

TECNOLOGÍAS DE ACCESO DINÁMICO Y USO COMPARTIDO DEL ESPECTRO



Ricardo Castañeda Álvarez
Director General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos
ricardo.castaneda@ift.org.mx

Roberto Carlos Castro Jaramillo
Director de Ingeniería y Tecnología
roberto.castro@ift.org.mx

Gerardo Martínez Cruz
Subdirector de Ingeniería del Espectro
gerardo.martinezc@ift.org.mx

En portada

- Capítulo I** Teléfono celular móvil inteligente, comúnmente llamado *smartphone*, de PEAKPX, disponible en:
<http://c2.peakpx.com/wallpaper/105/936/946/5k-google-hand-hand-phone-phone-wallpaper.jpg>
- Capítulo II** Arreglo de múltiples antenas para una configuración *massive MIMO*, de National Instruments, disponible en:
http://www.ni.com/cms/images/devzone/tut/fig3_20170220104037.png
- Capítulo III** Representación gráfica tridimensional de la energía en el dominio de la frecuencia y el tiempo, conocido como *espectrograma*, de Attack Magazine, disponible en:
<https://www.attackmagazine.com/wp-content/uploads/2015/04/Pic-11.png>
- Capítulo IV** Sensores utilizados para la medición de temperatura, humedad y control de una cosecha de tulipanes, de Business Wire, disponible en:
http://mms.businesswire.com/media/20140506005587/en/414520/5/dacom_photo.jpg
- Capítulo V** Mancha de cobertura de una estación de televisión en Veracruz, México, del Instituto Federal de Telecomunicaciones.
- Capítulo VI** Antenas sectoriales en una estación base para telefonía celular, de The Nationals, disponible en:
http://nationals.org.au/wp-content/uploads/2016/05/Depositphotos_6584864_original.jpg
- Capítulo VII** Centro Histórico de la Ciudad de México, México, de Time Out, disponible en:
<https://media.timeout.com/images/103022108/image.jpg>

Introducción

Actualmente, el mundo está experimentando una revolución tecnológica en las comunicaciones inalámbricas, principalmente impulsada no solo por el desarrollo de nuevas tecnologías, la invención de nuevos dispositivos inteligentes (como *smartphones*, tabletas, laptops, y todo tipo de *wearables* como relojes, pulseras medidoras de pulso, audífonos, dispositivos médicos, etc.) y a su cada vez menor costo, sino que gracias a las aplicaciones móviles, las personas han expandido su interacción alrededor del mundo; mediante el comercio electrónico, las redes sociales, el almacenamiento de información en la nube, los servicios del gobierno digital, etc. Así, las comunicaciones móviles hoy en día forman parte de un complejo y dinámico ecosistema digital, en el cual éstas son una pieza fundamental para que las personas y las cosas puedan comunicarse no solo en el mundo físico sino además en el mundo virtual.

En consecuencia, la demanda de tráfico móvil crece exponencialmente desde hace varios años y la tendencia continúa. Al respecto, se espera que para el 2021, el 73% del tráfico de internet global sea transmitido de forma inalámbrica (siendo el 27% restante para tráfico cableado), del cual el 53% será a través de redes WiFi y el 20% a través de las redes celulares¹. En este sentido, también se espera que para el año 2021 existan más de 27 billones de dispositivos conectados², cuyo tráfico de datos móviles será de aproximadamente 48.3 exabytes al mes³. Aunado a lo anterior, se tiene la expectativa de que en el futuro las tecnologías inalámbricas permitirán alcanzar mayores tasas de transmisión, con grandes anchos de banda.

Por consiguiente, los Reguladores⁴ se ven en la necesidad de implementar planes de acción que permitan liberar bandas de frecuencia para la utilización de las comunicaciones móviles. Sin embargo, en la mayoría de las ocasiones se ven superados por la demanda de tráfico móvil y a que la duración de la implementación de dichos planes no es inmediata, si no que

¹ CISCO, "Forecasting the World's Digital Transformation", *Cisco Systems, Inc.*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 20 de diciembre de 2017, disponible en: https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-complete-forecast/infographic.html

² *Ídem*.

³ CISCO, "The Zettabyte Era: Trends and Analysis", *Cisco Systems, Inc.*, Estados Unidos, 7 de junio de 2017. Consultado el 20 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/vni-hyperconnectivity-wp.html>

⁴ Organismos que administran el uso y explotación del espectro radioeléctrico en cada país, así como el desarrollo de las telecomunicaciones y la radiodifusión.

en la mayoría de los casos son procesos largos, complicados y muchas veces, costosos.

Por otro lado, es también un hecho que no todas las personas gozan de los beneficios que conllevan las comunicaciones inalámbricas, debido a que no cuentan con los recursos suficientes para adquirir ya sea el servicio o los dispositivos inteligentes; pero sobre todo, que existen numerosos núcleos de población que siguen sin contar con conectividad de banda ancha inalámbrica.

Así las cosas, en su preocupación por reducir la brecha digital y en busca de incrementar la capacidad de tráfico de las redes móviles para poder satisfacer la demanda de conectividad futura, la Industria de las telecomunicaciones y la Academia, en conjunto con los Reguladores, han sumado esfuerzos para buscar alternativas, tanto regulatorias como tecnológicas, que permitan ser implementadas de forma rápida y que brinden altas velocidades de transmisión con una calidad de servicio aceptable, sobre todo sin la necesidad de que identifiquen o liberen nuevas bandas para el uso del espectro radioeléctrico. Esto es, aplicar nuevos paradigmas tecnológicos que permitan usar de manera más eficiente el espectro radioeléctrico.

Por esta razón, aproximadamente en la última década se ha investigado sobre aquellas tecnologías que permitan hacer un uso más eficiente del espectro radioeléctrico al implementar esquemas de acceso dinámico que permiten hacer un uso compartido del mismo, en el dominio del *tiempo*, del *espacio* y de la *frecuencia*. De forma general, con estas tecnologías se busca optimizar el espectro radioeléctrico de forma tal que técnicamente sea posible compartirlo entre varios usuarios; bajo diversos mecanismos que permitan el uso o explotación de las frecuencias o mediante la implementación de medidas de coexistencia técnico-regulatorias que aseguren la correcta convivencia de los usuarios.

Además, gracias a estas tecnologías es posible que varios tipos de servicios puedan converger en una misma zona geográfica e incluso en la misma frecuencia. Asimismo, con este tipo de tecnologías se puede utilizar aquel espectro concesionado que se considera como “no utilizado” en determinadas zonas geográficas, debido a que por cuestiones de inviabilidad económica o dificultades geográficas, los concesionarios del espectro no despliegan infraestructura de red.

Por lo anterior, las tecnologías que permiten el acceso dinámico y el uso compartido del espectro son catalogadas como disruptivas, ya que su

forma de operar es radicalmente diferente al régimen tradicional de asignación de espectro donde se otorgan concesiones de largo plazo que conllevan derechos de uso exclusivo del espectro en términos de frecuencias y área geográfica a servir. Por ello, estas tecnologías no suelen converger con la regulación existente en los países en donde buscan implementarse, por lo que representan un gran reto para los Reguladores el poder habilitarlas, ya que pueden no ser compatibles con el esquema tradicional de asignación de espectro y enfrentar vacíos e impedimentos regulatorios que hagan inviable su implementación bajo un régimen que brinde la certeza jurídica necesaria para generar confianza en los potenciales inversionistas de este tipo de tecnologías y servicios.

Bajo este tenor, el Instituto Federal de Telecomunicaciones, a través de la Dirección General de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos y la Dirección de Ingeniería y Tecnología (DlyT), expone y analiza el estado del arte de las tecnologías de acceso dinámico y uso compartido del espectro radioeléctrico con la finalidad de identificar aquellas que sean susceptibles de adopción en México. Previo a la elaboración del presente estudio, la DlyT identificó y clasificó las tecnologías tomando en cuenta las siguientes consideraciones: su evolución tecnológica (si se encuentran en etapa de experimentación, si ya contaban con algún estándar, etc.), si cuentan con alguna madurez en el mercado (por ejemplo, si ya existían dispositivos autorizados por un determinado Regulador para comercializarse) y si a nivel internacional los Reguladores habían diseñado un marco regulatorio para su implementación.

Como resultado de ello, se identificaron tres categorías: *tecnologías emergentes*, las cuales son de reciente creación y se encuentran en una etapa de desarrollo y experimentación (Capítulo I. Tecnologías basadas en LTE que operan con en bandas de frecuencia de uso libre, y Capítulo II. Tecnologías basadas en MIMO); *tecnologías desplegadas*, cuyas investigaciones “tentativamente” han concluido, e incluso están estandarizadas, pero no cuentan aún con madurez en el mercado (Capítulo III. Radio Cognitivo); y *soluciones tecnológicas convergentes*, las cuales para su operación se componen de varias tecnologías y/o de un marco regulatorio impulsado por el Regulador (Capítulo IV. Comunicaciones Device-to-Device, y Capítulo V. TV White Spaces).

Además, la DlyT considero pertinente abordar una propuesta de modelo regulatorio (que pudiera acompañarse de tecnologías de acceso dinámico) el cual permite hacer una compartición del espectro bajo un régimen de concesión (Capítulo VI. *Licensed Shared Access*). Finalmente,

una vez analizadas a profundidad las tecnologías mencionadas, en el Capítulo VII. Recomendaciones para la implementación en México de las tecnologías de acceso dinámico y uso compartido del espectro, la DlyT recomienda cuales tecnologías serían susceptibles de adoptarse en México y qué considerandos se deben abordar al interior del Instituto Federal de Telecomunicaciones para materializar que dichas tecnologías, y sus beneficios potenciales, puedan implementarse de manera óptima en nuestro país.

Glosario de Términos

3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
ADC	<i>Analog to Digital Converter</i>
AFH	<i>Adaptive Frequency Hopping</i>
AGA	<i>Autorización General de Acceso</i>
AMI	<i>Advanced Metering Infrastructure</i>
AP	<i>Acceso Prioritario</i>
ASK	<i>Amplitude Shift Keying</i>
BDR	<i>Base de Datos del Regulador</i>
BDWS	<i>Base de Datos White Spaces</i>
BFR	<i>Bloque Físico de Recursos</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
CA	<i>Carrier Aggregation</i>
CBRS	<i>Citizens Broadband Radio Service</i>
CCA	<i>Clear Channel Assessment</i>
CCK	<i>Complementary Code Keying</i>
CE	<i>Comisión Europea</i>
CEPT	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administrations</i>
CLSA	<i>Controlador LSA</i>
C-MIMO	<i>Cooperative MIMO</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CoMP	<i>Coordinated MultiPoint transmission</i>
CRA	<i>Channel Reservation Access</i>
CRF	<i>Código de Regulaciones Federales</i>
CSAT	<i>Carrier Sensing and Adaptive Transmission</i>
CSIRO	<i>Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation</i>
CSMA/CA	<i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
D2D	<i>Device-to-Device</i>
D2D-O	<i>Device-to-Device Overlay</i>
D2D-U	<i>Device-to-Device Underlay</i>
DCBRS	<i>Dispositivos CBRS</i>
DCBRSA	<i>Dispositivo CBRS clase A</i>
DCBRSB	<i>Dispositivo CBRS clase B</i>
DEWS	<i>Dispositivo Esclavo White Spaces</i>
DMWS	<i>Dispositivo Maestro White Spaces</i>
DSA	<i>Dynamic Spectrum Access</i>
DSAN	<i>Dynamic Spectrum Access Networks</i>
DTN	<i>Delay Tolerant Networking</i>
DWS	<i>Dispositivos White Spaces (maestros y esclavos)</i>
DySPAN-SC	<i>Dynamic Spectrum Access Networks-Standards Committee</i>

ECC	<i>Electronic Communications Committee</i>
ECMA	<i>European Computer Manufacturers Association</i>
eLAA	<i>enhanced Licensed-Assisted Access</i>
ESC	<i>Environmental Sensing Capability</i>
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
FAN	<i>Field Area Network</i>
FBE	<i>Frame Based Equipment</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GFSK	<i>Gaussian Frequency Shift Keying</i>
GSM	<i>Global System for Mobile communications</i>
HAAT	<i>Height Above Average Terrain</i>
HetNet	<i>Heterogeneous Network</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
ICM	<i>Industriales, Científicas y Médicas</i>
IEC	<i>Información de Estado de Canal</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFT	<i>Instituto Federal de Telecomunicaciones</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
ISR	<i>Ideal Software Radio</i>
ITS	<i>Intelligent Transportation System</i>
KNOWS	<i>Kognitiv Networking Over White Spaces</i>
KUAR	<i>Kansas University Agile Radio</i>
LAA	<i>Licensed-Assisted Access</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LAP	<i>Licencia de Acceso Prioritario</i>
LBE	<i>Load Based Equipment</i>
LBT	<i>Listen-Before-Talk</i>
LEA	<i>License-Exempt Access</i>
LSA	<i>Licensed Shared Access</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>LTE-Advanced</i>
LTE-D	<i>LTE-Direct</i>
LTE-U	<i>LTE-Unlicensed</i>
LWA	<i>LTE-WiFi link Aggregation</i>
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>
MAC	<i>Media Access Control</i>
MAN	<i>Metropolitan Area Network</i>
MANET	<i>Mobile Ad Hoc Network</i>
MBAN	<i>Medical Body Area Network</i>

MFCN	<i>Mobile/Fixed Communications Network</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
M-QAM	<i>M-ary Quadrature Amplitude Modulation</i>
MU-MIMO	<i>Multi User - MIMO</i>
NOA&M	<i>Network Operations, Administration and Maintenance</i>
NTIA	<i>National Telecommunications and Information Administration</i>
Ofcom	<i>Office of Communications</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
O-QPSK	<i>Offset Quadrature Phase-Shift Keying</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P25	<i>Project 25</i>
PBB	<i>Procesador de Banda Base</i>
PCA	<i>Prioritized Contention Access</i>
PCAST	<i>President's Council of Advisors on Science and Technology</i>
PDS	<i>Procesador Digital de Señales</i>
PMSE	<i>Programme Making and Special Events</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RC	<i>Radio Cognitivo</i>
RDS	<i>Radio Definido por Software</i>
RF	<i>Radio Frecuencia</i>
RLSA	<i>Repositorio LSA</i>
RSPG	<i>Radio Spectrum Policy Group</i>
SAAA	<i>Sistemas de Antenas en Arreglos Adaptativos</i>
SAAF	<i>Sistemas de Antenas en Arreglos de Fase</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SAS	<i>Spectrum Access System</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SCR	<i>Software Controlled Radio</i>
SDL	<i>Supplemental DownLink</i>
SIG	<i>Special Interest Group</i>
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>
SINR	<i>Signal to Interference-plus-Noise Ratio</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i>
SON	<i>Self-Organized Networks</i>
STR	<i>Servicio de Televisión Radiodifundida</i>

SU-MIMO	<i>Single User - MIMO</i>
TADUC	Tecnologías de Acceso Dinámico y Uso Compartido
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDT	Televisión Digital Terrestre
TETRA	<i>Terrestrial Trunked Radio</i>
TVWS	<i>TV White Spaces</i>
UE	Unión Europea
UEC	Usuario Entrante Comercial
UEP	Usuario Entrante Público
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
USR	<i>Ultimate Software Radio</i>
UT	Usuario Titular
UTC	Usuario Titular Comercial
UTP	Usuario Titular Público
UWB	<i>Ultra Wide Band</i>
V2I	<i>Vehicle-to-Infrastructure</i>
V2P	<i>Vehicle-to-Pedestrian</i>
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>
V2X	<i>Vehicle-to-Everything</i>
WAN	<i>Wide Area Network</i>
WARP	<i>Wireless Open-Access Research Platform</i>
WiFi	<i>Wireless Fidelity</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WPAN	<i>Wireless Personal Area Network</i>
WRAN	<i>Wireless Regional Area Networks</i>

Índice

En portada.....	i
Introducción.....	ii
Glosario de Términos.....	iii

I. Tecnologías basadas en LTE que operan en bandas de frecuencias de uso libre 14

1.1 Esquemas de utilización de espectro en bandas de frecuencia de uso libre	15
1.1.1 <i>Carrier Aggregation</i>	16
1.1.2 <i>Supplemental Downlink</i>	16
1.2 Tecnologías que operan en bandas de frecuencia de uso libre	18
1.2.1 <i>LTE-Unlicensed</i> (LTE-U).....	18
1.2.2 <i>Licensed-Assited Access</i> (LAA)	20
1.2.3 <i>LTE-WiFi link Aggregation</i> (LWA)	22
1.2.4 <i>MulteFire</i>	23
1.3 Comparación entre las tecnologías basadas en LTE	24
1.4 Implementación.....	25
1.5 Regulación.....	27
1.6 Referencias	28

II. Tecnologías emergentes basadas en MIMO 32

2.1 Configuración de antenas	32
2.1.1 <i>SIMO</i>	32
2.1.2 <i>MISO</i>	33
2.2 Clasificación MIMO	33
2.3 Funcionamiento	34
2.3.1 <i>Diversidad espacial</i>	34
2.3.2 <i>Multiplexaje espacial</i>	35
2.4 Ventajas y desventajas generales de MIMO	35
2.4.1 <i>Ventajas</i>	35
2.4.2 <i>Desventajas</i>	36
2.5 Tecnologías emergentes basadas en MIMO	36
2.5.1 <i>Cooperative MIMO</i> (C-MIMO)	36
2.5.2 <i>Massive MIMO</i>	41
2.6 Referencias	48

III. Radio Cognitivo 51

3.1 Radio Cognitivo para <i>Dynamic Spectrum Access</i> (DSA).....	53
3.1.1 <i>Introducción a DSA</i>	53
3.1.2 <i>Operación del Radio Cognitivo para DSA</i>	53
3.2 Esquemas de compartición espectral	55
3.2.1 <i>Esquema Interweaving</i>	56
3.3 Arquitectura del transceptor RC.....	59
3.3.1 <i>Radio Definido por Software</i>	60
3.4 Aplicaciones de RC	62
3.4.1 <i>TV White Spaces</i>	62

3.4.2 Aplicaciones militares.....	62
3.4.3 Servicios de emergencia y misión crítica.....	63
3.4.4 Redes <i>Smart Grid</i>	63
3.4.5 Servicios de telemedicina.....	63
3.5 Estandarización de Radio Cognitivo	64
3.6 Prototipos experimentales y proyectos de investigación sobre RC	65
3.7 Ventajas y desventajas de RC	67
3.7.1 Ventajas	67
3.7.2 Desventajas	67
3.8 Referencias	70
IV. Comunicaciones Device-to-Device	73
4.1 Clasificación de la tecnología D2D según el uso del espectro	75
4.1.1 D2D en espectro concesionado	75
4.1.2 D2D en espectro de uso libre	76
4.1.3 Asignación de recursos del espectro.....	77
4.2 Operación de la Tecnología	80
4.2.1 Detección de dispositivos.....	80
4.2.2 Modos de operación	82
4.2.3 Control de potencia.....	83
4.2.4 Transmisión de información	84
4.3 Ventajas y desventajas	86
4.3.1 D2D en espectro concesionado	86
4.3.2 D2D en espectro de uso libre	87
4.4 Aplicaciones.....	87
4.5 Prototipos funcionales y ejemplos de implementación.....	90
4.5.1 <i>FlashLinQ</i>	90
4.5.2 <i>DataSpotting</i>	90
4.5.3 <i>Relay-by-Smartphone</i>	91
4.5.4 Seguridad Pública.....	91
4.6 Referencias	93
V. TV White Spaces	97
5.1 Funcionamiento del Sistema de TVWS (Ofcom).....	99
5.1.1 Arquitectura del Sistema TVWS	100
5.1.2 Protocolo de comunicación del Sistema TVWS.....	101
5.2 Sobre la autorización de operación de los equipos	103
5.2.1 Requerimientos de operación de los DWS	103
5.3 Implementación.....	106
5.3.1 Estados Unidos (FCC)	106
5.3.2 Reino Unido (Ofcom).....	108
5.4 Estandarización	109
5.4.1 IEEE 802.11af: <i>Television White Spaces (TVWS) Operation</i>	110
5.4.2 IEEE 802.22: <i>Policies and Procedures for Operation in the TV Bands</i>	111
5.4.3 IEEE 802.19: <i>TV White Space Coexistence Methods</i>	111
5.4.4 ETSI EN 301 598 <i>White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz TV broadcast band</i>	111
5.5 Ventajas y Desventajas	113
5.5.1 Ventajas	113
5.5.2 Desventajas	113

5.6 Referencias	115
VI. Licensed Shared Access	118
6.1 Funcionamiento de LSA	120
6.2 Modelos de compartición de espectro.....	121
6.2.1 Compartición Horizontal	121
6.2.2 Compartición Vertical.....	122
6.3 Factores a considerar para la compartición	123
6.3.1 La banda de frecuencias en donde se efectuará la compartición	124
6.3.2 Las condiciones regulatorias del usuario titular	124
6.3.3 Las características técnicas con la que se efectuará la compartición.....	125
6.3.4 El entorno regulatorio que habilitará la compartición. La participación del Regulador en el proceso de la compartición.....	125
6.3.5 Los beneficios que se obtendrán de la compartición.....	125
6.4 Implementación de LSA.....	126
6.4.1 Estados Unidos (FCC): banda 3.5 GHz	126
6.4.2 Unión Europea (CEPT): banda 2.3 GHz	133
6.4.3 Comparación de los modelos regulatorios.....	142
6.5 Ventajas y Desventajas	142
6.5.1 Ventajas	142
6.5.2 Desventajas	142
6.6 Referencias	144
VII. Recomendaciones para la implementación en México de las tecnologías de acceso dinámico y uso compartido del espectro	148
7.1 Sobre el problema actual de la regulación mexicana ante las TADUC	148
7.2 Sobre los incentivos para implementar las TADUC.....	151
7.3 Sobre la estandarización tecnológica.....	154
7.4 Sobre la viabilidad de la adopción de las tecnologías	156



I. Tecnologías basadas en LTE que operan en bandas de frecuencias de uso libre

El espectro destinado para las bandas de frecuencia uso libre es, sin duda alguna, un espectro demasiado valioso para las comunicaciones móviles pues es ahí donde se procesa la mayor parte del tráfico de Internet. Al respecto, de todo el tráfico de datos móviles que se genera a nivel mundial, el 72.6% es manejado por la tecnología WiFi, la cual opera en bandas de frecuencia no concesionadas, y el 27.4% restante es manejado por las tecnologías celulares¹, las cuales operan en espectro concesionado. Una de las ventajas de operar en bandas de frecuencia no concesionadas es que “cualquiera” puede operar, toda vez que cumpla con las condiciones técnico-regulatorias impuestas por el Regulador² para garantizar la coexistencia de las tecnologías en dichas bandas (por ejemplo, parámetros de potencia, técnicas de acceso al medio, etc.).

En este orden de ideas, WiFi se ha convertido en una tecnología accesible y eficiente para poder satisfacer la demanda de tráfico de los usuarios móviles, a tal grado que su evolución tecnológica ha alcanzado tasas de transmisión de hasta 1.73 Gbps³. No obstante lo anterior, es difícil de garantizar a través de WiFi una calidad de servicio (QoS, *Quality of Service*) ya que su naturaleza es compartir el espectro no sólo con múltiples usuarios sino con otras tecnologías existentes en la banda de frecuencias de operación.

Por otro lado, las personas demandan cada vez mayor cantidad de tráfico de datos móviles, por lo que los operadores del servicio de telefonía móvil celular se enfrentan a una escasez de recursos en sus redes debido a que el espectro que tienen concesionado para operar poco a poco se vuelve insuficiente para satisfacer dicha demanda. Así, la Industria se ha visto en la necesidad de explorar en aquellas bandas de frecuencia no

¹ CISCO, “Forecasting the World’s Digital Transformation”, *Cisco Systems, Inc.*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-complete-forecast/infographic.html

² El Regulador es la autoridad facultada para la administración del espectro radioeléctrico y se encarga de autorizar el uso del espectro a cualquier interesado que desee hacer un uso del mismo a través de un título habilitante.

³ Intel, “Diferentes protocolos de Wi-Fi y velocidades de datos”, *Intel Corporation*, Estados Unidos. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.intel.la/content/www/xl/es/support/articles/000005725/network-and-i-o/wireless-networking.html>

concesionadas, principalmente en las bandas de 2.5 y 5 GHz, para poder descargar el tráfico de sus redes a través del desarrollo y estandarización de nuevas tecnologías basadas en LTE (*Long Term Evolution*).

Sin embargo, lo anterior ha provocado fuertes discusiones entre los miembros de la Industria sobre si LTE debería de operar en bandas de frecuencia no concesionadas. Por un lado, existen diversas compañías a favor de WiFi que argumentan que LTE no cuenta con los mecanismos de coexistencia suficientes que garanticen una compartición del espectro equitativa con WiFi; y por otro lado, existen compañías que están a favor de la implementación de LTE en bandas de frecuencia de uso libre ya que cuentan con diferentes investigaciones que comprueban la correcta coexistencia de LTE con WiFi, incluso con argumentos tan sólidos en los que se menciona que LTE está mejor diseñada para compartir equitativamente el espectro en comparación con WiFi.

Así, la propuesta de usar LTE en bandas de frecuencia no concesionadas ha sido de gran preocupación para los fabricantes y proveedores de servicio de la tecnología WiFi, los cuales han usado la banda de 5 GHz por mucho tiempo y buscan continuar haciéndolo sin tener que lidiar con la introducción de LTE⁴.

Bajo este contexto, el presente Capítulo aborda las tecnologías basadas en LTE que operan en bandas de frecuencia no concesionadas que, a través de diferentes mecanismos de coexistencia, buscan garantizar la correcta convivencia con las demás tecnologías ya existentes. Estas tecnologías son: *LTE-Unlicensed*, *Licensed Assited Access*, *LTE-WiFi link Aggregation* y *MulteFire*.

1.1 Esquemas de utilización de espectro en bandas de frecuencia de uso libre

Para poder entender el funcionamiento de la utilización de las bandas no concesionadas como complemento de las bandas concesionadas, es necesario conocer los principales mecanismos de utilización de espectro en bandas de frecuencia de uso libre: *Carrier Aggregation* y *Supplemental Downlink*, los cuales se describen a continuación.

⁴ Ismaiel, Bushra *et al.*, "A Survey and Comparison Of Device-To-Device Architecture Using LTE unlicensed Band", 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Australia, 2017, p. 1.

1.1.1 Carrier Aggregation

Carrier Aggregation (CA) es una técnica que permite aumentar las tasas de transmisión en las redes LTE al adicionar portadoras que están en bandas de frecuencia concesionadas o no concesionadas. CA fue implementada por primera vez para LTE-Advanced (LTE-A) en el *Release 10* por el 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) y permite que las portadoras estén configuradas en modo FDD o TDD, lo cual habilita a CA para ser compatible con los anteriores *Releases* (8 y 9). Con la implementación de CA se tiene evidencia de tasas de transmisión en redes comerciales de hasta 450 Mbps al implementar 3 portadoras complementarias⁵.

En CA cada portadora agregada es referida como una portadora complementaria, las cuales pueden tener el mismo ancho de banda que una portadora común de LTE (1.4, 3, 5, 10, 15 o 20 MHz). En este sentido, con CA es posible agregar hasta un máximo de 5 portadoras tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada, teniendo un ancho de banda agregado máximo de 100 MHz⁶ por cada enlace.

Cuando CA es implementada en modo FDD, la cantidad de portadoras complementarias debe ser igual para el enlace de subida y de bajada. Sin embargo, dichas portadoras pueden o no estar contiguas en espectro y pueden tener diferente ancho de banda. Por otra parte, cuando CA es implementado en modo TDD, por lo general el enlace de subida será igual que el enlace de bajada respecto a las portadoras y ancho de banda. Se considera que CA será la tecnología que habilite velocidades en las bandas IMT-Advanced de hasta 1 Gbps⁷.

1.1.2 Supplemental Downlink

Al igual que CA, *Supplemental Downlink* (SDL) es una técnica habilitada por el 3GPP, la cual apareció por primera vez en el *Release 9* como parte de la evolución de la técnica de acceso al medio HSDPA (*High Speed Downlink*

⁵ QUALCOMM, "LTE Advanced Carrier Aggregation", *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

<https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/lte-carrier-aggregation>

⁶ Wannstrom, Jeanette, "Carrier Aggregation explained", *Third Generation Partnership Project*, junio de 2013. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <http://www.3gpp.org/technologies/keywords/acronyms/101-carrier-aggregation-explained>

⁷ 5G Americas, "Agregación de portadoras: una tecnología a prueba de futuro", *5gamericas*, Estados Unidos, 21 de octubre de 2014. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <http://www.5gamericas.org/es/newsroom/press-releases/agregacion-de-portadoras-una-tecnologia-prueba-de-futuro/>

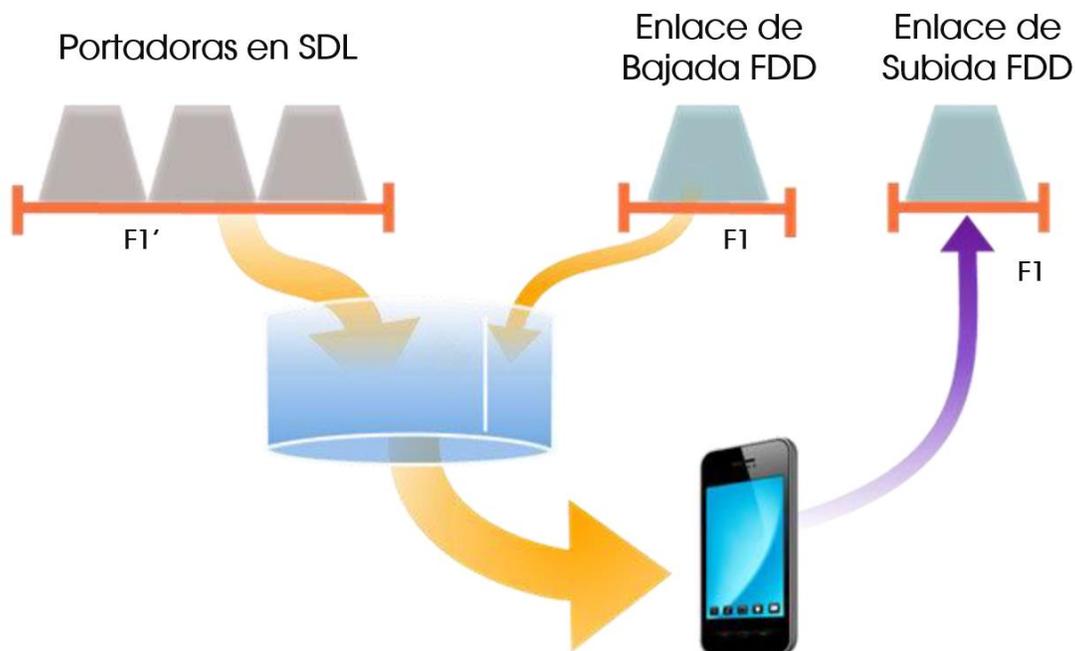


Fig. 1.1 Esquema de agregación de portadoras SDL⁸.

Packet Access)⁹. Al implementar SDL, los usuarios del espectro pueden aumentar la capacidad de descarga de sus redes al adicionar portadoras en el enlace de bajada (en el *Release 10* SDL permite agregar hasta 3 portadoras adicionales), las cuales se encuentran en bandas de frecuencia no concesionadas. Cabe mencionar que los usuarios del espectro deben tener espectro en modo FDD para poder implementar SDL. Para ejemplificar lo anterior, en la Figura 1.1 se muestra a la banda de 2.1 GHz (F1) como aquella en la que se encuentra la portadora principal, mientras las portadoras SDL agregadas se encuentran dentro de la banda L (F1'). Dado que SDL solo se puede aplicar en el enlace de bajada, esta técnica no es compatible con versiones posteriores al *Release 9*¹⁰.

Otra de las características de SDL es que, a diferencia de cómo se gestionan las potencias de los canales cuando LTE es implementado con una sola portadora (la cual debe de transmitir los canales de señalización y control, además de los canales propios para la transferencia de datos, entre otros), en las portadoras SDL se invierte casi toda la potencia en los canales destinados a la transferencia de información dado que los demás canales

⁸ QUALCOMM, "Qualcomm Research. HSPA Supplemental Downlink", *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, diciembre de 2014, p. 6. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.qualcomm.com/documents/supplemental-downlink>

⁹ *Ídem*, p. 5.

