Y) que indicarán la posición que ocupara una femtocelda dentro de un apartamento. posFemtoceldaX = Tomarán valores comprendidos desde 1 hasta 10. Los pares de coordenadas (posFemtoceldaX, posFemtoceldaY)=(1,1) se corresponde con la esquina superior izquierda de contraseña y la coordenada (10,10) con la esquina inferior derecha del mismo</p>
----- VARIABLES ASOCIADAS A LOS CANALES -----	----- VARIABLES ASOCIADAS A LOS CANALES -----
<p>numeroCanalesDisponibles: indica el número de Canales TVWS disponibles numeroCanalesDisponibles = número entero</p>	<p>numeroCanalesDisponibles: indica el número de Canales TVWS disponibles numeroCanalesDisponibles = número entero</p>
----- VARIABLES ASOCIADAS AL MODELO DE PROPAGACIÓN -----	----- VARIABLES ASOCIADAS AL MODELO DE PROPAGACIÓN -----
<p>potTrasmision: indica la potencia de trasmisión de las femtoceldas potTrasmision = Valor numérico expresado en Watios</p> <p>f: indica la frecuencia de operación de las femtoceldas potTrasmision = Valor numérico expresado en Mhz</p> <p>incremento/numeroPosiciones: Variables que permiten controlar el número de puntos sobre el que se va a calcular el modelo de propagación. Se tomarán un total de incremento*numeroPosiciones muestras incremento= Valores numéricos numeroPosiciones=</p>	<p>potTrasmision: indica la potencia de trasmisión de las femtoceldas potTrasmision = Valor numérico expresado en Watios</p> <p>f: indica la frecuencia de operación de las femtoceldas f = Valor numérico expresado en Mhz</p> <p>incremento/numeroPosiciones: Variables que permiten controlar el número de puntos sobre el que se va a calcular el modelo de propagación. Se tomarán un total de incremento*numeroPosiciones muestras incremento= Valores numéricos numeroPosiciones=</p>

Figura 7.5: Estructura ficheros de configuración

7.2.2 SELECCIÓN DE ESCENARIO

Una vez cargado el fichero de configuración en el simulador, la siguiente tarea a realizar es la de seleccionar la ejecución de un tipo de escenario u otro. Para controlar esta función se ha incluido una variable booleana en el fichero de control del simulador, cuyo valor estará asociado a cada escenario. De modo que si esta variable toma valor:

- 0 – se seleccionará el modelo *Dual Stripe*.
- 1 – se seleccionará el modelo en *Grid*.

7.2.3 CREACIÓN DEL ESCENARIO

La función *creación de escenario* es probablemente la más importante en cuanto a operaciones a realizar. Su función es la de crear el escenario elegido en el paso anterior. En ella, se desarrollan las principales funciones de modelado del sistema, correspondientes con la creación del escenario a partir de los parámetros de entrada contenidos en el archivo de configuración. Los únicos parámetros que debe proporcionar el usuario para el correcto funcionamiento de este método son: el número de apartamentos, en caso de seleccionar el escenario 1, o número de cuadrículas, en caso de seleccionar el escenario 2 y las dimensiones de cada uno de ellos.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\ESCENARIO01\generarEscenario.m



...\SIMULADOR\ESCENARIO02\generarEscenario.m

7.2.4 GENERAR OPERADORES Y SUS FEMTOCELDAS

En el proceso de creación de los operadores se realizan todos los procesos relacionados con la creación de los usuarios potenciales, que en nuestro caso son los operadores de telefonía móvil que darán servicio en zonas de interior mediante la utilización de femtoceldas.

Durante esta fase de la simulación se crearán y asignarán las femtoceldas a cada uno de los operadores. El simulador confeccionado permite o bien asignar un número fijo de femtoceldas a cada operador o bien realizar una asignación dinámica de éstas de acuerdo una distribución Gaussiana, especificando una media y una desviación.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\ESCENARIO1\generarOpeFemto.m



...\SIMULADOR\ESCENARIO2\generarOpeFemto.m

7.2.5 AGREGAR FEMTOCELDAS AL ESCENARIO

Una vez generadas las femtoceldas de cada operador, la siguiente tarea es la de colocarlas en el escenario. En este proceso hay que tener en cuenta que tanto en el escenario 1 como en el escenario 2, el espacio queda dividido en cuadrículas o apartamentos, respectivamente. Se ha establecido que sólo se podrá agregar una femtocelda por apartamento o cuadrícula.

La asignación de femtoceldas se llevará a cabo en dos pasos. En el primero de ellos se asignará a cada femtocelda, el apartamento o cuadrícula en el que se colocará. Esta tarea se realiza de manera aleatoria, de acuerdo a una distribución uniforme dependiente del número de apartamentos o cuadrículas libres. Cuando se ocupa un apartamento éste pasará a estar en estado no disponible y no participará en el proceso de asignación de femtoceldas. Con esto se consigue liberar la carga del sistema al no tener que estar comprobando en cada proceso si el apartamento está libre o no. En el segundo de ellos se asignará la posición dentro del apartamento o cuadrícula donde se colocará cada femtocelda. Estas posiciones se podrán definir de manera fija o de manera aleatoria de acuerdo distribución uniforme dependiente de las dimensiones del apartamento o *grid*.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\ESCENARIO1\agregarFemtoEsc.m



...\SIMULADOR\ESCENARIO2\agregarFemtoEsc.m

7.2.6 REPRESENTAR FEMTOCELDAS SOBRE EL ESCENARIO INDICANDO EL OPERADOR

Esta función permite representar el estado del escenario tras la colocación de las femtoceldas. Cada femtocelda irá representada con un círculo negro y se coloreará el apartamento o cuadrícula que lo contengan con el color asociado al operador.

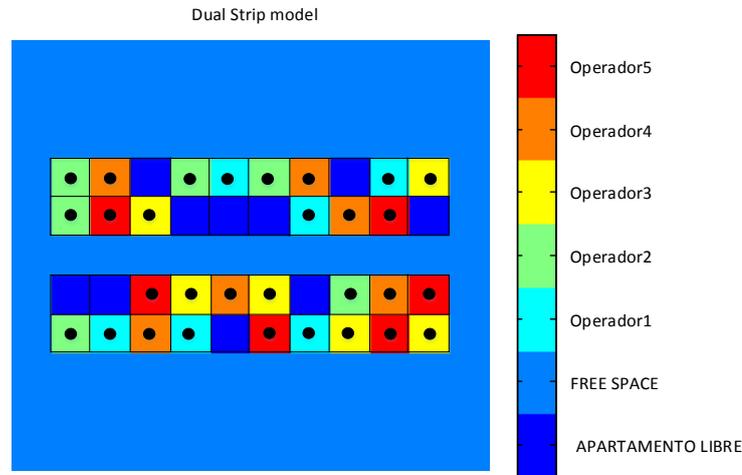


Figura 7.6: Ejemplo de escenario tipo 1.

En la figura 7.6 se puede ver un ejemplo de la representación que devolverá el simulador. En éste se muestra un escenario tipo *Dual-Stripe* constituido por 10 apartamentos por fila. En él participan 5 operadores con 6 femtoceldas cada uno de ellos. Las femtoceldas se han colocado en la posición central de cada apartamento.

Gracias a esta función podremos comprobar visualmente la evolución del reparto de canales a lo largo de la simulación completa, es decir, desde el estado de reparto inicial hasta el estado tras cada una de las negociaciones.

7.2.7 ASIGNAR CANAL INICIAL A CADA FEMTOCELDA

Una vez disponemos del escenario completo, la siguiente tarea es la de asignar un canal, de entre los disponibles, a cada femtocelda. La asignación inicial se realiza de manera aleatoria de acuerdo a una distribución aleatoria uniforme dependiente del número de canales disponibles.

Cabe señalar que esta asignación de canales será común para cada una de las negociaciones, de modo que en todas ellas se partirá de la misma situación inicial.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\ESCENARIO01\repartoCanalesIniciales.m



...\SIMULADOR\ESCENARIO02\repartoCanalesIniciales.m

7.2.8 REALIZAR MODELOS DE PROPAGACIÓN Y CÁLCULO DE SINR

Esta función se encarga de calcular los modelos de propagación de cada una de las femtoceldas colocadas en el escenario. Se han desarrollado dos funciones diferentes a este fin, una para cada modelo de propagación propuesto. Las funciones están confeccionadas para calcular el *path loss* (PL) en todos los puntos del escenario. Se podrá elegir la precisión con la que queremos realizar el modelo. Para ello se proporcionan al usuario dos variables de control. Un incremento en la precisión resultará en un modelo de propagación con más puntos.

A su vez esta función se encarga de realizar el cálculo de la relación señal a ruido (*Signal to Interference plus Noise Ratio*, SINR). La potencia de la señal, en escala lineal, se puede calcular a partir del PL como:

$$P_{señal} = \frac{P_{transmitida}}{PL}$$

donde $P_{transmitida}$ representa la potencia transmitida por la femtocelda y PL es el *path loss* calculado.

Conociendo esto, la SINR la calcularemos como el cociente entre la potencia de la señal y la potencia del ruido más la de la interferencia:

$$SINR = \frac{P_{señal}}{P_{ruido} + P_{interferencia}} \quad \rightarrow \quad SINR(dB) = 10\log_{10}(SINR)$$

Para las simulaciones se ha fijado la potencia del ruido a -100dBm. Este valor se corresponde, aproximadamente, con el valor de ruido térmico obtenido para un ancho de banda de 6MHz a temperatura ambiente:

$$P_{ruido}(dBm) = -174 + 10\log(B) = -174 + 10\log(6 \cdot 10^6) = -106,21$$

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\ESCENARIO1\modPropTipo1.m



...\SIMULADOR\ESCENARIO2\modPropTipo2.m

7.2.9 REPRESENTACIÓN MODELOS DE PROPAGACIÓN Y SINR

Esta función permite representar el modelo de propagación y los valores de SINR obtenidos para cada una de las femtoceldas existentes en el escenario. También permite representar estos parámetros para varias femtoceldas a la vez. Esto resulta útil para casos en los que se quiera comprobar de forma visual el nivel de interferencia entre femtoceldas.

7.2.10 REALIZAR NEGOCIACIÓN

Durante esta fase, se realiza la asignación de canales a las femtoceldas siguiendo la metodología propuesta en cada uno de los modelos de negociación diseñados.

Para todos los tipos de negociación propuestos la forma de estimar el mejor reparto de canales es la misma, lo que varía son las femtoceldas sobre las que se realizará el reparto. Para facilitar esta tarea se ha confeccionado una única función común a todas las negociaciones. Esta función se encarga de, dado un conjunto de femtoceldas, sus posiciones en el escenario y su *path losses*, estimar el mejor canal asociado a cada femtocelda. Este canal será aquel que maximice la función de utilidad [75]. Este proceso se repetirá internamente sobre todas las femtoceldas de entrada hasta que se alcance el equilibrio. El equilibrio se corresponde con la situación en la que todas las femtoceldas están conformes con el canal que se le ha sido asignado y deciden no cambiar de canal. Finalmente, la función devolverá el mejor canal para cada femtocelda en dicha situación de entrada.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\repartoCanalesUtilidad.m

A continuación se muestra la estructura y funcionamiento de cada una de las funciones confeccionadas para realizar las negociaciones.

NEGOCIACIÓN TIPO 1

En este tipo de negociación cada operador conoce la posición de todas las femtoceldas existentes en el escenario, sean o no sean de su propiedad. De modo que se está emulando una situación en la que todos los operadores actúan de forma cooperativa y comparten toda la información.

La forma de proceder con esta negociación es la de aplicar la función de asignación de canales sobre todas las femtoceldas existentes en el escenario.

Para emular una situación más real, en la que las femtoceldas no se encienden en un orden dependiente de la posición que ocupan en el escenario, se ha incluido una variable de control interna a este fin. Esta variable se generará de modo aleatorio de acuerdo a una distribución normal dependiente del número de femtoceldas que participan en el juego. Este orden de encendido será fijo durante el proceso de asignación de canales.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\negociacionTipo1.m

NEGOCIACIÓN TIPO 2

En este tipo de negociación, cada operador solo dispone de la información de sus propias femtoceldas para realizar el reparto de canales. Se trata por tanto de un ambiente en el que todos los operadores actúan de manera egoísta no compartiendo información alguna con el resto.

La forma de proceder en esta negociación es la de aplicar la función de asignación de canales sobre las femtoceldas de cada operador de manera independiente, sin incluir las femtoceldas de otros operadores.

Se puede decir que en este tipo de negociación los operadores actúan a ciegas, ya que al finalizar la negociación el resultado es ideal si sólo se consideran las femtoceldas de un único operador, pero el resultado no es tan bueno si se considera el escenario completo. Al no disponer de la información de todas las femtoceldas se dan situaciones en las que un operador elige un canal para una femtocelda que da muy buenos resultados en su modelo, pero podría ocurrir que existan femtoceldas de otro operador en una zona cercana operando sobre el mismo canal.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\negociacionTipo2.m

El reparto de canales obtenido a la salida de esta función constituirá el escenario de entrada para las funciones de negociación de tipo 3, 4 y 5.

NEGOCIACIÓN TIPO 3

En este tipo de negociación, partimos de una situación en la que los operadores han actuado de forma egoísta aplicando el reparto de canales sobre sus femtoceldas sin conocer la información del resto de operadores. Como ya advertíamos este tipo de negociación no da muy buenos resultados al actuar a ciegas. Para mejorar esta situación, la negociación de tipo 3 propone un mecanismo en el que los operadores comparten su información bajo ciertas condiciones y están dispuestos a cambiar de canal mejorar su rendimiento y el del sistema completo.

En esta forma de negociación la forma de proceder se dividirá en varios pasos. En primer lugar se obtiene la peor femtocelda de cada operador considerando únicamente las femtoceldas de su propiedad. Posteriormente se establece un área circular alrededor de esta femtocelda de radio R . El valor de este radio podrá ser fijado por el usuario. Finalmente se aplica el reparto de canales sobre las femtoceldas que se encuentren dentro de dicho radio. En este reparto las femtoceldas conocerán la información de las femtoceldas de su mismo operador dentro y fuera del área, y las del resto de operadores dentro del área.

Este proceso se realizará de forma iterativa hasta llegar a la situación en la que la peor femtocelda de cada operador es siempre la misma y por tanto el reparto de canales es estable en todo el escenario.

Cabe destacar que para evitar situaciones en las que siempre se dé preferencia a un operador frente al otro, se ha establecido que dentro del área de operación el turno para seleccionar el canal se asigne de manera aleatoria. Para ello se ha utilizado una función de distribución uniforme dependiente del número de femtoceldas existentes dentro del área de operación. Si esto no se realiza así, podrán aparecer situaciones en las que las peores femtoceldas de cada operador en iteraciones alternas sean las mismas. De modo que si el orden de encendido se repite la salida de la función de reparto de canales será siempre la misma y se volverá a repetir la situación anterior. De forma que no se lograría alcanzar el equilibrio, puesto que el sistema se encuentra inmerso en un bucle infinito.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\negociacionTipo3.m

NEGOCIACIÓN TIPO 4

De nuevo con la negociación de tipo 4 partimos del estado de reparto de canales obtenido tras la negociación de tipo 2. Para mejorar este tipo de situaciones, la negociación de tipo 4 propone un mecanismo en el que los operadores comparten su información bajo ciertas condiciones. A diferencia de la negociación de tipo 3, en esta negociación los operadores no están obligados a cambiar los canales asignados a sus femtoceldas para mejorar el rendimiento de otros operadores.

La forma de operación en este tipo de negociación es la misma que en la negociación de tipo 3, con la salvedad de que en este caso el reparto de canales dentro del área de operación lo realizan sólo las femtoceldas del mismo operador que la peor de ese turno.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\negociacionTipo4.m

NEGOCIACIÓN TIPO 5

Igualmente en la negociación de tipo 4 partimos del estado de reparto de canales obtenido tras la negociación de tipo 2.

En esta negociación los operadores no compartirán ninguna información entre sí. Para realizar el intercambio de canales se ha introducido una nueva entidad en el modelo. Todos los operadores confiarán en esta entidad y les entregarán la información de todas sus femtoceldas.

La forma de operación en este tipo de negociación es la misma que en la negociación de tipo 3, con la salvedad de que en este caso el reparto de canales dentro del área de operación será controlado por la entidad superior. De modo que cuando se realice el reparto de canales se hará conociendo la información de todas las femtoceldas del escenario.

La idea de este modelo es generar escenario en los que la función de reparto de canales no está en mano de los operadores sino que será controlada por una entidad superior. Esta entidad podrá ser una delegación del estado o alguna entidad reguladora, en la que es más fácil que confíen los operadores.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\negociacionTipo5.m

7.2.11 CÁLCULO SINR

La relación señal a interferencia más ruido (*Signal to Interference plus Noise Ratio*, SINR) es un indicador que permite medir la calidad de la señal recibida en un sistema de comunicaciones en términos de interferencias. Un valor de SINR alto indicará que el nivel de interferencia recibido es bajo.

Nuestro simulador incluye una función que, dada la información de las femtoceldas y los canales sobre las que operan, permite calcular el SINR en todas las posiciones de un apartamento o *grid* en el que exista en una femtocelda.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\calculoSINR.m

La SINR la calcularemos como el cociente entre el nivel de señal de recibido en cada posición de un apartamento, generado por la femtocelda que lo ocupe, entre la suma del ruido más el nivel de señal recibido en el apartamento generado por el resto de femtoceldas del escenario que compartan canal con la femtocelda que está colocada en el apartamento. Para comprender esto mejor en la figura 7.7 se incluye un ejemplo gráfico en el que se muestra el proceso de cálculo del SINR en una posición de un apartamento en el que existe una femtocelda operando en el canal 3. En ésta $C_{i,x,y}$ representa el nivel de señal recibido en la posición (x,y) del apartamento, producido por la femtocelda i y $\sum_j I_{j,x,y}$ es la suma del nivel de señal recibido en la posición (x,y) del apartamento, producido por el resto de femtoceldas existentes en el escenario que comparten canal con la femtocelda i .