¹⁰ *Ídem*, p. 6.

son gestionados en la portadora con espectro concesionado. Así, la potencia disponible para los usuarios SDL será más del doble en un esquema de 2 portadoras SDL y más del triple en un esquema de 3 portadoras SDL¹¹.

1.2 Tecnologías que operan en bandas de frecuencia de uso libre

1.2.1 LTE-*Unlicensed* (LTE-U)

LTE-U (LTE-*Unlicensed*) es una tecnología basada en los *Releases* 10, 11 y 12 del 3GPP propuesta por el LTE-U Forum, el cual está conformado por las compañías Verizon, LG Electronics, Alcatel-Lucent, Ericsson, Qualcomm Technologies, Inc. y Samsung Electronics¹². LTE-U permite a los operadores móviles descargar tráfico de sus redes en bandas de frecuencia no concesionadas, extendiendo los beneficios de LTE y LTE-A. Cabe señalar que esta tecnología no está estandarizada por ningún organismo para estos fines (como el 3GPP), sin embargo, el LTE-U Forum se encargó de generar las especificaciones técnicas que incluyen las características mínimas de desempeño que deben tener las estaciones base de LTE-U y los equipos de usuario, así como las especificaciones de coexistencia. Además, LTE-U puede ser implementada en aquellos países en los cuales no se requiera condiciones de coexistencia adicionales a los de LTE-U, por ejemplo, China, Corea del Sur, India y Estados Unidos¹³.

LTE-U opera en la banda de 5 GHz, específicamente en los rangos pertenecientes a las bandas denominadas UNII-1 (5150-5250 MHz) y UNII-3 (5725-5850 MHz). No obstante lo anterior, el LTE-U Forum contempló también la implementación de LTE-U en la banda UNII-2 (5250-5725 MHz), sin embargo, dado que implementar LTE-U en esa banda requiere características adicionales en la selección dinámica de frecuencias, se previó su utilización en el futuro¹⁴. Así, puesto que las portadoras SDL de LTE-U no operan en las bandas de frecuencia comerciales, es necesario de una nueva instalación de hardware para que las *small cells* operen en la banda de 5 GHz¹⁵.

¹¹ QUALCOMM, "Qualcomm Research. HSPA Supplemental Downlink", *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, diciembre de 2014, p. 7. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

<https://www.qualcomm.com/documents/supplemental-downlink>

¹² Para mayor información consúltese en: <http://www.lteuforum.org/index.html>

¹³ Chen, Bolin *et al.*, "Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz With Corresponding Deployment Scenarios: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, 2017, p. 10.

¹⁴ LTE-U Forum, "LTE-U SDL Coexistence Specifications V1.3", *LTE-U Forum*, 2015, p. 4. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

http://www.lteuforum.org/uploads/3/5/6/8/3568127/lte-u_forum_lte-u_sdl_coexistence_specifications_v1.3.pdf

¹⁵ NETMANIAS, "Analysis of LTE - WiFi Aggregation Solutions", *Netmanias.com*, Corea, 21 de marzo de 2016. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.netmanias.com/en/post/reports/8532/lte-lte-u-lwa-mptcp-wi-fi/analysis-of-lte-wifi-aggregation-solutions>

Para que los operadores móviles puedan implementar LTE-U, es necesario que tengan concesionado espectro en modo FDD y así implementar SDL en el enlace de bajada dentro de las bandas UNII-1 y UNII-3.

1.2.1.1 Mecanismos de Coexistencia

Para que LTE-U pueda operar en un entorno “justo” y “amistoso” con las tecnologías existentes en la banda de 5 GHz (en este caso WiFi), debe de utilizar mecanismos de coexistencia; LTE-U cuenta con tres tipos de mecanismos: selección de canal, CSAT (*Carrier Sensing and Adaptive Transmission*) y SDL oportunista, los cuales se explican a continuación:

- **Selección de canal.** Este mecanismo permite a las *small cells* escanear la portadora SDL para detectar aquellos canales que se encuentren más “limpios”. Este procedimiento se ejecuta antes de que la *small cell* transmita y, una vez que se ha empezado a transmitir, el procedimiento es ejecutado periódicamente¹⁶. Así, si el canal de transmisión llegara a no ser óptimo para seguir utilizándolo, la *small cell* seleccionará otro canal más limpio (si hay disponible) y conmutará la comunicación a través de los procedimientos establecidos en los *Releases* 10 y 11. Este mecanismo permite evitar interferencias a las *small cells* con las comunicaciones de otros sistemas vecinos como WiFi u otras *small cells* de LTE-U.
- **CSAT.** Es un algoritmo que permite a LTE-U compartir el espectro en bandas de frecuencia uso libre con otros sistemas WiFi o LTE-U, en entornos sumamente densos en los cuales es difícil encontrar canales “limpios” para poder transmitir. CSAT permite a las *small cells* detectar el medio para transmitir (tanto para sistemas WiFi como para sistemas LTE-U) en un periodo de duración entre 10 y 200 ms. Así, con base en los resultados de detección, el algoritmo define un ciclo de trabajo parecido al TDM (*Time Division Multiplex*), en el cual se definen periodos adaptativos de transmisión y no transmisión. Durante el tiempo en que LTE-U no transmite, el canal estará disponible para que un sistema vecino WiFi pueda restaurar sus transmisiones y viceversa¹⁷.
- **SDL oportunista.** Tal y como su nombre lo indica, la agregación de portadoras en el enlace de descarga de datos puede estar configurado de forma oportunista, es decir, que las portadoras SDL únicamente se “activen” cuando la demanda de descarga de datos

¹⁶ QUALCOMM, “Qualcomm Research. LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with Wi-Fi”, *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, junio de 2014, p. 6. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unlicensed-coexistence-whitepaper.pdf>

¹⁷ *Idem*, pp. 7 y 8.

se requiriera. Por ejemplo, cuando el tráfico del enlace de descarga de una determinada *small cell* excede el límite establecido, cuyos usuarios se encuentran dentro del área de cobertura de la portadora SDL, ésta se puede activar para descargar los datos de la portadora principal. De otra forma, cuando la demanda de tráfico pueda ser satisfecha con la portadora principal y no existe ningún usuario dentro de su cobertura, las portadoras complementarias dejarían de ser utilizadas por la red.

A pesar de los mecanismos de coexistencia anteriormente mencionados, se ha demostrado que LTE-U realmente no permite una compartición “amistosa” con las demás tecnologías existentes en las bandas no concesionadas, ya que ésta brinda prioridad a los usuarios LTE bloqueando el acceso a los usuarios de WiFi¹⁸.

1.2.2 Licensed-Assisted Access (LAA)

Desde sus orígenes, la tecnología LTE fue pensada para ser operada en bandas de frecuencia concesionadas, por lo que la transmisión de las estaciones base no contempla una detección previa del medio para conocer si el canal está disponible para transmitir. Por otro lado, los mecanismos de coexistencia de LTE-U no eran del todo suficientes para poder convivir con las tecnologías existentes en las bandas de frecuencia no concesionadas. Por lo anterior, fue necesario que a LTE se le implementara otro mecanismo que se asemejara a WiFi para que pudiera compartir el espectro de una forma justa.

En virtud de lo anterior, a LTE se le incorporó el mecanismo LBT (*Listen-Before-Talk*) resultando así la tecnología denominada LAA (*Licensed-Assisted Access*). LAA es una tecnología muy similar a LTE-U ya que a través de CA utiliza la portadora en la banda no concesionada como complemento de la portadora concesionada para solucionar problemas de descarga de tráfico. Sin embargo, a diferencia de LTE-U, LAA fue establecida por un organismo de estandarización, el 3GPP, dentro del *Release 13*¹⁹. Cabe señalar que en el *Release 13*, LAA únicamente puede ser implementada con CA en el enlace de descarga mientras que en el *Release 14* es posible implementar CA tanto en el enlace de subida como en el enlace de bajada. A esta nueva modalidad de LAA se le denomina *enhanced LAA (eLAA)*.

¹⁸ Ismaiel, Bushra *et al.*, “A Survey and Comparison Of Device-To-Device Architecture Using LTE unlicensed Band”, 2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring), Australia, 2017, p. 2.

¹⁹ *Idem*, p. 3.

Por otra parte, LAA depende del *core* de la red móvil para poder ser implementada, por lo que no hay necesidad de hacer cambios de infraestructura en las redes de LTE, solamente en el *software* para poder programar las bandas de frecuencia de operación, en este caso, las concesionadas y la de uso libre. No obstante, será necesario construir nuevos dispositivos LAA para que soporten las bandas de frecuencia no concesionadas²⁰.

1.2.2.1 Listen-Before-Talk en LAA

LBT es una técnica usada en las comunicaciones de radio, en la cual los radio transmisores primero detectan el medio antes de comenzar una transmisión; este procedimiento es conocido como CCA (*Clear Channel Assessment*). Así, si el canal está limpio, entonces la estación base transmitirá por un periodo de tiempo y después se detiene para volver a checar la disponibilidad de canal, pero si el canal se encuentra ocupado dejará de transmitir y seguirá “escuchando” hasta saber nuevamente si el canal está limpio. Si después de varios intentos de ejecutar el CCA el canal sigue ocupado, entonces procederá a examinar otro canal²¹.

Debido a que LBT es el mecanismo considerado como “adecuado”, bajo un consenso general entre la Industria, la Academia y los Reguladores para la compartición del espectro entre tecnologías que operan en bandas de frecuencia de uso libre, y además, de que LAA fue introducida al mercado por un organismo de estandarización, se considera a LAA como una solución global *ad hoc* para cualquier tipo de regulación²². Al respecto, países como Japón y aquellos que integran la Unión Europea (UE) tienen estipulados en sus regulaciones que las tecnologías que operen en la banda de 5 GHz deben de contar con el mecanismo LBT²³.

A pesar de que LAA es considerada como idónea para operar en bandas de frecuencia de uso libre, actualmente existe mucha controversia sobre si realmente con LBT, LAA pueda compartir el espectro de forma justa con WiFi. Al respecto, Qualcomm y Ericsson han argumentado que LAA incrementa la capacidad del sistema al brindar mayores velocidades de banda ancha,

²⁰ Intel, “Alternative LTE Solutions in Unlicensed Spectrum: Overview of LWA, LTE-LAA and Beyond”, *Intel Corporation*, Estados Unidos, 2016, p. 13. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

<https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/white-papers/unlicensed-lte-paper.pdf>

²¹ Ismaiel, Bushra *et al.*, “A Survey and Comparison Of Device-To-Device Architecture Using LTE unlicensed Band”, *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Australia, 2017, p. 3.

²² Kwon, Hwan-Joon *et al.*, “Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release 13”, *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2017, p. 203.

²³ *Ídem*, p. 202.

sin embargo, provoca “baja” interferencia con WiFi. Por otro lado, compañías como Google no están a favor de la operación de LAA debido a que ésta puede bloquear el acceso a los usuarios de WiFi al brindar prioridad a los usuarios de LAA²⁴. Por si fuera poco, la polémica persiste puesto que el 3GPP asegura que después de haberse realizado varios estudios sobre la coexistencia entre LAA y WiFi, existe mayor afectación entre redes WiFi que entre una red LAA y una WiFi²⁵. Lo anterior debido a que LAA causa menos interferencia de canal adyacente a un sistema WiFi en comparación con otro sistema WiFi²⁶.

1.2.3 LTE-WiFi *link Aggregation* (LWA)

Otro tipo de tecnología que permite trabajar en bandas de frecuencia no concesionadas es LTE-WiFi *link Aggregation*, conocida como LWA, la cual fue estandarizada por primera vez por el 3GPP en el *Release* 13 y posteriormente en el *Release* 14²⁷. En el *Release* 13 se especificó que LWA podía operar en bandas de 2.5 y 5 GHz²⁸, sin embargo, como mejora, en el *Release* 14 se añadió la banda de 60 GHz, en la cual operan los estándares de WiFi 802.11ad y 802.11ay, también conocida como WiGig²⁹.

A diferencia de las tecnologías anteriores en las cuales se implementa LTE directamente en bandas de frecuencia de uso libre, LWA utiliza a WiFi como medio para descargar tráfico de una red de LTE por medio de CA. Es decir, en la estación base de LTE los paquetes de datos son transmitidos a través del radio enlace de LTE y WiFi. Una de las ventajas de la solución LWA es que puede proveer un mejor control y utilización de los recursos sobre los enlaces de LTE y WiFi, mejorando tanto la tasa de transmisión para los usuarios como

²⁴ Ismaiel, Bushra *et al.*, “A Survey and Comparison Of Device-To-Device Architecture Using LTE unlicensed Band”, *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Australia, 2017, p. 3.

²⁵ Flore, Dino, “LAA standardization: coexistence is the key”, *Third Generation Partnership Project*, 13 de julio de 2016. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1789-laa_update

²⁶ Chen, Bolin *et al.*, “Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz With Corresponding Deployment Scenarios: A Survey”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, 2017, pp. 9 y 10.

²⁷ Intel, “Alternative LTE Solutions in Unlicensed Spectrum: Overview of LWA, LTE-LAA and Beyond”, *Intel Corporation*, Estados Unidos, 2016, p. 7. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/white-papers/unlicensed-lte-paper.pdf>

²⁸ Malladi, Durga, “Best use of unlicensed spectrum”, *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, 3 de febrero de 2016, p. 6. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/making-the-best-use-of-unlicensed-spectrum-presentation.pdf>

²⁹ Intel, “Alternative LTE Solutions in Unlicensed Spectrum: Overview of LWA, LTE-LAA and Beyond”, *Intel Corporation*, Estados Unidos, 2016, p. 7. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/white-papers/unlicensed-lte-paper.pdf>

la capacidad total de sistema al gestionar mejor los recursos de espectro entre los usuarios³⁰.

A diferencia de LTE-U y LAA, en las cuales para su operación es necesario modificar la infraestructura de red y crear equipos terminales para que los usuarios puedan contar con los beneficios de dichas tecnologías, LWA se puede implementar con tan solo actualizar el *software* de la red de LTE y no requiere la fabricación de equipos terminales. Lo anterior se debe a que en LWA el enlace de subida es ejecutado en LTE, sobre el espectro concesionado, y el enlace de descarga es dividido entre las tecnologías LTE y WiFi. Por consiguiente, las compañías de WiFi están más a favor en la implementación de LWA dado que, en caso de implementarse, no afectaría a los usuarios de WiFi existentes ya que en cuestión de coexistencia y desempeño, LWA es equivalente a una red WiFi³¹.

1.2.4 MulteFire

MulteFire es una tecnología basada en los *Releases* 13 y 14 del 3GPP, en específico en los modos de LAA y eLAA. Además, esta tecnología incorpora mejoras al mecanismo de LBT para poder coexistir con otras tecnologías, como WiFi o LAA³². Adicionalmente, la tecnología MulteFire incorpora alta calidad de servicios y funcionalidades de LTE, las cuales soportan voz y datos sobre IP, ya sea para ser desplegada como una red autónoma o para interoperar con las redes móviles ya existentes.

Es de gran relevancia señalar que MulteFire no fue diseñada por un organismo de estandarización (como el 3GPP o el ETSI, *European Telecommunications Standards Institute*), sino que fue diseñado directamente por una asociación de diferentes fabricantes de equipos de telecomunicaciones denominada MulteFire Alliance, la cual está compuesta por 31 compañías, entre ellas Samsung, Intel, Sony, Comcast, Qualcomm, Ericsson, entre otras.³³ A diferencia de las tecnologías expuestas anteriormente, MulteFire es la más reciente ya que en enero de 2017 la MulteFire Alliance publicó el primer conjunto de especificaciones técnicas denominado "*Release 1.0*".

³⁰ *Ibidem*.

³¹ Ismaiel, Bushra *et al.*, "A Survey and Comparison Of Device-To-Device Architecture Using LTE unlicensed Band", *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Australia, 2017, p. 1.

³² MULTEFIRE, "MulteFire Release 1.0 Technical Paper. A New Way to Wireless", *MulteFire Alliance*, Estados Unidos, 2016, p. 3. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible con previo registro del usuario en: <https://www.multeFire.org/specification/specification-release-1-0-1/download/>

³³ Para mayor información consúltese en: <https://www.multeFire.org/our-members/>

Una de las principales características de MulteFire es que opera en su totalidad en bandas de frecuencia de uso libre, a diferencia de las anteriores tecnologías que requieren que el operador móvil tenga espectro concesionado. Por lo anterior, MulteFire puede ser desplegada como red independiente para todo aquel operador que no cuente con espectro concesionado³⁴. No obstante lo anterior, es posible implementar esta tecnología como solución complementaria para aquellos operadores móviles que previamente cuentan con espectro concesionado. En este sentido, MulteFire puede ser implementada a través de *small cells* para extender la cobertura en aquellas regiones en las que el espectro concesionado de un operador móvil no se encuentra disponible y/o para liberar tráfico.

MulteFire puede operar en cualquier banda del espectro siempre y cuando en ésta el Regulador previamente le haya definido reglas de compartición (en la interfaz de aire) para lograr una compartición del espectro “justa” con las demás tecnologías, por ejemplo, la banda de 5 GHz o incluso la banda de 3.5 GHz (identificada por Estados Unidos para el servicio CBRS³⁵, de la cual se abordará a profundidad en el Capítulo VI).

1.3 Comparación entre las tecnologías basadas en LTE

Tabla 1.1 Comparación entre las tecnologías basadas en LTE que operan en bandas de frecuencia no concesionadas.

Tecnología	LTE-U	LAA	LWA	MulteFire
Característica				
Organismo de estandarización	Ninguno, pero fue diseñado por el LTE-U Forum	3GPP	3GPP	Ninguno, pero fue diseñado por la MulteFire Alliance
Bandas de frecuencia de operación	5 GHz	5 GHz	2.5 GHz 5 GHz 60 GHz	5 GHz 3.5 GHz
Estándar	Ninguno, pero fue diseñada con base en los Releases 10, 11 y 12 del 3GPP	Release 13 y Release 14	Release 13 y Release 14	Release 1.0
Países en los que puede operar con base en su regulación actual	China, Corea del Sur y Estados Unidos	Unión Europea y Japón	Todos	Unión Europea y Japón
Mecanismos de coexistencia	Selección de canal CSAT	LBT	LBT (opera igual que WiFi)	LBT

³⁴ MULTEFIRE, “MulteFire Release 1.0 Technical Paper. A New Way to Wireless”, *MulteFire Alliance*, Estados Unidos, 2016, p. 8. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible con previo registro del usuario en: <https://www.multefire.org/specification/specification-release-1-0-1/download/>

³⁵ *Citizens Broadband Radio Service*.

Tecnología	LTE-U	LAA	LWA	MulteFire
Característica	SDL oportunista			
Costo de implementación	Alta, es necesario nuevo hardware, tanto para las estaciones base como para los equipos terminales.	Media, se requiere de una actualización de software en la red LTE, así como nuevos equipos terminales.	Baja, solo se requiere una configuración de software en la red LTE.	Alta, es necesario nuevo hardware, tanto para las estaciones base como para los equipos terminales.
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Permite utilizar bandas de frecuencia de uso libre para descargar tráfico de la red LTE. 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite utilizar bandas de frecuencia de uso libre para descargar tráfico de la red LTE. • Está estandarizada. • Puede implementar CA en el enlace de subida y en el enlace de bajada. • Para implementarse no necesita de infraestructura adicional. 	<ul style="list-style-type: none"> • Permite utilizar bandas de frecuencia de uso libre para descargar tráfico de la red LTE. • Está estandarizada. • No requiere infraestructura adicional ni equipos terminales específicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Utiliza en su totalidad espectro en bandas de frecuencia de uso libre para operar.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • No está estandarizada. • Se requiere de nueva infraestructura para su implementación, así como de nuevos equipos terminales. • Requiere que el operador cuente con espectro concesionado. • Sus mecanismos de coexistencia son insuficientes para garantizar una compartición del espectro equitativa con otras tecnologías. 	<ul style="list-style-type: none"> • Es necesario construir nuevos equipos terminales para su operación. • Requiere que el operador cuente con espectro concesionado. 	<ul style="list-style-type: none"> • Requiere que el operador cuente con espectro concesionado. 	<ul style="list-style-type: none"> • No está estandarizada. • Se requiere de nueva infraestructura para su implementación, así como de nuevos equipos terminales.

1.4 Implementación

Dado que las tecnologías anteriormente expuestas son emergentes, pocos operadores del servicio de telefonía móvil a nivel mundial se han arriesgado a implementarlas dentro de sus redes, aunado a que actualmente sigue

persistiendo el debate sobre si realmente LTE puede coexistir con WiFi. Sin embargo, alrededor del mundo, tanto la Industria como la Academia han trabajado en conjunto para desarrollar diferentes simulaciones por *software*, así como diversas pruebas piloto para comprobar la coexistencia entre las tecnologías. Al respecto, en junio de 2017 la compañía T-Mobile realizó una prueba piloto en la ciudad de Los Angeles, Estados Unidos, en la que a través de la implementación de LAA alcanzó una velocidad de descarga de 741 Mbps usando 80 MHz de espectro por CA, MIMO 4x4 y 256 QAM³⁶.

Posteriormente, en julio de 2017, AT&T y Ericsson realizaron la primera prueba “en vivo” de LAA en el centro de San Francisco, Estados Unidos, en la cual se alcanzó una tasa de transmisión por arriba de 750 Mbps³⁷. No obstante, anteriormente dichas compañías habían demostrado una prueba piloto en el congreso mundial de Barcelona en la cual se implementó LAA, obteniendo una tasa de transmisión de hasta 1 Gbps con MIMO 4X4 y 256 QAM³⁸.

Después, en agosto de 2017, la compañía Verizon realizó una implementación de LAA, utilizando tres portadoras en la banda de 5 GHz, y una portadora de 20 MHz de espectro concesionado en la banda AWS³⁹. La prueba piloto se desarrolló en un centro comercial en Florida, Estados Unidos, en el cual se lograron tasas de transmisión de 953 Mbps, al implementar CA con MIMO 4X4⁴⁰ y 256 QAM. Aunque actualmente no hay una vasta cantidad de equipos terminales que pueden disfrutar los beneficios de LAA⁴¹, la compañía Verizon ha argumentado que está lista para desplegar LAA en todo Estados Unidos⁴².

³⁶ T-Mobile, “T-Mobile Completes Nation’s First Live Commercial Network Test of License Assisted Access (LAA)”, *T-Mobile US, Inc.*, Estados Unidos, 26 de junio de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://newsroom.t-mobile.com/news-and-blogs/lte-u.htm>

³⁷ AT&T, “AT&T Reaches Wireless Speeds of More than 750 Mbps with LTE Licensed Assisted Access (LTE-LAA) Field Trials”, *AT&T, Inc.*, Estados Unidos, 26 de junio de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: http://about.att.com/story/lte_licensed_assisted_access_field_trials.html

³⁸ Fuetsch, Andre, “Accelerating AT&T Network 3.0 Indigo with 5G and 5G Evolution, Open Source Software and Data Analytics”, *AT&T, Inc.*, Estados Unidos, 27 de febrero de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: https://about.att.com/innovationblog/accelerating_network

³⁹ DeGrasse, Martha, “Verizon starts nationwide LAA deployment”, *RCR Wireless News*, Estados Unidos, 4 de agosto de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.rcrwireless.com/20170804/carriers/verizon-starts-nationwide-laa-deployment-tag4>

⁴⁰ MIMO se abordará en el Capítulo II.

⁴¹ Actualmente solo hay dos equipos terminales en el mercado que soportan LAA: Samsung Galaxy S8 y Motorola Moto Z2 *Force Edition*.

⁴² DeGrasse, Martha, “Verizon starts nationwide LAA deployment”, *RCR Wireless News*, Estados Unidos, 4 de agosto de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.rcrwireless.com/20170804/carriers/verizon-starts-nationwide-laa-deployment-tag4>

1.5 Regulación

Hasta ahora, ningún país se ha pronunciado explícitamente ni ha emitido regulación alguna sobre la operación de las tecnologías basadas en LTE que operan en bandas de frecuencia de uso libre. Lo anterior se debe a que la regulación principalmente recae en las condiciones técnico-regulatorias que los Reguladores establecen de forma particular para cada una de las bandas de espectro no concesionadas y no así habilitando la operación de una tecnología en específico.

Por ejemplo, en la UE, el ETSI estableció dos tipos de LBT a través del estándar “ETSI EN 301 893 5 GHz RLAN; *Harmonised Standard covering the essential requirements of article 3.2 of Directive 2014/53/EU*”: *Frame Based Equipment (FBE)* y *Load Based Equipment (LBE)*⁴³. Con lo anterior, se entiende que cualquier tecnología que busque operar en la banda de 5 GHz en la UE debe de cumplir con alguno de los mecanismos de coexistencia, por ejemplo, LAA.

En cuanto a la autorización de equipos basados en LTE, en febrero de 2017, la Oficina de Ingeniería y Tecnología de la FCC (*Federal Communications Commission*⁴⁴) autorizó los primeros dispositivos de LTE-U en la banda de 5 GHz, los cuales fueron evaluados satisfactoriamente bajo las condiciones de coexistencia establecidas por la FCC⁴⁵.

⁴³ Para mayor información consúltese en:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301800_301899/301893/02.01.01_60/en_301893v020101p.pdf

⁴⁴ Regulador de las telecomunicaciones en Estados Unidos.

⁴⁵ Knapp, Julius, “OET Authorizes First LTE-U devices”, *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 22 de febrero de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.fcc.gov/news-events/blog/2017/02/22/oet-authorizes-first-lte-u-devices>

1.6 Referencias

1. CISCO, "Forecasting the World's Digital Transformation", *Cisco Systems, Inc.*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
https://www.cisco.com/c/m/en_us/solutions/service-provider/vni-complete-forecast/infographic.html
2. Intel, "Diferentes protocolos de Wi-Fi y velocidades de datos", *Intel Corporation*, Estados Unidos. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://www.intel.la/content/www/xl/es/support/articles/000005725/network-and-i-o/wireless-networking.html>
3. Ismaiel, Bushra *et al.*, "A Survey and Comparison Of Device-To-Device Architecture Using LTE unlicensed Band", *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Australia, 2017.
4. QUALCOMM, "LTE Advanced Carrier Aggregation", *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://www.qualcomm.com/invention/technologies/lte/lte-carrier-aggregation>
5. Wannstrom, Jeanette, "Carrier Aggregation explained", *Third Generation Partnership Project*, junio de 2013. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/101-carrier-aggregation-explained>
6. 5G Americas, "Agregación de portadoras: una tecnología a prueba de futuro", *5gamericas*, Estados Unidos, 21 de octubre de 2014. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<http://www.5gamericas.org/es/newsroom/press-releases/agregacion-de-portadoras-una-tecnologia-prueba-de-futuro/>
7. QUALCOMM, "Qualcomm Research. HSPA Supplemental Downlink", *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, diciembre de 2014. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://www.qualcomm.com/documents/supplemental-downlink>
8. Chen, Bolin *et al.*, "Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz With Corresponding Deployment Scenarios: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 1, 2017.
9. LTE-U Forum, "LTE-U SDL Coexistence Specifications V1.3", *LTE-U Forum*, 2015. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
http://www.lteuforum.org/uploads/3/5/6/8/3568127/lte-u_forum_lte-u_sdl_coexistence_specifications_v1.3.pdf

10. NETMANIAS, "Analysis of LTE - WiFi Aggregation Solutions", *Netmanias.com*, Corea, 21 de marzo de 2016. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://www.netmanias.com/en/post/reports/8532/laa-lte-lte-u-lwa-mptcp-wi-fi/analysis-of-lte-wifi-aggregation-solutions>
11. QUALCOMM, "Qualcomm Research. LTE in Unlicensed Spectrum: Harmonious Coexistence with Wi-Fi", *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, junio de 2014. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/lte-unlicensed-coexistence-whitepaper.pdf>
12. Intel, "Alternative LTE Solutions in Unlicensed Spectrum: Overview of LWA, LTE-LAA and Beyond", *Intel Corporation*, Estados Unidos, 2016. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://www.intel.com/content/dam/www/public/us/en/documents/white-papers/unlicensed-lte-paper.pdf>
13. Kwon, Hwan-Joon *et al.*, "Licensed-Assisted Access to Unlicensed Spectrum in LTE Release 13", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2017.
14. Flore, Dino, "LAA standardization: coexistence is the key", *Third Generation Partnership Project*, 13 de julio de 2016. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1789-laa_update
15. Malladi, Durga, "Best use of unlicensed spectrum", *Qualcomm Technologies, Inc.*, Estados Unidos, 3 de febrero de 2016. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/making-the-best-use-of-unlicensed-spectrum-presentation.pdf>
16. MULTEFIRE, "MulleFire Release 1.0 Technical Paper. A New Way to Wireless", *MulleFire Alliance*, Estados Unidos, 2016. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible con previo registro del usuario en:
<https://www.mulfire.org/specification/specification-release-1-0-1download/>
17. T-Mobile, "T-Mobile Completes Nation's First Live Commercial Network Test of License Assisted Access (LAA)", *T-Mobile US, Inc.*, Estados Unidos, 26 de junio de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en: <https://newsroom.t-mobile.com/news-and-blogs/lte-u.htm>
18. AT&T, "AT&T Reaches Wireless Speeds of More than 750 Mbps with LTE Licensed Assisted Access (LTE-LAA) Field Trials", *AT&T, Inc.*, Estados Unidos, 26 de junio de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

http://about.att.com/story/lte_licensed_assisted_access_field_trials.html

19. Fuetsch, Andre, "Accelerating AT&T Network 3.0 Indigo with 5G and 5G Evolution, Open Source Software and Data Analytics", *AT&T, Inc.*, Estados Unidos, 27 de febrero de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

https://about.att.com/innovationblog/accelerating_network

20. DeGrasse, Martha, "Verizon starts nationwide LAA deployment", *RCR Wireless News*, Estados Unidos, 4 de agosto de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

<https://www.rcrwireless.com/20170804/carriers/verizon-starts-nationwide-laa-deployment-tag4>

21. Knapp, Julius, "OET Authorizes First LTE-U devices", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 22 de febrero de 2017. Consultado el 18 de diciembre de 2017, disponible en:

<https://www.fcc.gov/news-events/blog/2017/02/22/oet-authorizes-first-lte-u-devices>



II. Tecnologías emergentes basadas en MIMO

Multiple-Input Multiple-Output o MIMO, es una tecnología para comunicaciones inalámbricas que utiliza múltiples antenas en los transmisores y receptores para incrementar la capacidad del canal de comunicación y permitir un uso más eficiente de los recursos espectrales. Esta tecnología aprovecha el fenómeno de propagación de señales por multitrayectoria (en la cual las ondas de radio emitidas por una antena transmisora llegan al equipo receptor en diferentes tiempos debido a que recorren diferentes trayectorias), para que en el sistema de recepción se combinen las señales entrantes, incrementando así el nivel de potencia recibida. La tecnología MIMO está dedicada a brindar soluciones a los servicios de telefonía móvil celular cuya arquitectura depende, de forma general, de las estaciones base.

2.1 Configuración de antenas

Las comunicaciones inalámbricas (satelitales, WLAN's, redes WiMAX, redes de telefonía celular, etc.) utilizan antenas MIMO con diversas configuraciones. La configuración más común es conocida como *Single Input Single Output (SISO)*, la cual aprovecha diversos modelos de procesamiento y codificación en el dominio del tiempo o la frecuencia para obtener la información transmitida/recibida. Así también, dependiendo de la disponibilidad de múltiples antenas en los transmisores/receptores, se puede hacer uso de otras configuraciones más dinámicas en el proceso de comunicación conocidas como *Single Input Multiple Output (SIMO)* y *Multiple Input Single Output (MISO)*, las cuales se describen a continuación y son ejemplificadas en la Figura 2.1.

2.1.1 SIMO

La configuración SIMO funciona mediante una antena para la transmisión y múltiples antenas para la recepción de señales. Esta configuración es también conocida como de diversidad en recepción, la cual es usualmente implementada en sistemas con receptores que detectan señales de fuentes independientes para combatir los efectos del *fading* (desvanecimiento). Existen dos formas de operación de los sistemas con configuración SIMO:

- **Diversidad de conmutación (*Switched Diversity*)**. En esta configuración el sistema receptor con SIMO, selecciona la antena que detecta la señal con el nivel de potencia más alto para así obtener la señal recibida.
- **Combinación de relación máxima (*Maximum ratio combining*)**. En esta configuración el sistema combina y suma todas las señales recibidas para obtener la señal original.

2.1.2 MISO

MISO, también conocida como diversidad en transmisión, es una configuración de antenas que se encarga de transmitir información de manera redundante desde múltiples antenas transmisoras, mientras que el receptor se encarga de detectar las transmisiones y extraer la señal deseada. En este caso, la sección encargada de la codificación y procesamiento de redundancia se encuentra en el transmisor, lo cual hace posible disminuir el tamaño, costo y consumo de energía de los dispositivos receptores.

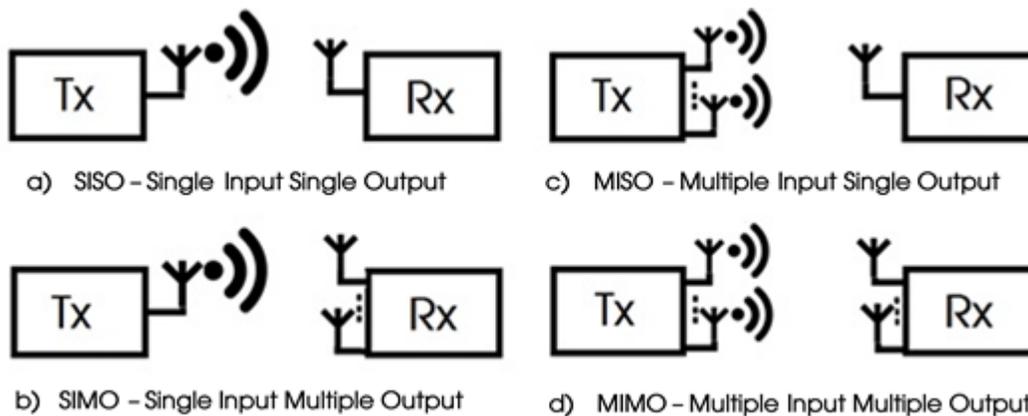


Figura 2.1. Configuraciones de antenas en transmisores y receptores: a) SISO, b) SIMO, c) MISO y d) MIMO.

2.2 Clasificación MIMO

Se pueden distinguir principalmente dos modalidades de operación de los sistemas con configuración de antenas MIMO (ver Tabla 2.1):

- **Single User - MIMO (SU-MIMO)**. Es la configuración más simple de MIMO, en donde la comunicación se realiza de punto a punto. Fue implementado en la primera versión de LTE (*Release 8*¹).

¹ Para mayor información consúltese en: http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-08_description_20140924.zip

- **Multiple User - MIMO (MU-MIMO).** Esta configuración permite establecer múltiples comunicaciones de manera simultánea usando los mismos recursos en el dominio del tiempo y la frecuencia.

Tabla 2.1. Comparación entre SU-MIMO y MU-MIMO.

Tecnología	SU-MIMO	MU-MIMO
Principal característica	Una estación base o punto de acceso puede comunicarse con un solo usuario.	Una estación base o punto de acceso puede comunicarse con múltiples usuarios.
Objetivo	La tasa de transmisión incrementa para un solo usuario.	Mayor cantidad de usuarios en el sistema MIMO.
Beneficios	Reduce la interferencia.	Mejora en las tasas de transmisión y calidad del servicio, proporciona mayor cantidad de usuarios por multiplexaje.
Información de Estado de Canal (IEC)²	No se requiere IEC.	Se requiere de un perfecto conocimiento de IEC.

2.3 Funcionamiento

Las dos principales técnicas utilizadas en el funcionamiento de MIMO para mejorar el canal de comunicación en lo referente a desvanecimientos y multitrayectorias son la "diversidad espacial" y el "multiplexaje espacial", las cuales son explicadas a continuación.

2.3.1 Diversidad espacial

La diversidad espacial consiste en crear canales de transmisión independientes sin hacer uso de un ancho de banda adicional, mediante el envío y recepción de señales a través de diferentes trayectorias físicas. Usualmente esta técnica se refiere a la diversidad de transmisión o recepción, las cuales son utilizadas para mejorar los niveles del SNR y se caracterizan por mejorar la confiabilidad del sistema de comunicaciones respecto a los problemas de desvanecimiento de la señal. Para proveer diversidad espacial a un sistema de comunicaciones inalámbrico se pueden implementar dos esquemas diferentes:

² IEC se refiere a las propiedades observables del canal de comunicación, como las condiciones de dispersión, desvanecimiento y atenuación de la señal.

- **Direccionamiento del haz**, en el cual se varían los parámetros físicos de las antenas para dirigir a conveniencia la energía radiada y así evitar que la antena emita energía en direcciones en las que podría ocasionar interferencia.
- **Diversidad de transmisión/recepción**, el cual está basado en el procesamiento de señales en el transmisor/receptor, cuyo objetivo es el de obtener una diversidad espacial para robustecer el sistema. En este esquema para decodificar la transmisión original se selecciona de forma dinámica el conjunto de antenas con mejor recepción/transmisión o se combinan las señales recibidas.

2.3.2 Multiplexaje espacial

El multiplexaje espacial se basa en la creación de múltiples canales dentro de una misma banda de frecuencias para procesar diferentes conjuntos de datos de forma simultánea. El multiplexaje espacial permite aumentar la capacidad de los canales al utilizar las multitrayectorias de la señal para transportar tráfico adicional. Así, esta técnica de multiplexaje permite mejorar las tasas de transmisión al recibir y transmitir más información dentro de un determinado ancho de banda.

2.4 Ventajas y desventajas generales de MIMO

2.4.1 Ventajas

Algunos de los beneficios que la tecnología MIMO proporciona son:

- Mejora en el desempeño del sistema de comunicaciones aún en condiciones tales como efectos de multitrayectoria, interferencia y desvanecimiento.
- Proporciona tasas de transmisión superiores en comparación con configuraciones SISO.
- Proporciona amplios rangos de cobertura y valores altos de confiabilidad del sistema de comunicaciones sin requerir de anchos de banda adicionales o de un ajuste en las potencias de transmisión.
- Puede ser utilizada para desplegar aplicaciones multimedia, WLAN's, aplicaciones inalámbricas de corto alcance o sistemas de radar.

2.4.2 Desventajas

Algunas desventajas de los sistemas de comunicaciones con tecnología MIMO son:

- Su implementación es costosa debido a la alta complejidad en la fabricación de los arreglos de antenas en comparación con los sistemas de comunicaciones que implementan antenas individuales.
- El número de antenas dentro de los dispositivos terminales está limitado por las dimensiones físicas del equipo, el consumo de energía y los costos.
- La ganancia del sistema de comunicaciones que se obtiene por medio del multiplexaje espacial puede disminuir en caso de altos niveles de interferencia, condiciones no favorables del canal de transmisión, etc.

2.5 Tecnologías emergentes basadas en MIMO

La tecnología MIMO ya está implementada en estándares inalámbricos tales como el IEEE 802.11n, IEEE 802.16, los *Releases* sobre LTE del 3GPP y WiMAX móvil. No obstante, actualmente MIMO sigue siendo considerada como un área activa de investigación, por lo que la industria en conjunto con la academia se encuentra estudiando nuevas tecnologías que utilizan MIMO, las cuales se describen a continuación.

2.5.1 Cooperative MIMO (C-MIMO)

Cooperative MIMO (C-MIMO), también conocida como *Distributed MIMO* o *Virtual MIMO*, es una técnica cooperativa de nodos con antenas individuales pertenecientes a una misma red. En este caso, la agrupación de múltiples dispositivos en arreglos virtuales de antenas simula el funcionamiento de las antenas MIMO.

Existen tres tipos de C-MIMO aplicados en redes inalámbricas: *Coordinated MultiPoint transmission* (CoMP), modelo de repetidor fijo y modelo de repetidor móvil, los cuales se ilustran en la Figura 2.2.

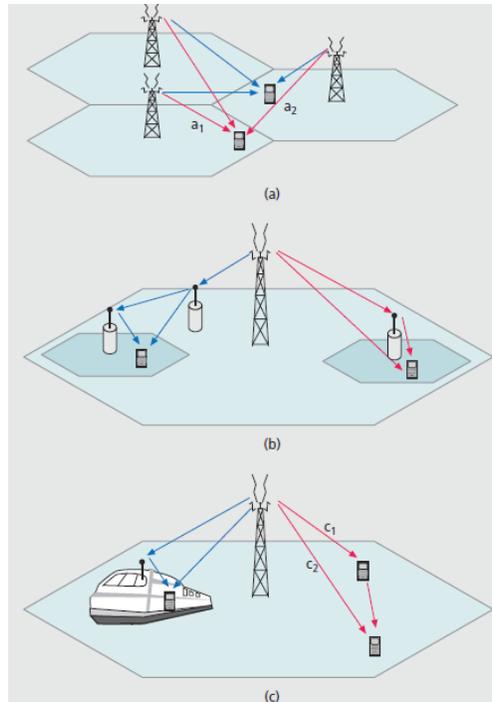


Figura 2.2. Tipos de C-MIMO: a) CoMP, b) Repetidor fijo y c) Repetidor móvil³.

2.5.1.1 Coordinated MultiPoint transmission (CoMP)

CoMP es una tecnología la cual busca combatir la interferencia entre celdas y mejorar el desempeño del sistema en los límites de las mismas. CoMP se basa en la compartición de datos e información IEC entre estaciones base cercanas para coordinar las transmisiones en el enlace de bajada y procesar en conjunto las señales del enlace de subida, logrando convertir la interferencia entre celdas en señales útiles. Cabe señalar que CoMP se encuentra en estudio por el 3GPP para ser implementada en sus estándares 4G⁴.

Para realizar una compartición espectral, se pueden utilizar arquitecturas de red denominadas *Heterogeneous Networks* (HetNets), las cuales están formadas principalmente por una variedad de picoceldas y femtoceldas (y en algunos casos macroceldas) que operan con bajas potencias de transmisión. Este tipo de configuraciones involucran un nivel alto de interferencia entre puntos de acceso, sobre todo en el caso de macroceldas. Para abordar esta problemática se puede optar por una operación cooperativa entre puntos de acceso o estaciones base (según el tipo de red), en donde éstos se encuentren coordinados y puedan transmitir

³ Wang, Cheng-Xian *et al.*, "Cooperative MIMO Channel Models: A Survey", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2010, p. 81.

⁴ *Idem*, p. 80.

en el dominio de la frecuencia, tiempo o espacio. Para realizar lo anterior, la tecnología CoMP utiliza tres métodos: programación coordinada y direccionamiento coordinado del haz, transmisión conjunta y selección dinámica de celdas⁵.

- **Programación coordinada y direccionamiento coordinado del haz.** La programación coordinada es una técnica que divide a una red en grupos de celdas y los programa para determinar los intervalos de tiempo en que una estación base puede transmitir y los dispositivos con los que puede establecer un enlace de comunicación. La técnica de direccionamiento coordinado del haz se utiliza para incrementar el valor del SINR⁶ al calcular los niveles óptimos de potencia de transmisión y los parámetros de direccionamiento del haz. Estas dos técnicas son utilizadas en conjunto para reducir la interferencia entre múltiples usuarios y entre múltiples celdas.
- **Transmisión conjunta.** La transmisión conjunta es una transmisión simultánea de datos hacia un dispositivo desde múltiples estaciones base coordinadas. Esta técnica es particularmente útil en los límites de las coberturas de cada estación base, ya que una señal interferente (procedente de otras celdas) puede convertirse en una señal deseada para el dispositivo.
- **Selección dinámica de celda.** En la selección dinámica de celda, los datos pueden ser transmitidos desde las estaciones base coordinadas hacia un dispositivo, pero no de manera simultánea como en la técnica de transmisión conjunta. Este método permite que los dispositivos sean programados de manera dinámica para establecer un enlace de comunicación con la estación base más apropiada de acuerdo a las condiciones del canal de transmisión

2.5.1.2 Repetidor fijo

El modelo de repetidor fijo se basa en una infraestructura de radio fija denominada estación repetidora, la cual usualmente tiene potencias de transmisión más bajas y coberturas más limitadas que una estación base.

Este tipo de configuración se puede desplegar para extender la cobertura de las redes de telefonía celular, reducir la potencia de transmisión total del

⁵ Lee, Daewon *et al.*, "Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced: Deployment Scenarios and Operational Challenges", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2012, pp. 150-152.

⁶ En telecomunicaciones, la Relación Señal a Ruido más Interferencia o SINR (del inglés *Signal to Interference-plus-Noise Ratio*) es la relación de la señal deseada respecto a los componentes indeseados como el ruido y la interferencia.

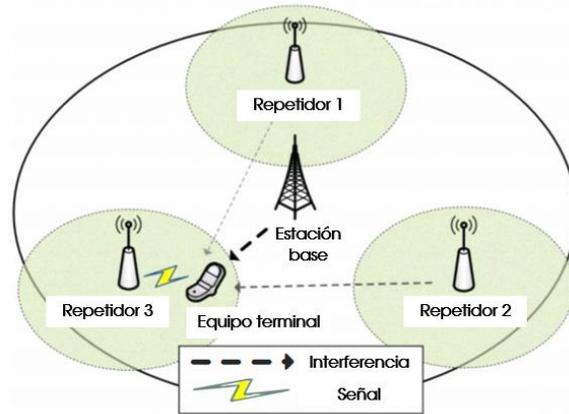


Figura 2.3. Interferencia co-canal causada por reuso de frecuencias⁷.

sistema y mejorar tanto la recepción de las señales como la capacidad del sistema en una región específica que tenga una demanda de tráfico elevada. No obstante, los repetidores fijos introducen latencia adicional a la señal y pueden llegar a incrementar el nivel de interferencia entre repetidores y estaciones base debido a que comparten el mismo ancho de banda (véase Figura 2.3).

El estándar IEEE 802.16-2012⁸ incorpora la configuración de repetidor fijo para mejorar el desempeño de los sistemas WiMAX. En estos sistemas se puede hacer uso de la característica de diversidad en transmisión y recepción de datos que posee MIMO, lo cual habilita las siguientes configuraciones:

- Combinar señales provenientes de diversos repetidores.
- Seleccionar un solo repetidor para transmitir.
- Optar por una transmisión entre estaciones base y equipos terminales sin repetidores de por medio.
- Adaptarse dinámicamente entre las tres configuraciones anteriores dependiendo de las condiciones del canal de transmisión y la disponibilidad de los recursos espectrales.

La familia de estándares IEEE 802.16 está diseñada para operar entre 2 y 11 GHz (logrando operar en bandas de frecuencias concesionadas o de uso libre), pero el despliegue de la tecnología a nivel global opera comúnmente

⁷ Mangayarkarasi, P. *et al.*, "Performance analysis in IEEE 802.16j Mobile Multi-hop Relay networks (MMR)", *International Conference on Communication and Signal Processing*, India, 2012, p. 121.

⁸ IEEE, "IEEE Std 802.16-2012. IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Estados Unidos, 17 de agosto de 2012, p. 7.

en las frecuencias 2.3, 2.5, 3.5 y 5.7 GHz. Además, estos estándares utilizan OFDMA y soportan anchos de banda de canal de 1.25 a 20 MHz⁹.

En el estándar IEEE 802.16-2012 las estaciones base y las estaciones repetidoras comparten las bandas de frecuencia con todo el sistema al implementar un reuso de frecuencias. De esta forma, los mismos recursos espectrales pueden aprovecharse por múltiples usuarios que se encuentren separados espacialmente. Adicionalmente, IEEE 802.16-2012 utiliza un sistema de codificación y modulación adaptativo, el cual selecciona el esquema de modulación de acuerdo a los niveles de SINR de la señal.

2.5.1.3 Repetidor móvil

En este caso, las estaciones repetidoras involucradas son móviles. Estos repetidores son más flexibles y se pueden adaptar a distintos ambientes. Los repetidores móviles pueden extender el rango de cobertura de la señal, reducir la potencia de transmisión utilizada e incrementar la capacidad del sistema en los límites de las celdas. Sin embargo, por sus características, los repetidores móviles involucran una topología muy dinámica e inestable, lo que puede provocar niveles altos de desvanecimiento de la señal y procesos de interferencia impredecibles. Adicionalmente, el estándar IEEE 802.16-2012 también soporta la modalidad de repetidor móvil y su propósito es extender la cobertura del sistema y mejorar el desempeño del mismo, especialmente aumentando las tasas de transmisión en los límites de cobertura.

Los repetidores móviles se emplean de la siguiente manera:

- **Redes móviles.** Este tipo de redes hacen uso de estaciones repetidoras móviles, las cuales pueden estar implementadas en diversos sistemas de transporte. El propósito de este tipo de topología es la mejora de la cobertura a partir de su característica de movilidad.
- **Usuarios móviles.** Es cuando se habilita a un dispositivo móvil como repetidor (dispositivo con funcionalidades *Device-to-Device*, *D2D*) para complementa la red de telefonía celular usando transmisiones de tipo *multihop*¹⁰.

⁹ Abate, Zerihun, *WiMax RF Systems Engineering*, Estados Unidos, Artech House, 2009, pp. 11 y 20.

¹⁰ Las redes inalámbricas *multihop* están constituidas por dispositivos inalámbricos fijos y/o móviles capaces de reenviar información, pudiendo funcionar como repetidores entre un equipo transmisor (fuente de la transmisión) y un equipo receptor (destinatario final de la transmisión).

2.5.1.4 Ventajas y desventajas de C-MIMO

Ventajas.

Entre las ventajas que la tecnología C-MIMO puede proporcionar frente a los sistemas con tecnología MIMO convencional, se encuentran:

- Mayores coberturas de la red.
- Mejora de las tasas de transmisión en los límites de cobertura de las celdas.
- Transformación de las señales de interferencia entre celdas a señales útiles.
- Mejor uso del espectro por medio del reuso de frecuencias.
- Mejora de la capacidad del sistema en regiones con condiciones de tráfico elevadas.

Desventajas.

Algunas desventajas importantes de C-MIMO frente a MIMO convencional incluyen:

- Latencia adicional de la señal transmitida debido a los múltiples reenvíos de información a través de diversos dispositivos.
- La topología resultante al utilizar C-MIMO es dinámica e inestable, lo que provoca niveles altos de desvanecimiento de la señal y procesos de interferencia impredecibles.
- Se requiere de una mayor infraestructura al incluir estaciones repetidoras múltiples.

2.5.2 Massive MIMO

Massive MIMO, también conocido como *hyper MIMO* o *MIMO full-dimension*, es una tecnología emergente consistente en un arreglo de múltiples antenas (en el orden de cientos o miles) que permiten manipular las características del haz radiado. El objetivo principal de esta configuración es obtener los beneficios de MIMO pero a una escala más grande en cuanto a cantidad de usuarios, infraestructura y optimización de recursos espectrales, en donde además sea posible que las estaciones base con tecnología *massive MIMO* transmitan y reciban información con múltiples dispositivos de manera simultánea y eficiente.

Los avances tecnológicos de *massive MIMO* que se han obtenido hasta ahora se han realizado principalmente en frecuencias por debajo de los 6

GHz. No obstante, se pueden aplicar los mismos conceptos para desarrollar esta tecnología en bandas de ondas milimétricas (entre 30 a 300 GHz)¹¹.

Al usar grandes arreglos de antenas en un sistema con tecnología MIMO, la directividad de las antenas aumenta considerablemente. El espaciamiento entre antenas dentro del arreglo puede ser menor que la medida convencional de media longitud de onda y se ha propuesto TDD para su operación.

2.5.2.1 Funcionamiento

Los arreglos de antenas en un sistema *massive* MIMO pueden desplegarse con diferentes configuraciones físicas, por ejemplo, pueden ser arreglos lineales, distribuidos, cilíndricos o rectangulares, tal como se muestra en la Figura 2.4.

Massive MIMO basa su funcionamiento en la técnica de multiplexaje espacial, la cual requiere que la estación base o punto de acceso conozca el estado de ocupación e información IEC de los canales de comunicación en los enlaces de subida y de bajada. La información del enlace de subida es proporcionada por los dispositivos o equipos terminales, los cuales envían señales piloto para que la estación base pueda estimar las respuestas por canal de cada dispositivo. En el caso del enlace de bajada el diseño del sistema es más complejo de implementar debido a que se necesitan hasta 100 veces más recursos de espectro, comparado con los sistemas convencionales, para que las señales piloto del enlace baja sean mutuamente ortogonales entre sí¹².

¹¹ Björnson, Emil *et al.*, "Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2016, p. 116.

¹² *Idem*, p. 115.

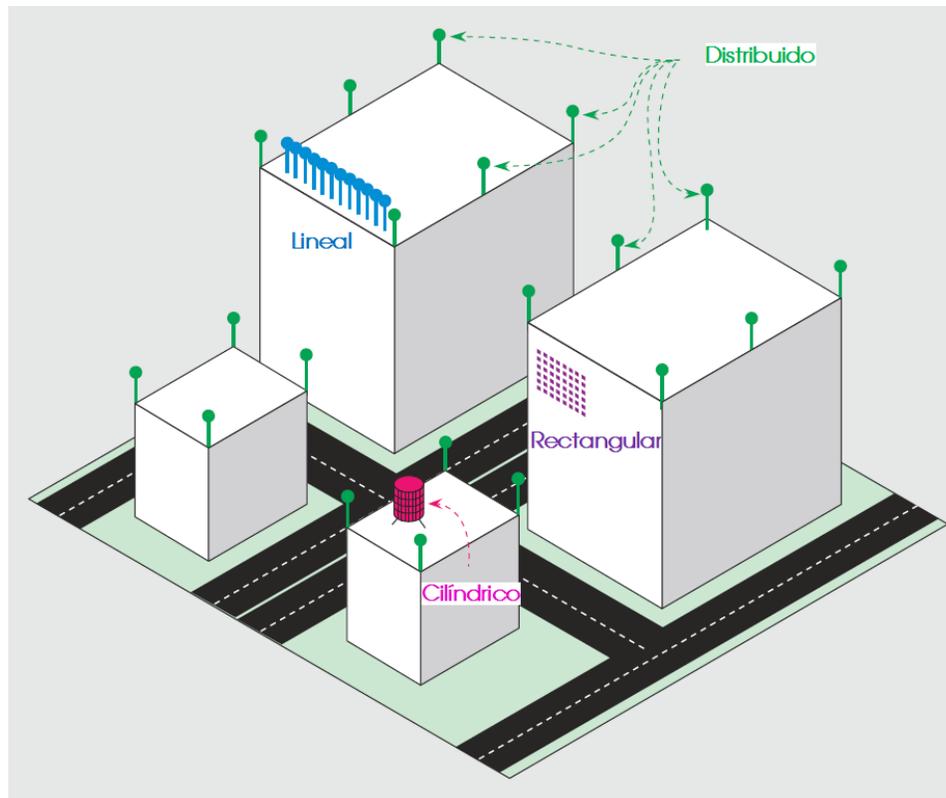


Figura 2.4. Configuraciones de arreglos de antenas en un sistema massive MIMO¹³.

Como se ha mencionado anteriormente, una de las características de los sistemas MIMO es la implementación de técnicas que permitan controlar el direccionamiento del haz. Para poder lograr lo anterior, cada antena debe de contar con un desplazador de fase, el cual modifica la fase de la señal transmitida para así direccionar el haz radiado en una dirección determinada. En este sentido, existen dos categorías de agrupaciones de antenas que permiten controlar el direccionamiento del haz radiado, las cuales son las siguientes:

- **Sistemas de Antenas en Arreglos de Fase (SAAF):** estos sistemas tienen preconfigurados distintos patrones de radiación y el sistema puede seleccionar dichos patrones de acuerdo a la dirección requerida. Los sistemas SAAF requieren tener el conocimiento de la localización del objetivo de la transmisión para seleccionar el patrón más adecuado. Sin embargo, dado que los arreglos de fase presentan configuraciones de fase ya establecidas, el patrón de radiación que se obtiene a partir de éstos es difícil, e incluso imposible, que sea

¹³ Larsson, Erik G. *et al.*, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2014, p. 187.

modificado a voluntad, provocando así que el direccionamiento del haz siempre se emita en direcciones ya preestablecidas.

- **Sistemas de Antenas en Arreglos Adaptativos (SAAA):** como su nombre lo indica, estos sistemas son de tipo adaptativo y contienen un número infinito de patrones de radiación, los cuales pueden ser ajustados de acuerdo a los requerimientos en tiempo real de la comunicación. Los sistemas SAAA pueden adaptar la forma del haz exactamente en las direcciones requeridas, sin embargo, el costo y complejidad del mismo es considerablemente mayor que en los sistemas SAAF.

Una de las principales características de *massive* MIMO es que los canales siempre están en condiciones favorables con la mayoría de los entornos de propagación. Además, dependiendo del arreglo de antenas, se puede obtener altas eficiencias espectrales y un ahorro de energía del sistema. Asimismo, actualmente esta tecnología es estudiada en conjunto con los sistemas de Radio Cognitivo (en el cual se profundizará en el Capítulo siguiente) para obtener más grandes tasas de transmisión. Por lo anterior, *massive* MIMO es considerado como una tecnología viable para el despliegue de sistemas de comunicaciones 5G¹⁴.

2.5.2.2 Prototipos experimentales e implementación

Aunque la tecnología *massive* MIMO todavía se encuentra en un estado inicial de desarrollo, existen diversos prototipos experimentales realizados en distintas partes del mundo, los cuales se describen a continuación.

- **ARGOS.** Es un sistema *massive MIMO* desarrollado por la Universidad Rice, en Estados Unidos, en cooperación con la compañía Alcatel-Lucent, cuya arquitectura consiste en un arreglo plano de 64 antenas. El sistema se diseñó de manera modular y escalable, operando en la banda de 2.4 GHz. Las pruebas obtenidas de ARGOS mostraron la posibilidad de operar con TDD basado en la reciprocidad de los canales de transmisión, logró soportar hasta 15 usuarios de manera simultánea, 20 MHz de ancho de banda para la transmisión de información y 85 bps/Hz de capacidad espectral¹⁵.
- **NGARA.** La *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) propuso la utilización de un sistema *massive*

¹⁴ Wang, Lifeng *et al.*, "Massive MIMO in Spectrum Sharing Networks: Achievable Rate and Power Efficiency", *IEEE Systems Journal*, 16 de julio de 2015, p. 20.

¹⁵ Shepard, Clayton *et al.*, "Argos: Practical Many-Antenna Base Stations", *The 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Turquía, agosto de 2012, p. 9. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <http://argos.rice.edu/pubs/Shepard-MobiCom12.pdf>

MIMO multi usuario con OFDMA para incrementar la eficiencia espectral de los sistemas fijos inalámbricos de acceso múltiple en áreas rurales en Australia. Para esto, la CSIRO planeó el desarrollo de dos prototipos: Ngara fase 1 y Ngara fase 2.

Ngara fase 1: soporta seis usuarios, proporciona 12 Mbps en el enlace de subida, 12 Mbps en el enlace de bajada y utiliza un ancho de banda de 7 MHz¹⁶. Las pruebas con este prototipo se llevaron a cabo en áreas rurales y en el laboratorio de radio física del CSIRO en Sydney.

Ngara fase 2: usa un arreglo de antenas de 32 elementos y puede soportar hasta 18 usuarios de manera simultánea por medio de multiplexaje espacial. Cada usuario presentó tasas de transmisión de 50 Mbps tanto en el enlace de subida como en el de bajada. Se utilizaron las frecuencias 806 MHz y 638 MHz para los enlaces de subida y de bajada respectivamente, cada una con un ancho de banda de 14 MHz. Las frecuencias anteriores se eligieron de tal manera que sean utilizadas en un futuro por sistemas de comunicación inalámbricos una vez que el dividendo digital australiano finalice (694-820 MHz). Así, el enlace de bajada del sistema Ngara se encontrará cercano al enlace de bajada del servicio de radiodifusión de TV digital¹⁷.

- **LuMaMi.** La compañía *National Instruments* en conjunto con la Universidad Lund en Suecia, anunció su colaboración para desarrollar un prototipo *massive MIMO* basado en el sistema LabVIEW de la compañía. Este prototipo, denominado LuMaMi, consiste de un arreglo escalable de 128 antenas que operan de 1.2 GHz a 6 GHz, y ocupa 20 MHz de ancho de banda por canal¹⁸. En algunas pruebas se utilizó 3.7 GHz como frecuencia de operación y un arreglo de 100 antenas. De esta manera, el sistema pudo soportar hasta 10 usuarios de manera simultánea y una tasa de transmisión de hasta 3.2 Gbps¹⁹. La Universidad de Bristol en Inglaterra, ha participado junto a la Universidad de Lund en algunas pruebas con el prototipo y en estas se utilizó 3.51 GHz como frecuencia de operación y un arreglo de 128

¹⁶ Suzuki, Hajime *et al.*, "Highly Spectrally Efficient Ngara Rural Wireless Broadband Access Demonstrator", *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2012, p. 914.

¹⁷ *Ídem*, p. 915.

¹⁸ National Instruments, "5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality", Estados Unidos, 22 de agosto de 2017. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/#toc4>

¹⁹ Vieira, Joao *et al.*, "A flexible 100-antenna testbed for Massive MIMO", *IEEE Globecom 2014 Workshop - Massive MIMO: From Theory to Practice*, Estados Unidos, 2014, p. 290.

antenas. El sistema implementado soportó una conectividad inalámbrica de hasta 12 dispositivos, compartiendo un canal de 20 MHz. Además, el sistema alcanzó una tasa de transmisión de 1.59 Gbps²⁰.

- **Samsung.** La compañía Samsung ha desarrollado pruebas implementando *massive* MIMO, y ha logrado una tasa de transmisión de hasta 1.056 Gbps en rangos de hasta 2 km, usando un arreglo de 64 antenas y operando en la banda de frecuencias de 28 GHz. Este prototipo puede controlar la dirección de la señal de manera electrónica, pero no se han publicado los detalles de su funcionamiento. Adicionalmente, la compañía ha expresado que los ejemplares comerciales del prototipo experimental solo estarán disponibles a partir de 2020²¹.

En la Tabla 2.2 se muestra un comparativo de diferentes prototipos experimentales realizados a nivel internacional, en donde se incluyen sus principales parámetros. En este comparativo se menciona el prototipo prueba de la compañía Samsung.

Tabla 2.2. Pruebas experimentales reportadas de *massive* MIMO.

Prototipo	Banda de frecuencias de operación (GHz)	Número de antenas en el arreglo de la estación base	Número máximo de usuarios	Tasa de transmisión conseguida (Gbps)
LuMaMi (Universidad de Lund)	1.2 - 6	100	10	3.2
ARGOS (Universidad Rice)	2.4	64	15	1.7
Ngara (CSIRO)	0.8	32	18	0.05
Prototipo de Samsung ²²	1-28	64	NA	1.056

²⁰ University of Bristol, "Bristol and Lund set a new world record in 5G wireless spectrum efficiency", *University of Bristol (News)*, Reino Unido, 23 de marzo de 2016. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.bristol.ac.uk/news/2016/march/massive-mimo.html>

²¹ Ricknäs, Mikael, "Samsung takes first 5G steps with advanced antenna. But not everyone is convinced the underlying technology will work", *PC World From IDG (News)*, Australia, 13 de mayo de 2013. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <https://www.pcworld.idg.com.au/article/461656/>

²² *Ídem.*

2.5.2.3 Ventajas y desventajas de massive MIMO

Ventajas:

- Permite concentrar la energía radiada del arreglo de antenas en espacios delimitados dependiendo al número de antenas del sistema, lo cual proporciona una mejora considerable en el ahorro de energía.
- Debido a su funcionamiento habilita nuevos esquemas de servicios (pensados principalmente para ser ofertados en redes 5G), por ejemplo, *massive MIMO* se ha propuesto como una opción viable para habilitar servicios D2D debido a su alta direccionalidad.
- Presenta un aumento en la eficiencia espectral al aumenta el número de canales disponibles para la transmisión sin modificar el ancho de banda.
- Brinda de robustez a la señal frente a las diversas condiciones de propagación, por ejemplo, efectos de multitrayectoria, interferencia y desvanecimiento de las señales, etc.
- Reduce la latencia de las señales transmitidas en la interfaz aérea.
- Los prototipos de la tecnología *massive MIMO* presentan altos valores de tasas de transmisión en comparación con los sistemas convencionales MIMO

Desventajas:

- Debido a que *massive MIMO* genera grandes cantidades de datos al incrementar el número de antenas, aún no se cuentan con métodos y/o algoritmos eficientes que logren procesar en tiempo real grandes cantidades de datos.
- Resulta costoso implementar arreglos *massive MIMO* debido a las características de las antenas y a la gran cantidad de las mismas.
- El sistema *massive MIMO* demanda de grandes cantidades de energía cuando procesa los datos.