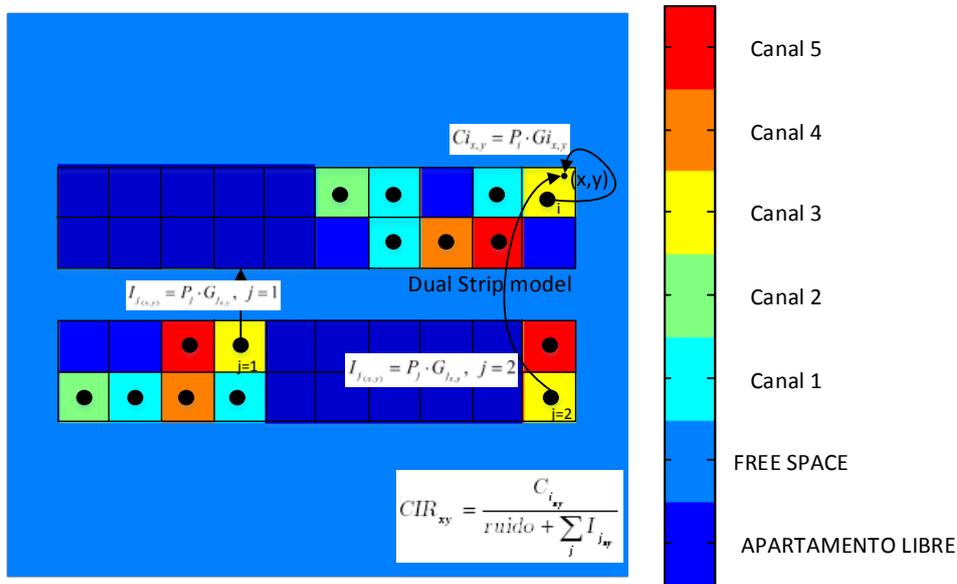


Figura 7.7: Procedimiento para el cálculo de SINR

7.2.12 CÁLCULO DEL THROUGHPUT

El *throughput* representa el nivel de utilización real de un enlace. Técnicamente es la capacidad de información que un elemento de red puede mover en un periodo de tiempo.

Éste parámetro lo calcularemos para cada una de las posiciones de los apartamentos del escenario en los que exista femtocelda. Para calcularlo haremos uso del teorema de Shannon, que relaciona éste con la SINR. Para una posición (x, y) del escenario el *throughput* vendrá dado por:

$$\text{Throughput}_{x,y} = BW \cdot \log_2(\text{SINR}_{x,y})$$

Donde **BW** es el ancho de banda y $\text{SINR}_{x,y}$ es la SINR en la posición (x, y).

La función desarrollada devolverá un vector que contiene el *throughput* calculado en todos los apartamentos del escenario en el que exista una femtocelda. A su vez obtendrá el valor medio del *throughput* obtenido.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:

 ...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\calculoThroughput.m

7.2.13 REPRESENTACIÓN CDF DE LA SINR Y DEL THROUGHPUT

Para representar la función de distribución acumulada (*Cumulative Distribution Function*, CDF) de la SINR y el *throughput* calculados, se va a hacer uso de la función 'cdfplot', que viene por defecto en Matlab.

La forma de operar será la de almacenar el conjunto de valores calculados de SINR o *throughput* en un vector y pasárselos como argumento a esta función, obteniendo la representación deseada.

Una vez calculado el valor del SINR en todas las posiciones de todos los apartamentos del escenario en los que exista una femtocelda el simulador tiene un apartado dedicado a mostrar su CDF.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\representarCDF.m

7.2.14 CÁLCULO DEL 5 Y 95 PERCENTIL

El percentil es una medida estadística que nos dice cómo está posicionado un valor respecto al total de un conjunto de muestras. Si tenemos un conjunto grande de muestras y las dividimos en 100 partes, cada una de ellas es un percentil.

Nosotros aplicaremos el cálculo del percentil a los valores de SINR y *throughput* obtenidos. De modo que el 5 percentil indicará que el 5% de los usuarios del sistema tendrán una SINR o *throughput* inferior a ese valor. El 95 percentil indicará que el 5% de los usuarios del sistema tendrán un SINR o *throughput* superior a ese valor.

La ruta de esta función, para cada escenario, es la siguiente:



...\SIMULADOR\FUNCIONES COMUNES\calculaPercentil.m

CAPÍTULO 8

RESULTADOS

En esta sección se van a presentar y comentar los resultados obtenidos con el simulador confeccionado.

Este capítulo se divide en dos secciones principales, una para cada uno de los escenarios implementados. A su vez, éstas se dividen en dos partes. El objetivo de la primera parte es representar la evolución completa del sistema desde que se crea el escenario hasta que se finaliza el reparto de canales con cada uno de los mecanismos de negociación desarrollados. En la segunda parte se va a realizar un análisis formal de los valores de SINR y *throughput* obtenidos para cada uno de los mecanismos de reparto de canales implementados.

8.1 ESCENARIO 1: MODELO DUAL STRIPE

8.1.1. ANÁLISIS DEL SISTEMA COMPLETO

En este apartado se va a llevar a cabo un análisis de todos los parámetros devueltos por el simulador en relación con el escenario. Éstos se mostrarán de acuerdo al orden de ejecución del simulador, el cual se detalla en la figura 8.1.

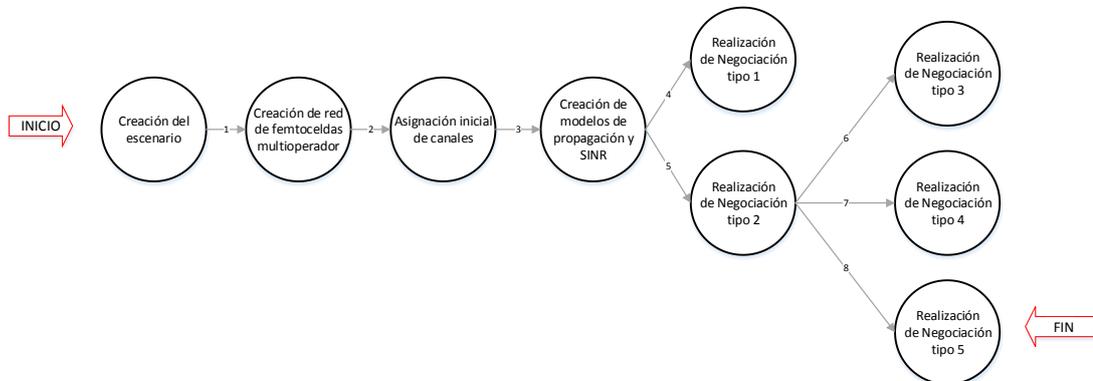


Figura 8.1: Orden de ejecución del simulador.

A continuación se muestra un ejemplo en el que se representa el estado del escenario desde que se crea, hasta que se realiza el reparto de canales con cada uno de los mecanismos de negociación diseñados.

Para este ejemplo, se ha simulado un escenario compuesto por 10 apartamentos por fila. Las dimensiones de cada apartamento son 10m x 10m y el ancho de la calle existente entre las dos bandas de apartamentos es también de 10m. De manera que el escenario completo tendrá un tamaño total de 8.400m².

Una vez creado el escenario, el siguiente paso es crear la red de femtoceldas multioperador e insertarla en el escenario. En este ejemplo, se ha establecido una red compuesta por 3 operadores que cuentan con 3 femtoceldas cada uno de ellos. La inserción de las femtoceldas en el escenario se ha realizado de acuerdo a una distribución uniforme dependiente del número de femtoceldas total de la red. Se ha especificado que las femtoceldas se instalan en la posición central del apartamento. El estado del escenario tras la inserción de la red de femtoceldas se muestra en la figura 8.2.

Una vez creado el escenario e insertadas las femtoceldas en él, el siguiente paso es asignar los canales iniciales a cada femtocelda. La asignación se realiza de manera aleatoria, de acuerdo a una distribución uniforme dependiente del número de canales disponibles. Para este ejemplo se ha designado que el número de canales disponibles es 2. El estado del escenario tras realizar la asignación inicial de canales, se puede ver en la figura 8.3. Como se puede observar, se parte de una situación en la que existen problemas graves de interferencia entre femtoceldas. Esto es debido a que se dan situaciones en las que dos femtoceldas situadas en apartamentos colindantes comparten el mismo canal.

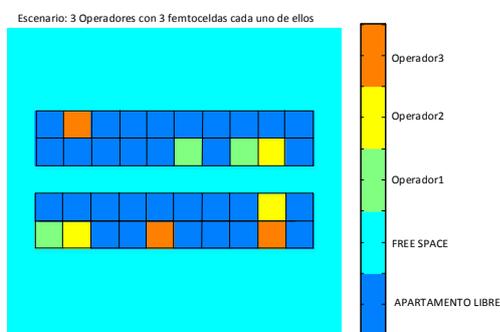


Figura 8.2: Red de femtoceldas creada.

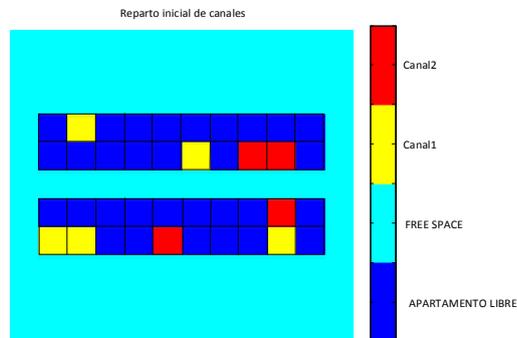


Figura 8.3: Reparto inicial de canales.

La siguiente tarea es crear el modelo de propagación asociado a cada una de las femtoceldas existentes en el escenario. Para éste, se ha utilizado el modelo de propagación para escenarios *Dual Stripe* descrito en el capítulo 6. Como ya se comentó este modelo propone una estimación del PL distinta en función de si nos situamos en una posición del escenario que se encuentre en la misma, distinta o fuera de la banda de apartamentos donde se coloque la femtocelda de la que se está creando el modelo:

Misma banda de apartamentos que la femtocelda	$PL(dB) = 32.44 + 20\log_{10} d(m) + 20\log_{10} f(GHz) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw}$
Fuera de la zona de apartamentos	$PL(dB) = \max(38.8 + 37.6\log_{10} R + 21\log f(GHz), 32.44 + 20\log_{10} d(m) + 20\log_{10} f(GHz)) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw} + L_{ow}$
Distinta banda de apartamentos que la femtocelda	$PL(dB) = \max(38.8 + 37.6\log_{10} R + 21\log f(GHz), 32.44 + 20\log_{10} d(m) + 20\log_{10} f(GHz)) + 0.7d_{2d,indoor} + q * L_{iw} + L_{ow,1} + L_{ow,2}$

Tabla 8.1: Ecuaciones PL modelo *Dual Stripe*.

Para confeccionar este modelo se ha tenido en cuenta la distancia d a la que nos encontremos de la femtocelda, la distancia recorrida dentro de las bandas de apartamentos $d_{2d,indoor}$ a la que nos encontramos de la femtocelda, el número de paredes atravesadas q , el ancho de banda f y unos parámetros L_{iw} , $L_{ow,1}$ y $L_{ow,2}$ relacionados con las pérdidas por penetración de las paredes. Para la simulación se ha utilizado un ancho de banda de 6Mhz, correspondiente con la banda del espectro de televisión en España.

Por otro lado, la SINR se calcula aplicando la relación:

$$SINR = \frac{P_{señal}}{P_{ruido}} = \frac{\frac{P_{transmitida}}{PL}}{P_{ruido} + P_{interferencia}} \rightarrow SINR(dB) = 10\log_{10}(SINR)$$

Para este ejemplo se ha fijado la potencia transmitida $P_{transmitida}$ a 40mW y la potencia del ruido a 100dBm. Para tener en cuenta las imperfecciones en la implementación de las componentes de RF y evitar un valor alto y no realista de SINR, se ha aplicado un EVM del 3%, que limita el valor de SINR obtenido a 30,5dB:

$$SINR_{limite} = \frac{1}{EVM^2} = \frac{1}{0.03} = 1122 \rightarrow SINR_{limite}(dB) = 10\log(SINR_{limite}) = 30,5$$

En la figura 8.4 se muestra la evolución de la distancia recorrida a lo largo del escenario. En la figura 8.5 se presenta la evolución de la distancia recorrida por dentro de las bandas de apartamentos a lo largo del escenario. En la figura 8.6 se ofrece la evolución del número de pareses atravesadas a lo largo del escenario. En la figura 8.7 se exhibe la evolución del PL a lo largo del escenario. En las figura 8.8 se expone la evolución de la SINR tras aplicar el modelo EVM. Estas estadísticas se muestran para dos de las femtoceldas existentes en el escenario, cada una de una banda de apartamentos, desde el punto en el que está colocada una femtocelda hasta cualquier punto del escenario. Este ejemplo además permite verificar el correcto funcionamiento de la implementación del modelo de propagación en el simulador.

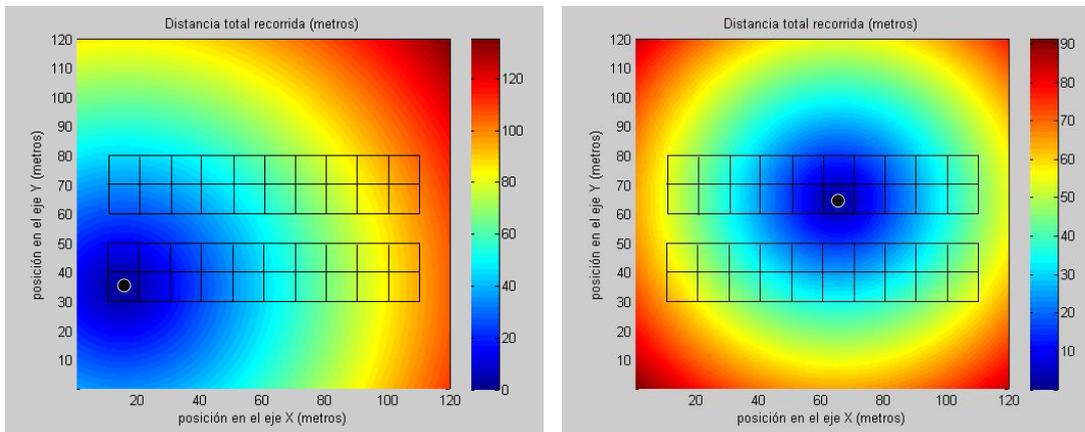


Figura 8.4: Distancia recorrida desde la femtocelda.

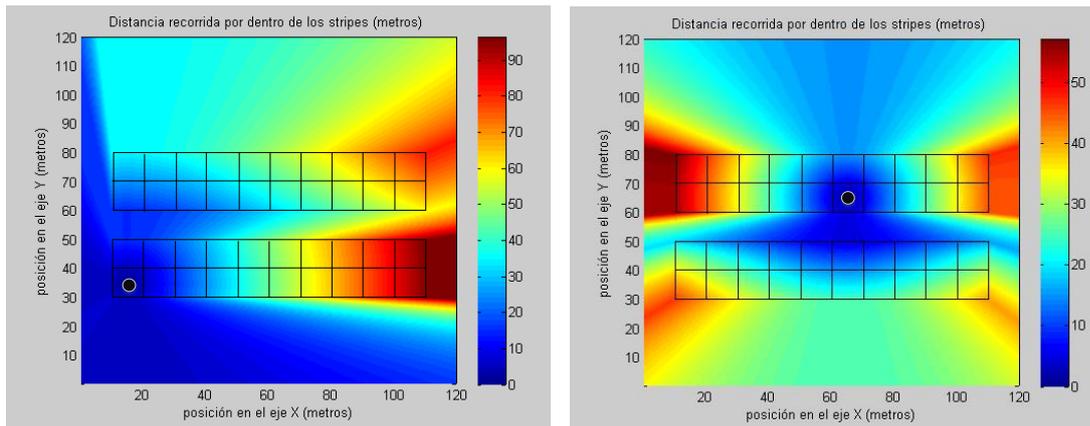


Figura 8.5: Distancia recorrida por dentro de los *stripes* desde la femtocelda.

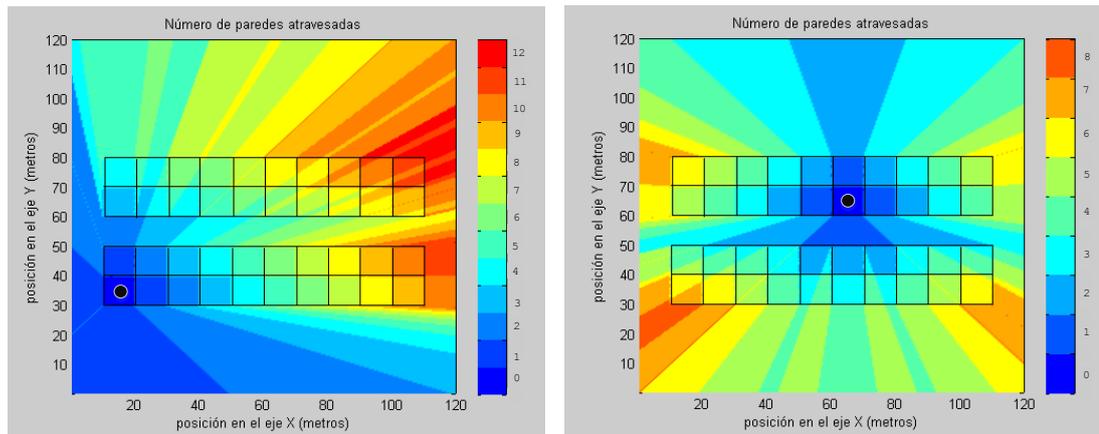


Figura 8.6: Número de paredes atravesadas desde la femtocelda.

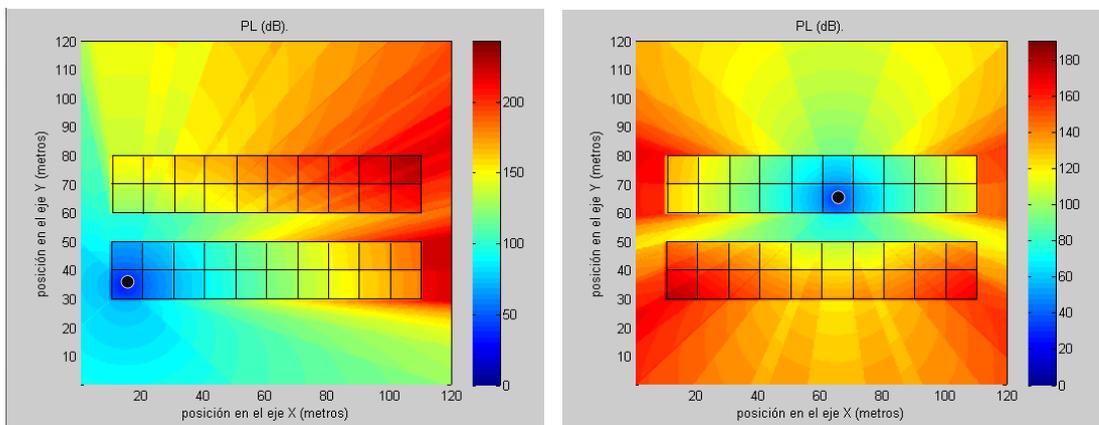


Figura 8.7: PL para todo punto del escenario desde la femtocelda.