Dado a que no hay una homologación sobre la cantidad mínima o máxima que deberían de conformar a un sistema *massive MIMO*, se ha propuesto que se desarrollen aplicaciones dedicadas para *massive MIMO* que no requieran de una compatibilidad establecida o que se desarrolle esta tecnología como una alternativa para el *backhaul* de sistemas en operación, por ejemplo de LTE²³.

²³ Ricknäs, Mikael, "Samsung takes first 5G steps with advanced antenna. But not everyone is convinced the underlying technology will work", *PC World From IDG (News)*, Australia, 13 de mayo de 2013. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <https://www.pcworld.idg.com.au/article/461656/>

2.6 Referencias

1. UIT-T, "Recomendación UIT-T Q.1741.2. Requisitos y protocolos de señalización para IMT-2000. Referencias de las IMT-2000 a la versión 5 de la red medular del sistema de telecomunicaciones móviles universales derivada del sistema global para comunicaciones móviles", *Sector de Normalización de las Telecomunicaciones de la UIT (Serie Q, Conmutación y Señalización)*, Suiza, septiembre de 2003. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=s&id=T-REC-Q.1741.3-200309-!!!PDF-S&type=items
2. Wang, Cheng-Xian *et al.*, "Cooperative MIMO Channel Models: A Survey", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2010.
3. Lee, Daewon *et al.*, "Coordinated Multipoint Transmission and Reception in LTE-Advanced: Deployment Scenarios and Operational Challenges", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2012.
4. Mangayarkarasi, P. *et al.*, "Performance analysis in IEEE 802.16j Mobile Multi-hop Relay networks (MMR)", *International Conference on Communication and Signal Processing*, India, 2012.
5. IEEE, "IEEE Std 802.16-2012. IEEE Standard for Air Interface for Broadband Wireless Access Systems", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Estados Unidos, 17 de agosto de 2012.
6. Abate, Zerihun, *WiMax RF Systems Engineering*, Estados Unidos, Artech House, 2009.
7. Björnson, Emil *et al.*, "Massive MIMO: Ten Myths and One Critical Question", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2016.
8. Larsson, Erik G. *et al.*, "Massive MIMO for Next Generation Wireless Systems", *IEEE Communications Magazine*, febrero de 2014.
9. Wang, Lifeng *et al.*, "Massive MIMO in Spectrum Sharing Networks: Achievable Rate and Power Efficiency", *IEEE Systems Journal*, 16 de julio de 2015.
10. Shepard, Clayton *et al.*, "Argos: Practical Many-Antenna Base Stations", *The 18th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*, Turquía, agosto de 2012. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <http://argos.rice.edu/pubs/Shepard-MobiCom12.pdf>
11. Suzuki, Hajime *et al.*, "Highly Spectrally Efficient Ngara Rural Wireless Broadband Access Demonstrator", *International Symposium on Communications and Information Technologies (ISCIT)*, 2012.
12. National Instruments, "5G Massive MIMO Testbed: From Theory to Reality", Estados Unidos, 22 de agosto de 2017. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.ni.com/white-paper/52382/en/#toc4>

13. Vieira, Joao *et al.*, "A flexible 100-antenna testbed for Massive MIMO", *IEEE Globecom 2014 Workshop - Massive MIMO: From Theory to Practice*, Estados Unidos, 2014.
14. University of Bristol, "Bristol and Lund set a new world record in 5G wireless spectrum efficiency", *University of Bristol (News)*, Reino Unido, 23 de marzo de 2016. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.bristol.ac.uk/news/2016/march/massive-mimo.html>
15. Ricknäs, Mikael, "Samsung takes first 5G steps with advanced antenna. But not everyone is convinced the underlying technology will work", *PC World From IDG (News)*, Australia, 13 de mayo de 2013. Consultado el 25 de octubre de 2017, disponible en: <https://www.pcworld.idg.com.au/article/461656/>

III. Radio Cognitivo

Con el fin de optimizar el uso del espectro, continuamente se impulsan nuevas tecnologías y esquemas regulatorios flexibles para mejorar el funcionamiento de las redes de comunicación inalámbricas: una de estas tecnologías es el Radio Cognitivo (RC). Para habilitar el uso de esta tecnología es necesario la presencia de las siguientes partes: el Regulador, la entidad nacional encargada de administrar el espectro; el usuario primario, aquella entidad que tiene derechos en la explotación y uso de una determinada cantidad de espectro; y el usuario secundario, aquella entidad que busca acceder al espectro del usuario primario.

De forma general, la tecnología RC permite el acceso a aquellos usuarios secundarios que deseen operar en las bandas de frecuencia en las que opera el usuario primario, toda vez que éstos no utilicen el espectro en el dominio del espacio y tiempo. Dicho acceso es logrado a través de un método dinámico y coordinado, así como un esquema que garantice la mínima interferencia posible.

De acuerdo a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT)

¹, el RC es un sistema radioeléctrico con tecnología que permite:

- Obtener información del entorno operacional y geográfico de la regulación establecida, patrones de uso espectral y del estado interno del sistema (habilidad cognitiva).
- Ajustar de manera dinámica y autónoma los parámetros operacionales y protocolos de funcionamiento de acuerdo a la información obtenida del entorno operacional (habilidad de reconfiguración).
- Extraer enseñanzas de los resultados obtenidos (habilidad de aprendizaje²).

De manera general, los sistemas RC consisten de un radio (analógico o digital, portátil y/o como parte interna del sistema), un módulo para

¹ UIT-R, "Informe UIT-R SM.2152. Definiciones de sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) y sistema radioeléctrico cognoscitivo (SRC)", *Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (Serie SM, Gestión del Espectro)*, Suiza, septiembre de 2009, p. 2. Consultado el 23 de octubre de 2017, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-S.pdf

² Los RC implican cierto grado de inteligencia artificial en su operación, por lo que las palabras "aprendizaje", "cognición", "automatización", "cooperación", "razonamiento", etc., caracterizan a este tipo de sistemas y serán mencionadas de forma muy común a lo largo del documento.

detectar las señales radioeléctricas, bases de datos, un módulo de aprendizaje, herramientas para optimizar el sistema y un módulo de razonamiento. Cabe mencionar que para propósitos de este estudio, el término "radio" es considerado como cualquier dispositivo transceptor utilizado para intercambiar información digital o analógica³.

Además, los sistemas RC pueden operar tanto en espectro de uso concesionado como en espectro de uso libre. En la primera modalidad, la comunicación de los usuarios secundarios se realiza en los periodos de tiempo en el que el usuario primario no está utilizándolo. En la segunda modalidad, se utilizan algoritmos de compartición espectral para coexistir con otras tecnologías de acceso oportunista, tales como la dispersión de la señal transmitida a lo largo de un gran ancho de banda (tecnologías de espectro disperso) o el establecimiento de límites de emisión de las señales transmitidas para mitigar la interferencia entre tecnologías.

Actualmente, existen dos tipos de RC: el radio completamente cognitivo y los RC para la detección espectral. El radio completamente cognitivo⁴ se encarga de adaptar *todos* los parámetros de transmisión de acuerdo a su entorno radioeléctrico. Los parámetros que se pueden modificar en un radio completamente cognitivo son de manera enunciativa mas no limitativa: el tipo de modulación, el método de acceso al medio, la codificación, el centro de la frecuencia de transmisión, ancho de banda, la duración de la transmisión, etc. Esta clase de RC es de gran interés científico, pero en la actualidad su fabricación y comercialización no es viable debido a su complejidad y a su alto costo.

Por otra parte, el RC para detección espectral es un sistema que únicamente adapta la frecuencia, el ancho de banda y la duración de la transmisión de acuerdo a su entorno radioeléctrico. Este tipo de RC es más sencillo que el radio completamente cognitivo y se le conoce también como RC de Acceso Dinámico al Espectro o *Dynamic Spectrum Access* (DSA). Además, la fabricación y desarrollo del RC para DSA es más viable desde el punto de vista práctico, ya que únicamente se varían los parámetros de frecuencia, el ancho de banda y la duración de la transmisión. Por lo anterior, el RC para DSA será objeto de estudio de este Capítulo.

³ Esta definición es más amplia que el concepto estándar de radio, el cual abarca comunicaciones alámbricas e inalámbricas.

⁴ También conocido como radio Mitola en honor al Dr. Joseph Mitola III pionero de la tecnología RC.

3.1 Radio Cognitivo para *Dynamic Spectrum Access* (DSA)

3.1.1 Introducción a DSA

DSA es un modelo de acceso dinámico y de compartición espectral cuya finalidad es el hacer un uso eficiente del espectro. La principal motivación del desarrollo de este modelo es el problema actual sobre la explotación del espectro. Dicho modelo contempla un esquema de utilización espectral en el cual el espectro concesionado no tiene un uso exclusivo por parte de los usuarios primarios, sin embargo, éstos cuentan con prioridad para su utilización. Así, los usuarios secundarios pueden utilizar temporalmente el espectro concesionado mientras el usuario primario no se encuentre utilizándolo o también es posible realizar una compartición espectral simultánea, toda vez que el usuario secundario garantice la protección contra interferencias al usuario primario.

Para implementar el modelo DSA, los usuarios secundarios deben detectar el entorno radioeléctrico por medio de sistemas RC simples o complejos. Los RC simples únicamente detectan la transmisión de los usuarios primarios para evitar transmitir simultáneamente y los RC complejos realizan predicciones de los niveles de interferencia en los receptores de los usuarios primarios para transmitir simultáneamente utilizando las mismas frecuencias.

Cabe mencionar que los RC pueden tener diversas características técnicas, las cuales dependen de las necesidades específicas de los usuarios que hagan uso de esta tecnología. Sin embargo, se debe considerar que a medida que el sistema RC posee más funcionalidades cognitivas (detección espectral, aprendizaje autónomo, cooperación, razonamiento, etc.) se vuelve más complejo y costoso de implementar.

3.1.2 Operación del Radio Cognitivo para DSA

La tecnología RC puede operar bajo tres diferentes modalidades: modelo exclusivo dinámico, modelo de compartición libre y modelo de acceso jerárquico, los cuales son descritos en los siguientes numerales.

3.1.2.1 Modelo exclusivo dinámico

En este modelo se considera que el espectro es de uso exclusivo para un determinado servicio pero puede ser compartido entre diferentes usuarios mediante RC. Esta compartición puede realizarse de forma comercial por medio de compra/renta de espectro o subastas del mismo por parte del Regulador. Otra posibilidad es que el Regulador (dependiendo de las estadísticas de uso por región geográfica) asigne espectro a un usuario de

forma exclusiva pero variante en el tiempo. Por ejemplo, un proveedor de telefonía celular que implemente RC en su red podría operar (en una determinada localidad) con anchos de banda variables durante el día (50 MHz de espectro por las mañanas y solamente 20 MHz a partir del mediodía).

3.1.2.2 Modelo de compartición libre

En este modelo todos los usuarios pueden acceder al espectro, siempre y cuando cumplan con ciertas restricciones en las características de operación (por ejemplo, límites de potencia, límites de emisiones no deseadas, etc.) en la banda de frecuencias a operar, usualmente indicadas por el Regulador.

3.1.2.3 Modelo de acceso jerárquico

En este modelo, el Regulador asigna diferentes prioridades de acceso y utilización del espectro concesionado a los usuarios primarios y secundarios. Los usuarios primarios tienen preferencia al acceder al espectro, de tal forma que experimentan una alta calidad en el servicio como si se tratara de recursos espectrales reservados exclusivamente para su uso.

Además, este modelo considera los siguientes estímulos para que los usuarios primarios accedan a compartir los recursos espectrales:

- Beneficios económicos: los usuarios primarios pueden cobrar la utilización de los recursos espectrales a los usuarios secundarios.
- Condiciones regulatorias en la operación del servicio: el Regulador puede asignar una banda de frecuencias para ser utilizada por usuarios secundarios por medio de tecnología RC, toda vez que no causen interferencias perjudiciales a los usuarios primarios. Por ejemplo, en algunos países los Concesionarios del servicio de televisión radiodifundida no pagan derechos por el espectro que utilizan, sino que lo obtienen de manera gratuita por otorgar un servicio público⁵. Lo anterior facilita que el Regulador solicite que las estaciones de televisión de los Concesionarios coexistan con otros servicios de interés público, para permitir la operación de los RC en las mismas bandas de frecuencia.
- Ayuda a los servicios de emergencia: los usuarios primarios deben ceder en ocasiones sus recursos espectrales a servicios de

⁵ Molisch, Andreas F., *Wireless Communications*, 2ª ed., Reino Unido, John Wiley & Sons, p. 503.

emergencia y éstos últimos pueden hacer uso de RC para acceder al espectro.

3.2 Esquemas de compartición espectral

Como se ha mencionado anteriormente, en el modelo de acceso jerárquico los usuarios secundarios tienen permitido operar en condiciones que no afecten el desempeño y/o los niveles de calidad del servicio de los usuarios primarios. Para esto, los usuarios secundarios usan de manera adaptativa las partes del espectro asignado a los usuarios primarios, detectando el canal de comunicación y posteriormente determinando una estrategia adecuada de transmisión que no afecte las comunicaciones de los usuarios primarios. Existen tres esquemas de compartición de espectro consideradas en la tecnología RC: *overlay*, *underlay* e *interweaving*.

En el esquema *overlay*, los usuarios primarios y secundarios transmiten simultáneamente en la misma ubicación, tiempo y frecuencia. En este caso, al usar técnicas apropiadas de cooperación⁶, los usuarios secundarios pueden transmitir su información sin afectar las transmisiones de los usuarios primarios. Sin embargo, dado que los usuarios secundarios necesitan poseer conocimiento detallado de la utilización espectral e información transmitida de los usuarios primarios, los sistemas RC que operan mediante *overlay* no son los más viables por su practicidad. Además, en el modelo *overlay* se necesita un canal de transmisión exclusivo para comunicación entre usuarios primarios y secundarios.

Por otro lado, en el esquema *underlay*, los usuarios secundarios tienen restricciones en la densidad de potencia de sus transmisiones con la finalidad de coexistir con los sistemas de los usuarios primarios. Dichas restricciones abarcan: transmisiones con potencias muy bajas (lo cual es posible cuando la comunicación entre usuarios es de corta distancia) y la dispersión de la señal transmitida a lo largo de un gran ancho de banda (por ejemplo, con señales UWB). Cabe señalar que a pesar de que los radios operan en modo *underlay*, en realidad no son catalogados como cognitivos (ya que no adaptan dinámicamente sus parámetros de transmisión de acuerdo a su entorno). Se siguen mencionando dentro de la tecnología RC debido a que son comúnmente utilizados por usuarios secundarios del espectro. Finalmente, en la siguiente sección se desarrollará el esquema de compartición *interweaving*, ya que es el método más utilizado en la

⁶ Las técnicas de cooperación entre usuarios primarios y secundarios son aquellos métodos para transmitir información mitigando las interferencias, por ejemplo, haciendo uso de codificación especial (como el denominado *rateless code*).

tecnología RC y por lo tanto su explicación es más extensa en comparación con los esquemas anteriores.

3.2.1 Esquema *Interweaving*

En este esquema de compartición, los usuarios secundarios transmiten en los espacios espectrales libres o “huecos espectrales”, es decir, los usuarios secundarios se encargan de identificar aquellas ubicaciones, intervalos de tiempo y frecuencias que los usuarios primarios no están utilizando, para posteriormente transmitir (ver Figura 3.1). La técnica para transmitir en los huecos espectrales se divide en tres procesos: detección, gestión y compartición espectral, los cuales son descritos a continuación.

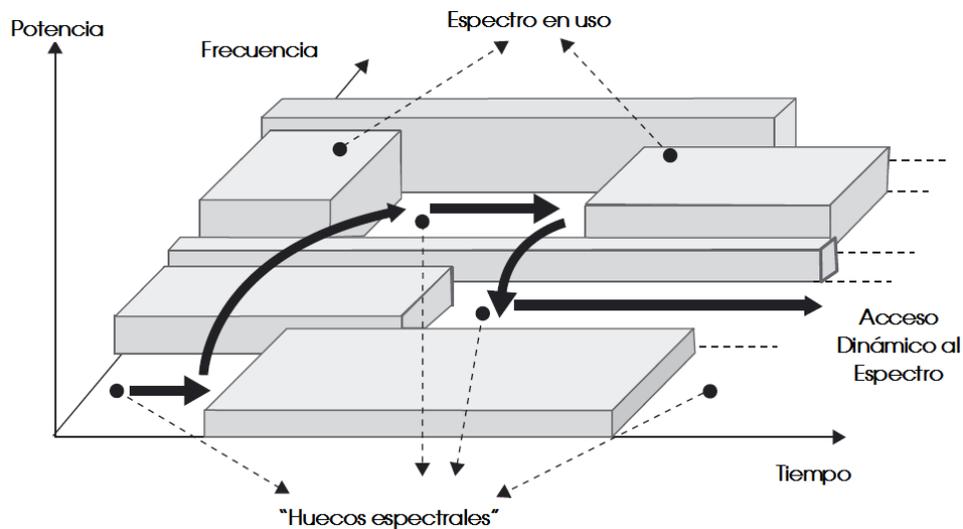


Figura 3.1. Concepto de huecos espectrales⁷.

3.2.1.1 Detección espectral

En este proceso, el sistema RC identifica los rangos de frecuencias que no están siendo utilizados (en el dominio del tiempo) por los usuarios primarios, para que los usuarios secundarios hagan uso de ellos. Existen diferentes maneras de realizar la detección espectral: mediante la detección de transmisores, la detección cooperativa o la detección basada en interferencia.

Al implementar la detección de transmisores, los sistemas RC deben tener la habilidad de determinar si la señal de un transmisor de un usuario primario se encuentra espacialmente presente en una determinada parte del espectro. Esto se realiza mediante detectores coherentes de filtro acoplado,

⁷ Molisch, Andreas F., *Wireless Communications*, 2º ed., Reino Unido, John Wiley & Sons, p. 506.

detectores no coherentes de energía o detectores de señales ciclo-estacionarias, los cuales se explican a continuación:

- Los detectores coherentes de filtro acoplado necesitan del conocimiento previo de cada uno de los sistemas de los usuarios primarios (información de potencia, fase, codificación y duración de las transmisiones contenida en las secuencias de sincronización) para detectar correctamente su señal. El desarrollo y diseño de este tipo de detectores es un proceso complejo y costoso, por lo que no se utilizan comúnmente en aplicaciones prácticas.
- Los detectores de energía de señales son más sencillos de implementar que los detectores coherentes de filtro acoplado, pero son altamente susceptibles ante los cambios de potencia de las señales y son dependientes de los niveles de ruido. En este tipo de detectores, la señal recibida se procesa y se compara con un nivel de energía de referencia para saber si el usuario primario se encuentra transmitiendo.
- Los detectores de señales ciclo-estacionarias pueden detectar señales moduladas con características periódicas y con bajos niveles de SNR. Además, este tipo de detectores puede diferenciar entre el ruido, señales interferentes de otros sistemas y señales de usuarios primarios.

Por otro lado, la detección cooperativa se refiere a los métodos de detección que utilizan la información procedente de múltiples usuarios de RC. Esta detección consiste en tres etapas: primero, cada usuario de RC “escucha” su entorno para saber la ocupación espectral; después, se realiza un reporte de la información obtenida y finalmente, se difunde la información a los sistemas RC vecinos por medio de canales dedicados *broadcast*.

Por último, en la detección basada en interferencia, el RC opera como la tecnología UWB, ya que los usuarios primarios coexisten con los usuarios secundarios, los cuales tienen permitido transmitir con bajas potencias, toda vez que no causen interferencias perjudiciales a los usuarios primarios.

3.2.1.2 Gestión espectral

En esta etapa, los sistemas de RC de los usuarios secundarios establecen la banda de frecuencias, el ancho de banda y el tiempo de transmisión que utilizarán para sus comunicaciones. Para esto, los RC deben seleccionar los recursos espectrales con los que se obtengan niveles altos de calidad en los

servicios. Este proceso se divide de forma general en un análisis del espectro disponible y de la selección de frecuencias de operación⁸.

Una parte importante del análisis del espectro disponible es la creación y consulta de un registro que contenga un estado de la utilización del espectro con modelos detallados, los cuales sirvan para obtener estadísticas de tráfico y así poder programar anticipadamente las asignaciones espectrales de cada usuario⁹. Si durante la gestión espectral, el RC decide que la banda de frecuencias en uso tiene que ser liberada (por malas condiciones de propagación de la señal o porque los recursos están siendo solicitados por los usuarios primarios), se cambia la banda de frecuencias de operación o se termina la transmisión. Este proceso se denomina proceso de movilidad espectral y su objetivo es utilizar los recursos espectrales dinámicamente de tal forma que la comunicación se mantenga estable y transparente para el usuario final durante los cambios de frecuencia de operación.

3.2.1.3 *Compartición espectral*

Actualmente existen diversos métodos de compartición espectral dependiendo del grado de coordinación entre los usuarios (a nivel geográfico, tiempo o frecuencia). Bajo este contexto, uno de los mayores retos en la tecnología RC es el diseño de métodos para asignar espectro a los usuarios. Por un lado, existen esquemas controlados y centralizados en los cuales un dispositivo o sistema maestro asigna directamente los recursos espectrales a los usuarios y por otro lado, existen esquemas de competición entre usuarios que no requieren de un proceso de coordinación e intercambio de mensajes entre ellos.

Bajo este tenor, la tecnología RC puede definir su funcionamiento y operación con base en un modelo matemático para la asignación de espectro a los usuarios, conocido como la *teoría de juegos*. Dicha teoría estudia el conflicto y la cooperación entre entes con inteligencia que son capaces de tomar decisiones, lo cual la convierte en un modelo óptimo para modelar y analizar el comportamiento y las acciones de los usuarios al competir dinámicamente por el espectro. En la *teoría de juegos*, un *juego* involucra una cantidad determinada de *jugadores*, una *estrategia de juego* asignada a cada *jugador* y una *recompensa* que se obtiene una vez

⁸ Yu, F. Richard, *Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks*, Canadá, Springer Science + Business Media, 2011, p. 7.

⁹ Un modelo estadístico, simple y analítico utilizado en RC para el análisis espectral en la etapa de gestión es el de Markov. Este modelo asume que cada subcanal de transmisión está en uno de dos posibles estados (ocupado o libre) y tiene cierta probabilidad de transición (obtenida por observaciones) entre un estado y otro. Modelos más detallados pueden incluir variaciones en la ocupación del espectro de acuerdo a la hora, tener en cuenta las duraciones típicas de paquetes de información de los diferentes sistemas, etc.

finalizada la *jugada*. En términos de utilización espectral de la tecnología RC, lo anterior se puede traducir en una determinada cantidad de usuarios primarios y secundarios (*jugadores*), con métodos particulares para acceder al espectro (*estrategia del juego*) y en un determinado resultado al finalizar la aplicación de dichos métodos (*recompensa*).

Además, en la *teoría de juegos* se consideran las siguientes variantes estadísticas para simular diferentes escenarios de compartición espectral:

- *Juegos no cooperativos*. La cooperación entre los jugadores es iniciativa de cada uno y no existe un tercero que haga cumplir reglas particulares (por ejemplo, el Regulador).
- *Juegos con coordinación parcial*. Existen diferentes mecanismos para promover el comportamiento óptimo de los jugadores, por ejemplo, mediante la coordinación realizada por un Regulador o por medio de la aplicación de sanciones.
- *Juegos de soluciones centralizadas*. El Regulador posee la información de los requerimientos de ancho de banda de los diferentes usuarios del sistema, así como de la disponibilidad de espectro. Entonces, el Regulador se encarga de asignar los recursos espectrales para que se optimicen los sistemas de comunicación de los usuarios primarios y secundarios. Esta solución involucra un alto nivel de información de control entre los usuarios y la autoridad central.

3.3 Arquitectura del transceptor RC

En la Figura 3.2 se ilustra la estructura general de un transceptor RC, generalmente dividido en tres partes principales: Radio Frecuencia (RF), Convertidor Analógico-Digital o *Analog to Digital Converter* (ADC) y Procesador de Banda Base (PBB), los cuales pueden ser adaptativos dependiendo del tipo de RC¹⁰. En un RC para detección espectral, sólo la parte *RF Front end* (compuesta de la RF y del ADC) es diferente a un receptor convencional, ya que incluye antenas, amplificadores de bajo ruido, osciladores locales y controles de ganancia automáticos que funcionan en amplios anchos de banda para operar en todas las posibles frecuencias que se consideran en el diseño del sistema RC.

¹⁰ Molisch, Andreas F., *Wireless Communications*, 2^o ed., Reino Unido, John Wiley & Sons, p. 504.

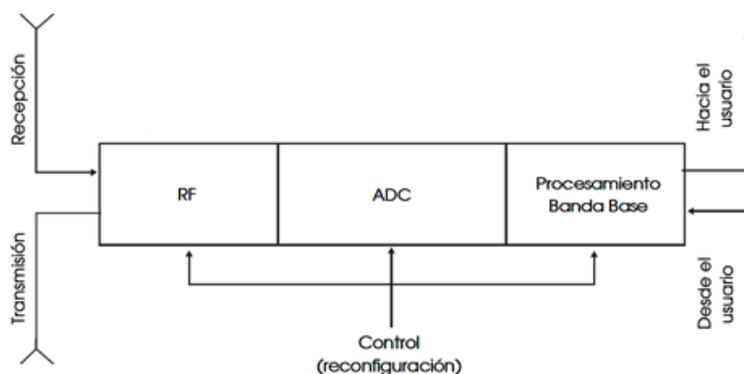


Figura 3.2. Estructura básica de un transceptor RC¹¹.

La selección del canal de transmisión ocurre después del convertidor de bajada por lo que una de las limitantes en el RC es la posibilidad de una saturación del receptor por señales fuera de la banda de operación. Una posibilidad de reducir esa interferencia es la utilización de filtros sintonizables de RF colocados antes del amplificador de bajo ruido. Sin embargo, el costo de tales filtros es alto y su capacidad de sintonización es limitada.

En el caso de un RC completamente cognitivo, el procesamiento de banda base también tiene que ser adaptativo, lo cual se puede implementar por medio de un software de procesamiento en un Procesador Digital de Señales (PDS). Así, un RC completamente cognitivo es también denominado en ocasiones *software radio*.

Cabe aclarar que RC se apoya de otras tecnologías para habilitar sus funciones, por ejemplo, el radio adaptativo y el Radio Definido por *Software* (RDS). Este último es de las tecnologías habilitantes de RC más importantes y se presenta con más detalle a continuación.

3.3.1 Radio Definido por *Software*

Un RDS es un radio que tiene todas o algunas de sus funciones de la capa física del modelo OSI¹² implementadas mediante *software*¹³. En el caso de RDS, los diferentes parámetros de las señales (como la frecuencia de portadora, tasa de transmisión de datos, modulación, codificación, etc.)

¹¹ *Ibidem*.

¹² *Open Systems Interconnection (OSI)*. Modelo de subdivisión de los sistemas de comunicaciones que consiste de una estructura jerárquica de 7 capas para definir los niveles de operación y la interrelación entre ellos.

¹³ Grayver, Eugene, *Implementing Software Defined Radio*, Estados Unidos, Springer Science + Business Media, 2013, p. 5.

pueden modificarse al realizar cambios en el *software* o el *firmware*¹⁴ del sistema, sin tener que modificar las características del *hardware*¹⁵. Las aplicaciones de esta tecnología son diversas, por ejemplo: radio amateur o radioaficionados, radiolocalización de embarcaciones y aeronaves, aplicaciones en redes GSM y LTE, etc.

Algunas de las características técnicas más importantes de los RDS son las funcionalidades para seleccionar automáticamente canales de transmisión, codificación programable, control total del procesamiento de señales mediante *software* y optimizar su funcionamiento mediante funciones de aprendizaje. Lo anterior con la finalidad de adaptar su operación de acuerdo a las características de la red y las necesidades de los usuarios.

3.3.1.1 Clasificación de la tecnología RDS

Con el fin de establecer una clasificación de los equipos RDS, el *Wireless Innovation Forum* definió 5 niveles (del 0 al 4) de utilización de *software* en los radios para controlar o realizar funciones de la capa física, determinando la frontera entre *hardware* y *software* en el equipo, los cuales son:

- **Nivel 0.** En este nivel se encuentran únicamente los radios construidos con *hardware*. En este nivel no se utiliza *software* para controlar las funciones de operación del radio.
- **Nivel 1.** En este nivel se clasifican los radios controlados por *software* pero con limitaciones en el control de ciertas funcionalidades. Usualmente se utiliza el término Radio Controlado por *Software* (SCR del inglés *Software Controlled Radio*) para denominar a los radios de nivel 1. En este nivel, los radios controlan funciones básicas como los niveles de potencia, pero no cuestiones más elaboradas como los formatos de modulación o las frecuencias de transmisión.
- **Nivel 2.** En este nivel se clasifican los radios con una parte significativa de su arquitectura configurable mediante *software*. Además, a partir de este nivel el radio puede ser utilizado como plataforma para desarrollar un RC. Los radios de nivel 2 pueden controlar mediante *software* parámetros como la frecuencia, modulación, generación/detección de forma de onda, aspectos de seguridad informática, etc. La etapa de RF de estos radios se implementa mediante *hardware* y no puede ser reconfigurada.

¹⁴ El *firmware* es el conjunto de instrucciones básicas de control de un programa informático que se encuentran almacenadas en la memoria ROM de los dispositivos.

¹⁵ Cabe mencionar que uno de los principales fabricantes de RDS es *National Instruments*.

- **Nivel 3.** Este nivel agrupa a todos los radios en los que al menos una de sus funciones está completamente definida por *software*. En este nivel se clasifica el Radio Definido por *Software* Ideal (ISR del inglés *Ideal Software Radio*).
- **Nivel 4.** Los equipos pertenecientes a esta categoría reciben el nombre de *Ultimate Software Radio* (USR), son completamente programables y capaces de soportar diversas funciones simultáneamente.

3.4 Aplicaciones de RC

La tecnología RC tiene diversas aplicaciones y se prevé que en el futuro se implementen en sistemas más complejos, como las redes *Smart Grid*, servicios de misión crítica, telefonía móvil y aplicaciones médicas, entre otras¹⁶. A continuación, se presentan brevemente algunas de estas aplicaciones.

3.4.1 TV *White Spaces*

La utilización de TV *White Spaces* (TVWS) se refiere al uso de las frecuencias disponibles localizadas en las bandas VHF y UHF que no son utilizadas por los Concesionarios del servicio de televisión radiodifundida. Estas bandas de frecuencias disponibles pueden ser utilizadas para proveer servicios de banda ancha bajo la condición de no causar problemas de interferencia significativos en los servicios de otros usuarios. La tecnología TVWS se aborda con más detalle en el Capítulo V de este estudio.

3.4.2 Aplicaciones militares

Las técnicas de RC en aplicaciones militares son emergentes y un ejemplo de su potencial es la capacidad de identificar comunicaciones de enemigos. El departamento de defensa de los Estados Unidos de América ha establecido programas especiales como *SPEAKeasy* y *next Generation* (XG) para aprovechar los beneficios de la tecnología RC¹⁷.

¹⁶ Wang, Jianfeng *et al.*, "Emerging Cognitive Radio Applications: A Survey", *IEEE Communications Magazine*, marzo de 2011, p. 74.

¹⁷ Akyildiz, Ian F. *et al.*, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey", *Computer Networks* vol. 50, Estados Unidos, 15 de septiembre de 2006, p. 2135. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128606001009/pdf?md5=017d13356819abba72365d80a59b882&pid=1-s2.0-S1389128606001009-main.pdf>

3.4.3 Servicios de emergencia y misión crítica

En condiciones de emergencia y en situaciones de desastres naturales, la infraestructura de comunicaciones inalámbricas puede colapsar debido al aumento de tráfico de información o a la caída de los servicios. Además, existen diversos usuarios de servicios de misión crítica equipados con múltiples dispositivos (computadoras inalámbricas, cámaras de video, teléfonos móviles, etc.) que demandan diversos servicios como son voz, mensajería, acceso a internet, acceso a bases de datos, transferencia de imágenes y video, entre otros. Por lo tanto, existe una gran necesidad de utilizar RC para establecer redes de comunicación de emergencia que sean confiables y usen el espectro de manera dinámica, de tal manera que se faciliten las comunicaciones y se habilite la interoperabilidad de los dispositivos.

3.4.4 Redes *Smart Grid*

Las redes *Smart Grid* consisten de infraestructuras AMI¹⁸ (en casas o edificios) de redes del tipo *Field Area Network* (FAN) y redes *Wide Area Network* (WAN). Al habilitar RC en este tipo de redes se obtiene, además de un acceso dinámico al espectro, la posibilidad de desarrollar mecanismos de coexistencia para coordinar el uso del espectro y priorizarlo de acuerdo al tráfico de la red *Smart Grid*.

3.4.5 Servicios de telemedicina

La tecnología RC se puede implementarse en aplicaciones médicas inalámbricas conocidas como telemedicina, debido a que puede mejorar el nivel de la calidad del servicio entre los dispositivos médicos al definir prioridades para acceder al espectro. Un ejemplo de aplicación potencial de RC en los servicios de telemedicina son las redes *Medical Body Area Network* (MBAN) implementadas para monitorear signos vitales de las personas (temperatura, presión, oxigenación en la sangre, generación de electrocardiogramas, etc.). Este tipo de red requiere de niveles altos de calidad de servicio por proveer aplicaciones médicas críticas y no es óptimo desplegarlas en bandas de frecuencias ICM. No obstante, si se aplica tecnología RC en las MBAN para operar en espectro concesionado como usuarios secundarios, se podría mitigar la problemática de los niveles de calidad del servicio.

¹⁸ *Advanced Metering Infrastructure* (AMI). Son sistemas que miden, recolectan, analizan la utilización de energía y se comunican con dispositivos de medición, tales como medidores de electricidad, gas, calor o agua.

3.5 Estandarización de Radio Cognitivo

Para facilitar la introducción e implementación de RC a nivel mundial es necesario el desarrollo de estándares y esquemas regulatorios flexibles que permitan la operación de nuevas tecnologías que habiliten la compartición y el acceso dinámico al espectro. En este sentido, diversas organizaciones se encuentran trabajando en el desarrollo de estándares y consideraciones regulatorias para la tecnología RC, como el *Wireless Innovation Forum*, el *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), el ETSI, la FCC, la *National Telecommunications and Information Administration* (NTIA) y la UIT, entre otras. Algunos de los proyectos y grupos de trabajo de estas organizaciones para el desarrollo y estandarización de RC para DSA son los siguientes:

- **IEEE *Dynamic Spectrum Access Networks Standards Committee* (DySPAN-SC).** El enfoque principal de este comité es el desarrollo de DSA para mejorar la utilización del espectro, incluyendo la gestión de interferencia y coordinación entre diferentes tecnologías inalámbricas. DySPAN-SC también incluye un grupo especializado en DSA para redes vehiculares¹⁹.
- **El comité técnico del ETSI sobre sistemas de radio reconfigurables.** Este comité trabaja en el desarrollo de soluciones de tecnología RDS, RC y LSA. Sus grupos de trabajo se especializan en la arquitectura de los sistemas de radio, gestión y control cognitivo, y aplicaciones de seguridad pública²⁰.
- **IEEE 802.22.** El estándar IEEE 802.22 se desarrolló para redes *Wireless Regional Area Network* (WRAN) y fue el primer estándar para RC. Este estándar se diseñó para proveer acceso de banda ancha inalámbrica en áreas con radios de hasta 100 km y considera esquemas de duplexaje TDD con OFDM; además considera anchos de banda de 6, 7 y 8 MHz para operar en diferentes anchos de banda de canal de TV en diferentes países. En este estándar se considera la agregación de canales para mejorar el sistema, que consiste en la

¹⁹ IEEE, "IEEE DySPAN Standards Committee (DySPAN-SC)", *IEEE Standards Coordinating Committee 41 (SCC41)*, Estados Unidos, 2016. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://grouper.ieee.org/groups/dyspan/>

²⁰ ETSI, "Reconfigurable Radio (Our Role & Activities)", *TC RRS (Reconfigurable Radio System)*, Francia, 2017. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/reconfigurable-radio>

utilización de múltiples canales de transmisión de TV para dar servicio a un mismo usuario²¹.

- **IEEE 802.11af.** El estándar IEEE 802.11af, también denominado WhiteFi o Super WiFi, tiene como objetivo la modificación de las capas física y MAC del estándar 802.11 para estandarizar tecnología WiFi para TVWS. El estándar 802.11af se enfoca en redes LAN, por lo que el rango de comunicación es de hasta 1 km, su capa física está basada en OFDM y el protocolo MAC se basa en CSMA/CA. Algunos prototipos de IEEE 802.11af han sido llevados a cabo por diversas compañías y universidades como Microsoft, Google y Rice University²².
- **IEEE 802.19.** El IEEE 802.19 es un grupo técnico consultivo enfocado en la coexistencia de diversos sistemas inalámbricos, incluidos los sistemas basados en RC, que operan en espectro de uso libre y pertenece al comité IEEE 802 LAN/MAN²³.
- **ECMA – 392.** ECMA – 392 es un estándar publicado en el 2012, en el que se especifican las capas física y MAC de los dispositivos cognitivos que operan en bandas de frecuencias TVWS. Las aplicaciones de este estándar abarcan dispositivos portátiles para *streaming* de video y acceso a internet, electrodomésticos, computadoras y periféricos. La capa física de ECMA - 392 se basa en OFDM y la capa MAC soporta los protocolos *Prioritized Contention Access (PCA)* basado en CSMA/CA y *Channel Reservation Access (CRA)*²⁴.

3.6 Prototipos experimentales y proyectos de investigación sobre RC

A continuación, se presentan diversos prototipos experimentales y proyectos de investigación de RC llevados a cabo por diversas organizaciones.

- **DARPA Next Generation (XG) Communications.** DARPA es un programa que se encarga de investigar aspectos de RC mediante su

²¹ IEEE, "IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks. Enabling Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology and Spectrum Sharing in White Spaces. Recipient of the IEEE SA Emerging Technology Award", *IEEE 802.22 Working group on Wireless Regional Area Networks*, Estados Unidos. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.ieee802.org/22/>

²² Matin, Mohammad A., *Spectrum Access and Management for Cognitive Radio Networks*, Singapur, Springer Science + Business Media, 2017, p. 271.

²³ IEEE, "WG802.19 - Wireless Coexistence Working Group", *IEEE Working Group 802.19*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <https://standards.ieee.org/develop/wg/WG802.19.html>

²⁴ ECMA, "Standard ECMA-392. MAC and PHY for Operation in TV White Space", *European Computer Manufacturers Association*, Suiza, junio de 2012. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-392.pdf>

proyecto NeXt Generation (XG) Networks, también conocido como DSAN (Dynamic Spectrum Access Networks)²⁵. El objetivo principal de DSAN es que los usuarios utilicen de manera óptima el espectro por medio de técnicas de acceso dinámico y arquitecturas de redes heterogéneas. El programa DARPA XG surgió principalmente por la demanda de espectro de las aplicaciones inalámbricas del gobierno, militares, civiles y comerciales. Las pruebas experimentales llevadas a cabo por este proyecto han demostrado éxito en la detección de espectro disponible y en el cambio de frecuencias de forma dinámica.

- **WINC2R.** El sistema WINC2R es una plataforma para comunicaciones inalámbricas que soporta diversas configuraciones de redes basadas en RC. Esta plataforma cuenta con múltiples protocolos MAC y tiene la habilidad de cambiar de protocolo de operación (abarcado desde los protocolos para etiquetado de paquetes de información y enrutamiento, hasta protocolos de comunicación para redes *multihop*)²⁶.
- **Wireless Open-Access Research Platform (WARP).** La plataforma WARP creada por la Universidad Rice es un prototipo inalámbrico avanzado y programable, utilizada principalmente para desarrollar e investigar tecnologías inalámbricas avanzadas²⁷, incluyendo RC.
- **Kansas University Agile Radio (KUAR).** KUAR es una arquitectura de radio basada en software que permite el desarrollo de investigaciones en DSA y RC. KUAR puede operar en un amplio rango de frecuencias y diversos anchos de banda en las transmisiones, implementar diversos algoritmos de modulación, protocolos MAC y mecanismos de adaptación. Esta plataforma experimental es altamente configurable y resulta una opción viable para la comunidad de investigadores en RC²⁸.
- **Kognitiv Networking Over White Spaces (KNOWS).** KNOWS es un proyecto de Microsoft Research para realizar investigaciones en

²⁵ Shukla, Anil *et al.*, "Cognitive Radio Technology. A study for Ofcom - Volume 1", *QinetiQ*, 12 de febrero de 2007, pp. 59 y 60. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en:

https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0029/35966/cograd_main.pdf

²⁶ WINLAB, "Network Centric Cognitive Radio Platform (WINC2R)", *WINLAB, Rutgers University*, Estados Unidos, 2009. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.winlab.rutgers.edu/docs/focus/WINC2R.html>

²⁷ WARP, "WARP: Wireless Open Access Research Platform", *Wireless Open-Access Research Platform Project*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <https://warpproject.org/trac>

²⁸ Minden, Gary J. *et al.*, "KUAR: A Flexible Software-Defined Radio Development Platform", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Estados Unidos, 2007, pp. 428 y 429.

tecnologías TVWS y RC. El prototipo KNOWS detecta los espacios disponibles del espectro radioeléctrico permitiendo un acceso oportunista y una compartición espectral adaptable²⁹.

3.7 Ventajas y desventajas de RC

3.7.1 Ventajas

Algunas de las principales ventajas de RC frente a otras tecnologías inalámbricas son

- Permite utilizar el espectro que no está siendo utilizado por los Concesionarios (usuarios primarios).
- Mitiga las interferencias entre usuarios y mejora los niveles de calidad de servicio al detectar el entorno radioeléctrico. Además, cambia sus parámetros dinámicamente para seleccionar los mejores canales de transmisión (aquellos canales de transmisión con SNR más alto).
- Modifica sus parámetros operativos para adaptarse a las condiciones del canal de transmisión, por lo que el consumo de energía en los equipos transmisores (debido a colisiones y retransmisiones de paquetes de información) puede reducirse.
- Puede operar en casi cualquier parte del mundo debido a su capacidad de modificar dinámicamente su banda de frecuencias de operación y así solucionar exitosamente el problema de incompatibilidad espectral.
- Los usuarios primarios pueden rentar o arrendar espectro en aquellos lugares y momentos que no lo utilicen. Esto hace que el RC sea una tecnología viable para aquellos entes que no puedan obtener una concesión de forma inmediata debido a cuestiones legales o financieras. Además, supone una ventaja financiera para los usuarios primarios (aunque estos beneficios dependan directamente del esquema regulatorio que se establezca para la operación de los RC).

3.7.2 Desventajas

El RC abre la posibilidad de utilizar el espectro de manera dinámica. No obstante lo anterior, existen dos problemáticas principales de esta tecnología. Una de ellas es la incertidumbre de los usuarios primarios en

²⁹ Yuan, Yuan *et al.*, "KNOWS: Kognitiv Radio Networks Over White Spaces", *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Estados Unidos, 2007, p. 416.

cuanto al potencial riesgo de interferencia procedente de las comunicaciones de los usuarios secundarios. Esta interferencia puede degradar los niveles de calidad de servicio de los usuarios primarios e incluso puede derivar en provocar pérdidas económicas en sus esquemas de negocios. Por lo tanto, es importante que los usuarios secundarios sean capaces de contar con mecanismos eficientes al detectar los huecos espectrales que garanticen la protección de las comunicaciones de los usuarios primarios.

Otra problemática de RC es la carencia de esquemas sólidos de incentivos económicos para que los usuarios primarios habiliten la compartición espectral. Debido a esto, es necesario desarrollar mecanismos eficientes y estrategias de asignación de precios y tarifas en el uso del espectro que puedan facilitar el acceso a los usuarios secundarios.

Algunas otras desventajas más específicas de RC son las siguientes:

- Implementación y desarrollo de técnicas de detección que puedan operar con altas tasas de muestreo, así como contar con convertidores analógicos a digitales de alta resolución y sensibilidad, y con tiempos de retardo limitados. Por lo anterior, la implementación de este tipo de *hardware* resulta costoso.
- Existe el riesgo de que un sistema RC no pueda detectar a un determinado usuario debido a factores como los fenómenos de multitrayectoria y al desvanecimiento de la señal que experimentan los usuarios secundarios.
- Se requiere de niveles limitados de pérdidas de paquetes y retrasos de información durante los procesos de movilidad espectral, lo que impone nuevos retos en términos de transmisión estable de datos, gestión de canales basada en prioridades y calidad de servicio.
- Las redes de RC son vulnerables a ciberataques que comprometen la seguridad del sistema (al igual que otras tecnologías inalámbricas) por medio de *software* malicioso, el cual puede modificar, extraer, eliminar o robar datos del sistema e información sensible de los usuarios. Por ejemplo, pueden existir usuarios de RC maliciosos que se hagan pasar por un usuario primario, de tal manera que se obstaculice o se cambie la decisión final de asignación de los recursos espectrales por parte del sistema cognitivo. Además, los *softwares*

maliciosos pueden provocar un cambio de los parámetros de transmisión como la frecuencia, la potencia y el tipo de modulación³⁰.

³⁰ Baldini, Gianmarco *et al.*, "Security Aspects in Software Defined Radio and Cognitive Radio Networks: A Survey and A Way Ahead", *IEEE Communications Surveys & Tutorials* vol. 14, no. 2, 2012, p. 358.

3.8 Referencias

1. UIT-R, "Informe UIT-R SM.2152. Definiciones de sistema radioeléctrico determinado por programas informáticos (RDI) y sistema radioeléctrico cognoscitivo (SRC)", *Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (Serie SM, Gestión del Espectro)*, Suiza, septiembre de 2009. Consultado el 23 de octubre de 2017, disponible en: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2152-2009-PDF-S.pdf
2. Molisch, Andreas F., *Wireless Communications*, 2ª ed., Reino Unido, John Wiley & Sons.
3. Yu, F. Richard, *Cognitive Radio Mobile Ad Hoc Networks*, Canadá, Springer Science + Business Media, 2011.
4. Grayver, Eugene, *Implementing Software Defined Radio*, Estados Unidos, Springer Science + Business Media, 2013.
5. Wang, Jianfeng *et al.*, "Emerging Cognitive Radio Applications: A Survey", *IEEE Communications Magazine*, marzo de 2011.
6. Akyildiz, Ian F. *et al.*, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey", *Computer Networks vol. 50*, Estados Unidos, 15 de septiembre de 2006. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128606001009/pdf?md5=017d13356819abbaf72365d80a59b882&pid=1-s2.0-S1389128606001009-main.pdf>
7. IEEE, "IEEE DySPAN Standards Committee (DySPAN-SC)", *IEEE Standards Coordinating Committee 41 (SCC41)*, Estados Unidos, 2016. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://grouper.ieee.org/groups/dyspan/>
8. ETSI, "Reconfigurable Radio (Our Role & Activities)", *TC RRS (Reconfigurable Radio System)*, Francia, 2017. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.etsi.org/technologies-clusters/technologies/reconfigurable-radio>
9. IEEE, "IEEE 802.22 Working Group on Wireless Regional Area Networks. Enabling Broadband Wireless Access Using Cognitive Radio Technology and Spectrum Sharing in White Spaces. Recipient of the IEEE SA Emerging Technology Award", *IEEE 802.22 Working group on Wireless Regional Area Networks*, Estados Unidos. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.ieee802.org/22/>
10. Matin, Mohammad A., *Spectrum Access and Management for Cognitive Radio Networks*, Singapur, Springer Science + Business Media, 2017.
11. IEEE, "WG802.19 - Wireless Coexistence Working Group", *IEEE Working Group 802.19*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en:

- <https://standards.ieee.org/develop/wg/WG802.19.html>
12. ECMA, "Standard ECMA-392. MAC and PHY for Operation in TV White Space", *European Computer Manufacturers Association*, Suiza, junio de 2012. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.ecma-international.org/publications/files/ECMA-ST/ECMA-392.pdf>
 13. Baldini, Gianmarco *et al.*, "Security Aspects in Software Defined Radio and Cognitive Radio Networks: A Survey and A Way Ahead", *IEEE Communications Surveys & Tutorials* vol. 14, no. 2, 2012.
 14. Shukla, Anil *et al.*, "Cognitive Radio Technology. A study for Ofcom – Volume 1", *QinetiQ*, 12 de febrero de 2007. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0029/35966/cograd_main.pdf
 15. WINLAB, "Network Centric Cognitive Radio Platform (WiNC2R)", *WINLAB, Rutgers University*, Estados Unidos, 2009. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <http://www.winlab.rutgers.edu/docs/focus/WiNC2R.html>
 16. WARP, "WARP: Wireless Open Access Research Platform", *Wireless Open-Access Research Platform Project*, Estados Unidos, 2017. Consultado el 24 de octubre de 2017, disponible en: <https://warpproject.org/trac>
 17. Minden, Gary J. *et al.*, "KUAR: A Flexible Software-Defined Radio Development Platform", *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, Estados Unidos, 2007.
 18. Yuan, Yuan *et al.*, "KNOWS: Kognitiv Radio Networks Over White Spaces", *2nd IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, Estados Unidos, 2007.



IV. Comunicaciones Device-to-Device

La comunicación de Dispositivo a Dispositivo (*Device-to-Device* o *D2D*), es un término aplicado a aquellas tecnologías que permiten la identificación e interacción directa entre dispositivos cercanos sin recurrir necesariamente a un punto de acceso o una estación base para establecer la comunicación inalámbrica entre estos.

Al ser un tipo de comunicación directa, D2D puede ser eficaz para liberar tráfico de redes principales, lo cual representa una reducción en el consumo de energía y en la latencia de la señal transmitida. Además, D2D incrementa la eficiencia espectral, ya que puede utilizar bandas concesionadas o bandas del espectro de uso libre; de igual forma, D2D puede llegar a mejorar la experiencia del usuario al expandir las aplicaciones por proximidad de las comunicaciones.

En este sentido, actualmente existen tecnologías inalámbricas basadas en WLAN (Wi-Fi, Wi-Fi Direct, etc.) y WPAN (Bluetooth, UWB, ZigBee, etc.) que pueden proporcionar comunicaciones directas entre diferentes clases de dispositivos y están diseñadas para funcionar en coberturas reducidas, proporcionar tasas de transmisión de entre 25 Mbps a 480 Mbps y operan con un bajo consumo de energía¹. Sin embargo, la mayoría de estas tecnologías opera en bandas de frecuencias de uso libre, por lo que están expuestas a altos niveles de interferencia y pueden enfrentar complicaciones para acceder a canales de frecuencias debido a la congestión de tráfico que se presentan en las bandas de frecuencias de uso libre.

Por otro lado, otro tipo de tecnología que soporta las comunicaciones D2D es LTE-A, estandarizada por el 3GPP, la cual soporta nuevas características para alcanzar mayores tasas de transmisión, ofrece menor consumo de energía respecto a versiones anteriores de la tecnología LTE y extiende la gama de servicios en materia de comunicaciones inalámbricas. Este tipo de comunicación se integró particularmente en el *Release 12* del 3GPP² con el nombre de *Proximity Services* (ProSe) o *LTE-Direct* (LTE-D) y se considera como una tecnología emergente. En este *Release*, se planteó el uso de D2D para posicionar a LTE como una tecnología competitiva en materia de redes

¹ Mumtaz, Shahid y Rodriguez, Jonathan, Smart Device to Smart Device Communication, Suiza, Springer Science + Business Media, 2014, pp. 2-4 y 239.

² Para mayor información consúltese en:
http://www.3gpp.org/ftp/Information/WORK_PLAN/Description_Releases/Rel-12_description_20150909.zip

de comunicaciones para misión crítica, las cuales son comúnmente implementadas con tecnologías como P25 y TETRA, ambas catalogadas como tecnologías de banda angosta.

A diferencia de tecnologías como Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee y UWB, D2D basado en LTE proporciona tasas teóricas de transmisión de hasta 1 Gbps, mayores rangos de alcance entre dispositivos y ofrece la posibilidad de hacer un mejor uso de los recursos espectrales. Sin embargo, aún se encuentra en etapa de desarrollo e implementación. Por lo anterior, en el presente Capítulo se abordará la tecnología LTE-D. En la Tabla 4.1 se presenta un resumen comparativo de algunas tecnologías que proporcionan funcionalidades D2D.

Tabla 4.1. Comparación de diversas tecnologías para D2D ^{3 4}.

Tecnología / Característica	D2D: LTE-D	Bluetooth	Wi-Fi Direct	ZigBee	UWB
Grupo de trabajo encargado de la estandarización	3GPP LTE-A	Bluetooth SIG	IEEE 802.11	IEEE 802.15.4	IEEE 802.15.3a
Banda de Frecuencia (GHz)	Bandas espectrales concesionadas para LTE-A y/o bandas espectrales de uso libre	2.4	2.4, 5	0.868/0.915, 2.4	3.1-10.6
Rango máximo de alcance (m)	1000	10-100	200	10-100	10
Tasa máxima de transmisión (Mbps)	1000	25	250	0.250	480
Potencia nominal de transmisión (dBm)	23*	0-10	15-20	-25-0	-41.3 dBm/MHz
Ancho de banda de canal (MHz)	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	1	22	0.3/0.6; 2	500-7500
Modulación	SC-FDMA, OFDM, FDMA	GFSK	BPSK, QPSK, COFDM, CCK, M-QAM	BPSK (+ASK), O-QPSK	BPSK, QPSK

³ Mumtaz, Shahid y Rodriguez, Jonathan, Smart Device to Smart Device Communication, Suiza, Springer Science + Business Media, 2014, p. 3.

⁴ Lee, Jin-Shyan et al., "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi", The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Taiwán, noviembre de 2007, p. 48.

Tecnología Característica	D2D: LTE-D	Bluetooth	Wi-Fi Direct	ZigBee	UWB
Mecanismo de coexistencia	Ciclo de trabajo, detección de canal, control de potencia**.	AFH	Selección Dinámica de Frecuencia, control de potencia de transmisión (802.11h)	Selección Dinámica de Frecuencias	AFH
Infraestructura	Transmisión directa de datos de manera autónoma o asistida por una red de telefonía celular	Los dispositivos transmiten datos directamente, de manera autónoma en bandas de frecuencia de uso libre.			

*Puede ser de hasta 31 dBm para algunos dispositivos LTE¹.

**Puede variar dado que la tecnología se encuentra en etapa de desarrollo.

4.1 Clasificación de la tecnología D2D según el uso del espectro

La comunicación D2D puede clasificarse dependiendo el tipo de espectro que utilice, ya sea espectro concesionado o de uso libre⁵, tal como se describe a continuación.

4.1.1 D2D en espectro concesionado

D2D en espectro concesionado, también denominado *D2D inband*⁶, es la comunicación que utiliza segmentos concesionados del espectro destinados para servicios de datos y telefonía celular; este tipo de comunicación se puede dividir a su vez en dos categorías: *D2D Underlay* y *D2D Overlay*.

4.1.1.1 D2D Underlay (D2D-U)

Se define como D2D-U cuando la comunicación D2D y los servicios de telefonía celular comparten los mismos recursos de espectro. Al realizar lo anterior, un usuario no puede establecer la comunicación D2D y celular de forma simultánea.

La selección entre la comunicación celular y la comunicación D2D es equivalente a una decisión de enrutamiento de información realizada por

⁵ Mumtaz, Shahid y Rodriguez, Jonathan, Smart Device to Smart Device Communication, Suiza, Springer Science + Business Media, 2014, p. 5.

⁶ Song, Lingyang et al., Wireless Device-to-Device Communications and Networks, 1ª ed., Reino Unido, Cambridge University Press, 2015, pp. 6 y 7.

el sistema. En este caso, el sistema decide operar de manera estática o dinámica, en alguno de los siguientes estados:

- **Modo D2D:** los paquetes de información se transmiten únicamente por medio de enlaces directos entre dispositivos.
- **Modo celular:** los paquetes de información se transmiten únicamente por medio de enlaces celulares, haciendo uso de una red de telefonía móvil.
- **Modo híbrido:** los paquetes de información pueden transmitirse por medio de enlaces directos o enlaces celulares. La decisión se toma de manera dinámica por cada slot de tiempo⁷.

4.1.1.2 D2D Overlay (D2D-O)

A diferencia de D2D-U, la comunicación D2D-O destina una porción de los recursos espectrales para la operación de la red de telefonía celular y otra porción para el establecimiento de comunicaciones D2D.

4.1.2 D2D en espectro de uso libre

D2D en espectro de uso libre (también denominado D2D *outband*), tal como su nombre lo indica, es la comunicación D2D que opera en bandas de frecuencias de uso libre. Al utilizar estas bandas de frecuencias se requiere de una interfaz adicional en los dispositivos, o inclusive, que sea necesario adoptar otro tipo de tecnología inalámbrica (como Bluetooth, ZigBee, WiFi, UWB, etc.). De esta forma, los dispositivos realizan comunicaciones directas D2D y por separado, establecen comunicaciones con la red de telefonía móvil (operando en espectro concesionado). Adicionalmente, D2D en espectro de uso libre se divide en dos categorías:

- **D2D controlada:** en este tipo de comunicación, la segunda interfaz o tecnología para D2D es coordinada y controlada por una red de telefonía móvil.
- **D2D autónoma:** la comunicación D2D es autónoma cuando la red de telefonía móvil se encarga de coordinar la comunicación, pero deja en manos del usuario el control de la comunicación directa D2D, es decir, en este caso la segunda interfaz o tecnología no se encuentra bajo control directo de la red de telefonía móvil.

⁷ Mumtaz, Shahid y Rodriguez, Jonathan, Smart Device to Smart Device Communication, Suiza, Springer Science + Business Media, 2014, pp. 59 y 60.

En la Figura 4.1 se muestra el esquema de clasificación de la comunicación D2D en el dominio de la frecuencia.

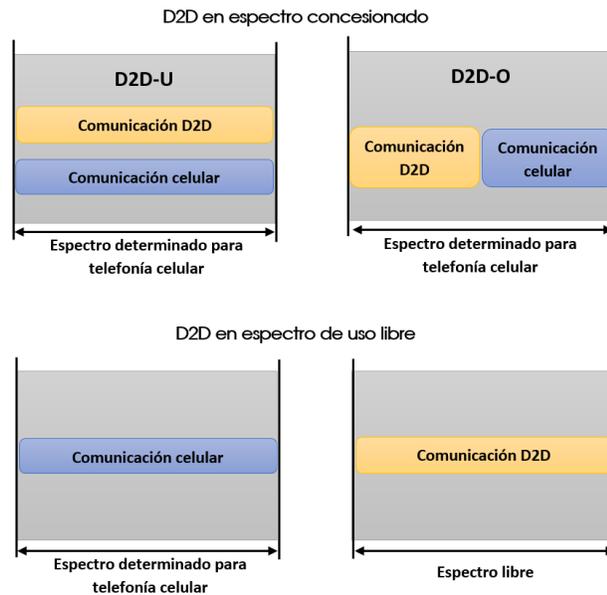


Figura 4.1. Representación esquemática de la comunicación D2D en espectro concesionado y en espectro de uso libre.

4.1.3 Asignación de recursos del espectro

En las especificaciones para la comunicación D2D establecidas por el 3GPP, los dispositivos deben tener asignado un número de sub portadoras en un tiempo determinado, las cuales son conocidas como Bloque Físico de Recursos (BFR). Cada BFR ocupa un espacio o *slot* en el dominio del tiempo y 180 kHz en el dominio de la frecuencia, es decir, 12 sub portadoras con anchos de banda de 15 kHz como en las especificaciones para LTE, tal y como se representa en las Figuras 4.2 y 4.3. Los anchos de banda para la transmisión son 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.

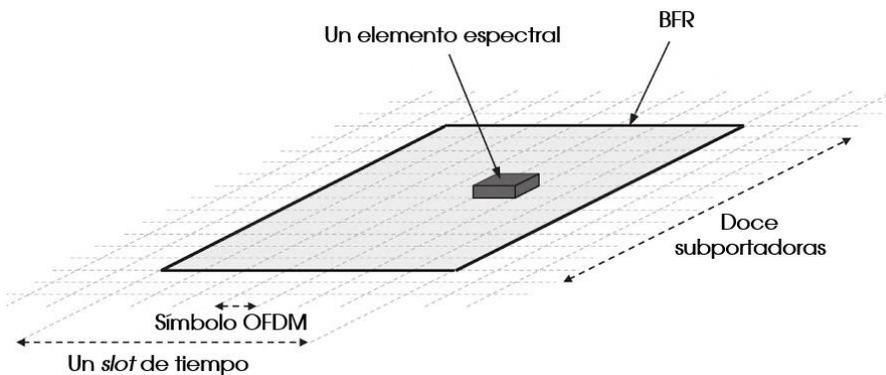


Figura 4.2. Representación de un Bloque Físico de Recursos (BFR) espectrales en el dominio del tiempo y la frecuencia⁸.

Como se mencionó anteriormente, la tecnología D2D está diseñada para operar en las bandas de frecuencia que se utilizan actualmente con la tecnología LTE, ya que comparten los mismos enlaces de subida y/o de bajada de información. En la actualidad, estas bandas (diversificadas entre las 3 regiones de la UIT) son utilizadas en modo FDD o TDD (bandas 2, 3, 4, 7, 14, 20, 26, 28, 31, 41 y 68 del 3GPP⁹). Sin embargo, cabe mencionar que actualmente se están investigando el uso de nuevas frecuencias para las *International Mobile Telecommunications* (IMT), las cuales se encuentran dentro del rango de 24.25 a 86 GHz¹⁰, por lo que las bandas de frecuencia utilizadas por D2D aún pueden seguir diversificándose a nivel mundial.

⁸ Dahlman, Erick et al., 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, 3^o ed., Suecia, Academic Press, 2016, p. 78.

⁹ ETSI, "ETSI TS 136 101, V13.3.0. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 13.3.0 Release 13)", European Telecommunications Standards Institute (Technical Specification), Francia, mayo de 2016, p. 44. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/13.03.00_60/ts_136101v130300p.pdf

¹⁰ Dahlman, Erick et al., 4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G, 3^o ed., Suecia, Academic Press, 2016, p. 22.

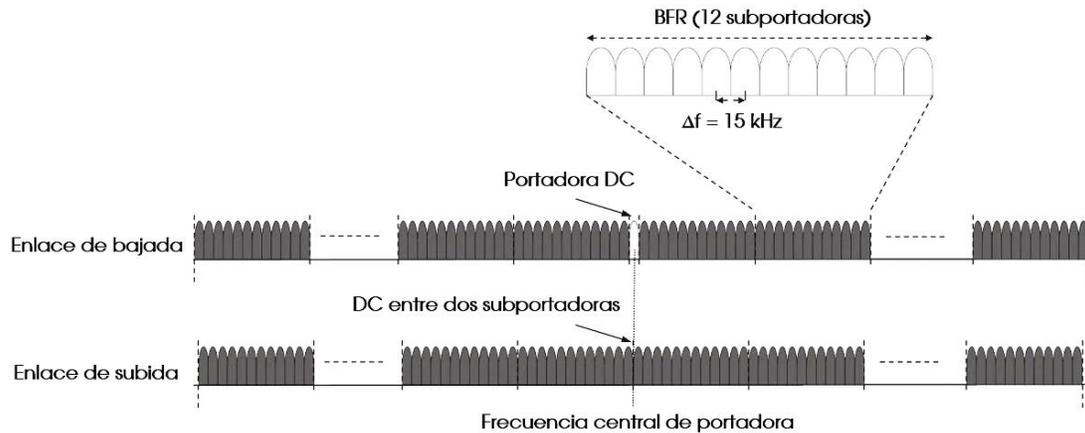


Figura 4.3. Representación de la estructura de LTE en el dominio de la frecuencia ^{11 12}.