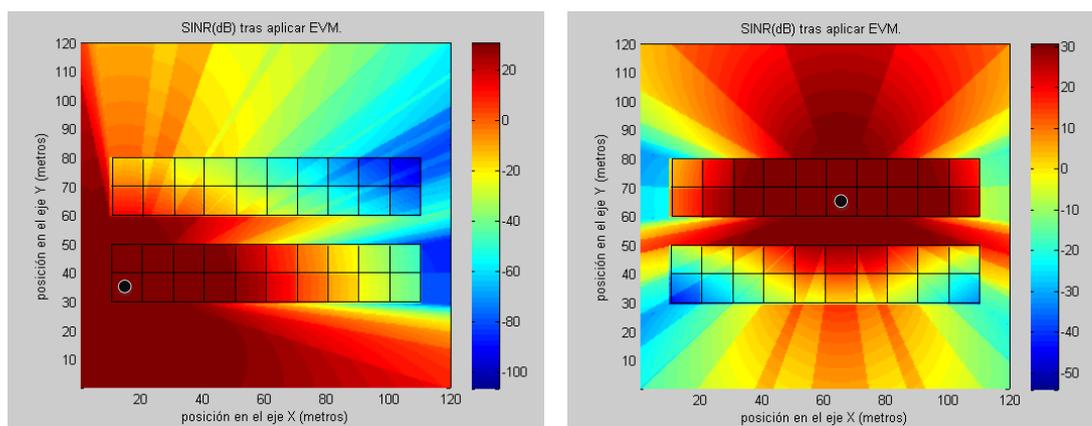


Figura 8.8: SINR tras aplicar EVM para todo punto del escenario desde la femtocelda.

Finalmente, se va a presentar el resultado obtenido tras aplicar cada uno de los tipos de negociación diseñados sobre el escenario creado. En las figuras 8.9, 8.10, 8.11, 8.12 y 8.13 se representa, respectivamente, el reparto de canales obtenido tras las negociaciones de tipo 1, 2, 3, 4 y 5. En todas ellas se muestra la asignación de canales obtenida antes y después de realizar la negociación. Se debe señalar que en las negociaciones de tipo 3, 4 y 5, el juego se aplica en áreas circulares alrededor de la peor femtocelda de cada operador, hasta que se alcance una situación de equilibrio. El radio elegido para esta área, durante las simulaciones, es de 30 metros.

Si analizamos en detalle el resultado obtenido tras aplicar cada una de las negociaciones se pueden extraer las siguientes conclusiones.

Con las negociaciones de tipo 1 y 5 se consiguen resolver todas las situaciones en las que existen problemas graves de interferencia entre femtoceldas. En el primer tipo de negociación se alcanza una situación tan favorable debido a que los operadores comparten toda su información entre sí. En el quinto tipo de negociación la situación es tan buena ya que, aunque los operadores no compartan la información entre sí, las negociaciones se realizan controladas por una entidad superior que sí dispone de dicha información.

Con la negociación de tipo 2 se consiguen resolver los problemas de interferencia entre femtoceldas, si sólo se consideran las femtoceldas de cada operador de forma independiente. Sin embargo, cuando se considera el sistema completo, el resultado empeora incluso la situación inicial. Ésto se debe a que los operadores actúan de forma egoísta sin compartir algún tipo de información entre sí, por lo que puede haber femtocelda vecinas de operadores diferentes que utilicen el mismo canal.

Con las negociaciones de tipo 3 y 4, se consiguen resolver la mayoría de las situaciones de conflicto existentes en el escenario inicial. No obstante, los resultados obtenidos no llegan a ser tan buenos como para las negociaciones 1 y 5, habiendo celdas en apartamentos colindantes que usan el mismo canal. Ésto es debido a que en este tipo de negociaciones los operadores no comparten toda su información entre sí, sino que únicamente lo hacen dentro del área de operación. Esto se verá más claramente en el análisis realizado en el siguiente apartado.

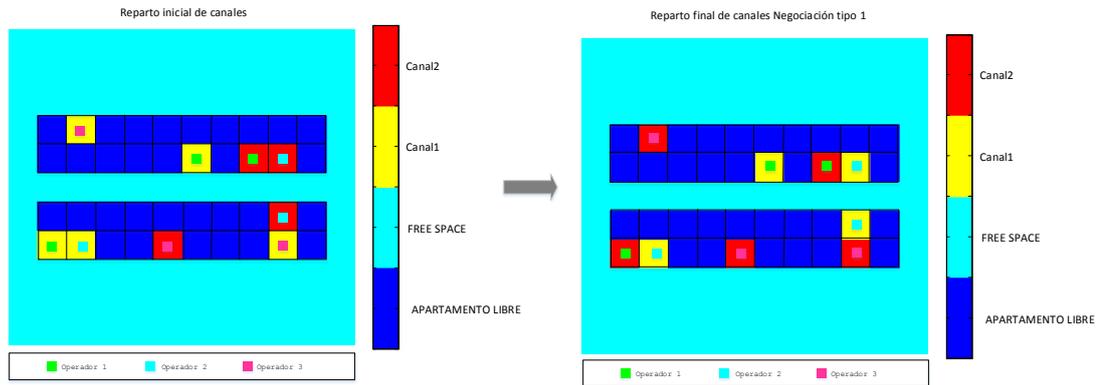


Figura 8.9: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 1.

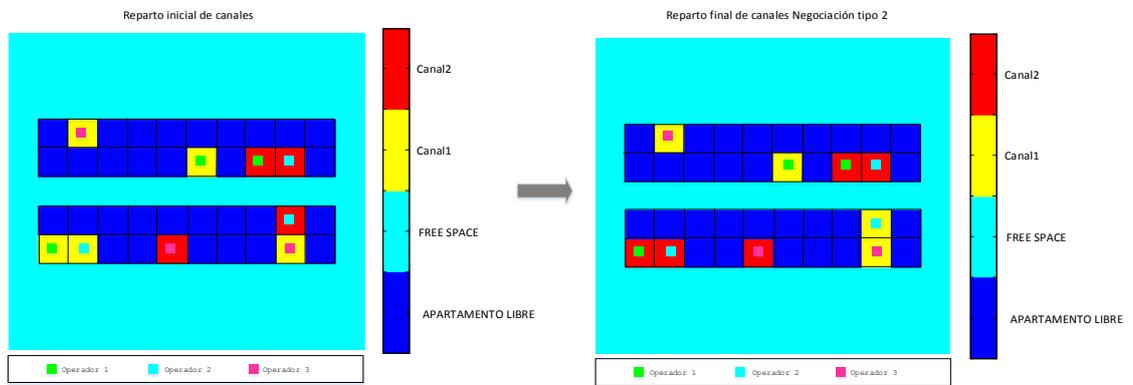


Figura 8.10: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 2.

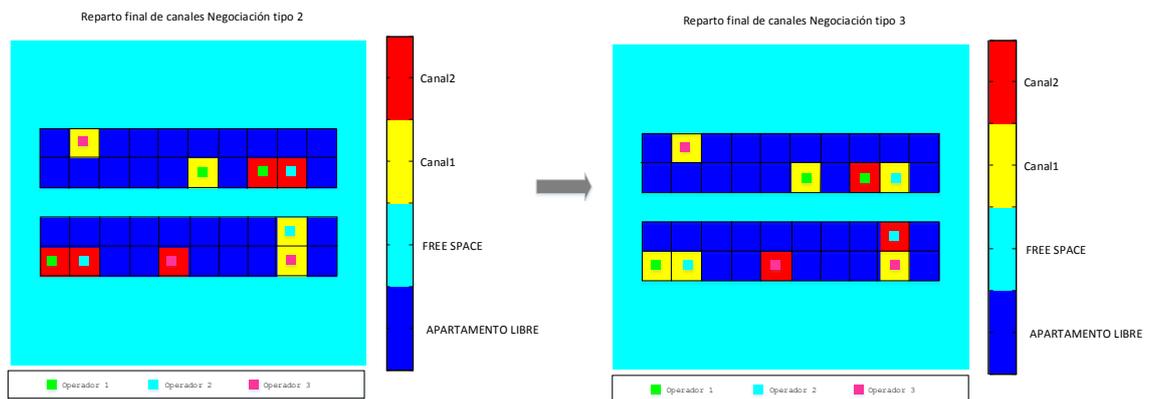


Figura 8.11: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 3.

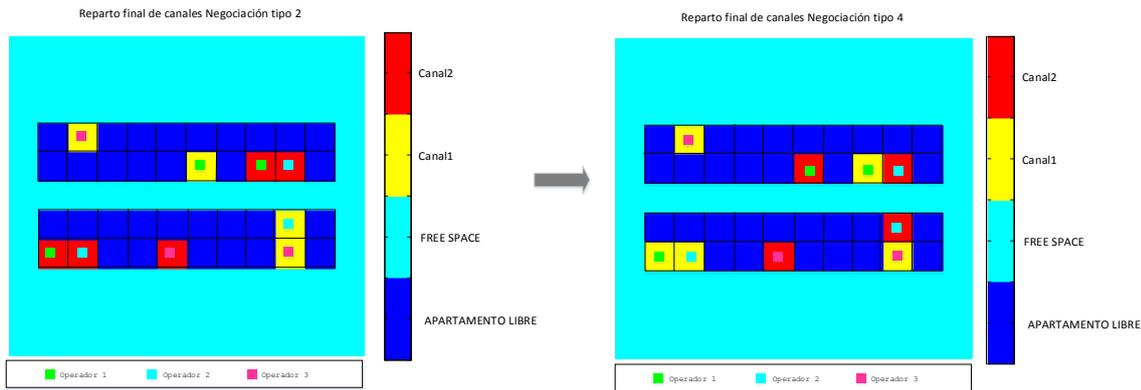


Figura 8.12: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 4.

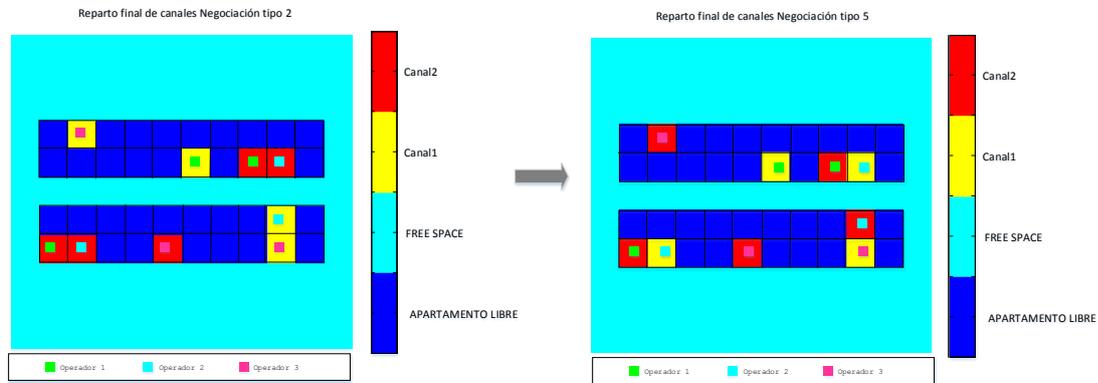


Figura 8.13: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 5.

8.1.2. ANÁLISIS DE LA SINR, THROUGHPUT, 5 PERCENTIL Y 95 PERCENTIL DE CADA NEGOCIACIÓN

En este apartado se van a simular 3 topologías de red diferentes:

- Topología 1: Red constituida por 1 operador con 30 femtoceldas.
- Topología 2: Red constituida por 3 operadores con 10 femtoceldas cada uno.
- Topología 3: Red constituida por 5 operadores con 6 femtoceldas cada uno.

Para éstas se simularán casos en los que existan 3, 5 o 7 canales disponibles. El escenario utilizado para estas redes es el mismo que el descrito en el apartado 8.1.1.

Para cada una de las configuraciones descritas arriba, se va a hacer una campaña de medidas, consistente en realizar 50 simulaciones completas desde que se crea un escenario hasta que se realiza el reparto de canales con cada una de las negociaciones propuestas. Cada simulación se ha realizado con una semilla de números aleatorios distinta. Se hace así para evitar la generación de escenarios repetidos, ya que si la

semilla se repite, las funciones de generación de números aleatorios devolverán la misma secuencia de valores.

Para cada una de las simulaciones realizadas se ha calculado el SINR y *throughput*. Para todos se ha evaluado su valor promedio y el valor medio de su 5 percentil y 95 percentil. El cálculo del valor promedio se ha realizado obteniendo el valor medio de cada simulación y promediando los valores obtenidos (diferentes semillas del mismo caso). El cálculo del 5 percentil medio y del 95 percentil medio se ha realizado obteniendo el 5 percentil y el 95 percentil de cada simulación y luego realizando la media de los valores obtenidos. Todos los valores obtenidos se muestran en las tablas 8.1 y 8.2.

Asimismo se incluye la representación de la CDF de la SINR y la CDF del *throughput* obtenidos para cada femtocelda. Todo ello para una misma simulación.

A continuación mostramos los resultados y conclusiones obtenidas para cada una de las topologías.

8.1.2.1 TOPOLOGÍA 1: 1 OPERADOR CON 30 FEMTOCELDAS

En este tipo de topología, en la que existe una red de femtoceldas constituida por un único operador, no tiene mucho sentido aplicar las negociaciones de tipo 2, 3, 4 y 5. Se debe a que éstas están diseñadas para funcionar sobre escenarios multioperador. Por ello no se han incluido en los resultados.

Si se observan los valores de SINR y *throughput* medios obtenidos (ver tablas 8.2 y 8.3), se concluye que, a medida que aumenta el número de canales disponibles la calidad de servicio media recibida en los apartamentos aumenta.

Por otro lado se observa que, a medida que aumenta el número de canales disponibles, la diferencia entre los valores medios de 5 y 95 percentil obtenidos disminuye. Ésto implica que a mayor número de canales disponibles la calidad de servicio prestado a todos los usuarios es más similar.

Por tanto los resultados obtenidos muestran que, como es lógico, un aumento en el número de canales disponibles reducirá la interferencia entre usuarios y mejorará su calidad de servicio, al existir menos usuarios compartiendo el mismo canal en el escenario. Además, gracias al tipo de negociación aplicado, se consigue que los usuarios que comparten el mismo canal se encuentre lo más alejados posible entre sí, reduciéndose al máximo la interferencia producida entre ellos.

En las figuras 8.14 y 8.15 se muestran, respectivamente, la CDF de la SINR y la CDF del *throughput*, para una de las 50 simulaciones realizadas. A la vista de los resultados obtenidos se comprueba el mismo comportamiento que el concluido a partir de los valores medios.

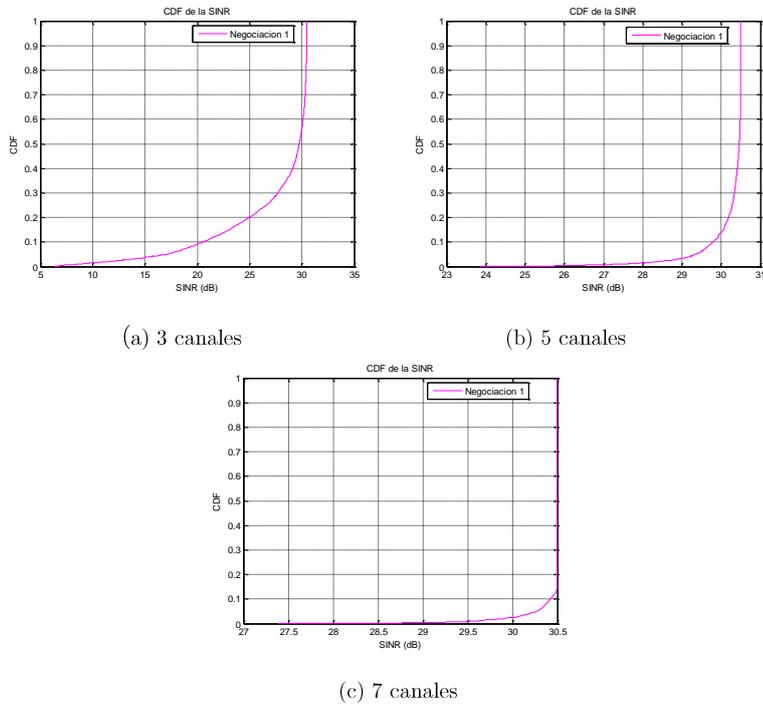


Figura 8.14: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

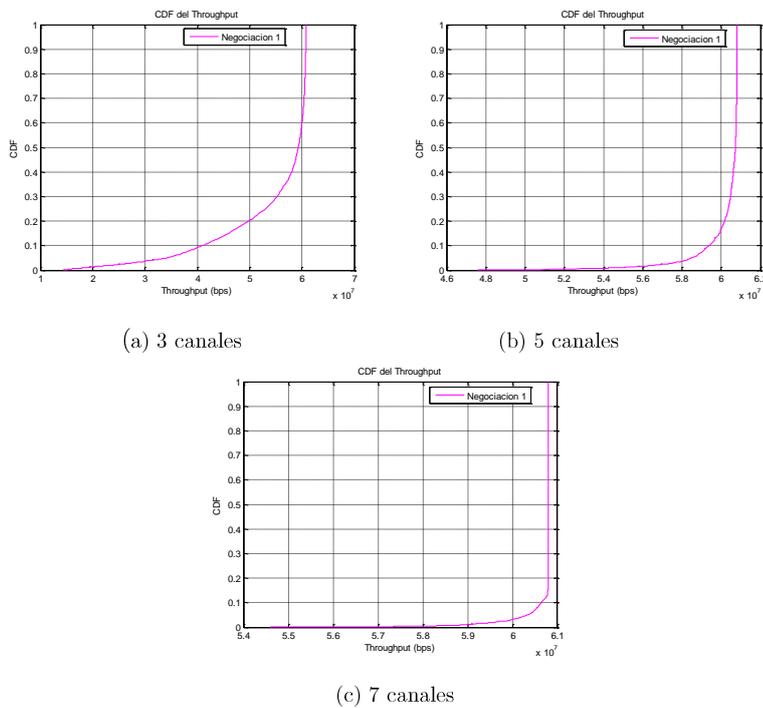


Figura 8.15: CDF del *Throughput* para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

8.1.2.2 TOPOLOGÍA 2: 3 OPERADORES CON 10 FEMTOCELDAS CADA UNO

En este tipo de topología, en la que existe una red de femtoceldas constituida por tres operadores diferentes, se van a mostrar los resultados obtenidos para cada uno de los mecanismos de negociación desarrollados.