Como se mencionó anteriormente, la compartición del espectro en las comunicaciones D2D es controlada por la red de telefonía celular a la que están asociados los dispositivos D2D¹³. En este sentido, existen diferentes enfoques acerca de los métodos para realizar el acceso al espectro y muchos de ellos promueven soluciones que involucran la compartición a nivel espacial¹⁴, como la división de celdas en zonas determinadas para dedicar una fracción de ellas a la comunicación D2D¹⁵ o el modelado de la asignación de recursos espectrales por medio de una maximización del reúso espacial¹⁶. Otras alternativas son los algoritmos de asignación dinámica de recursos, particiones estáticas espectrales y la obtención de distancias óptimas entre dispositivos para cambiar dinámicamente sus modos de operación, entre otros.

En el *Release 12* del 3GPP, se contempla que la asignación de los recursos espectrales pueda ser de dos formas: por medio de una asignación directa por parte de la red o una asignación automática realizada por el propio dispositivo. En el primer caso, la red se encargaría de otorgar los recursos necesarios para la comunicación y los datos de control de una manera semiestática, y en el segundo caso, el dispositivo seleccionaría sus propios

¹¹ En la Figura 4.3 se ilustra el concepto de portadora DC, la cual no transporta información y funciona como señalizador en los sistemas OFDM. Esta portadora es usada por los dispositivos para localizar el centro de la banda de frecuencias y los sistemas LTE la contienen.

¹² Dahlman, Erick et al., *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, 3ª ed., Suecia, Academic Press, 2016, p. 79.

¹³ Lin, Xingqin et al., "Spectrum Sharing for Device-to-Device Communication in Cellular Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, diciembre de 2014, p. 6728.

¹⁴ Krishnasamy, Subhashini y Shakkottai, Sanjay, "Spectrum Sharing and Scheduling in D2D-Enabled Dense Cellular Networks", *13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, Estados Unidos, 2015, pp. 307 y 308.

¹⁵ Botsov, Mladen et al., "Location Dependent Resource Allocation for Mobile Device-to-Device Communications", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Alemania, 2014, p. 1681.

¹⁶ Lee, Dong H. et al., "Resource Allocation Scheme for Device-to-Device Communication for Maximizing Spatial Reuse", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Corea, 2013, p. 112.

recursos de entre un grupo de frecuencias designadas para fines de comunicación D2D¹⁷.

4.2 Operación de la Tecnología

La comunicación D2D puede implementarse con distintos tipos de dispositivos, incluyendo teléfonos celulares, tabletas, computadoras portátiles y en general con todos aquellos dispositivos que soporten la conectividad mediante tecnología LTE¹⁸ ¹⁹ con funcionalidades pertenecientes al *Release 12* en adelante.

El funcionamiento de los dispositivos al utilizar la comunicación D2D se puede dividir de manera general en dos partes: detección de dispositivos (*D2D Discovery*) y transmisión de información (*D2D communication*). A continuación se describe de forma secuencial el proceso de interacción D2D entre los dispositivos, el cual puede ser independiente o controlado por la red a la que pertenecen²⁰. Dicho proceso involucra las etapas de detección de dispositivos, selección del modo de operación, control de la potencia y transmisión de información.

4.2.1 Detección de dispositivos

Un proceso importante para las comunicaciones D2D es la detección de los dispositivos cercanos, la cual puede ser realizada por ellos mismos o asistida por la red de telefonía móvil. Posteriormente, se establece un enlace directo entre los dispositivos (comunicación D2D) y se habilitan para intercambiar información, o en su caso, direccionarla hacia el dispositivo final²¹. La detección no es seguida necesariamente por el proceso de comunicación, por lo que puede utilizarse para habilitar otros servicios²² como la localización de equipos terminales.

¹⁷ Song, Lingyang et al., *Wireless Device-to-Device Communications and Networks*, 1ª ed., Reino Unido, Cambridge University Press, 2015, p. 5.

¹⁸ Tehrani, Mohsen N. et al., "Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions", *IEEE Communications Magazine*, mayo de 2014, p. 86.

¹⁹ Kim, Taisiya et al., "Korean Mobile Operators' Value Map for LTE D2D", *International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDWC)*, Corea, 2015, pp. 141 y 142.

²⁰ Lin, Xingqin et al., "Spectrum Sharing for Device-to-Device Communication in Cellular Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, diciembre de 2014, p. 6728.

²¹ Bello, Oladayo y Zeadally, Sherali, "Intelligent Device-to-Device Communication in the Internet of Things", *IEEE Systems Journal Vol. 10*, 3 de septiembre de 2016, pp. 1174-1176.

²² ETSI, "ETSI TS 122 278, V14.4.0. LTE; Service requirements for the Evolved Packet System (EPS) (3GPP TS 22.278 version 14.4.0 Release 14)", *European Telecommunications Standards Institute (Technical Specification)*, Francia, octubre de 2017, p. 22. Consultado el 18 de octubre de 2017, disponible en:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122278/14.04.00_60/ts_122278v140400p.pdf

4.2.1.1 Detección directa

En el caso de la detección directa, el proceso para localizar e identificar dispositivos cercanos se realiza de manera autónoma (realizada por los propios dispositivos), a través de la transmisión y recepción de señales periódicas (transmisión de la señal de localización e identidad del propio dispositivo o mediante la solicitud de información de los dispositivos cercanos detectables). Aunque lo anterior consume tiempo y energía en los dispositivos, esta detección permite a los dispositivos operar dentro y fuera de la cobertura de una estación base y no excluye la asistencia por parte de la red de telefonía móvil si ésta se encuentra disponible²³.

4.2.1.2 Detección asistida

En el proceso de la detección asistida, la red determina qué dispositivos se pueden comunicar entre sí, principalmente a partir de su ubicación y prioridad (previamente definida). Asimismo, este proceso también se puede iniciar cuando un Dispositivo 1 (D1) envía a la estación base una solicitud para comunicarse con un Dispositivo 2 (D2); posteriormente, la estación base obtiene la información requerida (identidad y localización del D2) para establecer el enlace. En esta modalidad, la red requiere de un constante registro, rastreo y control de los dispositivos y dado que dicho proceso es controlado por la red, es llevado a cabo de forma rápida y eficiente.

La detección de dispositivos asistida por la red garantiza un proceso más predecible, ya que el operador de la red es el responsable del control de los recursos y de la coordinación sobre las posibles interferencias que pudieran existir. Además, dado que todo el proceso es ejecutado por la red, los dispositivos no se ven afectados por el consumo de tiempo, memoria física o energía para poder realizarlo²⁴.

El proceso de detección asistida puede ser centralizado o semicentralizado dependiendo de qué tanto la red se involucra en el proceso de detección, lo cual a su vez depende del diseño de la red y de las necesidades del operador.

4.2.1.3 Detección centralizada

Este tipo de detección considera el proceso en que un D1 desea comunicarse con un D2, el cual se describe a continuación:

²³ Lin, Xingqin et al., "An Overview of 3GPP Device-to-Device Proximity Services", *IEEE Communications Magazine*, abril de 2014, p. 45.

²⁴ Ídem.

- 1) El D1 informa a la estación base más cercana su intención de comunicarse con el D2.
- 2) La estación base solicita al D2 que espere la llegada de un mensaje de detección del D1, y le solicita al D1 que le envíe dicho mensaje.
- 3) El D1 envía el mensaje de detección al D2.
- 4) Si el D2 recibe el mensaje de detección, le solicita la identificación del D1 a la estación base.
- 5) La estación base le envía la identificación del D1 al D2.
- 6) Después de la identificación, el D2 reporta a la estación base el valor de SINR del mensaje transmitido por el D1.
- 7) La estación base indica a ambos dispositivos que se puede iniciar la comunicación por medio de un enlace directo si resulta favorable²⁵.

4.2.1.4 Detección semicentralizada

En el caso de la comunicación semicentralizada, la red tiene un rol menos dominante puesto que la primera parte del procedimiento no incluye el intercambio de mensajes con la estación base, sino que comienza con el envío de un mensaje de detección entre dispositivos sin requerir asistencia o autorización por parte de ésta.

El procedimiento a seguir, considerando que el D1 desea comunicarse con el D2, es el siguiente:

- 1) El D1 envía un mensaje de detección y su identificación al D2.
- 2) Si el D2 recibe el mensaje de detección y la identificación, el D2 envía al D1 su identificación y el valor del SINR recibido.
- 3) El D1 manda el valor SINR a la estación base e informa la intención de comunicarse con el D2.
- 4) La estación base indica a ambos dispositivos que se puede iniciar la comunicación por medio de un enlace directo si resulta favorable.

4.2.2 Modos de operación

Una vez realizado el proceso inicial de detección, los dispositivos deben seleccionar un modo de operación para optimizar el desempeño de la

²⁵ Mumtaz, Shahid y Rodriguez, Jonathan, Smart Device to Smart Device Communication, Suiza, Springer Science + Business Media, 2014, p. 48.

comunicación D2D, dependiendo de la carga de tráfico de la red, las condiciones del canal y de los parámetros de interferencia.

Algunos autores²⁶ han propuesto diversos modos de operación para los dispositivos cuando están involucrados en una comunicación D2D controlada por la red, los cuales se describen a continuación.

a) Modo silencioso. En este modo la red no puede garantizar la comunicación debido a que no cuenta con los recursos espectrales suficientes para asignar a los dispositivos o cuando resulta imposible implementar el reuso de frecuencias por los niveles altos de interferencia. Por lo anterior, los dispositivos D2D no pueden realizar una transmisión y permanecen en silencio.

b) Modo de reuso. Este modo permite que los dispositivos se comuniquen mediante la compartición de recursos espectrales del enlace ascendente o descendente de información de la red de telefonía celular. Además, la comunicación D2D puede interferir con la comunicación celular (disminuyendo el nivel de calidad de las comunicaciones celulares y obstaculizando los procesos de *handover*), sin embargo, se minimiza el consumo de energía ya que la mayoría de los procesos los realiza únicamente la red.

c) Modo dedicado. En este modo una porción del espectro está destinada a las comunicaciones D2D para que los dispositivos puedan establecer una comunicación directa. Durante la selección del modo de operación, es común que se implemente de manera simultánea la gestión de los recursos espectrales para determinar la cantidad de recursos dedicados (en D2D-O) o para saber cuáles son los recursos que pueden ser compartidos (en D2D-U) para establecer la comunicación²⁷. Este proceso de gestión incluye la asignación de los recursos espectrales y el control de la potencia de transmisión.

4.2.3 Control de potencia

El control de la potencia de transmisión es un mecanismo para mitigar la interferencia entre usuarios de una red, garantizando los requerimientos mínimos de calidad del servicio: en general, la asignación de recursos espectrales y el control de potencia son dos procesos inseparables. Cuando se asignan recursos compartidos, existen interferencias entre los usuarios celulares y los usuarios D2D; en este caso, la potencia de transmisión del

²⁶ Wang, Li y Tang, Huan, *Device-to-Device Communications in Cellular Networks*, Springer, 2016, pp. 17 y 18.

²⁷ Wei, Lili et al., "Enable Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks: Challenges and Research Aspects", *IEEE Communications Magazine*, junio de 2014, pp. 94 y 95.

usuario D2D se reduce de acuerdo al valor mínimo de referencia de la comunicación celular. Así, también la red puede establecer un valor máximo de transmisión para los dispositivos D2D, dependiendo el impacto de los diferentes niveles de potencia de los dispositivos en la calidad de los enlaces celulares.

Cuando se asignan recursos espectrales dedicados a los dispositivos D2D, a diferencia de la asignación de recursos compartidos, la potencia de transmisión puede usualmente ser más alta, ya que la probabilidad de interferencia entre los usuarios de telefonía celular y D2D es baja o nula. Así, la gestión de los recursos espectrales puede ser llevada principalmente por la red o por los propios dispositivos. En la compartición dedicada, los dispositivos deben detectar el entorno y utilizar los recursos de manera adaptativa, tratando de causar el mínimo de interferencia a otros usuarios. Cuando se deja la gestión de los recursos en manos del propio dispositivo, se obtiene un proceso menos predecible, pero con mayor flexibilidad y menor complejidad.

4.2.4 Transmisión de información

Existen distintas maneras de transmitir información por medio de D2D²⁸, las cuales se ejemplifican en los esquemas de la Figura 4.4 y a continuación son descritas.

4.2.4.1 Difusión única

También denominado *unicast*, enlace directo o punto a punto, donde un D1 inicia el proceso para comunicarse con un D2, donde ambos se encuentran registrados como usuarios de la red de telefonía celular y están suscritos a ésta, pero pueden o no estar bajo su cobertura (véase Figura 4.4a). Existe además una variante de la difusión única, en donde el D1 puede mantener de manera concurrente los procesos para comunicarse con varios dispositivos, por ejemplo con D2 y D3 (Dispositivo 3). Los dispositivos bajo este esquema deben cumplir con los mismos requisitos para establecer los procesos en el establecimiento de las comunicaciones y el intercambio de información, manteniendo así la comunicación uno a uno por medio de múltiples conexiones.

²⁸ ETSI, "ETSI TS 123 303, V12.8.0. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Proximity-based services (ProSe); Stage 2 (3GPP TS 23.303 version 12.8.0 Release 12)", European Telecommunications Standards Institute (Technical Specification), Francia, abril de 2016, pp. 40-42. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123300_123399/123303/12.08.00_60/ts_123303v120800p.pdf

4.2.4.2 Difusión en modo repetidor

Esta difusión, también denominada *relay*, transmisión asistida o cooperativa, se establece cuando un dispositivo actúa como un repetidor de información para uno o varios dispositivos. El modo repetidor es considerado como una característica de la comunicación D2D, la cual debe ser ofrecida por el operador del servicio para poder utilizarla. Los dispositivos involucrados en el proceso deben estar registrados y suscritos a la red, pudiendo o no estar bajo su cobertura; deben pertenecer a un mismo grupo de comunicación y el dispositivo que actúa como repetidor debe tener la capacidad de recibir y retransmitir la información de forma directa. Este tipo de difusión se puede ejemplificar con 3 dispositivos: D1, D2 y D3, en donde D3 está fuera del alcance de D1, pero dentro del rango de D2. Si D1 y D2 se encuentran en proximidad, D2 puede actuar como repetidor, recibir la información de D1 y enviarla a D3; tal como se aprecia en la Figura 4.4b).

4.2.4.3 Difusión grupal

Conocida también como *groupcast* o de multisaltos; en la difusión grupal un dispositivo busca enviar la misma información a dos o más dispositivos de manera directa y todos los dispositivos están configurados para pertenecer a un mismo grupo de comunicación. En la difusión grupal los dispositivos están registrados y suscritos a la red, y pueden o no estar bajo su cobertura. En este caso un primer dispositivo puede transmitir información a otros simultáneamente mientras se encuentren en su mismo grupo, aunque el proceso de detección no se haya llevado a cabo por la red o la funcionalidad se encuentre deshabilitada. Para ejemplificar lo anterior, en la Figura 4.4c) se muestra que el dispositivo D1 puede transmitir en modo de difusión grupal pero sólo a los dispositivos que se encuentren en su mismo grupo de comunicación.

4.2.4.4 Difusión global

Conocida también con el nombre de *broadcast*, en este tipo de comunicación un dispositivo inicia una transmisión directa a todos los dispositivos que se encuentren dentro de su rango de transmisión. La difusión global está considerada como una característica dentro de D2D, por lo que debe ser ofrecida por el operador de la red para poder utilizarla. Todos los dispositivos que se involucran en la transmisión deben registrarse y estar suscritos a la red de telefonía móvil, además pueden pertenecer a distintos grupos de comunicación. Sin embargo, si se desea establecer una comunicación de difusión global entre diferentes grupos, el dispositivo que transmite el mensaje debe pertenecer a cada grupo para poder enviar la

información de manera directa a cada dispositivo. Para ejemplificar este tipo de comunicación, en el inciso c) de la Figura 4.4 se muestra el dispositivo D2, el cual pertenece a los grupos 1 y 2, y por lo tanto, puede realizar una difusión global para los dispositivos de ambos grupos.

Adicionalmente se pueden definir casos distintos a los anteriormente mencionados, como la difusión híbrida, la cual permite establecer de manera simultánea comunicaciones directas y comunicaciones por medio de la red, es decir, D2D y telefonía celular. Este mismo caso puede unirse con la difusión en modo repetidor para extender la cobertura de los dispositivos y así obtener sistemas de comunicación D2D más robustos y personalizados²⁹.

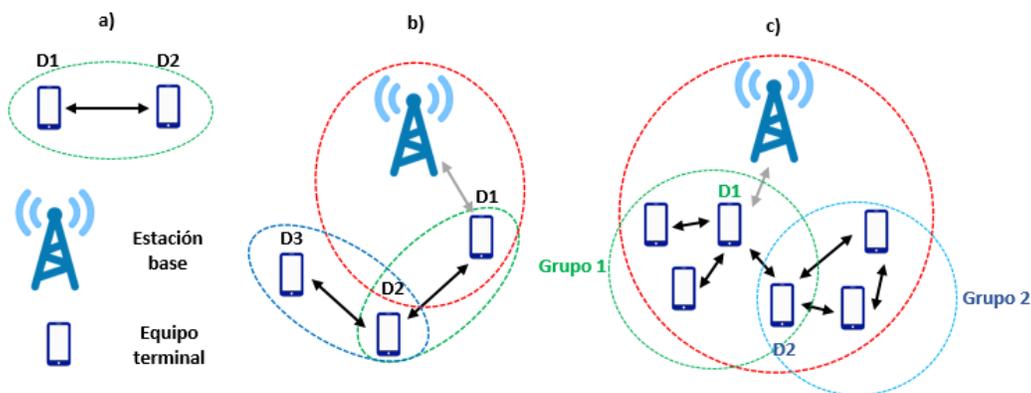


Figura 4.4. Transmisión de información en D2D: a) difusión única, b) difusión en modo repetidor y c) difusión grupal - difusión global.

4.3 Ventajas y desventajas

4.3.1 D2D en espectro concesionado

La comunicación D2D que opera en bandas de espectro concesionado permite incrementar la eficiencia espectral, ya sea reutilizando los recursos espectrales o asignando parte de los recursos del servicio de telefonía celular exclusivamente para los usuarios D2D.

No obstante lo anterior, al utilizarse D2D-O puede existir un desperdicio de estos recursos al dividir la banda de frecuencias entre los dos servicios. Así también, en D2D-U se deben tomar medidas para mantener al mínimo la interferencia entre los servicios y controlar los niveles de potencia de las transmisiones, aunque esto conlleva un aumento en el costo y complejidad

²⁹ Lee, Dong H. et al., "Resource Allocation Scheme for Device-to-Device Communication for Maximizing Spatial Reuse", IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), Corea, 2013, pp. 112 y 113.

de las comunicaciones. Un punto importante a considerar es que en D2D en espectro concesionado no se pueden efectuar transmisiones simultáneas, es decir, de telefonía celular y D2D, en un mismo dispositivo³⁰.

La modalidad de comunicación D2D en espectro concesionado ha ganado más popularidad entre la comunidad de investigadores y la industria. Lo anterior debido principalmente a la búsqueda de mejores parámetros, los cuales pueden ser alcanzados tentativamente con D2D-U, por ejemplo: mayor eficiencia espectral, reducción del consumo de energía, y confiabilidad del servicio al trabajar en bandas espectrales concesionadas, entre otros.

Por otro lado, la modalidad D2D-O está siendo cada vez más explorada. El principal motivo de interés en D2D-O reside en la robustez de la comunicación ante la interferencia entre redes de telefonía móvil y comunicaciones D2D.

4.3.2 D2D en espectro de uso libre

Por otra parte, la comunicación D2D en espectro de uso libre resuelve los problemas de interferencia con los enlaces celulares (aunque conserva los procesos de interferencia impredecibles propios de esas bandas de frecuencias), su implementación es menos compleja y puede proporcionar comunicaciones celulares y D2D simultáneas. Además, dado que se piensa que existirá una mayor cantidad de dispositivos operando en bandas del espectro de uso libre, se puede deducir que existirá una mayor cantidad de dispositivos comunicándose entre sí bajo esta modalidad. Por lo anterior, las bandas de frecuencia de uso libre serían propensas a presentar una carga de tráfico mucho mayor que las bandas de frecuencias concesionadas.

4.4 Aplicaciones

Visto desde un aspecto económico, las comunicaciones D2D pueden ser un elemento clave en la implementación de nuevas aplicaciones comerciales. Algunas de las aplicaciones potenciales son: los servicios de proximidad (publicidad, videojuegos, servicios informativos, localización, *e-commerce*, etc.), redes LAN, redes vehiculares V2V, sistemas de tráfico inteligente ITS, redes sociales móviles, multidifusión, comunicaciones M2M y servicios críticos de seguridad, guías interactivas para turistas, publicidad de comercios

³⁰ Mumtaz, Shahid y Rodriguez, Jonathan, Smart Device to Smart Device Communication, Suiza, Springer Science + Business Media, 2014, p. 5.

cercanos al usuario, notificaciones de redes sociales, hasta notificaciones en aeropuertos y estacionamientos, entre otros.

Por otra parte, los dispositivos habilitados con D2D pueden funcionar como controladores de las redes denominadas M2M y V2V, sirviendo además como enlaces entre éstas y las redes celulares.

Por citar un ejemplo, para el caso de las comunicaciones vehiculares, denominadas como *Vehicle-to-Everything* (V2X), son utilizadas principalmente para la navegación del vehículo, asistencia vial, información para viajeros, evasión y control de congestionamientos viales, gestión de flotillas para transporte de pasajeros y productos, transacciones de pago en carreteras y seguridad en los caminos. Este tipo de comunicación puede ser efectuada entre dos vehículos (V2V), entre el vehículo y una infraestructura (V2I), entre el vehículo y los peatones (V2P), etc., por lo que es común utilizar el término V2X para englobar y referirse a las aplicaciones de comunicaciones móviles en vehículos. La industria del sector automotriz considera prometedora a V2X basada en LTE, ya que habilita coberturas de red en áreas urbanas y rurales, altas capacidades para transmitir información, inclusión de aplicaciones para sistemas de entretenimiento y de valor agregado, entre otros³¹.

No obstante lo anterior, de acuerdo al 3GPP, la aplicación objetivo con la que se está desarrollando D2D sobre LTE es para prestar servicios de seguridad pública y misión crítica. La documentación publicada por el 3GPP acerca de los avances de esta tecnología está orientada a este tipo de comunicaciones, aunque esto no implica que en el futuro no se puedan extender los criterios de estandarización para aplicaciones comerciales.

Actualmente, la mayoría de las redes para comunicaciones de seguridad pública están basadas en tecnologías como TETRA o P25, principalmente para prestar servicios de comunicación de voz y datos de baja velocidad, y están diseñadas para usar canales de banda angosta, típicamente de 12.5 kHz o de 25 kHz de ancho de banda por canal. En este sentido, "trasladar" las aplicaciones para seguridad pública y misión crítica a la banda ancha móvil puede, entre otras cosas, significar la agregación de más servicios de emergencia, transferencias multimedia, difusión masiva de información

³¹ Nokia, "LTE-Advanced Evolution in Releases 12 - 14. New services to pave the way to 5G", Nokia Solutions and Networks Oy, Finlandia, 2015, p. 8. Consultado el 20 de septiembre de 2016, disponible en: <http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200175>

crítica, diagnósticos remotos de situaciones extremas y robustez del sistema ante situaciones adversas.

En este sentido, por ejemplo, FirstNet en Estados Unidos ha mencionado en sus publicaciones la relevancia de incluir aplicaciones D2D en las redes vehiculares para misión crítica³². Estas y otras aplicaciones D2D podrían operar no solo en Estados Unidos, sino también en el Reino Unido y Corea, utilizando tecnología LTE en bandas específicas (que se incluirán en el *Release 14* del 3GPP), incluyendo la banda de 700 MHz. No obstante, el desarrollo de las aplicaciones D2D y su introducción al mercado aún se encuentran en desarrollo, por lo que se estima que, en el mejor de los casos, los primeros dispositivos comerciales D2D para misión crítica se encuentren disponibles en 2018³³.

Por lo anterior, dado el ecosistema de desarrollo entorno a las aplicaciones D2D, muchos aspectos de diseño se encuentran abiertos a nuevas metodologías de implementación. Por ejemplo, el centro de investigación de Nokia ha planteado el uso de D2D como alternativa al radio cognitivo para redes densas basadas en LTE, en donde se proponen dos opciones para establecer la comunicación y gestionarla de forma eficiente³⁴. Estas dos opciones incluyen la detección del tráfico potencial de la red por medio de la puerta de enlace o *gateway* de la red y el uso de señalización dedicada en la arquitectura central de la red, denominada comúnmente como *SAE*. En esta investigación se consideró a la gestión de interferencias como un requisito para el establecimiento de la comunicación D2D.

Por otro lado, aún se debe de trabajar en diversos retos relacionados a las comunicaciones D2D, como son: la gestión de interferencias, la asignación de recursos espectrales, el tipo de modulación, la canalización y el consumo de energía. Dentro de estos retos, los más importantes a enfrentar son el consumo de energía y la gestión de interferencias entre los dispositivos D2D y los usuarios de telefonía celular. Sin embargo, éstos a su vez dependen del tipo de protocolos que se diseñen en el futuro para el reconocimiento de los dispositivos y la comunicación directa.

³² The FirstNet CTO Devices Team, "Tech Talk: Updated Vehicular Network System Vision", *First Responder Network Authority*, Estados Unidos, 7 de abril de 2016. Consultado el 10 de marzo de 2017, disponible en: <http://www.firstnet.gov/newsroom/blog/tech-talk-updated-vehicular-network-system-vision>

³³ Wendelken, Sandra, "Nascent Public-Safety LTE Proximity Services Market Faces Obstacles", *RadioResource Media Group*, Estados Unidos, 7 de febrero de 2017. Consultado el 10 de marzo de 2017, disponible en: <http://www.rmediagroup.com/Features/FeaturesDetails/FID/723>

³⁴ Doppler, Klaus et al., "Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks", *IEEE Communications Magazine*, diciembre de 2009, p. 43.

4.5 Prototipos funcionales y ejemplos de implementación

4.5.1 *FlashLinQ*

Un primer prototipo experimental D2D es el denominado *FlashLinQ*, desarrollado por Qualcomm³⁵. Este sistema es síncrono, opera con una modulación TDD OFDM, en la banda concesionada de 2.5 GHz con un ancho de banda de 5 MHz. *FlashLinQ* puede ofrecer tasas de transmisión de 1.5 Mbps y permite que los dispositivos se detecten de manera automática y continua, para después comunicarse a velocidades de banda ancha.

La sincronización que presenta este prototipo es efectuada por parte de la red, lo cual permite llevar a cabo los procesos de detección y gestión de recursos de una manera distribuida y autónoma. El sistema tiene como principal elemento de innovación a la denominada *matriz de tonos OFDM*, la cual aprovecha la transmisión de tipo OFDM y la señalización paralela para que el transmisor y el receptor puedan detectar los niveles de interferencia en su entorno.

En la arquitectura de este prototipo se asignaron niveles de prioridad a los enlaces D2D. De esta manera, el transmisor o el receptor enviarán información solo si se cumplen dos condiciones: 1) que la transmisión de datos no cause interferencia a los enlaces ya existentes en el entorno y, 2) que el enlace para el establecimiento de la comunicación cuente con una relación señal a interferencia suficiente y favorable. Durante las pruebas con el prototipo se reportó un rango de detección de dispositivos de hasta 1 km, pudiendo detectar miles de dispositivos dentro de su periferia³⁶. Se espera que con el tiempo, el prototipo pueda complementar los servicios tradicionales basados en las redes celulares e impulsar las aplicaciones que se desarrollen a partir de las comunicaciones D2D.

4.5.2 *DataSpotting*

Otro ejemplo de prototipo D2D es el llamado *DataSpotting*, diseñado por investigadores de la Universidad de Duke, KAIST y Alcatel-Lucent³⁷. El sistema utiliza un modo híbrido de utilización del espectro, en donde el operador de la red de telefonía móvil activa el modo de servicio "*DataSpotting*" durante las horas pico de la red, posteriormente en intervalos de tiempo, el operador

³⁵ Wu, Xinzhou et al., "FlashLinQ: A Synchronous Distributed Scheduler for Peer-to-Peer Ad Hoc Networks", IEEE Forthty-Eight Annual Allerton Conference, Estados Unidos, 2010, pp. 514-521.

³⁶ Liu, Jijia et al., "Device-to-Device Communication in LTE-Advanced Networks: A Survey", IEEE Communications Surveys & Tutorials Vol. 17, 2015, p. 1933.

³⁷ Bao, Xuan et al., "DataSpotting: Exploiting Naturally Clustered Mobile Devices to Offload Cellular Traffic", IEEE INFOCOM Proceedings, 2013, pp. 420-424.

reúne las localizaciones de todos los dispositivos dentro de su cobertura y a su vez genera o actualiza su base de datos con las ubicaciones de los dispositivos, las cuales pueden estar previamente cargadas.

Después, basado en las localizaciones obtenidas de los dispositivos y de los datos almacenados en su base de datos, el operador estima el tamaño de cada *data spot*, definido como un área determinada con alta densidad de dispositivos móviles. La idea fundamental del prototipo es la compartición de contenidos de manera directa entre dispositivos que se encuentren agrupados en un área geográfica. Este prototipo se ha implementado en plataformas Android, y los primeros resultados experimentales arrojaron la cantidad total de datos transmitidos de 10 Mb con tasas de transmisión que oscilaban entre los 0.3 y 2.5 Mbps. Se espera implementar este prototipo en el futuro en aplicaciones que involucren zonas de alta densidad de dispositivos como las ciudades, estaciones de tren, aeropuertos, estadios, etc.

4.5.3 Relay-by-Smartphone

*Relay-by-Smartphone*³⁸, desarrollado por investigadores de la Universidad de Tohoku en Japón, es un sistema enfocado a aplicaciones en materia de desastres y situaciones de emergencia. La idea principal de este sistema es la implementación de dos modos de operación en los dispositivos: Red Móvil Ad Hoc (MANET, *Mobile Ad Hoc Network*) y Red Tolerante al Retardo (DTN, *Delay Tolerant Networking*). Estos modos pueden ser intercambiados dependiendo de una situación en específico (densidad de los nodos vecinos, patrón de movilidad del dispositivo, nivel de batería). *Relay-by-Smartphone* sugiere una comunicación de manera autónoma, un alcance de detección de hasta 100 metros, tasas de transmisión de 5 kbps y una implementación sobre plataformas Android.

4.5.4 Seguridad Pública

En la actualidad ya existe un desarrollo avanzado de D2D sobre LTE para propósitos de seguridad pública. Un ejemplo de estos sistemas es el que está implementado en Corea del Sur, desarrollado por la empresa Samsung. Este sistema soporta hasta 400 mil usuarios simultáneos³⁹ de los sectores policíacos, marítimos, médicos, militares, gobiernos locales, bomberos, entre otros; y combina varias funciones de LTE para misión crítica orientadas a la

³⁸ Nishiyama, Hiroki et al., "Relay-by-Smartphone: Realizing Multihop Device-to-Device Communications", IEEE Communications Magazine, abril de 2014, pp. 56-65.

³⁹ Samsung, "Public Safety LTE Solution. For a reliable, fast and secure network", Samsung Networks, Corea, 2016, p. 7. Consultado el 20 de septiembre de 2016, disponible en: <http://www.samsung.com/global/business-images/insights/2016/Samsung-Public-Safety-LTE-Solution-1.pdf>

obtención de niveles altos de confiabilidad, seguridad y calidad del servicio. La red piloto, implementada a partir del 2016, incluyó 205 estaciones base y 2496 dispositivos, cubriendo por etapas desde el área de Seúl hasta la provincia Gangwon y se planea extender de manera nacional en el año 2017⁴⁰ ⁴¹. El gobierno de Corea planeó la banda de 700 MHz para estos servicios, asignando 10 + 10 MHz de manera dedicada.

A nivel internacional, los Reguladores no han publicado aún su postura y lineamientos para el uso de D2D basado en LTE. No obstante lo anterior, actualmente diversas empresas del sector de telecomunicaciones (Ericsson, Huawei, Alcatel, Nokia, Rohde & Schwarz, etc.) están participando y trabajando de forma activa en las sesiones de trabajo del 3GPP⁴² en el proceso de desarrollo, diseño y optimización de las comunicaciones D2D.