Si se observan los resultados relacionados con el SINR y *throughput* obtenidos (ver tablas 8.2 y 8.3), se tiene que, en general, son mucho peores para casos en los que se apliquen negociaciones de tipo 2 y 4. Por ello, sólo se van a analizar en detalle los resultados obtenidos con las negociaciones de tipo 1, 3 y 5.

Si se observan los resultados de SINR medio y el *throughput* medio obtenidos, se tiene que éstos son muy próximos en las negociaciones de tipo 1, 3 y 5. De modo que la calidad de servicio media recibida en los apartamentos, al aplicar estos tipos de negociación, será muy similar. Esto es llamativo puesto que en la negociación de tipo 3 los operadores no comparten toda su información con el resto de operadores, mientras que en las negociaciones de tipo 1 y 5, de una u otra forma sí lo hacen.

A la vista de los resultados de 5 percentil y 95 percentil de la SINR y *throughput* obtenidos, se observa que a pesar de que el nivel medio obtenido sea muy similar para las negociaciones de tipo 1, 3 y 5, la diferencia entre el 5 percentil y 95 percentil, es mayor para la negociación de tipo 3 que para las negociaciones de tipo 1 y 5. Esta diferencia aumenta a medida que el número de canales disponibles también lo hace. Se obtienen valores muy próximos para casos en los que existen 3 canales disponibles y aumentando la diferencia hasta el 29% para casos en los que existen 7 canales disponibles. Esto implica que en las negociaciones de tipo 1 y 5 la calidad de servicio prestada a todos los usuarios del escenario es muy similar. No obstante, los resultados obtenidos con la negociación de tipo 3 son buenos, puesto que el peor de los casos (3 canales disponibles) tan sólo el 5% de los usuarios dispondrán de un *throughput* inferior a 41,44 Mbps y un SINR inferior a 20,75dB. Estos valores se corresponden con los obtenidos en las zonas más cercanas a las paredes externas de los apartamentos.

En las figuras 8.16 y 8.17 se muestran, respectivamente, la CDF de la SINR y la CDF del *throughput* asociado a cada femtocelda, para una de las 50 simulaciones realizadas. Si se analizan detalladamente estas gráficas, se comprueba el mismo comportamiento que el concluido a partir de los valores medios.

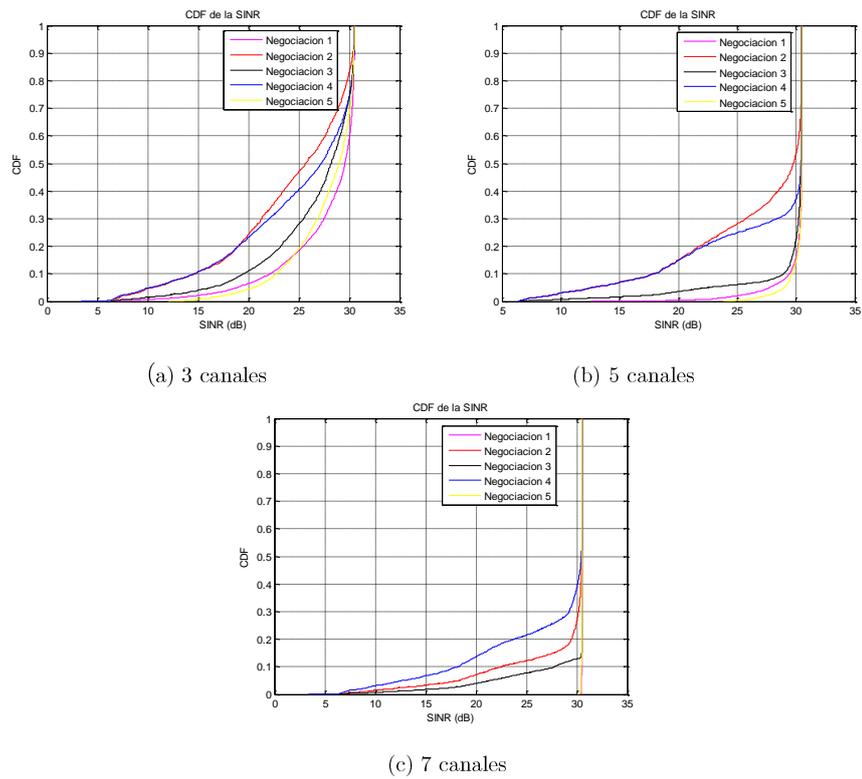


Figura 8.16: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

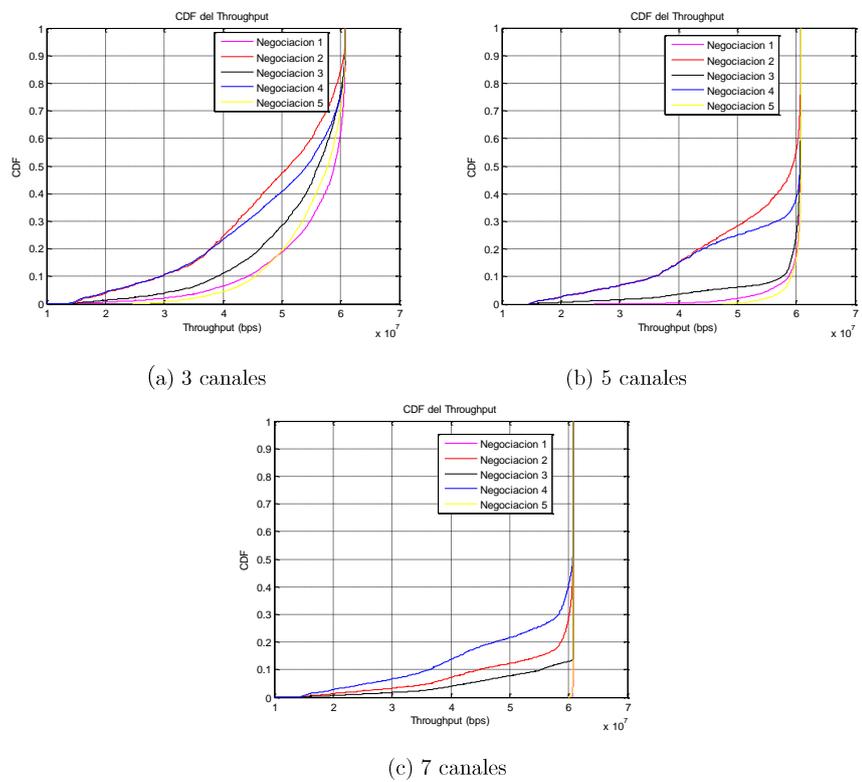


Figura 8.17: CDF del *Throughput* para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

8.1.2.3 TOPOLOGÍA 3: 5 OPERADORES CON 6 FEMTOCELDAS CADA UNO

En este tipo de topología, en la que existe una red de femtoceldas constituida por cinco operadores diferentes, se van a mostrar los resultados obtenidos para cada uno de los mecanismos de negociación desarrollados.

Si se observan los resultados relacionados con la SINR y *throughput* (ver tablas 8.2, y 8.3), se tiene que, en general, son mucho peores para casos en los que se apliquen negociaciones de tipo 2 y 4. Por ello, sólo se van a analizar en detalle los resultados obtenidos con las negociaciones de tipo 1, 3 y 5.

Si se observan los resultados de la SINR media y el *throughput* medio obtenidos, de nuevo se consiguen valores muy próximos entre sí al aplicar las negociaciones de tipo 1, 3 y 5. De modo que la calidad de servicio media recibida en los apartamentos, al aplicar estos tipos de negociación, será muy similar.

En vista de los resultados de 5 percentil y 95 percentil de la SINR y *throughput* obtenidos, vuelve a ocurrir que la diferencia entre el 5 percentil y 95 percentil, es mayor para la negociación de tipo 3 que para las negociaciones de tipo 3 y 5. Se obtienen valores muy próximos para casos en los que existen 3 canales disponibles y aumentando la diferencia hasta el 35% para casos en el que existen 7 canales disponibles. Este efecto es mayor que para la topología en la que existen 3 operadores. Esto implica que en las negociaciones de tipo 1 y 5, la calidad de servicio prestada a todos los usuarios del escenario es más similar. No obstante, los resultados obtenidos con la negociación de tipo 3 son buenos, puesto que el peor de los casos (3 canales disponibles) tan sólo el 5% de los usuarios dispondrán de un *throughput* inferior a 43,32 Mbps y una SINR inferior a 21,65. Estos valores se corresponden con los obtenidos en las zonas más cercanas a las paredes externas de los apartamentos.

En las figuras 8.18 y 8.19 se muestran, respectivamente, la CDF de la SINR y la CDF del *throughput*, para una de las 50 simulaciones realizadas. Si se analizan detalladamente estas gráficas se observa el mismo comportamiento que el concluido a partir de los valores medios.

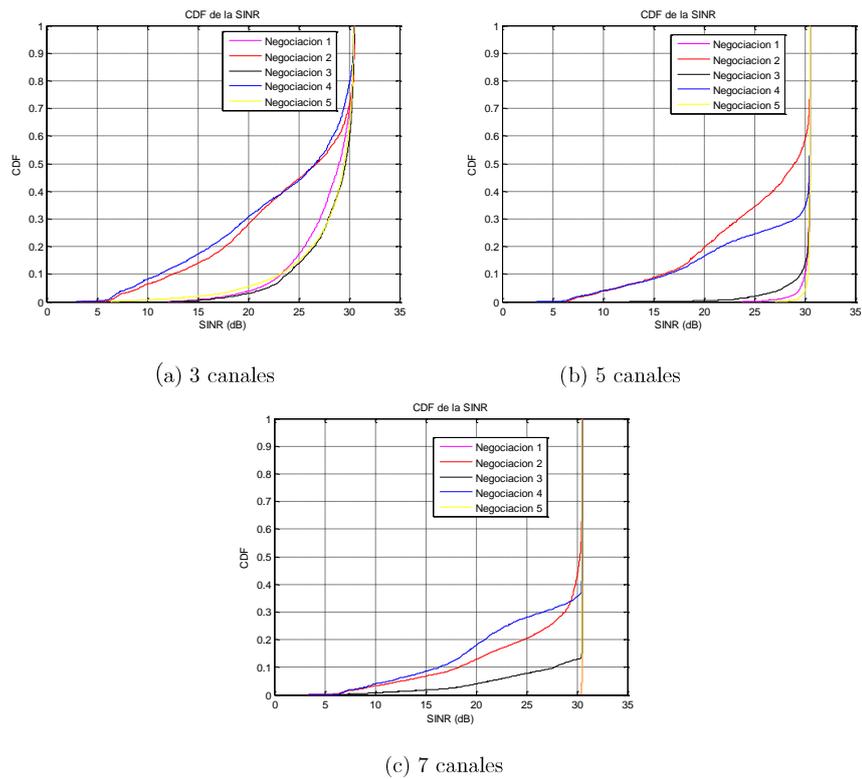


Figura 8.18: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

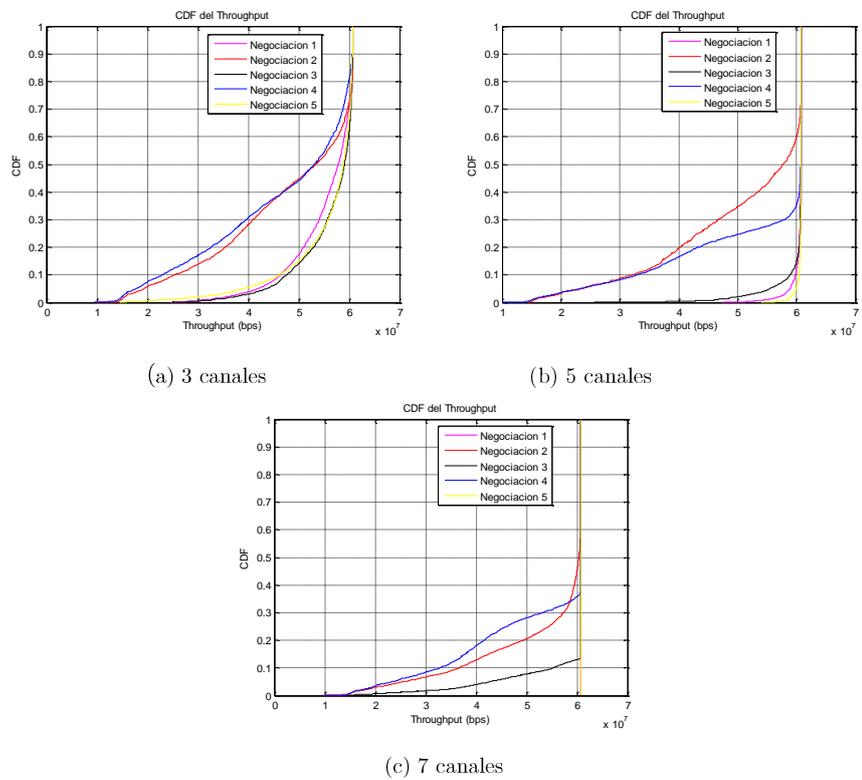


Figura 8.19: CDF del *Throughput* para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

TIPO DE NEGOCIACIÓN:	SINR MEDIA (dB)					5-PERCETIL DE LA SINR (dB)					95-PERCENTIL LA SINR (dB)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 3 CANALES	28.02	-	-	-	-	20.94	-	-	-	-	30.49	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 5 CANALES	30.32	-	-	-	-	29.56	-	-	-	-	30.50	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 7 CANALES	30.49	-	-	-	-	30.46	-	-	-	-	30.50	-	-	-	-
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 3 CANALES	27.98	23.53	27.88	25.24	27.95	20.48	9.82	20.26	11.62	20.73	30.49	30.48	30.49	30.49	30.49
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 5 CANALES	30.33	26.34	29.84	27.47	30.33	29.62	13.08	25.82	14.70	29.63	30.50	30.50	30.49	30.50	30.50
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 7 CANALES	30.49	27.41	30.03	28.34	30.49	30.46	15.65	26.65	17.97	30.45	30.50	30.50	30.50	30.50	30.50
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 3 CANALES	28.04	23.02	28.11	24.77	27.99	21.00	9.21	21.08	10.66	20.78	30.49	30.48	30.48	30.49	30.49
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 5 CANALES	30.31	25.70	30.09	27.33	30.31	29.48	11.96	27.57	14.78	29.53	30.50	30.49	30.49	30.50	30.50
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 7 CANALES	30.49	26.82	30.03	28.00	30.49	30.46	13.88	26.77	16.28	30.46	30.50	30.50	30.50	30.50	30.50

Tabla 8.2: Resultados obtenidos de SINR en las simulaciones para el escenario 1.

TIPO DE NEGOCIACIÓN:	THROUGHPUT MEDIO (Mbps)					5-PERCETIL DEL THROUGHPUT (Mbps)					95-PERCENTIL DEL THROUGHPUT (Mbps)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 3 CANALES	55.87	-	-	-	-	41.82	-	-	-	-	60.78	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 5 CANALES	60.45	-	-	-	-	58.93	-	-	-	-	60.79	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 7 CANALES	60.78	-	-	-	-	60.72	-	-	-	-	60.79	-	-	-	-
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 3 CANALES	55.79	47.05	55.60	50.43	55.73	40.92	20.47	40.47	23.82	41.38	60.78	60.77	60.78	60.79	60.78
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 5 CANALES	60.46	52.59	59.50	54.83	60.46	59.05	26.58	51.51	29.68	59.07	60.79	60.79	60.79	60.79	60.79
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 7 CANALES	60.78	54.71	59.87	56.54	60.77	60.72	31.54	53.16	36.07	60.70	60.79	60.79	60.79	60.79	60.79
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 3 CANALES	55.92	46.06	56.06	49.50	55.82	41.93	19.35	42.09	22.00	41.51	60.78	60.76	60.77	60.78	60.78
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 5 CANALES	60.42	51.34	59.99	54.55	60.43	58.71	24.45	54.99	29.82	58.87	60.79	60.79	60.79	60.79	60.79
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 7 CANALES	60.78	53.54	59.88	55.87	60.78	60.73	28.11	53.40	32.73	60.73	60.79	60.79	60.79	60.79	60.79

Tabla 8.3: Resultados obtenidos de *throughput* en las simulaciones para el escenario 1

8.2 ESCENARIO 2: MODELO EN GRID

Para este tipo de escenario se va a realizar el mismo tipo de análisis que el descrito para el escenario *Dual Stripe*, mostrado en el apartado 8.1. En primer lugar, se van a mostrar todos los parámetros devueltos por el simulador, que tengan relación con el escenario y, en segundo lugar se realizará un análisis formal de los valores de SINR y *throughput* obtenidos para cada uno de los tipos de negociación implementados.

8.2.1. ANÁLISIS DEL SISTEMA COMPLETO

En esta sección mostramos un ejemplo, en el que se representa el estado del escenario desde que se crea, hasta que se realiza el reparto de canales con cada uno de los mecanismos de negociación diseñados.

Para ello, se ha creado un escenario cuadrado de 70m x 70m, sobre el que se han definido zonas de 10m x 10m en las que se puede colocar una única femtocelda.

Una vez creado el escenario, el siguiente paso ha sido el de concebir la red de femtoceldas multioperador e insertarla en el escenario. Para este ejemplo, se ha creado una red compuesta por 3 operadores que cuentan con 4 femtoceldas cada uno de ellos. Se ha especificado que las femtoceldas se instalen en una posición cualquiera de los espacios habilitados para ello, respetando que sólo puede haber una femtocelda por región. El estado del escenario tras la inserción de la red de femtoceldas se muestra en la figura 8.20.

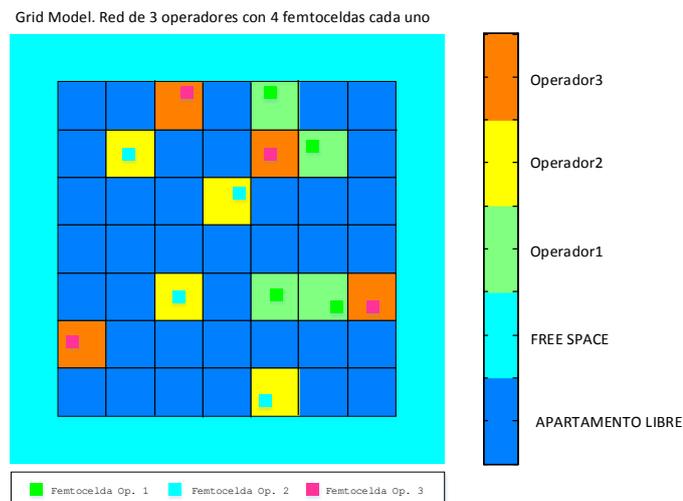


Figura 8.20: Red de femtoceldas creada sobre el escenario.

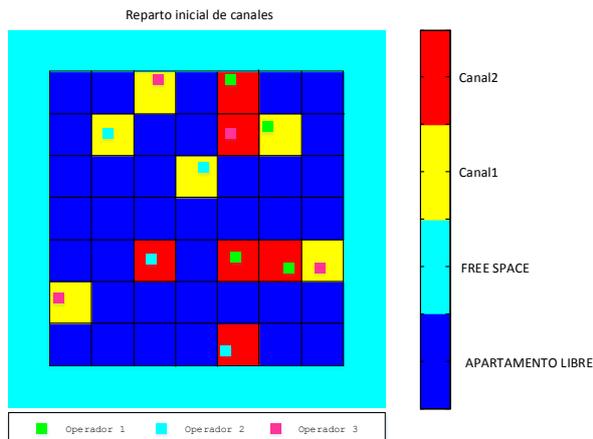


Figura 8.21: Reparto inicial de canales.

El siguiente paso es asignar el canal inicial asociado a cada femtocelda. La asignación se realiza de manera aleatoria de acuerdo una distribución uniforme dependiente del número de canales disponibles. Para este ejemplo se ha establecido que el número de canales disponibles es 2. El estado del escenario tras realizar la asignación inicial de canales, se puede ver en la figura 8.21. En vista de esta figura, se observa que en la situación inicial, la red constituida presenta problemas de interferencias, al existir femtoceldas situadas en posiciones muy cercanas que comparten el mismo canal.

Tras esto, la siguiente tarea es crear el modelo de propagación asociado a cada una de las femtoceldas existentes en el escenario. Para este caso, se ha utilizado el modelo de propagación en interiores para TVWS descrito en el capítulo 6. Como ya se comentó, este modelo propone la siguiente ecuación para la estimación de la potencia recibida:

$$P_r = 10\log_{10}P_t + 10\log_{10}G_t + 10\log_{10}G_r + 20\log_{10}h_t + 20\log_{10}h_r - 43.36\log_{10}d - \bar{A} - 2\bar{B} - \bar{C}$$

En esta ecuación se tiene en cuenta la distancia d a la que nos encontremos de la femtocelda, la ganancia de la antena transmisora G_t y receptora G_r , la altura de las antenas transmisora h_t y receptora h_r y tres factores de atenuación (\bar{A} , \bar{B} y \bar{C}), que tomarán un valor u otro en función de si el escenario a simular es una zona comercial o una zona de viviendas unifamiliares, situadas en zonas urbanas o suburbanas.

Para este ejemplo se ha fijado la potencia transmitida $P_{transmitida}$ a 40mW y la potencia del ruido a 11pW (-100dBm). El escenario simulado se corresponde con una zona

comercial situada en una zona urbana, por lo que los factores de atenuación aplicados han sido: $\bar{A} = 25dB$, $\bar{B} = 17.7dB$ y $\bar{C} = 9.6dB$. Se ha asignado ganancia unidad, tanto para la antena receptora como transmisora, una altura de 3 metros para la antena transmisora y de 1.2 metros para la antena receptora. Se han elegido estos valores puesto que un usuario de estatura media puede llevar el móvil aproximadamente a una altura de entre 1 y 1.4 metros sobre el suelo, y que los centros comerciales no suelen tener más de 3.5 metros de altura por planta.

Para tener en cuenta las imperfecciones en la implementación de las componentes de RF y evitar un valor alto y no realista de SINR, se ha aplicado un EVM del 3%, que impone un límite suave en el valor de SINR obtenido.

En la figura 8.22 se muestra la evolución de la distancia recorrida a lo largo del escenario. En la figura 8.23 se muestra la evolución del PL a lo largo del escenario. Éste se ha calculado como el cociente de la potencia transmitida y la potencia recibida. En la figura 8.24 se representa la evolución de la SINR tras aplicar el modelo EVM. Todo ello se ha realizado para dos de las femtoceldas existentes en el escenario.

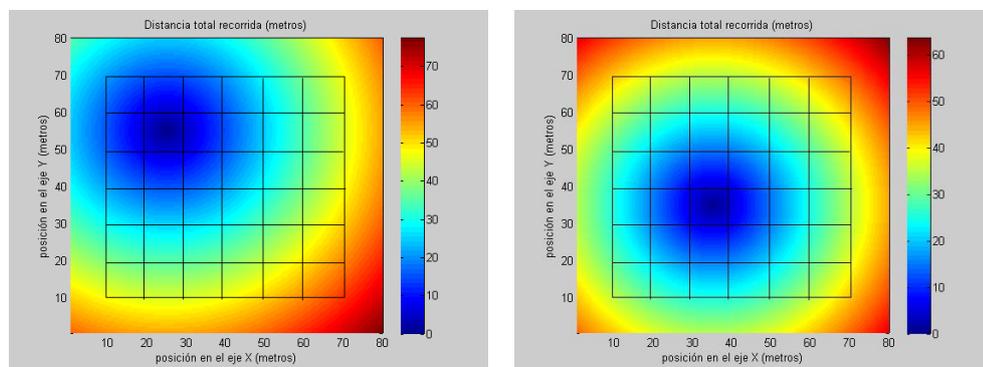


Figura 8.22: Distancia recorrida desde la femtocelda.

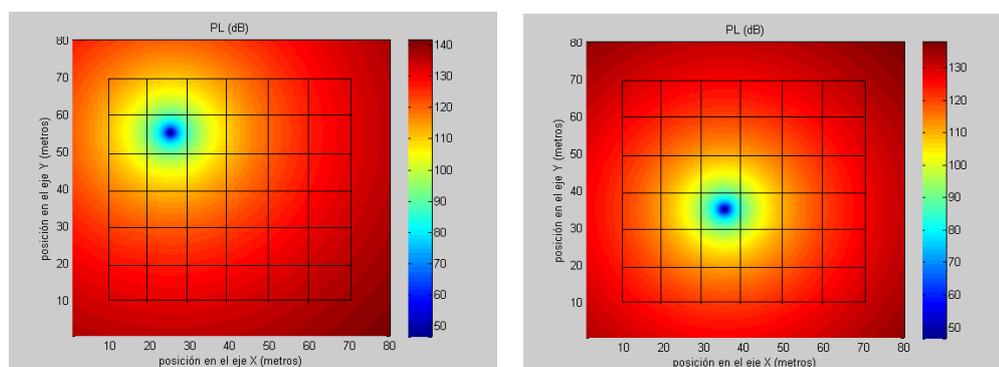


Figura 8.23: PL en todo punto del escenario desde la femtocelda.

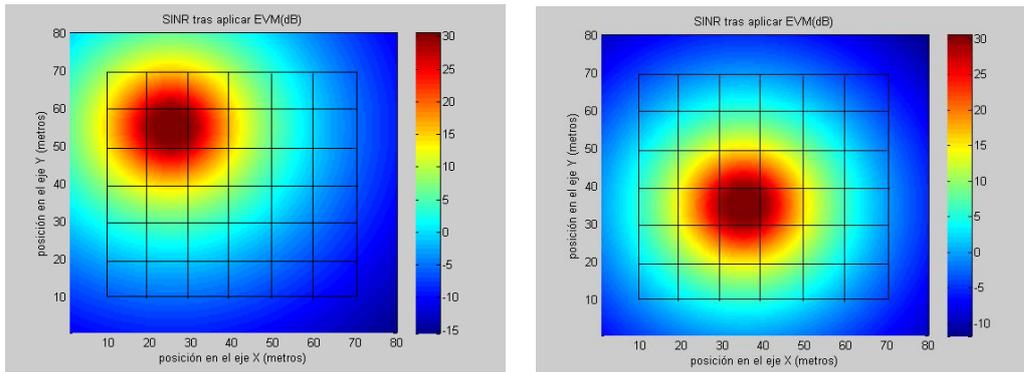


Figura 8.24: SINR tras aplicar EVM en todo punto del escenario desde la femtocelda.

Finalmente se va mostrar el resultado obtenido tras aplicar cada uno de los tipos de negociación diseñados sobre el escenario creado. En las figuras 8.25, 8.26, 8.27, 8.28 y 8.29 se representa respectivamente, el reparto de canales obtenido tras la negociación de tipo 1, 2, 3, 4 y 5. En todas ellas se muestra la asignación de canales obtenida, antes y después de realizar la negociación. Para las negociaciones de tipo 3, 4 y 5, se ha elegido un radio para el área de aplicación de éstas de 20 metros.

Si se analiza en detalle los resultados obtenidos, tras aplicar cada una de las negociaciones se extraen las conclusiones que se detallan en los siguientes párrafos.

Con las negociaciones de tipo 1 y 5 se han resuelto todas las situaciones en las que existe conflicto, por existir dos o más femtoceldas situadas de forma próxima compartiendo el mismo canal.

Con la negociación de tipo 2, se alcanza una situación ideal si sólo se consideran las femtoceldas de cada operador de forma independiente. Sin embargo, al evaluar el sistema completo, el resultado no es tan favorable. Esto se debe a que, en este tipo de negociación los operadores actúan de forma egoísta sin compartir la información de sus femtoceldas con el resto.

Con las negociaciones de tipo 3 y 4, también se consiguen resolver las situaciones de conflicto existentes a la salida de la negociación de tipo 2. No obstante, si se comparan con los resultados obtenidos a la salida de las negociaciones de tipo 1 y 5, se observa que existen más casos en las que dos femtoceldas situadas de forma consecutiva en la diagonal comparten el mismo canal. Ésto implicará que el nivel de interferencia media percibido por los usuarios del escenario será mayor.

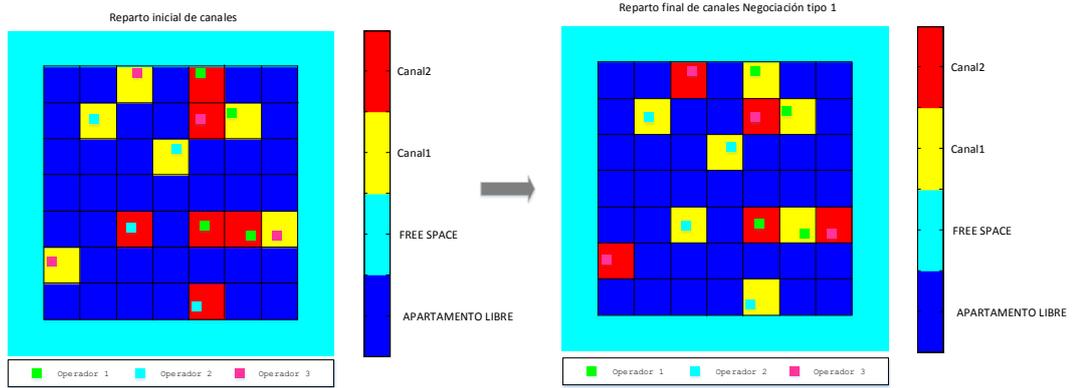


Figura 8.25: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 1.

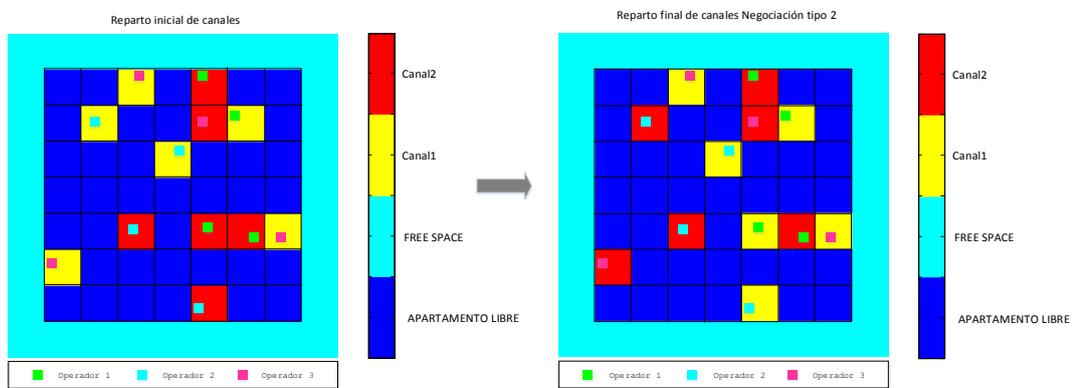


Figura 8.26: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 2.

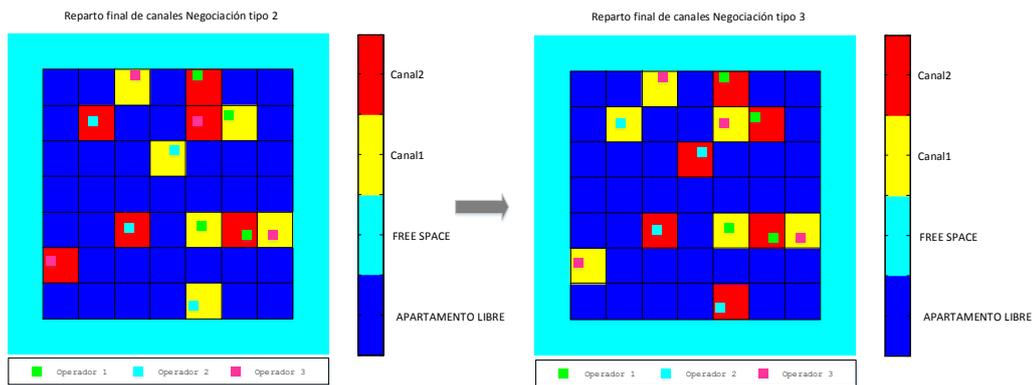


Figura 8.27: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 3.

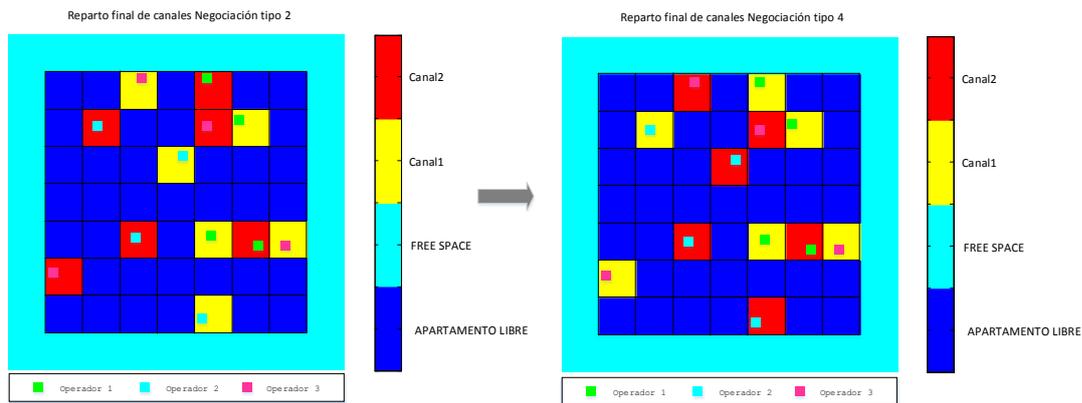


Figura 8.28: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 4.

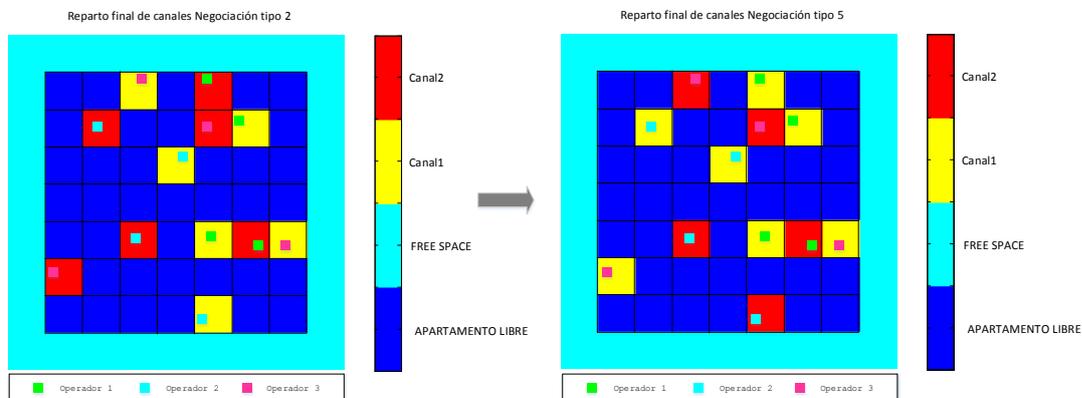


Figura 8.29: Asignación de canales antes y después de la negociación de tipo 5.

8.2.2. ANÁLISIS DE SINR, THROUGHPUT, 5 PERCENTIL Y 95 PERCENTIL DE CADA NEGOCIACIÓN

Para este apartado se van a simular las mismas topologías que en el apartado 8.1.2, pero aplicadas sobre el escenario con arquitectura en *grid*:

- Topología 1: Red constituida por 1 operador con 30 femtoceldas.
- Topología 2: Red constituida por 3 operadores con 10 femtoceldas cada uno.
- Topología 3: Red constituida por 5 operadores con 6 femtoceldas cada uno.

De nuevo se simularán casos en los que existan 3, 5 o 7 canales disponibles.

Igualmente se ha realizado una campaña de medidas consistente en llevar a cabo 50 simulaciones completas desde que se crea un escenario hasta que concluye el reparto de canales con cada una de las negociaciones propuestas, utilizando una semilla distinta en cada una de las simulaciones.

Para éstas se ha calculado la SINR y *throughput* y se ha evaluado su valor promedio. Sobre éstos también se ha calculado el 5 percentil medio y 95 percentil medio. El cálculo del valor promedio se ha realizado obteniendo el valor medio de cada simulación y promediando los valores obtenidos (diferentes semillas del mismo caso). El cálculo del 5 percentil medio y 95 percentil medio se ha realizado obteniendo el 5 percentil y 95 percentil de cada simulación, y luego realizando la media de los valores obtenidos. Todos los valores conseguidos se muestran en las tablas 8.4 y 8.5.

Asimismo se incluye la representación de la CDF de la SINR y del *throughput*, todo ello para una misma simulación.