⁴⁰ Wendelken, Sandra, "South Korea Selects Operators for Public Safety LTE Pilot Network", RadioResource Media Group, Estados Unidos, 20 de octubre de 2015. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en: <http://www.mccmag.com/Features/FeaturesDetails/FID/607>

⁴¹ Mu-Hyun, Cho, "Samsung to provide public safety network in South Korea", ZDNet, 12 de febrero de 2016. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en: <http://www.zdnet.com/article/samsung-to-provide-public-safety-network-in-south-korea/>

⁴² Para mayor información consúltese en:
<http://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R4-80--31681.htm>

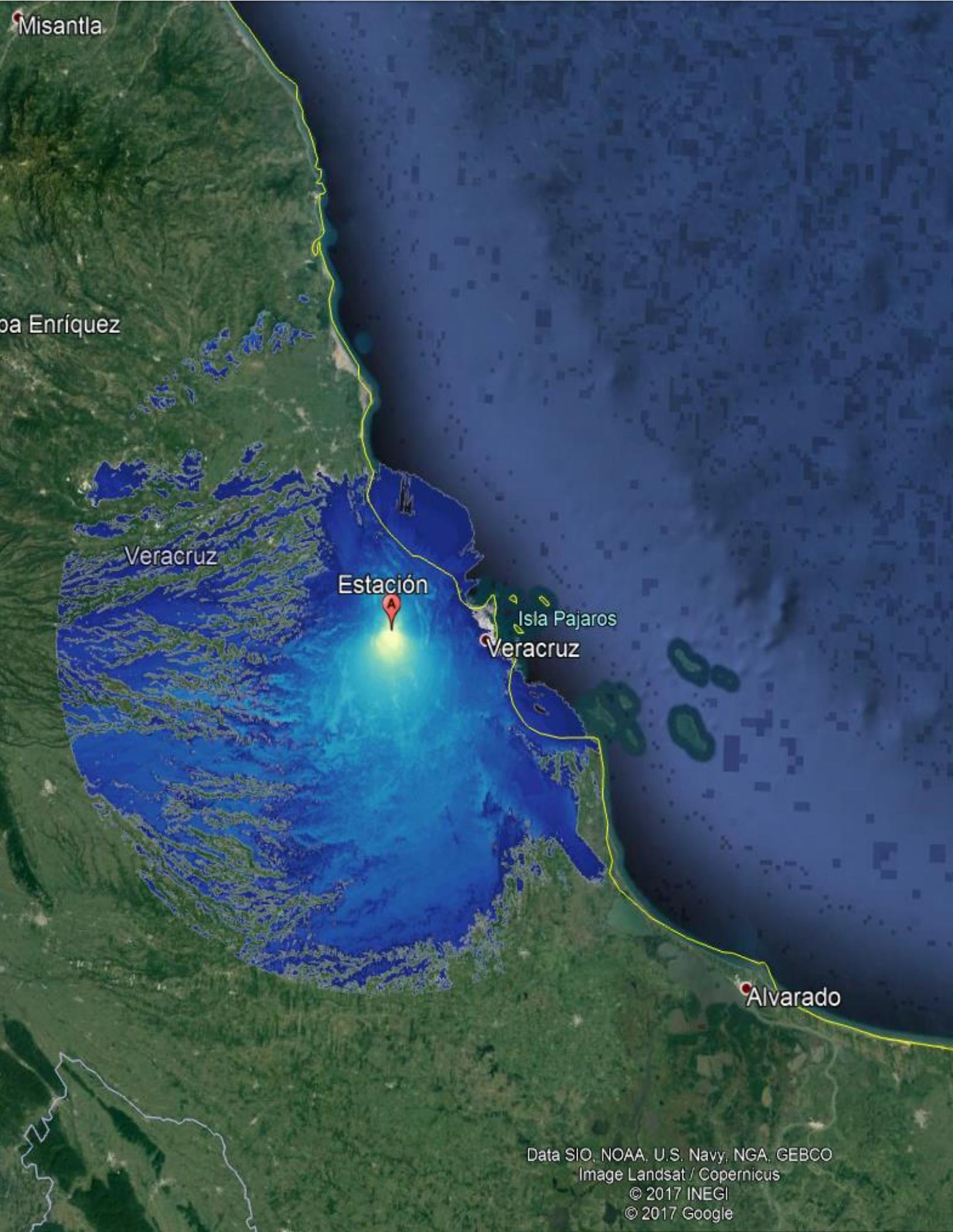
4.6 Referencias

1. Mumtaz, Shahid y Rodriguez, Jonathan, *Smart Device to Smart Device Communication*, Suiza, Springer Science + Business Media, 2014.
2. Lee, Jin-Shyan *et al.*, "A Comparative Study of Wireless Protocols: Bluetooth, UWB, ZigBee, and Wi-Fi", *The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)*, Taiwán, noviembre de 2007.
3. Song, Lingyang *et al.*, *Wireless Device-to-Device Communications and Networks*, 1ª ed., Reino Unido, Cambridge University Press, 2015.
4. Dahlman, Erick *et al.*, *4G, LTE-Advanced Pro and The Road to 5G*, 3ª ed., Suecia, Academic Press, 2016.
5. ETSI, "ETSI TS 136 101, V13.3.0. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (3GPP TS 36.101 version 13.3.0 Release 13)", *European Telecommunications Standards Institute (Technical Specification)*, Francia, mayo de 2016. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/13.03.00_60/ts_136101v130300p.pdf
6. Lin, Xingqin *et al.*, "Spectrum Sharing for Device-to-Device Communication in Cellular Networks", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, diciembre de 2014.
7. Krishnasamy, Subhashini y Shakkottai, Sanjay, "Spectrum Sharing and Scheduling in D2D-Enabled Dense Cellular Networks", *13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, Estados Unidos, 2015.
8. Botsov, Mladen *et al.*, "Location Dependent Resource Allocation for Mobile Device-to-Device Communications", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Alemania, 2014.
9. Lee, Dong H. *et al.*, "Resource Allocation Scheme for Device-to-Device Communication for Maximizing Spatial Reuse", *IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, Corea, 2013.
10. Tehrani, Mohsen N. *et al.*, "Device-to-Device Communication in 5G Cellular Networks: Challenges, Solutions, and Future Directions", *IEEE Communications Magazine*, mayo de 2014.
11. Kim, Taisiya *et al.*, "Korean Mobile Operators' Value Map for LTE D2D", *International Journal of Digital Information and Wireless Communications (IJDWC)*, Corea, 2015.
12. Bello, Oladayo y Zeadally, Sherali, "Intelligent Device-to-Device Communication in the Internet of Things", *IEEE Systems Journal Vol. 10*,

3 de septiembre de 2016.

13. ETSI, "ETSI TS 122 278, V14.4.0. LTE; Service requirements for the Evolved Packet System (EPS) (3GPP TS 22.278 version 14.4.0 Release 14)", *European Telecommunications Standards Institute (Technical Specification)*, Francia, octubre de 2017. Consultado el 18 de octubre de 2017, disponible en:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/122200_122299/122278/14.04.00_60/ts_122278v140400p.pdf
14. Lin, Xingqin et al., "An Overview of 3GPP Device-to-Device Proximity Services", *IEEE Communications Magazine*, abril de 2014.
15. Wang, Li y Tang, Huan, *Device-to-Device Communications in Cellular Networks*, Springer, 2016.
16. Wei, Lili et al., "Enable Device-to-Device Communications Underlying Cellular Networks: Challenges and Research Aspects", *IEEE Communications Magazine*, junio de 2014.
17. ETSI, "ETSI TS 123 303, V12.8.0. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Proximity-based services (ProSe); Stage 2 (3GPP TS 23.303 version 12.8.0 Release 12)", *European Telecommunications Standards Institute (Technical Specification)*, Francia, abril de 2016. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123300_123399/123303/12.08.00_60/ts_123303v120800p.pdf
18. Nokia, "LTE-Advanced Evolution in Releases 12 – 14. New services to pave the way to 5G", *Nokia Solutions and Networks Oy*, Finlandia, 2015. Consultado el 20 de septiembre de 2016, disponible en:
<http://resources.alcatel-lucent.com/asset/200175>
19. The FirstNet CTO Devices Team, "Tech Talk: Updated Vehicular Network System Vision", *First Responder Network Authority*, Estados Unidos, 7 de abril de 2016. Consultado el 10 de marzo de 2017, disponible en:
<http://www.firstnet.gov/newsroom/blog/tech-talk-updated-vehicular-network-system-vision>
20. Wendelken, Sandra, "Nascent Public-Safety LTE Proximity Services Market Faces Obstacles", *RadioResource Media Group*, Estados Unidos, 7 de febrero de 2017. Consultado el 10 de marzo de 2017, disponible en:
<http://www.rmediagroup.com/Features/FeaturesDetails/FID/723>
21. Doppler, Klaus et al., "Device-to-Device Communication as an Underlay to LTE-Advanced Networks", *IEEE Communications Magazine*, diciembre de 2009.
22. Wu, Xinzhou et al., "FlashLinQ: A Synchronous Distributed Scheduler for Peer-to-Peer Ad Hoc Networks", *IEEE Forthty-Eight Annual Allerton Conference*, Estados Unidos, 2010.

23. Liu, Jiajia *et al.*, "Device-to-Device Communication in LTE-Advanced Networks: A Survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials Vol. 17*, 2015.
24. Bao, Xuan *et al.*, "DataSpotting: Exploiting Naturally Clustered Mobile Devices to Offload Cellular Traffic", *IEEE INFOCOM Proceedings*, 2013.
25. Nishiyama, Hiroki *et al.*, "Relay-by-Smartphone: Realizing Multihop Device-to-Device Communications", *IEEE Communications Magazine*, abril de 2014.
26. Samsung, "Public Safety LTE Solution. For a reliable, fast and secure network", *Samsung Networks, Corea*, 2016. Consultado el 20 de septiembre de 2016, disponible en:
<http://www.samsung.com/global/business-images/insights/2016/Samsung-Public-Safety-LTE-Solution-1.pdf>
27. Wendelken, Sandra, "South Korea Selects Operators for Public Safety LTE Pilot Network", *RadioResource Media Group*, Estados Unidos, 20 de octubre de 2015. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en:
<http://www.mccmag.com/Features/FeaturesDetails/FID/607>
28. Mu-Hyun, Cho, "Samsung to provide public safety network in South Korea", *ZDNet*, 12 de febrero de 2016. Consultado el 29 de septiembre de 2016, disponible en: <http://www.zdnet.com/article/samsung-to-provide-public-safety-network-in-south-korea/>



Misantla

Poa Enríquez

Veracruz

Estación

Isla Pajaros

Veracruz

Alvarado

V. TV White Spaces

Actualmente el servicio de televisión radiodifundida opera en las bandas de VHF y UHF, cuyas bandas de frecuencia son, para el caso de la banda VHF de 54-88 MHz (canales 2 al 6) y 174-216 MHz (canales 7 al 13); mientras que en la banda de UHF es de 470-608 MHz (canales 14 al 36). Dependiendo del estándar digital que se utilice¹, cada canal tendrá un ancho de banda de 6 u 8 MHz. Así, para que los Concesionarios puedan prestar el servicio de televisión radiodifundida (STR) libre de interferencias perjudiciales co-canal y canal adyacente, las estaciones de televisión deben de observar la normatividad técnica aplicable y el modelo de propagación electromagnética establecida por su respectiva Administración. La aplicación de tales criterios, hace necesario que las estaciones tengan una distancia de separación entre sí. Para ejemplificar lo anterior, la Figura 5.1 ilustra la ocupación del canal 26 en México:

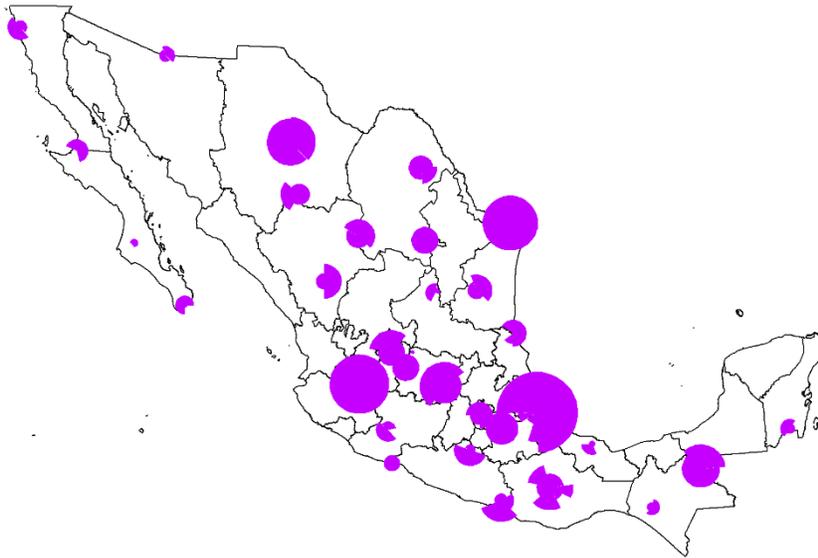


Figura 5.1. Ocupación del canal 26 en México; de morado se observan las áreas de servicio de cada una de las estaciones.

Como se puede observar en la Figura 5.1, existen “espacios” en los cuales se encuentra el canal 26 desocupado, es decir, no se está utilizando cierta frecuencia en áreas geográficas establecidas. Bajo este contexto y derivado de una serie de pruebas piloto, se encontró que estos espacios en

¹ DVB-T, ATSC, ISDB-T o DTMB.

blanco pueden ser aprovechados para brindar servicios de banda ancha a través de dispositivos de baja potencia, siempre y cuando existan reglas de compartición que permitan una convivencia sin interferencias entre el servicio de banda ancha y el servicio de televisión radiodifundida; estos segmentos de espectro son conocidos en inglés como *TV White Spaces* (TVWS).

Cabe mencionar que hasta ahora no existe una definición homogénea sobre el término *White Spaces*. Sin embargo, se ha adoptado el denominar *White Spaces* a cualquier segmento de espectro radioeléctrico, el cual no está siendo utilizado por algún Concesionario y que potencialmente puede ser utilizable, mientras que el término *TV White Spaces* enfatiza aquellos segmentos del espectro “libres” pertenecientes al espectro destinado al STR².

Debido a las características de propagación de la banda UHF, las señales de la tecnología TVWS pueden atravesar fácilmente edificios (a diferencia de las tecnologías de banda ancha convencionales, como WiFi o LTE) y los radios de cobertura registrados en entornos rurales son de hasta 10 millas³ (aproximadamente 16 km). Por lo anterior, a TVWS también se le conoce como “Súper WiFi”⁴.

Para la operación de la tecnología TVWS (como se explicará más adelante) es necesario la utilización de bases de datos robustas, dinámicas e inteligentes, las cuales estén procesando información sobre los parámetros técnicos de los elementos de la red en tiempo real, y de radios cognitivos capaces de analizar las señales de radio en un determinado segmento de espectro. Además, dependiendo de donde se busque habilitar esta tecnología (a nivel regional o a nivel nacional), los reguladores deben tener un control y registro actualizado de los parámetros técnicos de las estaciones de TV (potencia de transmisión, alturas de antenas, etc.) y de su respectiva ubicación geográfica, así como información técnica de otro tipo de equipos habilitados dentro del segmento de espectro seleccionado para TVWS.

A diferencia de las tecnologías abordadas en Capítulos anteriores, la tecnología TVWS es disruptiva ya que su operación necesita no solo de un marco regulatorio flexible que le permita a los Concesionarios compartir su espectro dentro de su área autorizada, sino que además regulatoriamente

² Microsoft, *A Rural Broadband Strategy. Connecting Rural America to New Opportunities*, Estados Unidos, p. 16.

³ *Ídem*.

⁴ *Ídem*, p. 14.

se habilite la convergencia y coexistencia entre los servicios de banda ancha y de aquellos servicios previamente existentes en la banda (por ejemplo, el STR). Adicionalmente, TVWS requiere de la participación de los Reguladores no solo como medios para regular la operación de la tecnología, si no que tienen un papel activo e importante en la prestación del servicio ya que alimentan constantemente de información a las bases de datos. Lo anterior permite calcular los parámetros técnicos de los elementos del sistema TVWS y así garantizar un entorno libre de interferencias perjudiciales para asegurar la convivencia de los servicios sin interferencias perjudiciales.

Bajo este contexto, el primer país en implementar la tecnología TVWS fue Estados Unidos en 2008, bajo la coordinación de la FCC y posteriormente siguió Reino Unido en 2015, bajo la coordinación de la *Office of Communications* (Ofcom). Gracias a que tanto la regulación como la tecnología fueron evolucionando a la par, en cada uno de estos países se desarrolló un estándar tecnológico bajo un régimen “flexible” que permitió a los reguladores “moldear” cada estándar acorde a sus necesidades y restricciones domésticas. Sin embargo, como se explicará más adelante, tanto la regulación como el estándar tecnológico de Estados Unidos son menos flexibles que lo establecido en Reino Unido.

Así, considerando que la regulación de Reino Unido es más flexible y más reciente, y que actualmente ya se ha agotado el estudiar la tecnología TVWS desde la perspectiva estadounidense, el presente Capítulo abordará la tecnología TVWS desde el enfoque de Ofcom. No obstante lo anterior, el funcionamiento y operación de la tecnología entre ambos países es bastante similar. Cabe resaltar que a lo largo del Capítulo se hará de forma continua una comparación entre las regulaciones de ambos países, así como de las características de operación de la tecnología.

5.1 Funcionamiento del Sistema de TVWS (Ofcom)

Tanto en Estados Unidos como en Reino Unido, dentro del segmento UHF designado para el STR se tiene habilitado a través de licencias, una modalidad de “servicio” en el que se habilita la operación de micrófonos inalámbricos con los servicios de radiocomunicaciones que operan a título primario dentro del cuadro de atribuciones de frecuencias. Para el caso de Reino Unido, este servicio es conocido como PMSE (*Programme Making and Special Events*), el cual habilita a las “aplicaciones inalámbricas que se utilizan en la producción y puesta en escena de una amplia gama de

eventos de entretenimiento en vivo y de radiodifusión”⁵ para operar en diferentes porciones del espectro (cada una con diferentes condiciones de operación⁶). Dependiendo de la naturaleza de la aplicación de PMSE, Ofcom puede asignar las licencias bajo un régimen exclusivo, compartido (bajo el principio de no interferencia con otros servicios habilitados previamente en determinada banda de frecuencias) o incluso estos servicios pueden ser habilitados en otras bandas diferentes a las que habitualmente se usan en los PMSE.

5.1.1 Arquitectura del Sistema TVWS

El sistema TVWS de Ofcom se compone principalmente de cuatro elementos: la base de datos del Regulador, la base de datos *White Spaces*, el(los) dispositivo(s) maestro(s) y el(los) dispositivo(s) esclavo(s) (donde éste último puede o no ser parte del sistema)⁷. Estos elementos se describen a continuación:

Base de Datos del Regulador (BDR): Esta base de datos está administrada por Ofcom, la cual almacena la siguiente información:

- La potencia máxima permitida para la operación de los dispositivos maestros. Para asegurar una baja probabilidad de interferencia perjudicial para las estaciones de Televisión Digital Terrestre (TDT), dicha potencia fue calculada *ad-hoc* por cada 100 m² en todo el territorio de Reino Unido.
- Datos agnósticos de ubicación: máximos límites de potencia permitidos en el canal 38 (606-614 MHz). Estos límites de potencia son fijos dado que el canal 38 es utilizado por equipos PMSE cuya ubicación es desconocida por Ofcom.
- Datos PMSE: límites de potencia máximos calculados por Ofcom a partir de la información de los PMSE autorizados (fuera del canal 38) y con base en una determinada ubicación y tiempo.
- Datos de ajuste no programados: límite de potencia máximo que pueden ser introducidos en un área geográfica determinada.

Base de Datos *White Spaces* (BDWS): Esta base de datos es controlada por un tercero y para ser implementada dentro de la red TVWS necesita estar previamente certificada por Ofcom; se encarga de entablar comunicación

⁵ Ofcom, “New Spectrum for Audio PMSE”, *Office of Communications*, Reino Unido, 2015. Consultado el 23 de septiembre de 2015, disponible en: <https://www.ofcom.org.uk/consultations-and-statements/category-2/new-spectrum-audio-pmse>

⁶ Para mayor información consúltese en: https://www.ofcom.org.uk/_data/assets/pdf_file/0017/10781/ir2038.pdf

⁷ Dado que el dispositivo maestro y el dispositivo esclavo son equipos que utilizan los espacios en blanco para operar, dichos dispositivos también se les conoce como “dispositivos *White Spaces*” (DWS). Por lo que en adelante, cuando la lectura se refiera a los dispositivos tanto maestros como esclavos se utilizará el término DWS.

con el dispositivo maestro al cual le asignará sus parámetros de operación (frecuencias y potencias), buscando en todo momento que exista una baja probabilidad de interferencia perjudicial con otros usuarios de la banda y de usuarios en bandas adyacentes.

Esta base de datos no es única, por lo que puede existir más de una base de datos operada por un diferente proveedor de servicios. Como anteriormente se mencionó, antes de entrar en operación estas bases de datos deben estar previamente certificadas por Ofcom; uno de los requerimientos que Ofcom tiene que validar es que las bases de datos calculen de forma correcta los parámetros para los dispositivos maestros tomando en consideración los criterios de coexistencia entre los servicios de TDT y PMSE. Asimismo, los cálculos de los parámetros de operación ejecutados por estas bases de datos dependen también de la información proporcionada por la BDR.

Cabe mencionar que las organizaciones certificadas por Ofcom para proveer el servicio de BDWS en Reino Unido son *The Council for Scientific and Industrial Research (CSIR)*, *Fairspectrum Oy*, *Google UK Limited*, *Microsoft Ireland Operations Limited*, *Nominet UK*, *Sony Europe Limited*. Sin embargo, actualmente solo dos se encuentran en operación: *Fairspectrum Oy* y *Nominet UK*⁸.

Dispositivo Maestro *White Spaces* (DMWS)⁹: dispositivo que es capaz de comunicarse con la BDWS para obtener sus parámetros de operación.

Dispositivo Esclavo *White Spaces* (DEWS)¹⁰: dispositivo que únicamente puede operar bajo el control de un DMWS.

5.1.2 Protocolo de comunicación del Sistema TVWS

Para que el servicio de TVWS pueda prestarse sin causar interferencias perjudiciales a otros servicios con los que comparta el espectro, cada parte del sistema TVWS necesita seguir un protocolo muy estricto de comunicación entre sí, el cual se describe a continuación (véase Figura 5.2):

1. El DMWS se comunica con la BDR para que ésta le asigne una BDWS con base en la ubicación geográfica del DMWS.
2. Una vez que el DMWS conoce su BDWS correspondiente, el DMWS establece un enlace de comunicación con ésta, la cual indicará al

⁸ Ofcom, "White Space Database Operators", *Office of Communications*, Reino Unido, 30 de junio de 2016. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: <https://tvws-databases.ofcom.org.uk/>

⁹ En Estado Unidos se les nombró "dispositivos fijos" o "estaciones base fijas".

¹⁰ En Estado Unidos se les nombró "terminales de usuario" o "dispositivos móviles".

DMWS sus parámetros de operación (cantidad de canales, así como los niveles de potencia a operar por canal).

3. El DMWS seleccionará los canales y potencias a usar y subsecuentemente se lo reportará a la BDWS. Si el DMWS tiene a su control DEWS, podrá obtener sus parámetros operacionales como sigue
 - 3.1. El DMWS solicitará a la BDWS parámetros genéricos (potencias y canales) con los cuales operarán los DEWS asociados al DMWS; dichos parámetros son calculados por la BDWS, asumiendo que todos los DEWS estarán en cualquier punto del área de cobertura del DMWS.
 - 3.2. El DMWS comunicará a sus DEWS asociados los parámetros determinados por la BDWS. La primera comunicación que realicen los DEWS será para comunicarle al DMWS su identificador único así como otros parámetros (los cuales se explicarán más adelante). A partir de estos parámetros, existe la posibilidad que la BDWS calcule parámetros *ad-hoc* (menos restrictivos que los parámetros genéricos) para ser utilizados por los DEWS.

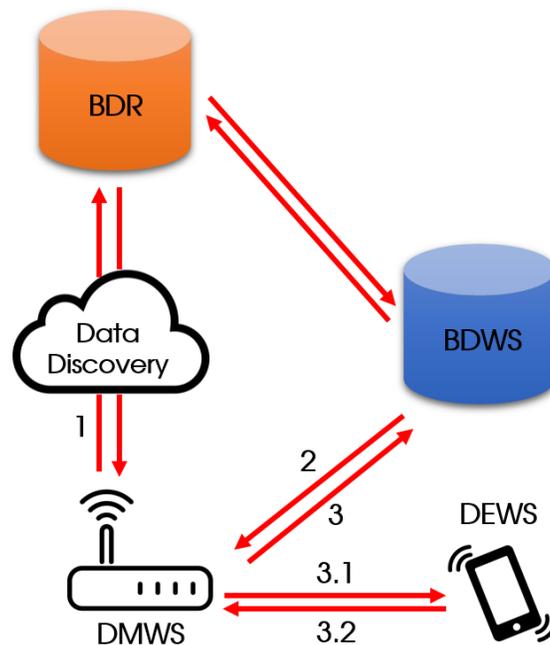


Figura 5.2. Arquitectura del sistema TVWS con su protocolo de comunicación.

5.2 Sobre la autorización de operación de los equipos

Dado que Ofcom observó que la tendencia futura de los Dispositivos *White Spaces* (DWS) es masificarse y diversificarse en el mercado, Ofcom decidió que estos dispositivos deberían de operar bajo un régimen libre de autorización¹¹, toda vez que cumplieran con los requerimientos de operación mínimos establecidos por Ofcom (de los cuales se hablará más adelante) y que además operarán bajo el control de las bases de datos certificadas por Ofcom. Lo anterior con la finalidad de que estos dispositivos no causaran interferencias perjudiciales a otros usuarios de la banda UHF (TV y PMSE). Sin embargo, aunque los parámetros de operación mínimos fueron consensuados entre la Industria y Ofcom a través de varias consultas públicas, dichos parámetros se establecieron en miras de ser modificados en un corto o largo plazo. Lo anterior dependerá de la experiencia que se tenga del funcionamiento de la tecnología sobre qué tanto se puede garantizar un entorno libre de interferencias en la banda de frecuencias.

Bajo este tenor, el ETSI desarrolló el estándar EN 301 598¹², en el cual se vertieron los parámetros mínimos de los DWS y cuya finalidad es el de homogeneizar los DWS. Sin embargo, es posible que cualquier otro DWS que no esté acorde al estándar pueda operar toda vez que cumpla los requerimientos mínimos establecidos por Ofcom.

5.2.1 Requerimientos de operación de los DWS

Para que los DWS puedan operar libres de autorización, deben de cumplir los siguientes requerimientos¹³:

1. Intercambio de datos con la BDWS

Para asegurar que el intercambio de información que se realice entre la base de datos y los DWS le permita a ésta calcular sus parámetros de operación, los DWS deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- EL DMWS únicamente transmitirá con los parámetros previamente establecidos por la BDWS (parámetros operacionales).

¹¹ Ofcom, "Implementing TV White Spaces", *Office of Communications*, Reino Unido, 12 de febrero de 2015, p. 34. Consultado el 19 de agosto de 2017, disponible en:

https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0034/68668/tvws-statement.pdf

¹² ETSI, "ETSI EN 301 598 White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz, TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, 2014. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301598/01.01.01_60/en_301598v010101p.pdf

¹³ *Idem*, p. 18.

- EL DEWS únicamente transmitirá con los parámetros previamente establecidos por el DMWS.
- El DMWS o el DEWS que requiera operar con parámetros específicos deberá de reportárselo previamente a la BDWS.
- El DEWS que busque operar con parámetros operacionales genéricos, establecidos por un DMWS, deberá de reportar su identificador único (el cual se explicará más adelante).
- El DMWS deberá informar a la BDWS los canales y potencias con las que operará (parámetros de uso del canal).

2. Parámetros y caracterización del DWS¹⁴

Los DWS tendrán especificados a nivel *software* y en su hoja de especificaciones (*datasheet*) la siguiente información:

- Categoría: define si un dispositivo es maestro o esclavo.
- Tipo: de acuerdo al estándar ETSI EN 301 598, los DWS puede ser del Tipo A, solo uso fijo, o Tipo B, el cual puede ser fijo o móvil.
- Identificador único: grupo de caracteres (establecidos por el fabricante) que permiten a la BDWS registrar los dispositivos que están asociados con ésta, así como sus canales y potencias de operación.
- Ubicación de la antena: dado que algunos DEWS no tienen la capacidad de geolocalización, a través de las coordenadas de su antena es posible que la BDWS pueda conocer su ubicación geográfica con un nivel de exactitud del 95%.
- Clase de emisión: de acuerdo al estándar ETSI EN 301 598 existen 5 clases de emisión¹⁵; así, cada dispositivo deberá reportar su respectiva máscara a la BDWS.
- Identificador de tecnología: identificador del DWS, establecido por el fabricante, que permite a la BDWS conocer qué tipo de tecnología utiliza el dispositivo.

¹⁴ Cabe mencionar que además de los parámetros aquí mencionados, existen dos adicionales (mejora en la máscara espectral y mejorar en la atenuación de intermodulación inversa) establecidos por ETSI en el estándar ETSI EN 301 598 (p. 18). No obstante, dichos parámetros no fueron considerados por Ofcom (por el momento) dado que son muy restrictivos y añaden complejidad en la fabricación de los equipos.

¹⁵ ETSI, "ETSI EN 301 598 White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz, TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, 2014, p. 15. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301598/01.01.01_60/en_301598v010101p.pdf

3. Parámetros operacionales¹⁶

Estos parámetros son generados por la BDWS, los cuales establecen el cómo operarán los DWS:

- Rango de frecuencias en el cual los DWS pueden operar.
- Máxima densidad espectral de potencia permitida en los límites del rango de frecuencias.
- Cantidad máxima de canales TDT que pueden ser utilizados en un tiempo determinado y la cantidad máxima de canales contiguos TDT que pueden ser utilizados en un tiempo determinado.
- El periodo de tiempo en que los parámetros operacionales serán válidos.
- El periodo de tiempo en el que el DMWS se comunicará con la BDWS para validar si los parámetros operacionales siguen siendo válidos.
- Un indicador binario que permitirá saber si un canal, operado por el DWS, operará de forma simultánea con un canal de TDT y en cuyo caso se establece el límite de potencia a operar por los DWS.

4. Parámetros del uso del canal

Los parámetros de los DWS para la BDWS son

- Ancho de banda de transmisión.
- Máxima densidad espectral de potencia permitida en los límites del rango de frecuencias.

5. Capacidad de ubicación

Los DMWS deberán tener la capacidad de relocalizarse y reportar su ubicación a la BDWS; dicha geolocalización deberá ser efectuada (al menos) por coordenadas de latitud y longitud, aunque es posible (más no obligatorio) reportar su altitud. En dado caso que el DMWS no reporte su altitud a la BDWS, éste tomará un valor genérico.

6. Cese de transmisiones

Existen tres modalidades en las que se pueden suspender las comunicaciones en un sistema TVWS:

¹⁶ *Ibidem*, p. 19.

- Para propósitos de gestión de interferencias, Ofcom (a través de la BDWS) tendrá la posibilidad de apagar un dispositivo dentro de un periodo de tiempo (donde sea requerido).
- Cuando el DMWS no pueda validar sus parámetros de operación con la BDWS, el DMWS cesará sus transmisiones e indicará a los DEWS que de igual forma detengan sus transmisiones.
- Los DEWS detendrán sus transmisiones si es que después de 5 segundos no pueden entablar comunicaciones con su DMWS.

7. Descubrimiento de las BDWS calificadas

Los DMWS solo podrán obedecer los parámetros indicadas por las BDWS certificadas por Ofcom, las cuales serán actualizadas periódicamente por éste y publicados a través de una página de internet. El DMWS tendrá que actualizar su lista de BDWS cada 24 hrs.

8. Restricciones de acceso al usuario

Los dispositivos libres de autorización por Ofcom deberán estar diseñados de tal forma que no puedan ser modificados por el usuario final, tanto en *software* como en *hardware*.

5.3 Implementación

5.3.1 Estados Unidos (FCC)

ETAPA 1. Considerando que la población estadounidense podría ser beneficiada con el desarrollo y operación de nuevos dispositivos inalámbricos que permitieran el acceso a internet de banda ancha, esto a través de la explotación de aquellas frecuencias en las bandas de TV que no estuvieran siendo usadas por los servicios concesionados, a finales del 2002 la FCC sometió a consulta pública el documento "NOTICE OF INQUIRY, In Matter of Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band"¹⁷.