A continuación se muestran los resultados y conclusiones para cada una de las topologías.

8.2.2.1 TOPOLOGÍA 1: 1 OPERADOR CON 30 FEMTOCELDAS

Para esta topología no se han mostrado los resultados obtenidos con las negociaciones de tipo 2, 3, 4 y 5, puesto que éstas están diseñadas para funcionar sobre escenarios multioperador.

A continuación se analizarán en detalle los resultados obtenidos para esta topología de escenario, en relación con el SINR y *throughput*, los cuales son mostrados en las tablas 8.5 y 8.5.

Si se observan los valores de SINR media y *throughput* medio obtenidos, se tiene que, a medida que aumenta el número de canales disponibles, la calidad de servicio media recibida en los apartamentos, se incrementa.

Por otro lado, se percibe que la diferencia entre los valores de 95 percentil y 5 percentil obtenida es grande para todos los casos simulados de esta topología. Ésto implica que los usuarios que se encuentren en la zona cercana a la femtocelda tendrán muy buena calidad de servicio, que se degradará con rapidez a medida que el usuario se aleje de ese punto.

En las figuras 8.30 y 8.31 se muestran, respectivamente, la CDF de la SINR y la CDF del *throughput*, para una de las 50 simulaciones realizadas. En vista de los resultados obtenidos se observa el mismo comportamiento que el concluido a partir de los valores medios.

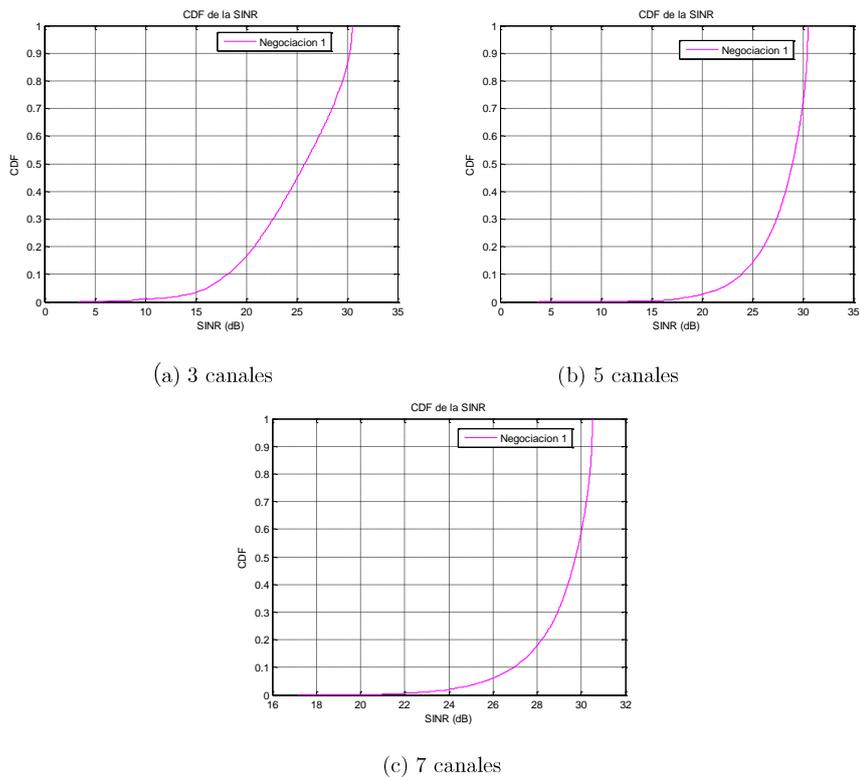


Figura 8.30: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

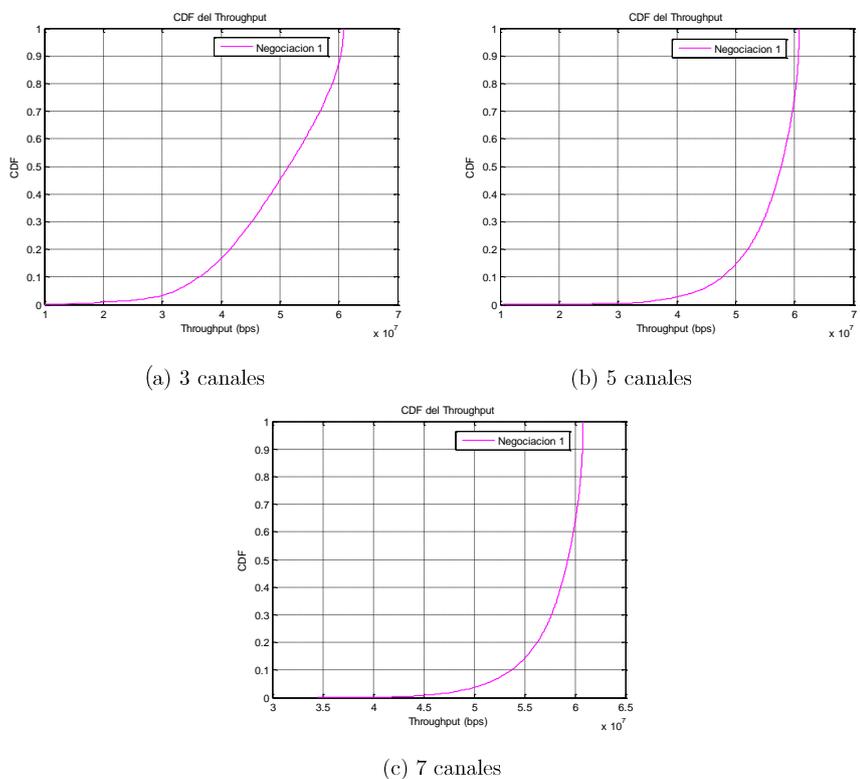


Figura 8.31: CDF del Throughput para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

8.1.2.2 TOPOLOGÍA 2: 3 OPERADORES CON 10 FEMTOCELDAS CADA UNO

En este apartado se van a mostrar los resultados y conclusiones obtenidos para cada uno de los mecanismos de negociación desarrollados.

A continuación se analizarán en detalle los resultados obtenidos para esta topología de escenario, en relación con la SINR y *throughput*, los cuales son mostrados en las tablas 8.4 y 8.5.

Si se observan los resultados de SINR y *throughput* conseguidos se tiene que, en general, son mucho peores para casos en los que se han aplicado las negociaciones de tipo 2 y 4. Por ello, sólo se van a analizar en detalle los resultados obtenidos con las negociaciones de tipo 1, 3 y 5.

En vista de los resultados de SINR y *throughput* mostrados, se tiene que estos son muy próximos en las negociaciones de tipo 1, 3 y 5, de modo que la calidad de servicio media recibida en los apartamentos al aplicar estos tipos de negociación será muy similar. Para este caso, además, se aprecia que la diferencia entre el 95 percentil y el 5 percentil es muy próxima para estos 3 tipos de negociación, de manera que la calidad de servicio percibida por los usuarios es muy similar al aplicar estos 3 tipos de negociación. Es muy favorable debido a que con una negociación en la que los operadores no comparten toda su información entre sí, se obtienen resultados muy parecidos a los obtenidos en tipos de negociaciones en los que de una forma u otra sí lo hacen.

En las figuras 8.32 y 8.33 se muestran, respectivamente, la CDF de la SINR y la CDF del *throughput*, para una de las 50 simulaciones realizadas. Si se analizan detalladamente estas gráficas se observa el mismo comportamiento que el concluido a partir de los valores medios.

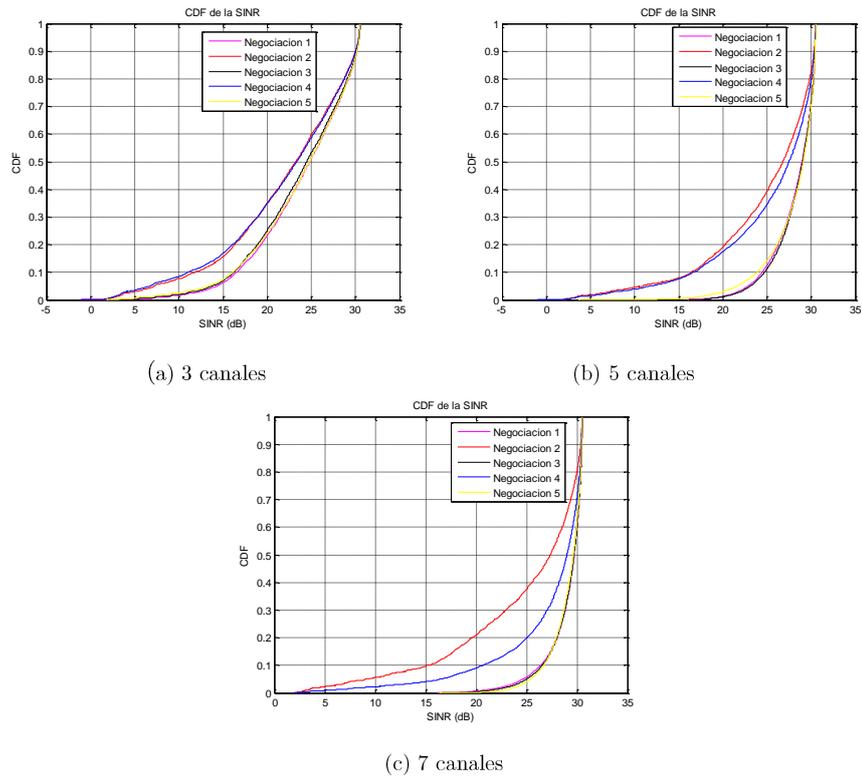


Figura 8.32: CDF de la SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

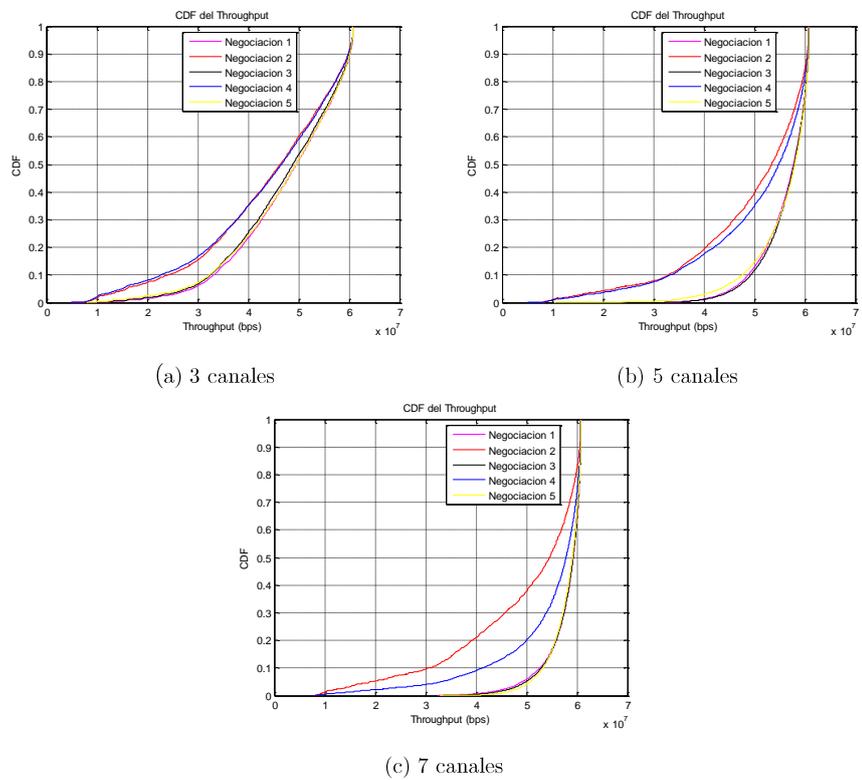


Figura 8.33: CDF del *throughput* para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

8.1.2.3 TOPOLOGÍA 3: 5 OPERADORES CON 6 FEMTOCELDAS CADA UNO

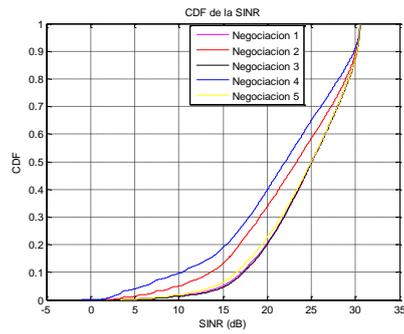
En este apartado se van a mostrar los resultados y conclusiones obtenidos para cada uno de los mecanismos de negociación desarrollados.

A continuación se analizarán en detalle los resultados obtenidos para esta topología de escenario, en relación con el SINR y *throughput*, los cuales son mostrados en las tablas 8.4 y 8.5.

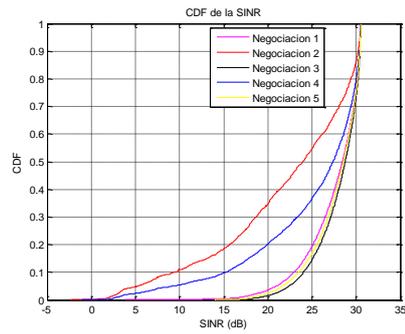
Si se observan los resultados de SINR y *throughput* conseguidos se tiene que, en general, son mucho peores para casos en los que se han aplicado las negociaciones de tipo 2 y 4. Por ello, sólo se van a analizar en detalle los resultados obtenidos con las negociaciones de tipo 1, 3 y 5.

En vista de los resultados de SINR, *throughput* mostrados, se tiene que éstos son muy próximos en las negociaciones de tipo 1, 3 y 5. Además, no sólo los valores medios son muy parecidos, sino que también lo es la diferencia entre el 95 percentil y el 5 percentil obtenidos. Esto da como resultado que los usuarios experimenten la misma calidad de servicio, independientemente del tipo de negociación que se utilice para realizar el reparto de canales sobre las femtoceldas del escenario.

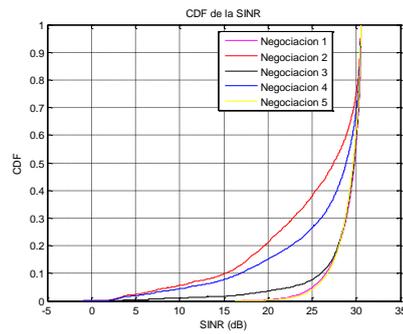
En las figuras 8.34 y 8.35 se muestran, respectivamente, la CDF de la SINR y la CDF del *throughput*, para una de las 50 simulaciones realizadas. Si se analizan detalladamente estas gráficas se observa el mismo comportamiento que el concluido a partir de los valores medios.



(a) 3 canales

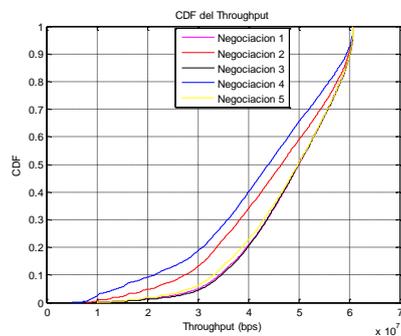


(b) 5 canales

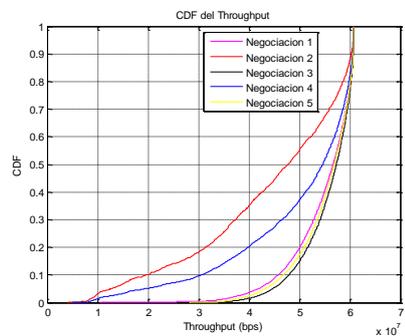


(c) 7 canales

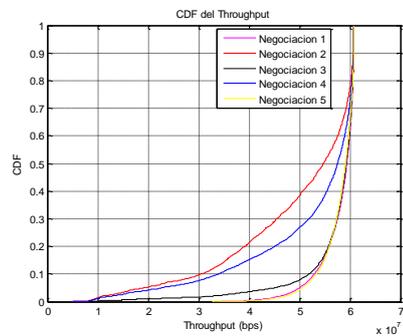
Figura 8.34: CDF del SINR para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.



(a) 3 canales



(b) 5 canales



(c) 7 canales

Figura 8.35: CDF del Throughput para la topología 1, en función del número de canales disponibles en el escenario.

TIPO DE NEGOCIACIÓN:	SINR MEDIA (dB)					5-PERCETIL DE LA SINR (dB)					95-PERCENTIL LA SINR (dB)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 3 CANALES	24.25	-	-	-	-	14.46	-	-	-	-	30.43	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 5 CANALES	27.75	-	-	-	-	21.79	-	-	-	-	30.48	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 7 CANALES	29.11	-	-	-	-	25.48	-	-	-	-	30.49	-	-	-	-
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 3 CANALES	24.47	21.79	24.36	22.81	24.37	14.94	6.87	14.74	9.18	14.77	30.43	30.38	30.43	30.41	30.43
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 5 CANALES	27.69	24.34	27.63	25.60	27.66	21.60	10.34	21.53	13.21	21.61	30.48	30.46	30.48	30.47	30.48
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 7 CANALES	29.10	25.60	28.88	27.11	29.07	25.48	12.29	24.38	16.04	25.41	30.49	30.48	30.49	30.49	30.49
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 3 CANALES	24.30	21.11	24.45	22.32	24.35	14.58	6.01	15.14	7.81	14.76	30.43	30.36	30.43	30.40	30.43
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 5 CANALES	27.78	23.81	27.65	25.24	27.78	21.84	8.89	21.32	11.86	21.89	30.48	30.46	30.48	30.47	30.48
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 7 CANALES	29.08	25.16	28.93	26.29	29.10	25.41	11.15	24.68	13.55	25.56	30.49	30.48	30.49	30.49	30.49

Tabla 8.4: Resultados obtenidos de SINR en las simulaciones para el escenario 2

TIPO DE NEGOCIACIÓN:	THROUGHPUT MEDIO (Mbps)					5-PERCETIL DEL THROUGHPUT (Mbps)					95-PERCENTIL DEL THROUGHPUT (Mbps)				
	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 3 CANALES	48.43	-	-	-	-	29.14	-	-	-	-	60.66	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 5 CANALES	55.34	-	-	-	-	43.49	-	-	-	-	60.76	-	-	-	-
1 OPERADOR 30 FEMTOCELDAS 7 CANALES	58.04	-	-	-	-	50.82	-	-	-	-	60.78	-	-	-	-
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 3 CANALES	48.86	43.71	48.64	45.68	48.67	30.07	15.36	29.69	19.39	29.74	60.67	60.57	60.66	60.62	60.66
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 5 CANALES	55.21	48.69	55.11	51.16	55.16	43.13	21.51	42.98	26.84	43.14	60.76	60.72	60.76	60.75	60.76
3 OPERADORES 10 FEMTOCELDAS 7 CANALES	58.02	51.15	57.58	54.12	57.95	50.81	25.09	48.63	32.28	50.69	60.78	60.76	60.78	60.78	60.78
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 3 CANALES	48.53	42.41	48.83	44.74	48.62	29.39	14.01	30.45	16.98	29.73	60.66	60.52	60.66	60.60	60.66
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 5 CANALES	55.39	47.66	55.14	50.45	55.40	43.60	18.88	42.57	24.35	43.69	60.76	60.72	60.76	60.75	60.76
5 OPERADORES 6 FEMTOCELDAS 7 CANALES	57.98	50.30	57.68	52.52	58.02	50.67	23.02	49.24	27.51	50.98	60.78	60.76	60.78	60.77	60.78

Tabla 8.5: Resultados obtenidos de *throughput* en las simulaciones para el escenario 2.

CAPÍTULO 9

CONCLUSIONES

En este proyecto se ha diseñado e implementado un simulador que aporta una solución completa a la problemática del reparto de canales en entornos multioperador operando sobre los TVWS. Las contribuciones más destacables son las siguientes:

- Se han analizado los mecanismos más relevantes para el diseño de esquemas de reparto del espectro para casos en que los operadores estén transmitiendo en bandas sin licencia. Este estudio se ha centrado en el análisis de negociaciones de tipo *1-seller-2-buyer* y *1-buyer-multiple-seller*, que sirven de referencia, por ser las más completas hasta el momento.
- Se ha realizado un simulador reutilizable y extensible, que permite integrar nuevos escenarios y modelos de propagación con gran facilidad. Esto es posible gracias a que las funciones que lo componen se han realizado de forma modular.
- Se proporciona soporte para las situaciones más comunes. Para ello, se incluyen diferentes escenarios con los que poder evaluar el rendimiento de los esquemas de reparto y negociación de canales diseñados. Sobre estos escenarios se pueden emular redes de femtoceldas operando sobre los TVWS desplegadas en zonas de oficinas, centros comerciales o en edificios de apartamentos.
- La herramienta consta de una función principal, desde la que se puede gestionar el funcionamiento del sistema completo.
- Se ha diseñado un tipo de negociación cooperativa en las que los operadores no tienen que compartir toda su información, que obtiene resultados muy similares al caso en el que sí lo hicieran. La importancia de ésto radica en que si se quisiera implementar este tipo de sistemas en un entorno real, los operadores podrían apostar por soluciones en las que tuvieran que desvelar el

mínimo de información al resto de operadores, sin degradar la calidad de servicio ofrecida a sus clientes.

En definitiva, el simulador confeccionado ofrece una herramienta útil con la que llevar a cabo la asignación de canales cuando varios operadores tienen que negociar las frecuencias asignadas a sus femtoceldas.

Como líneas de trabajo futuras se han identificado los siguientes aspectos:

- Adaptación del juego y de las negociaciones implementadas para que una misma femtocelda pueda operar utilizando varios canales.
- Considerar escenarios *Dual Stripe* constituidos por varias plantas (3D).
- Diseño e implementación de funciones de utilidad para que el juego que permitan incorporar nuevos criterios como, por ejemplo, la idea de justicia entre femtoceldas.
- Diseño y análisis de mecanismos de negociación más complejos que los expuestos en el proyecto.

ANEXO I

GUÍA DE UTILIZACIÓN DEL SIMULADOR

En este anexo se describe de manera resumida el funcionamiento del simulador desarrollado en Matlab para la gestión y asignación de canales en entornos multioperador operando sobre los TVWS.

El entorno de simulación implementado es sencillo y presenta gran flexibilidad al haberse desarrollado de acuerdo a una estructura de funciones, cada una para un objetivo particular.

De cara al usuario, el simulador se presenta en forma de carpeta de archivos (ver figura 7.4). Dentro de esta carpeta se encuentran dos carpetas que contienen las funciones desarrolladas para cada escenario, una carpeta que incluye las funciones comunes a los dos escenarios y tres archivos con extensión ‘.m’. Dos de estos archivos se corresponden con los ficheros de configuración de cada escenario y el tercero se refiere al fichero base de control de la simulación. Desde este último se podrán controlar y efectuar las simulaciones deseadas. Gracias a esta estructura, el usuario tendrá a su alcance un sistema sencillo al no necesitar controlar todas las funciones implementadas para realizar con éxito una simulación.

PARÁMETROS DE ENTRADA

Todos los parámetros que se requieren para realizar simulaciones se incluyen en dos ficheros .m, uno para cada tipo de escenario confeccionado (modelo *Dual Stripe* y modelo en *Grid*) llamados “FICHERO CONFIGURACIÓN ESCENARIO 1” y “FICHERO CONFIGURACIÓN ESCENARIO 2”. En la figura 7.5 se muestra la estructura de cada uno de estos archivos de configuración, junto con el valor que puede tomar cada una de las variables que lo componen.

PARÁMETROS DE SALIDA

De cara a poder evaluar los resultados obtenidos tras una simulación completa y sus iterativas repeticiones, y poder llegar a obtener unas conclusiones, es necesario extraer información del sistema implementado. Los parámetros devueltos por el simulador son los siguientes:

PL Cell que contiene el *Path Loss* asociado a cada una de las femtoceldas existentes en el escenario. Cada uno de los componentes de este cell es una matriz que incluye el valor de PL calculado en cada una de las posiciones que componen el escenario.

SINR Cell que contiene la SINR asociada a cada una de las femtoceldas existentes en el escenario. Cada uno de los componentes de este cell es una matriz que incluye el valor de PL calculado en cada una de las posiciones que componen el escenario.

canalesNegociacion1-5 Matrices que contienen el reparto de canales asociado a cada femtocelda del escenario tras aplicar cada uno de los tipos de negociación diseñados. Esta matriz tendrá tantas filas como repeticiones de una simulación (cada una con una semilla diferente) se realicen. Cada columna representa una femtocelda del escenario y cada fila una repetición de la simulación. Cada una de estas matrices está asociada a un tipo de negociación de las diseñadas

SINRTotal_Negociacion1-5 Matrices que contienen el valor de SINR calculado para cada una de las posiciones de un apartamento en las que existe una femtocelda. Cada una de estas matrices está asociada a un tipo de negociación de las diseñadas. Esta matriz tendrá tantas filas como simulaciones distintas se realicen. Cada columna se corresponde con una posición de un apartamento.

throughputTotal_Negociacion1-5 Matrices que contienen el valor de throughput calculado para cada una de las posiciones de un apartamento en las que existe una femtocelda. Cada una de estas matrices está asociada a un tipo de negociación de las diseñadas. Esta matriz tendrá tantas filas como simulaciones distintas se realicen. Cada columna se corresponde con una posición de un apartamento.

SINR_medio_Negociacion Vector que contiene el valor medio de SINR calculado para cada uno de los tipos de negociación confeccionados.

CincoPercentilSINRMedio Vector que contiene el valor medio del 5 percentil de la SINR calculada para cada uno de los tipos de negociación confeccionados.

`noventaCincoPercentilSINRMedio` Vector que contiene el valor medio del 95 percentil de la SINR calculada para cada uno de los tipos de negociación confeccionados.

`throughput_medio_Negociacion` Vector que contiene el valor medio de throughput calculado para cada uno de los tipos de negociación confeccionados.

`CincoPercentilThroughputMedio` Vector que contiene el valor medio del 5 percentil del throughput calculado para cada uno de los tipos de negociación confeccionados.

`noventaCincoPercentilThroughputMedio` Vector que contiene el valor medio del 95 percentil del throughput calculado para cada uno de los tipos de negociación confeccionados.

EJECUCIÓN DE UNA SIMULACIÓN

En este subapartado se va a describir la metodología que es necesario seguir para realizar una simulación completa desde que se crea el escenario hasta que se aplican los diferentes tipos de negociación diseñados sobre éste. Para facilitar la tarea a los usuarios, se ha implementado una función principal de control que se encarga de llamar a todas las funciones internas del simulador. Éste fichero se ha dividido en varios bloques o zonas, cada uno de ellos para un fin particular. Éstos comienzan con dos símbolos de tanto por ciento seguidos.

En los párrafos siguientes se describe cada uno de estos bloques, de acuerdo al orden en el que aparecen dentro del fichero de control.

SELECCIÓN DEL TIPO DE ESCENARIO

```
%% SELECCIÓN DEL TIPO DE ESCENARIO y NÚMERO DE ITERACIONES
tipoEscenario = % 1: selección escenario tipo Dual Stripe
                % 2: selección escenario tipo Grid
N = % 1 HASTA VALOR NUMÉRICO ENTERO DESEADO
```

La función de este primer bloque es la selección del tipo de escenario sobre el cual se quiere realizar la simulación. Para ello se incluye una variable de control “tipoEscenario”, que según el valor que tome se seleccionará un tipo de escenario u otro. En este bloque también se puede especificar el número de simulaciones diferentes que se quieren realizar. Para ello se incluye una variable de control ‘N’ dedicada a este fin.

LLAMADA A LOS FICHEROS DE CONFIGURACIÓN

```
%%                                LLAMADA A FICHEROS DE CONFIGURACIÓN
if tipoEscenario==1
    FICHERO CONFIGURACIÓN ESCENARIO 1();
Else
    FICHERO CONFIGURACIÓN ESCENARIO 2();
end
```

Este bloque se encarga de la gestión de los ficheros de configuración asociados a cada escenario. El simulador se ha configurado de forma que, una vez que el usuario tenga estos ficheros adaptados a sus necesidades, el propio simulador de manera interna realizará su gestión.

GENERACIÓN DE ESCENARIO, NEGOCIACIONES Y CÁLCULO DE SINR

```
for i=1:l:N
% Llamada a función de generación de escenario:
if tipoEscenario==1
[tableroOperadores, tableroCanalesIniciales, informacionOperadores, canalesInicialescell, canalesFemtocelda
cell, PlporOperadores, PL, informacionEscenario, canalesIniciales]=SIMULADOR_generacionEscenarioTipo1(numOp
eradores, numeroFemtoceldas, numeroCanalesDisponibles, Ptrans, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, lado, f, increme
nto, numeroPosiciones, numApartamentos, tamañoIzquierda, tamañoDerecha, tamañoArriba, tamañoAbajo);
Else
[tableroOperadores, tableroCanalesIniciales, informacionOperadores, canalesInicialescell, canalesFemtocelda
cell, PlporOperadores, PL, informacionEscenario, canalesIniciales]=SIMULADOR_generacionEscenarioTipo2(numOp
eradores, numeroFemtoceldas, numeroCanalesDisponibles, Ptrans, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, lado, f, increme
nto, numeroPosiciones, numApartamentos, tamañoIzquierda, tamañoDerecha, tamañoArriba, tamañoAbajo);
end

%                                Llamada a función de aplicación de las negociaciones

[tableroCanalesNegociacion1, tableroCanalesNegociacion2, tableroCanalesNegociacion3, tableroCanalesNegocia
cion4, tableroCanalesNegociacion5, canalesNegociacion1(i,:), canalesNegociacion2(i,:), canalesNegociacion3(
i,:), canalesNegociacion4(i,:), canalesNegociacion5(i,:)] = SIMULADOR_Negociacion(informacionOperadores, can
alesInicialescell, canalesFemtoceldacell, PlporOperadores, PL, informacionEscenario, canalesIniciales, numero
CanalesDisponibles, numOperadores, numeroFemtoceldas, Ptrans, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, lado, f, incremen
to, numeroPosiciones, numApartamentos, tamañoIzquierda, tamañoDerecha, tamañoArriba, tamañoAbajo, tableroC
analesIniciales);

%                                Llamada a función de cálculo de SINR
[cirTotal_Negociacion1(i,:)] = calculoSINR(canalesNegociacion1(i,:), Ptrans, informacionEscenario,
lado, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, incremento, PL);
[cirTotal_Negociacion2(i,:)] = calculoSINR(canalesNegociacion2(i,:), Ptrans, informacionEscenario,
lado, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, incremento, PL);
[cirTotal_Negociacion3(i,:)] = calculoSINR(canalesNegociacion3(i,:), Ptrans, informacionEscenario,
lado, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, incremento, PL);
[cirTotal_Negociacion4(i,:)] = calculoSINR(canalesNegociacion4(i,:), Ptrans, informacionEscenario,
lado, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, incremento, PL);
[cirTotal_Negociacion5(i,:)] = calculoSINR(canalesNegociacion5(i,:), Ptrans, informacionEscenario,
lado, posFemtoceldaX, posFemtoceldaY, incremento, PL);

end
```

Se podría decir que este bloque es el principal del simulador. Su función es la de crear el escenario, aplicar los tipos de negociación sobre éste y llevar a cabo el cálculo de la SINR.

REPRESENTACIÓN DEL ESCENARIO.

```

%%                                REPRESENTACIÓN ESCENARIO

%Llamada a las funciones de representación del escenario
for i=1:1:N
%REPRESENTACIÓN DE OPERADORES
representarTablero(tableroOperadores,numOperadores);
%REPRESENTACIÓN DE CANALES INICIAL
representarCanales(tableroCanalesIniciales,numeroCanalesDisponibles,informacionEscenario, 'Reparto inicial de canales',r,g,b)
%REPRESENTACIÓN DE CANALES TRAS LA NEGOCIACIÓN TIPO 1
representarCanales(cell2mat(tableroCanalesNegociacion1cell(i)),numeroCanalesDisponibles,informacionEscenario,['Reparto final de canales Negociación tipo 1_'
num2Str(i)],r,g,b);
%REPRESENTACIÓN DE CANALES TRAS LA NEGOCIACIÓN TIPO 2
representarCanales(cell2mat(tableroCanalesNegociacion2cell(i)),numeroCanalesDisponibles,informacionEscenario,['Reparto final de canales Negociación tipo 2_'
num2Str(i)],r,g,b);
%REPRESENTACIÓN DE CANALES TRAS LA NEGOCIACIÓN TIPO 3
representarCanales(cell2mat(tableroCanalesNegociacion3cell(i)),numeroCanalesDisponibles,informacionEscenario,['Reparto final de canales Negociación tipo 3_'
num2Str(i)],r,g,b);
%REPRESENTACIÓN DE CANALES TRAS LA NEGOCIACIÓN TIPO 4
representarCanales(cell2mat(tableroCanalesNegociacion4cell(i)),numeroCanalesDisponibles,informacionEscenario,['Reparto final de canales Negociación tipo 4_'
num2Str(i)],r,g,b);
%REPRESENTACIÓN DE CANALES TRAS LA NEGOCIACIÓN TIPO 5
representarCanales(cell2mat(tableroCanalesNegociacion5cell(i)),numeroCanalesDisponibles,informacionEscenario,['Reparto final de canales Negociación tipo 5_'
num2Str(i)],r,g,b);
end

```

Este bloque se encarga de realizar la representación del estado del escenario en cada instante de la simulación. Los estados que se representan son: escenario tras crear la red de femtoceldas, escenario tras realizar el reparto inicial de canales y escenario tras aplicar cada uno de los tipos de negociación diseñados.

NOTA: El bloque está configurado para mostrar los resultados gráficos asociados a cada una de las diferentes simulaciones realizadas. Si se quiere mostrar el resultado de una simulación concreta se debe eliminar el bucle for existente en este bloque e incluir una variable 'i' que tome un valor numérico entero, igual al número de simulación que se desea mostrar.

CÁLCULO DE LA SINR MEDIA, DEL 5 PERCENTIL MEDIO DE LA SINR Y DEL 95 PERCENTIL MEDIO DE LA SINR, Y DE LA REPRESENTACIÓN DE LA CDF DE LA SINR

```
%%                               Cálculos y medidas SINR

%Llamada a las función de cálculo de SINR medio y cálculo de percentiles:
for i=1:1:5
    SINRTotal_Negociacion=eval(['SINRTotal_Negociacion' num2str(i)]);
    SINR_medio_Negociacion(i)=calculoSINRMedio(cirTotal_Negociacion);
    CincoPercentilSINRMedio(i)=calculoPercentil(SINRTotal_Negociacion,5);
    NoventaCincoPercentilSINRMedio(i)=calculoPercentil(SINRTotal_Negociacion,95);
end

%Representación de la CDF del CIR para una de las simulaciones
SimulacionDeseada=10; %Puede tomar un valor entero igual o inferior a N
for i=1:1:1
    cirTotal_Negociacion=eval(['SINRTotal_Negociacion' num2str(i)]);
    h=cdfplot(cirTotal_Negociacion(SimulacionDeseada,:));
    set(h,'color',[r(i) g(i) b(i)]);
    hold on
end
hold off
title(['CDF de la SINR'])
ylabel('CDF')
xlabel('SINR (dB)')
legend('Negociacion 1','Negociacion 2','Negociacion 3','Negociacion 4','Negociacion 5')
```

Este bloque se encarga de calcular el valor medio de la SINR, del 5 percentil de la SINR y del 95 percentil de la SINR asociados a cada una de las negociaciones diseñadas. Asimismo permite la representación de la cdf de la SINR para cada uno de los tipos de negociación aplicados, en cada una de las repeticiones realizadas.

CÁLCULO DEL THROUGHPUT MEDIO, DEL 5 PERCENTIL MEDIO DEL THROUGHPUT Y DEL 95 PERCENTIL MEDIO DEL THROUGHPUT, Y DE LA REPRESENTACIÓN DE LA CDF DEL THROUGHPUT.

```

%%                               Cálculos y medidas de throughput

%Llamada a la función de cálculo de throughput:
throughputTotal_Negociacion1=calculothroughput(CirTotal_Negociacion1);
throughputTotal_Negociacion2=calculothroughput(CirTotal_Negociacion2);
throughputTotal_Negociacion3=calculothroughput(CirTotal_Negociacion3);
throughputTotal_Negociacion4=calculothroughput(CirTotal_Negociacion4);
throughputTotal_Negociacion5=calculothroughput(CirTotal_Negociacion5);

%Llamada a las funciones de cálculo de throughput medio y cálculo de percentiles:
for i=1:1:5
throughputTotal_Negociacion=eval(['throughputTotal_Negociacion' num2str(i)]);
throughput_medio_Negociacion(i)=calculothroughputMedio(throughputTotal_Negociacion);
CincoPercentilThroughputMedio(i)=calculoPercentil(throughputTotal_Negociacion,5);
NoventaCincoPercentilthroughputMedio(i)=calculoPercentil(throughputTotal_Negociacion,95);
end

%Representación de la CDF del CIR para una de las simulaciones
SimulacionDeseada=10; %Puede tomar un valor entero igual o inferior a N
for i=1:1:1
    throughputTotal_Negociacion=eval(['throughputTotal_Negociacion' num2str(i)]);
    h=cdfplot(throughputTotal_Negociacion(SimulacionDeseada,:));
    set(h,'color',[r(i) g(i) b(i)]);
    hold on
end
hold off
title(['CDF deL throughput'])
ylabel('CDF')
xlabel('throughput (bps)')
legend('Negociacion 1','Negociacion 2','Negociacion 3','Negociacion 4','Negociacion 5')

```

Este bloque se encarga de calcular el valor medio del *throughput*, del 5 percentil *throughput* y del 95 percentil del *throughput* asociados a cada una de las negociaciones diseñadas. Asimismo permite la representación de la cdf del *throughput* para cada uno de los tipos de negociación aplicados, en cada una de las repeticiones realizadas.

REFERENCIAS

- [1] UIT, "*Reglamento de Radiocomunicaciones*". Unión Internacional de Telecomunicaciones, 1995-2012, vol. Vol. 1.
- [2] N. Telecommunications and I. A. O. of Spectrum Management. (2011, Agosto) "United States Frequency Allocation Chart". U.S. DEPARTMENT OF COMMERCE. Disponible en: <http://www.ntia.doc.gov/osmhome/allochrt.pdf>
- [3] F. C. Commission, "Spectrum policy task force report," *ET Docket No. 02-155*, Noviembre 2002.
- [4] S. Cabric, D. Mishra, "Issues in Spectrum Sensing for Cognitive Radios" vol. Proc. 38th Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Noviembre 2004, pp. 772–776.
- [5] P. S. A. Petrin, "Measurement and Analysis of Urban Spectrum Usage," vol. International Symposium on Advanced Radio Technologies NTIA Special Publication. SP-04-409, Marzo 2004, pp. 45–48.
- [6] FCC, "Cognitive Radio Technologies Proceeding (CRTP)," *ET Docket No. 03-108*, 2005.
- [7] FCC, "Second report and order and memorandum opinion and order, in the matter of unlicensed operation in the TV broadcast bands additional spectrum for unlicensed devices below 900 Mhz and in the 3 Ghz band" Federal Communications Commission, Tech. Rep., Noviembre 2008.
- [8] X. W. G. DARPA, "The Xg Architectural Framework v1.0" 2003.
- [9] X.W.G. DARPA, "The xg vision rfc," 2003.

- [10] D. T. C. Bergstorm, S. Chuprun, “Adaptative Spectrum Exploitation Using Software Defined Radios” vol. IEEE Radio and Wireless Conference, 1999, pp. 113–116.
- [11] Ericsson, “Para el año 2016 la cantidad de datos transmitidos desde dispositivos móviles tendrá un aumento de 10 veces,” 2011. Disponible en: <http://media.ericsson.pl/pr/197861/do-roku-2016-ilosc-danych-przesylanych-za-pomoca-urzadzen-mobilnych-wzrosnie-10-krotnie>, 09 de noviembre 2011
- [12] S. Carlaw, “Challenges Facing The Femtocell Market-A Realistic View?” vol. Proc. 2nd International Conference on Home Access Points and Femtocells, Dec. 2007.
- [13] C. O. de Ingenieros de Telecomunicación. Comunicado honorarios profesionales. Disponible en: <http://www.coit.es>
- [14] A. Tributaria. (2013) Cuadro general de amortizaciones. Gobierno de España. Disponible en: http://www.agenciatributaria.es/AEAT.internet/-Inicio_es_ES/_Segmentos_/Empresas_y_profesionales/-Empresarios_individuales_y_profesionales/-Rendimientos_de_actividades_economicas_en_el_IRPF/-Regimenes_para_determinar_el_rendimiento_de_las_actividades_economicas/-Estimacion_Directa_Simplificada.shtml
- [15] J. M. III, “Software Radios-Survey, Critical Evaluation And Future Directions” vol. Telesystems Conference, Mayo 1992, pp. 13–15.
- [16] N. R. Internacional. (2012) Defining next-generation radio with sdr. Global Defence Technology. Disponible en: <http://www.naval-technology.com/features/-feature92362/feature92362-1.html>
- [17] J. M. III, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio,” Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology (KTH), Mayo 2000.
- [18] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, pp. 201–220, 2005.
- [19] X. W. Group, “The xg vision rfc,” 2003.
- [20] N. Telecommunications and I. Administration, “Facilitating opportunities for flexible, efficient and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies”

FCC ET Docket No. 03-108, Febrero 2010. Disponible en: http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-10-12A1.pdf

[21] IEEE, “Improving Spectrum Usage Through Cognitive Radio Technology” *IEEE USA Position*, Noviembre 2003.

[22] D. D. IEEE 1900.1 Group, “Standard Definitions And Concepts For Spectrum Management And Advanced Radio System Technologies” Junio 2006.

[23] H. Arslan, *Cognitive Radio, Software Defined Radio, And Adaptive Wireless Systems*, W. I. Forum, Ed. Springer, 2007.

[24] FCC, *Second Memorandum Opinion and Order In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands, Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band*, Septiembre 2010.

[25] *Notice of Proposed Rulemaking (NPRM 03 322): Facilitating Opportunities for Flexible, Efficient and Reliable Spectrum agile Radio Technologies*. FCC, ET Docket No. 03 108, 2003.

[26] Oficom. (2006, Abril) A study into the application of interference cancellation techniques. Rep. 72/06/R/037/U. Disponible en: http://www.ofcom.org.uk/research/technology/research/emer_tech/intcx/summary.pdf

[27] F. C. Commission. (2004, Mayo) Fcc proposes rules to facilitate wireless broadband services using vacant tv channels. Washington, D.C. (EEUU). Disponible en: http://hraunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-247169A1.pdf

[28] E. C. Committee, “Technical And Operational Requirements For The Possible Operation Of Cognitive Radio Systems In The White Spaces? Of The Frequency Band 470-790 Mhz” E. C. of Postal and T. Administrations, Eds. Cardiff: ECC, Febrero 2011, report 159. Disponible en: <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/pdf/ECCREP159.PDF>

[29] FCC, *Electronic Code Of Federal Regulations*, FCC, Ed., 2013, vol. 47, no. 0-17. Disponible en: http://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?tpl=/ecfrbrowse/Title47/47tab_02.

[30] IEEE, “Second memorandum opinion and order in the matter of unlicensed operation in the TV broadcast bands, additional spectrum for unlicensed devices below 900 Mhz and in the 3 Ghz band,” *Docket 10-174*, Septiembre 2010.

- [31] IEEE, “Second report and order and memorandum opinion and order in the matter of unlicensed operation in the TV broadcast bands, additional spectrum for unlicensed devices below 900 Mhz and in the 3 Ghz band,” *Docket 08-260*, Noviembre 2008.
- [32] M. Baykas, T. Kasslin, “Developing A Standard for TV White Space Coexistence: Technical Challenges And Solution Approaches,” *IEEE Wireless Communications*, Febrero 2012.
- [33] Ofcom, “Digital dividend: Cognitive access statement on license exempting cognitive devices using interleaved spectrum” Febrero 2009.
- [34] Ofcom, “Geolocation for cognitive access: A discussion on using geolocation to enable licence-exempt access to the interleaved spectrum” Noviembre 2009.
- [35] Ofcom, “Implementing geolocation” Noviembre 2010.
- [36] Ofcom, “Implementing geolocation, summary of consultation responses and next steps,” Septiembre 2011.
- [37] I. Canada, *Consultation on a Policy and Technical Framework for the Use of Non-Broadcasting Applications in the Television Broadcasting Bands Below 698MHz*, S. Management and Telecommunications, Eds. SMSE-012-11, Agosto 2011.
- [38] IEEE. (2011, Octubre) Response to the Industry Canada Consultation on a Policy and Technical Framework for the Use of Non- Broadcasting Applications in the Television Broadcasting Bands Below 698 Mhz. 802.18 Radio Regulatory Technical Advisory Group. Disponible en: [https://mentor.ieee.org/802.18/dcn/11/18-11-0075-04-0000-ieee-802-response-to-canadian tvws-consultation.Doc](https://mentor.ieee.org/802.18/dcn/11/18-11-0075-04-0000-ieee-802-response-to-canadian-tvws-consultation.Doc)
- [39] IDA, “Trial of White Space Technology Accessing VHF and UHF Bands in Singapore” Julio 2010.
- [40] E. C. I. Society and M. Directorate, “Radio Spectrum Policy Group — Opinion on Cognitive Technologies” Febrero 2011.
- [41] ECC, “Technical and operational requirements for the possible operation of Cognitive Radio Systems in the “White Spaces” of the frequency band 470–790 Mhz,” Enero 2011.
- [42] ECMA, “MAC and PHY for operation in TV White Space” vol. Standard, Diciembre 2009.

-
- [43] ECMA, “Standard ecma-392,” 2012. Disponible en: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-392.pdf>
- [44] IEEE, “IEEE Standard for Information Technology Telecommunications and Information Exchange Between Systems Local and Metropolitan Area Networks Specific Requirements — Part 22: Cognitive Wireless Ran Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications: Policies and Procedures for Operation in the TV Bands” *July 2011*, vol. Std 802.22-2011, p. 1–680, Julio 2011.
- [45] W.-Y. L. Ian F. Akyildiz, “NeXt Generation/Dynamic Spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey” *Computer Network*, vol. 50, pp. 2127–2159, 2006.
- [46] FCC, “Notice of Proposed Rule Making - ET Docket no. 04-186” 2004.
- [47] Y. H. Kim., “IEEE 802.22 WRAN overview” 2007. Disponible en: http://-bungae.kaist.ac.kr/seminar/Material/2007/07_Jeju/0129-%EA%B9%80%EC%9C%A4%ED%9D%AC.pdf
- [48] Cordeiro, “IEEE 802.22: The first worldwide standard based on cognitive radio” *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, 2005.
- [49] IEEE, “IEEE 802.11af draft 5.0, amendment 5: TV White Spaces operation” *802.11 Working Group*, Junio 2013.
- [50] IEEE, “Project authorization request for p1900.7 radio interface for white space dynamic spectrum access radio systems supporting fixed and mobile operation” *DySPAN-SC*, Marzo 2011. Disponible en: http://grouper.ieee.org/-groups/802/16/docs/11/80216-11_0009.pdf
- [51] S. M. M. K. Harrison and A. Sahai, “How much white space capacity is there?” *Proc. 4th IEEE Int’l. Symp. New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Mayo 2010.
- [52] M. Baykas, T. Kasslin, “Developing a Standard for TV White Space coexistence: Technical challenges and solution approaches” *Wireless Communications, IEEE*, vol. 19, Febrero 2012.
- [53] N. Golmie, “Coexistence in wireless networks: Challenges and system-level solutions in the unlicensed bands,” *Cambridge U. Press*, 2006.

- [54] IEEE, “IEEE Standard for information technology telecommunications and information exchange between systems local and metropolitan area networks specific requirements — part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications” *Std 802.11-2007*, Junio 2007.
- [55] IEEE, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks part 16: Air interface for broadband wireless access systems amendment 2: Improved coexistence mechanisms for license-exempt operation” *Std 802.16h*, Abril 2010.
- [56] IEEE, “IEEE Standard for information technology telecommunications and information exchange between systems Local and Metropolitan Area Networks specific requirements part 22.1: Standard to enhance harmful interference protection for low power licensed devices operating in TV broadcast bands” *Std. 802.22.1*, 2009.
- [57] IEEE, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks part 16: Air interface for broadband wireless access systems amendment 2: Improved coexistence mechanisms for license-exempt operation” *Std 802.16h-2010*, Abril 2010.
- [58] J. O. Neel, “Analysis and design of cognitive radio networks and distributed radio resource management algorithms” Ph.D. dissertation, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [59] M. V. S. M. I. F. Akyildiz, Won-Yeol Lee, “NeXt Generation/Dynamic Spectrum Access/Cognitive Radio wireless networks: A survey” 2006.
- [60] A. R. M. Osborne, *A Course in Game Theory*, Cambridge MA, Ed. MIT Press, 1994.
- [61] R. M. B. S. Ginde and J. Neel, “A game theoretic analysis of the GPRS adaptive modulation schemes,” *Vehicular Technology Conference*, vol. 2, pp. 732 – 736, 2003.
- [62] P. Dutta, *Strategies and Games: Theories and Practice*, Cambridge MA, Ed. MIT Press, 1999.
- [63] J. T. D. Fudenberg, *Game Theory*, Cambridge MA, Ed. MIT Press, 1991.
- [64] A. Zemlianov and G. de Veciana., “Cooperation and decision making in wireless multi-provider setting” *IEEE Infocom*, 2005.

-
- [65] M. Félegyházi, M. Cagalj, D. Dufour, and J.-P. Hubaux., “Border games in cellular networks” *IEEE Infocom*, 2007.
- [66] M. Félegyházi, M. Cagalj, D. D.legyházi, and J.-P. Hubaux., “Wireless operators in a shared spectrum” *IEEE Infocom*, pp. 23–29, 2006.
- [67] R. Etkin, A. P. Parekh, and D. Tse, “Spectrum sharing in unlicensed bands. IEEE JSAC on adaptive, spectrum agile and cognitive wireless networks” Abril 2007.
- [68] M. M. Halldorsson, J. Y. Halpern, L. E. Li, and V. S. Mirrokni, “On spectrum sharing games” *ACM PODC*, 2004.
- [69] L. Cao and H. Zheng, “Distributed spectrum allocation via local bargaining” *SECON*, 2005.
- [70] C. Peng, H. Zheng, and B. Y. Zhao, “Utilization and fairness in spectrum assignement for opportunistic spectrum access” *Mobile Networks and Applications*, 2006.
- [71] J. Zhao, H. Zheng, and G. H. Yang, “Distributed Coordination in Dynamic Spectrum Allocation Networks” *DySPAN*, 2005.
- [72] H. Zheng and L. Cao, “Device-centric spectrum management” *DySPAN*, 2005.
- [73] R. B. J. Huang and M. L. Honig, “Auction-based spectrum sharing” *ACM/Springer (MONET)*, vol. 11(3), p. 405–418, Junio 2006.
- [74] Z. Han, Z. Ji, and K. J. R. Liu, “Non-cooperative resource competition game by virtual referee in multi-cell OFDMA networks” *IEEE JSAC, Non-cooperative Behavior in Networking, (2nd Quarter)*, 2007.
- [75] N. Nie and C. Comaniciu, “Adaptive channel allocation spectrum etiquette for cognitive radio networks” *New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 269 – 278, 2005.
- [76] 3GPP, “Technical report 3rd generation partnership project; technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (e-Utra); further advancements for e-Utra Physical Layer aspects” vol. 3GPP TR 36.814 V9.0.0 (2010-03) (Release 9), 2010.

- [77] Y. Okumura, E. Ohmori, T. Kawano, and K. Fukuda, "Field strength and its variability in VHF and UHF land-mobile service" *Comm. Lab*, vol. 16 (9-10), pp. 825-873, 1968.
- [78] ITU-R, "Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range of 30 Mhz to 3000 Mhz" *Technical Report*, pp. 1546-4, 2009.
- [79] M. Hata, "Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services" *Vehicular Technology, IEEE Transactions*, vol. 29 (3), pp. 317-325, 1980.
- [80] ITU-R, "Propagation data and prediction methods for the planning of short-range outdoor radio communication systems and radio local area networks in the frequency range 300 Mhz to 100 Mhz" *Technical Report*, pp. 1411-1, 1999-2001.
- [81] COST231, "Urban transmission loss models for mobile radio in the 900 and 1800 Mhz bands - revision 2," *Technical Report*, 1991.
- [82] G. P. Villardi, C. Sun, Y. D. Alemseged, and H. Harada, "Coexistence of TV White Space enabled Cognitive Wireless Access Points" *Wireless Communications and Networking Conference Workshops*, pp. 18 - 23, 2012.
- [83] K. Tsujimura and M. Kuwabara, "Cordless telephone system and its propagation characteristics" *Vehicular Technology, IEEE Transactions*, vol. 26 (4), pp. 367-371, Noviembre 1977.
- [84] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice (Second Edition)*. Prentice Hall, 2001.
- [85] K. C. Allen, N. DeMinco, J. R. Hoffman, Y. Lo, and P. B. Papazian, "Building penetration loss measurements at 900 Mhz, 11.4 Ghz and 28.8 Ghz," *NTIA Tech. Rep.*, pp. 94-306, 1994.
- [86] H. K. Kobayashi and G. Patrick, "Preliminary building attenuation model" *NTIA-92-155, Tech. Rep.*, Mayo 1992.
- [87] D. C. Cox, R. R. Murray, and A. W. Norris, "Antenna height dependence of 800 Mhz attenuation measured in houses" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 34 (2), Mayo 1985.
- [88] D. Devasirvatham, "Radio propagation studies in a small city for universal portable communications," *Vehicular Technology Conference*, vol. IEEE 38th, pp. 100-104, Junio 1988.

-
- [89] S. cells forum. Small cell technology and deployment. Disponible en: <http://www.smallcellforum.org/aboutsmallcells-small-cells-consumer-faqs>
- [90] IEEE, “Technical specification group services and system aspects; service requirements for home NodeBs and home eNodeBs” *3GPP TS 22.220*, 2009-2012.
- [91] D. Calin, H. Claussen, and a. A.-L. Huseyin Uzunalioglu, “Femtocells: On femto deployment architectures and macrocell offloading benefits in joint macro-femto deployments” *IEEE Communications Magazine*, Enero 2010.
- [92] IEEE, “Open and closed access for home NodeBs” *3GPP TSG-RAN WG4 Meeting 44*, Agosto 2007.
- [93] IEEE, “Technical specification group radio access networks; 3G home NodeB study item technical report” *3GPP TR 25.820*, Septiembre 2008.
- [94] D. N. Knisely, Airvana, T. Yoshizawa, T. Telecom, F. Favichia, and Alcatel-Lucent, “Standardization of femtocells in 3GPP” *IEEE Communications Magazine*, Septiembre 2009. Disponible en: <http://www.iith.ac.in/~tbr/teaching/docs/3G-FemtoCells.pdf>
- [95] L. G. U. Garcia, K. I. Pedersen, and P. E. Mogensen, “On open versus closed LTE-Advanced femtocells and dynamic interference coordination” *Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 1–10, 2010.
- [96] 3GPP, “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Radio Frequency (RF) system scenarios” vol. 3GPP TR 25.942 V10.1.0 (Release 10), section 5.1.4.2 (macro cell propagation model), Junio 2012.