¹⁷ FCC, "NOTICE OF INQUIRY, In Matter of Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 20 de diciembre de 2002. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-328A1.pdf

La finalidad de este documento fue el de obtener comentarios sobre la viabilidad de permitir a los dispositivos sin autorización¹⁸ operar en bandas de frecuencia de TV, en las ubicaciones y en los tiempos donde el espectro no se estuviera siendo usado, así como conocer los requerimientos técnicos necesarios para asegurar que aquellos dispositivos no causaran interferencia perjudicial a los servicios previamente autorizados dentro de las bandas del servicio de televisión radiodifundida. Como resultado de dicha consulta se obtuvieron comentarios polarizados por parte de la Industria: por un lado, los fabricantes y usuarios de los dispositivos no autorizados apoyaron la iniciativa de la FCC, y por otro lado, los Concesionarios de TV expresaron su preocupación por la posible interferencia de estos nuevos dispositivos.

ETAPA 2. En el 2004, la FCC sometió a consulta pública el documento *"NOTICE OF PROPOSED RULE MAKING. In Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands"*¹⁹, el cual habilitaba la operación de los dispositivos no autorizados en el espectro del STR en las ubicaciones donde dicho espectro no estuviera siendo usado y establecía las condiciones técnicas de operación de dichos dispositivos, toda vez que no causaran interferencias perjudiciales al servicio de televisión radiodifundida.

ETAPA 3. Como respuesta a la anterior consulta pública, en el año 2006 la FCC publicó el documento *"FIRST REPORT AND FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands and Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band"*, cuya finalidad fue el establecer los primeros pasos para la habilitación de la tecnología TVWS y además someter nuevamente a consulta pública las condiciones y criterios de operación de dicha tecnología con base en la consulta pública del 2004.

ETAPA 4. Finalmente, a finales de 2008 la FCC publicó el *"SECOND REPORT AND ORDER AND MEMORANDUM OPINION AND ORDER. In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands and Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band"*, en el cual se terminó por definir y adoptar las condiciones técnicas y regulatorias para el uso de los TVWS. En este sentido, este documento se publicó bajo un principio conservativo que incluye muchas protecciones técnicas para

¹⁸ Este término viene del inglés *"unlicensed device"*, cuya traducción al español significa "dispositivo sin autorización" o "dispositivo sin licencia". Cabe señalar que en este Capítulo cuando nos referimos a un "dispositivo sin autorización" se debe de entender que es un dispositivo que no opera bajo el amparo de una concesión, mas no al que no deba de ser homologado.

¹⁹ FCC, "NOTICE OF PROPOSED RULE MAKING. In Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 25 de mayo de 2004. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-04-113A1.pdf

prevenir interferencias perjudiciales a los servicios preestablecidos en la banda de TV.

Dado que FCC, al igual que Ofcom, estableció sus parámetros técnicos en miras a ser modificados con el paso del tiempo, en 2012 FCC publicó el *"THIRD MEMORANDUM OPINION AND ORDER. In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands and Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band"*. En este documento FCC modificó el *"SECOND REPORT AND ORDER AND MEMORANDUM OPINION AND ORDER"*, flexibilizando la forma de operar los DWS, dotándolos de un uso "oportunista", es decir, los DWS tendrían la flexibilidad y agilidad para localizar y operar en los canales no utilizados, independientemente de dónde se encuentren los dispositivos.

5.3.2 Reino Unido (Ofcom)

ETAPA 1. Después de haber procedido con el dividendo digital en Reino Unido, en el 2007, Ofcom publicó la declaración de nombre *"Digital Dividend Review: a statement on our approach"* en donde concluyó que era necesario permitir el acceso a aquellos dispositivos (sin licencia) en las bandas de UHF destinadas al servicio de televisión radiodifundida toda vez que no causaran interferencias perjudiciales con los servicios concesionados (TDT y PMSE).

ETAPA 2. Posteriormente en el 2009, Ofcom publicó la declaración *"Digital dividend: cognitive access. A discussion on using geolocation to enable licence exempt Access to the interleaved spectrum"*, en la cual se describen las formas para poder acceder de forma dinámica al espectro haciendo especial énfasis en la utilización de las bases de datos de geolocalización.

ETAPA 3. En el 2010, Ofcom sometió a consulta pública el documento *"Implementing Geolocation: Summary of consultation responses and next steps"* y posteriormente la declaración *"Implementing Geolocation: proposed approach to implementing geolocation in the UHF TV band"*. En estos documentos se propuso que los dispositivos operaran exentos de licencia y además se mencionó que Ofcom sería el responsable de publicar los parámetros técnicos mínimos que utilizarían los dispositivos. Además, Ofcom expuso la necesidad de que las bases de datos fueran controladas por terceros.

ETAPA 4. En el 2012 Ofcom publicó la consulta pública sobre *"TV White spaces; A Consultation on White space device requirements"*, en donde se propuso un régimen de autorizaciones para los DWS de acuerdo a su rol en

la red (maestro o esclavo), la tecnología implementada y su máscara de emisión.

Con base en los resultados de dicha consulta pública, ETSI comenzó a trabajar en el estándar *"ETSI EN 301 598 White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive"*²⁰.

ETAPA 5. A principios de 2013, Ofcom en conjunto con la Industria empezaron a desarrollar las pruebas piloto de la tecnología TVWS. A finales de ese año se publicó otra consulta pública de nombre *"TV White spaces: approach to coexistence"*, en las cuales se mencionó cómo Ofcom debería calcular los parámetros operativos de los DWS y dónde éstos podrían operar, con la finalidad de proteger los servicios existentes; el resultado de la consulta fue aplicado en las pruebas piloto posteriores.

A partir de los resultados que se obtuvieron de la consulta anterior, finalmente Ofcom habilita la operación de la tecnología TVWS. Sin embargo, el objetivo de Ofcom en ese momento era implementar TVWS hasta finales de 2015.

ETAPA 6. En el 2014 se ejecutaron otras pruebas piloto pero ahora con las bases de datos. Las pruebas permitieron además probar los protocolos de comunicación entre los DWS y las BDWS y evaluar el procedimiento para la gestión de interferencias.

ETAPA 7. Finalmente el 23 de febrero de 2015 Ofcom pone en operación la tecnología TVWS²¹.

5.4 Estandarización

Desde que se analizó la viabilidad de destinar rangos de espectro para la operación de la tecnología TVWS, tanto el Regulador como la Industria tenían incertidumbre de cómo se deberían de coordinar las partes del sistema (BDWS-BDR-DWS) para evitar las interferencias perjudiciales a otros servicios existentes en la banda, con qué parámetros deberían de operar los

²⁰ ETSI, "ETSI EN 301 598 White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz, TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, abril de 2014. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301598/01.01.01_60/en_301598v010101p.pdf

²¹ Ofcom, "Ofcom gives green light for 'TV white space' wireless technology", *Office of Communications*, Reino Unido, 12 de febrero de 2015. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: <https://www.ofcom.org.uk/about-ofcom/latest/media/media-releases/2015/tvws-statement>

DWS, cómo se deberían de comunicar entre sí las bases de datos, e incluso si realmente la tecnología en su conjunto iba a funcionar.

Sin embargo, el hecho de que la tecnología fuera emergente y no hubiera un precedente o alguna tecnología parecida en la cual Estados Unidos y Reino Unido pudieran apoyarse, permitió a ambos países, desde el comienzo hasta el final de la implementación de la tecnología, establecer las bases técnico-regulatorias que al final terminarían solidificadas en un estándar técnico diseñado por el IEEE y el ETSI, para Estados Unidos y Reino Unido, respectivamente. En consecuencia, los estándares resultantes así como los instrumentos regulatorios de sus respectivos países son muy parecidos entre sí, por lo que no es de extrañarse que las características técnicas y regulatorias estén establecidas tanto en el estándar como en el instrumento regulatorio. Cabe destacar que aunque Estados Unidos fue el primer país en implementar TVWS, los estándares elaborados por ambos países fueron publicados en el mismo año (2014).

Bajo este tenor, actualmente existen cuatro estándares internacionales que regulan la operación técnica con “tintes” regulatorios de la tecnología TVWS: **802.11af**, **802.19.1**, **802.22** del IEEE, y el **EN 301 598** del ETSI, dedicados a establecer la operación técnica entre DWS y su interacción con las BDWS. Los estándares se describen a continuación:

5.4.1 IEEE 802.11af: *Television White Spaces (TVWS) Operation*

El estándar 802.11af define las especificaciones técnicas para la compartición de espectro entre los DWS sin licencia y los servicios concesionados en la banda de TV²², y además proporciona un marco de referencia común para los DWS para poder satisfacer múltiples regulaciones en todo el mundo. De forma general, este estándar se pronuncia respecto a la capa física del sistema (arquitectura de los equipos, modulaciones, anchos de banda, frecuencias a utilizar así como máximas potencias permitidas, etc.), así como el marco regulatorio (protección a los usuario del servicio STR, implementación regulatoria de la base de datos de geolocalización). El elemento principal que diferencia la operación del estándar 802.11af con los otros estándares 802.11 es que en este estándar se define la base de datos de geolocalización, la cual (como se ha mencionado anteriormente) almacena las frecuencias y parámetros de operación de los DWS a partir de su ubicación geográfica. La arquitectura

²² Flores, Adriana B. y Guerra, Ryan E., “IEEE 802.11af: A Standard for TV White Space Spectrum Sharing”, *IEEE Communications Magazine*, octubre de 2013, p. 92.

del sistema TVWS definido en este estándar es muy parecida a lo que se explicó en la sección 5.1.1 del presente Capítulo.

5.4.2 IEEE 802.22: *Policies and Procedures for Operation in the TV Bands*

El estándar 802.22 especifica la interfaz de aire, la capa de control de acceso cognitivo al medio y la capa física de las redes inalámbricas de área regional punto-multipunto conformadas por una estación base fija con terminales fijos (DMWS) y con terminales de usuario portátiles (DEWS) operando en la bandas del STR entre 54 y 862 MHz²³.

5.4.3 IEEE 802.19: *TV White Space Coexistence Methods*

Dado que los estándares 802.11af y 802.22 únicamente sirven para sistemas TVWS que operan bajo el mismo estándar a partir de mecanismos de auto-coexistencia, el estándar 802.19 fue diseñado para solucionar problemas de coexistencia entre los diferentes sistemas de radio cognitivo que operan con diferentes estándares de comunicación²⁴. Lo anterior a partir de la ejecución de tres tareas principales: el descubrimiento de sistemas de radio WS que necesitan coexistir simultáneamente; cambiar los parámetros operacionales de los sistemas de radio WS para mejorar su desempeño; y proveer una interfaz unificada y un sistema de coexistencia entre diferentes tipos de sistemas de radio WS²⁵.

5.4.4 ETSI EN 301 598 *White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz TV broadcast band*

En el estándar ETSI EN 301 598 se establecieron los métodos y principios para la operación de los DWS en las bandas de 470 a 790 MHz basados en el Reporte de la *European Consumers Centers* 186²⁶, en el cual se explican los principios bajo los cuales está previsto que estos dispositivos operen en toda la Unión Europea²⁷. Este estándar aplica para los DWS (DMWS y DEWS)

²³ IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and information exchange between systems Wireless Regional Area Networks (WRAN) — 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", *IEEE Standards Association*, Estados Unidos, 2011, pp. 1 y 2.

²⁴ IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 19: TV White Space Coexistence Methods", *IEEE Standards Association*, Estados Unidos, 2014, pp. 1 y 2.

²⁵ *Idem*.

²⁶ ECC, "ECC Report 186 Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, enero de 2013. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:

<http://www.erdocdb.dk/docs/doc98/official/Pdf/ECCRep186.pdf>

²⁷ ETSI, "ETSI EN 301 598 White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz, TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, 2014. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301598/01.01.01_60/en_301598v010101p.pdf

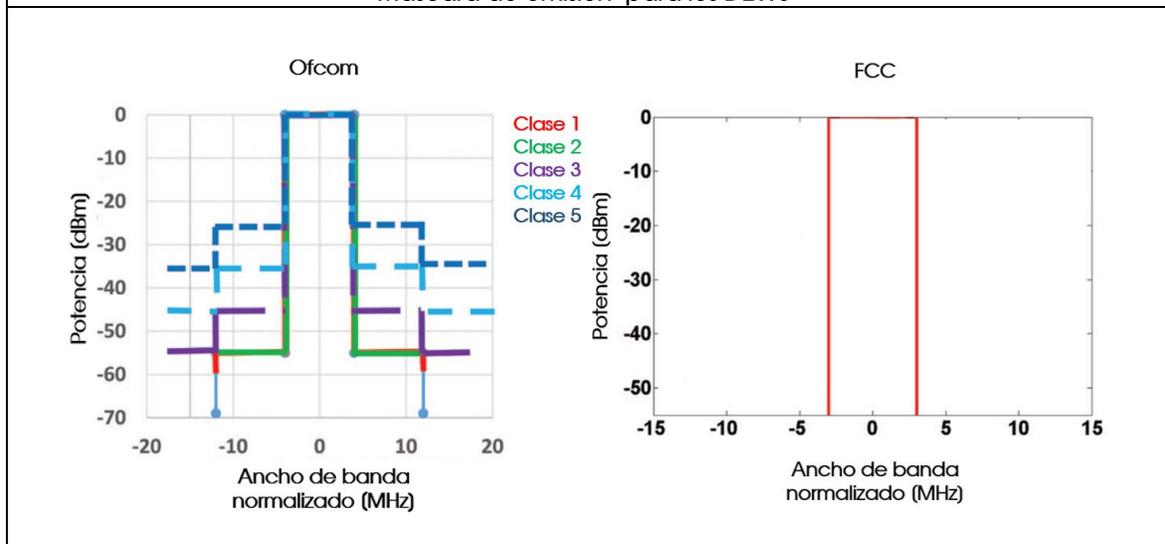
controlados por una BDWS, cuya banda de frecuencias de operación está comprendida dentro del rango de 470-790 MHz. Además, este estándar incluye las características de la capa física y los elementos que componen la arquitectura del sistema TVWS.

En la Tabla 5.1 se realiza una comparación en la operación de la Tecnología TVWS entre Ofcom y FCC.

Tabla 5.1. Comparación de las regulaciones de Ofcom y FCC respecto a la operación de la tecnología TVWS.

Características	Reino Unido (Ofcom)	Estados Unidos (FCC)
Rango de frecuencias	470-790 MHz	608-614 MHz
Instrumento Regulatorio que define la operación de los TVWS	<i>ELECTRONIC COMMUNICATIONS The Wireless Telegraphy (White Space Devices) (Exemption) Regulations 2015</i>	<i>ELECTRONIC CODE OF FEDERAL REGULATIONS.</i> Título 47, parte 15, subparte H.
Autorización	Nacional	Nacional
Tecnologías para el acceso oportunista al espectro	-Base de datos dinámicas	-Técnicas de detección espectral (<i>spectrum sensing</i>). -Bases de datos dinámicas.
Estándar	ETSI EN 301 598	IEEE 802.11af IEEE 802.22 IEEE 802.19
Homologación de DWS	No, toda vez que sigan el estándar y/o cumplan las características operativas contenidas en el instrumento regulatorio.	Si
Ancho de banda mínimo de canal	8 MHz	6 MHz

Máscara de emisión para los DEWS²⁸



²⁸ Ramachandran, Ramjee *et al.*, "A CRITIQUE OF FCC'S TV WHITE SPACE REGULATIONS", *Get mobile Vol. 20*, Estados Unidos, junio de 2016, p. 24. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en: <https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/07/fcc.pdf>

5.5 Ventajas y Desventajas

5.5.1 Ventajas

- A través de la tecnología TVWS es posible utilizar el espectro ocioso, en tiempo y/o espacio, de un Concesionario del Servicio de Televisión Radiodifundida, lo cual contribuye al uso eficiente del espectro.
- La tecnología *White Spaces* puede ser utilizada en cualquier rango del espectro radioeléctrico.
- Con base en el punto anterior, dado que TVWS es principalmente (hasta ahora) implementada en la banda UHF, debido a sus características de propagación presentan coberturas del orden de decenas de kilómetros en comparación de las tecnologías comunes de banda ancha.
- La tecnología TVWS se encuentra estandarizada por el ETSI y por el IEEE, lo cual brinda una certeza a los inversionistas de tecnología o aquellos Concesionarios que deseen utilizar la tecnología TVWS.
- Las características técnicas, tanto para los estándares IEEE y ETSI, pueden ser modificadas de acuerdo a la regulación del país en el cual se vaya a desplegar la tecnología TVWS.
- De acuerdo a "*The Boston Consulting Group*", en comparación con otras tecnologías para la prestación del servicio de banda ancha (como son las redes de fibra óptica, las comunicaciones satelitales, las redes LTE, etc.), resulta más barato desplegar proyectos de TVWS (aproximadamente entre 10 y 15 billones de dólares).²⁹
- Es más viable implementar TVWS en zonas rurales dado a que en estas zonas no se encuentra una demanda de espectro como en las zonas metropolitanas.

5.5.2 Desventajas

- Como es entendido el concepto de "concesión" a nivel internacional (y haciendo especial énfasis en aquellos países cuya legislación está basada en el derecho romano, como es el caso de México) impone una barrera regulatoria para que pueda existir la tecnología TVWS.
- De acuerdo a la industria, TVWS no resulta ser viable en entornos metropolitanos debido a la congestión de espectro.
- La tecnología TVWS puede no ser atractiva para ser implementada debido a que no necesariamente en los espacios geográficos "en

²⁹ Microsoft, *A Rural Broadband Strategy. Connecting Rural America to New Opportunities*, Estados Unidos, p. 13.

blanco” existe un núcleo de población lo suficiente grande para invertir en la tecnología.

- La tecnología satelital puede ser la mejor opción para cubrir las zonas rurales que implementar TVWS.
- Actualmente hay incertidumbre por parte de los Reguladores a nivel internacional sobre si el habilitar TVWS puede ser una buena opción y si realmente permitirá desarrollar nichos de mercado.
- Las Administraciones deben de tener un perfecto conocimiento de la ubicación de sus estaciones de TV, así como de otras posibles estaciones de radiocomunicaciones que pudieran ser afectadas por los servicios de TVWS, de lo cual no en todas las Administraciones se tiene un perfecto conocimiento.
- En dado caso de implementar la tecnología TVWS, el Regulador debe de tener una base de datos inteligente y dinámica capaz de estar actualizándose constantemente para así garantizar un entorno libre de interferencias. Lo anterior involucra una gran inversión económica por parte de las Administraciones.
- Las bases de datos controladas por los terceros deben de estar protegidas de ciberataques ya que la información que resguardan éstas podría ser objeto de ser clasificada de carácter sensible y, en caso de ser vulnerada, se pondrían en riesgo las comunicaciones e incluso podría atentar contra la seguridad nacional.

5.6 Referencias

1. Microsoft, *A Rural Broadband Strategy. Connecting Rural America to New Opportunities*, Estados Unidos.
2. Ofcom, "New Spectrum for Audio PMSE", *Office of Communications*, Reino Unido, 2015. Consultado el 23 de septiembre de 2015, disponible en:
<https://www.ofcom.org.uk/consultations-and-statements/category-2/new-spectrum-audio-pmse>
3. Ofcom, "White Space Database Operators", *Office of Communications*, Reino Unido, 30 de junio de 2016. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:
<https://tvws-databases.ofcom.org.uk/>
4. Ofcom, "Implementing TV White Spaces", *Office of Communications*, Reino Unido, 12 de febrero de 2015. Consultado el 19 de agosto de 2017, disponible en:
https://www.ofcom.org.uk/__data/assets/pdf_file/0034/68668/tvws-statement.pdf
5. ETSI, "ETSI EN 301 598 White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz, TV broadcast band; Harmonized EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, 2014. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_en/301500_301599/301598/01.01.01_60/en_301598v010101p.pdf
6. FCC, "NOTICE OF INQUIRY. In Matter of Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 20 de diciembre de 2002. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:
https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-02-328A1.pdf
7. FCC, "NOTICE OF PROPOSED RULE MAKING. In Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 25 de mayo de 2004. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:
https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-04-113A1.pdf
8. Ofcom, "Ofcom gives green light for 'TV white space' wireless technology", *Office of Communications*, Reino Unido, 12 de febrero de 2015. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:
<https://www.ofcom.org.uk/about-ofcom/latest/media/media-releases/2015/tvws-statement>
9. Flores, Adriana B. y Guerra, Ryan E., "IEEE 802.11af: A Standard for TV White Space Spectrum Sharing", *IEEE Communications Magazine*, octubre de 2013.

10. IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Information Technology — Telecommunications and information exchange between systems Wireless Regional Area Networks (WRAN) — 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", *IEEE Standards Association*, Estados Unidos, 2011.
11. IEEE Computer Society, "IEEE Standard for Information technology — Telecommunications and information exchange between systems — Local and metropolitan area networks — Specific requirements — Part 19: TV White Space Coexistence Methods", *IEEE Standards Association*, Estados Unidos, 2014.
12. ECC, "ECC Report 186 Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, enero de 2013. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:
<http://www.erodocdb.dk/docs/doc98/official/Pdf/ECCRep186.pdf>
13. Ramachandran, Ramjee *et al.*, "A CRITIQUE OF FCC'S TV WHITE SPACE REGULATIONS", *Get mobile Vol. 20*, Estados Unidos, junio de 2016. Consultado el 2 de noviembre de 2017, disponible en:
<https://www.microsoft.com/en-us/research/wp-content/uploads/2016/07/fcc.pdf>



VI. Licensed Shared Access

En los Capítulos anteriores se ha hablado de aquellas tecnologías, algunas ya implementadas y otras en desarrollo, que permiten acceder al espectro de forma dinámica, ya sea en bandas de frecuencia concesionadas o en bandas de frecuencia de uso libre, e incluso algunas de ellas son capaces de operar en un modo híbrido (como es el caso de LTE-U). Sin embargo, debido a que las tecnologías anteriormente expuestas son de reciente creación y algunas de ellas todavía se encuentran en etapa experimental, resulta muy costoso actualmente implementarlas. Por consiguiente, fue necesario explorar otras formas de compartición del espectro, que si bien pueden ser también implementadas con tecnologías de acceso dinámico, la compartición recae principalmente en el modelo regulatorio y no así en la tecnología misma, como es el caso del modelo regulatorio conocido como *Licensed Shared Access* (LSA).

Debido a la demanda continua y creciente de espectro radioeléctrico para las comunicaciones móviles, los Reguladores han implementado diversos planes de acción que permiten “obtener” espectro para satisfacer dicha demanda. Por ejemplo, anteriormente se ha comentado sobre el *rebandig* (cuyo término en español se acuñó como “reordenamiento”), el cual consiste en un “desplazamiento” de los usuarios existentes del espectro hacia nuevas bandas de frecuencias para la introducción de nuevos servicios o para mejorar los ya existentes¹. Sin embargo, el *rebanding* es un procedimiento a largo plazo, cuyas acciones de liberación de espectro no son perceptibles sino hasta años después de haber comenzado a ejecutar dicho procedimiento. Además, los reordenamientos, sin importar en las bandas de frecuencia que se apliquen, conllevan cuantiosas inversiones en nuevos equipos e infraestructura, principalmente para los usuarios del espectro que son objeto del reordenamiento y, en algunos casos, implican también gastos para los Reguladores.

Por lo anterior, los Reguladores han tenido la necesidad de diseñar otras formas de obtención de espectro para la prestación de los servicios de banda ancha. Así, LSA surgió como una propuesta regulatoria innovadora para habilitar la compartición de espectro, revolucionando la forma en la

¹ UIT-R, “Recomendación UIT-R SM.1603-2. Reorganización del espectro como método de gestión nacional del espectro”, *Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (Serie SM, Gestión del Espectro)*, Suiza, agosto de 2014, p. 2. Consultado el 10 de Octubre de 2017, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1603-2-201408-III!PDF-S.pdf

que tradicionalmente se ha autorizado el acceso espectro: a través de un régimen de concesión o a través de las bandas de frecuencias de uso libre.

Actualmente no existe una definición mundialmente aceptada por los Reguladores (o incluso por la propia UIT) sobre LSA, por lo que cada Regulador que ha adoptado este modelo regulatorio lo ha definido *ad hoc* sus condiciones regulatorias locales (más adelante en este Capítulo se abordarán los únicos modelos de LSA que se han habilitado, el europeo y el estadounidense). Sin embargo, la primera definición que describió lo que significa LSA fue establecida por el Grupo de Políticas de Espectro Radioeléctrico (*Radio Spectrum Policy Group*, RSPG) de la Comisión Europea (CE) en el 2013 con la finalidad de sugerir a ésta el explorar otras formas de compartición de espectro. Así, el RSPG definió a LSA como:

“Una propuesta regulatoria enfocada a facilitar la introducción de los sistemas de radiocomunicaciones operados por un número limitado de licencias bajo un régimen individual de licenciarios en una banda de frecuencias ya asignada o de la que se espera que se asigne a uno o más usuarios titulares. Bajo la propuesta de *Licensed Shared Access*, los usuarios adicionales están autorizados para usar el espectro (o parte de éste) de acuerdo con las reglas de compartición incluidos en sus derechos del uso del espectro, permitiendo a todos los usuarios autorizados, incluyendo a los usuarios titulares, proveer cierta calidad de servicio (QoS)”².

En otras palabras, LSA es un modelo regulatorio que permite a los usuarios titulares del espectro poder compartir su espectro (o parte del mismo) con nuevos usuarios. Al momento de efectuar la compartición, el usuario titular cede de los derechos del uso del espectro para que el(los) nuevo(s) usuario(s) entrante(s) pueda(n) tener la ventaja de ofertar su servicio garantizando una calidad en el mismo. Lo anterior sería imposible de efectuarse únicamente con las tecnologías de acceso dinámico, dado que su calidad de “oportunistas” hace depender las comunicaciones únicamente del funcionamiento y de la protección contra interferencias que tengan estas tecnologías, por lo que no hay una forma de garantizar la fiabilidad en la comunicación. Por ejemplo, como se explicó en el Capítulo V, aunque con la tecnología TVWS hay una compartición de espectro a nivel espacial y temporal, aunado a un mecanismo coordinado de protección contra interferencias entre el usuario titular y los nuevos usuarios; y a pesar que en los países en donde se ha implementado existe un marco

² RSPG, “RSPG Opinion on Licensed Shared Access”, *EUROPEAN COMMISSION*, Bélgica, 12 de noviembre de 2013, p. 7. Consultado el 16 de octubre de 2017, disponible en: https://circabc.europa.eu/sd/d/3958ecef-c25e-4e4f-8e3b-469d1db6bc07/RSPG13-538_RSPG-Opinion-on-LSA%20.pdf

regulatorio que brinda una estabilidad jurídica a la operación de esta tecnología, los usuarios de la tecnología TVWS no tienen los derechos del uso del espectro. Además, en dado caso que los nuevos usuarios causen interferencias perjudiciales al usuario titular, el Regulador en cualquier momento puede cesar operaciones.

El presente Capítulo explicará LSA desde una perspectiva técnico-regulatoria, en el cual se expondrá el modelo de compartición de espectro estadounidense y europeo.

6.1 Funcionamiento de LSA

El objetivo de LSA es autorizar a nuevos usuarios el derecho al uso del espectro a través de un título habilitante bajo un régimen compartido con el usuario titular del espectro, logrando así garantizar una calidad de servicio tanto para el usuario titular como para los nuevos usuarios. Para que LSA pueda ser llevado a cabo, es necesario la participación coordinada de las siguientes partes: el Regulador, el usuario titular y el(los) usuario(s) entrante(s). Para efectos del análisis de LSA en el presente Capítulo, a continuación se definen los siguientes conceptos:

- **Regulador:** es la autoridad facultada para la administración del espectro radioeléctrico y se encarga de autorizar el uso del espectro a cualquier interesado que desee hacer un uso del mismo a través de un título habilitante.
- **Usuario titular:** es un usuario del espectro radioeléctrico existente en una determinada banda de frecuencias, el cual tiene derechos en el uso del espectro en un área geográfica determinada durante el tiempo establecido por el Regulador a través de un título habilitante.
- **Usuario entrante:** es un usuario que busca tener acceso al espectro radioeléctrico perteneciente a un usuario titular.

Nota: tanto los usuarios titulares como los usuarios entrantes pueden utilizar el espectro para fines comerciales o públicos. La utilización del espectro radioeléctrico para uso comercial confiere el derecho a los usuarios para explotar las bandas de frecuencias con fines de lucro; mientras que el uso del espectro para fines públicos implica que los usuarios utilicen el espectro sin fines de lucro (siendo los principales usuarios de este tipo de espectro las entidades gubernamentales).

El objetivo de autorizar la compartición con un título habilitante de por medio brinda certidumbre legal a los usuarios entrantes, no solo en la prestación del servicio, sino que además les proporciona un instrumento para garantizar una resolución de disputas con el usuario titular ante el

Regulador, en dado caso que alguno de los usuarios entrantes cause interferencias perjudiciales al usuario titular, y viceversa.

Como se ha mencionado anteriormente, la compartición que LSA habilita pudiera ser únicamente a nivel espacial, es decir, el permitir que un usuario entrante utilice todo o parte del espectro del usuario titular dentro de una zona geográfica limitada; lo cual es una forma tradicional y simple de habilitar la compartición de espectro. Sin embargo, existe la posibilidad de que la compartición se ejecute dinámicamente en el tiempo. Por lo anterior, los Reguladores y los usuarios se pueden valer del uso de las tecnologías de acceso dinámico para implementar al LSA³.

6.2 Modelos de compartición de espectro

Se define a la “compartición del espectro” como el uso colectivo, por dos o más usuarios, de un rango del espectro radioeléctrico, el cual puede estar bajo el régimen de una licencia (para el caso de LSA) o exento de licencia, como es el caso de las bandas de frecuencia de uso libre, también llamado *License-Exempt Access (LEA)*⁴. La compartición de espectro es realizada una vez que el Regulador ha identificado que el usuario titular está haciendo un uso ineficiente del espectro al tener parte de su espectro subutilizado u ocioso; la compartición también puede ser ejecutada a partir de la iniciativa del usuario titular a través de un acercamiento directo con el Regulador.

En la compartición de espectro se debe asegurar que todas las partes involucradas (usuario titular, Regulador y el usuario entrante) tengan los suficientes incentivos para apoyar la compartición de espectro, es decir, que los beneficios que se cuenten para implementar la compartición superen los costos y los riesgos de implementación de dicha compartición⁵. Existen dos modelos en los cuales se puede efectuar la compartición del espectro: la compartición *horizontal* y *vertical*.

6.2.1 Compartición Horizontal

Se le denomina compartición horizontal cuando la compartición está efectuada entre usuarios, tanto titulares como entrantes, cuya finalidad es

³ RSPG, “RSPG Opinion on Licensed Shared Access”, EUROPEAN COMMISSION, Bélgica, 12 de noviembre de 2013, p. 5. Consultado el 16 de octubre de 2017, disponible en: https://circabc.europa.eu/sd/d/3958ecef-c25e-4e4f-8e3b-469d1db6bc07/RSPG13-538_RSPG-Opinion-on-LSA%20.pdf

⁴ Deloitte, “The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum”, GSMA, Reino Unido, 23 de enero de 2014, p. 14. Consultado el 18 de septiembre de 2017, disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/02/The-Impacts-of-Licensed-Shared-Use-of-Spectrum.-Deloitte.-Feb-20142.pdf>

⁵ Ídem, p. 22.

utilizar el espectro para fines comerciales⁶. Cabe mencionar que este modelo de compartición ya es habilitado por otros mecanismos, diferentes a los de LSA, en los cuales los usuarios titulares generan acuerdos con los usuarios entrantes para vender capacidad de banda ancha o ceder los derechos del uso del espectro. Para el caso de la venta/renta de capacidad, estos acuerdos han demostrado ser exitosos y bastante eficientes en relación con los costos y las complejidades de diseñar, construir y operar infraestructura paralela a las redes móviles⁷ (véase “Lineamientos para la comercialización de servicios móviles por parte de operadores móviles virtuales”⁸).

Para el caso de la cesión de derechos en el uso del espectro, a nivel internacional ya existe un modelo denominado “mercado secundario de espectro” (véase “Lineamientos generales sobre la autorización de arrendamiento de espectro radioeléctrico”⁹). Este mecanismo ha sido utilizado en diversos países para flexibilizar, agilizar y dar dinamismo a la gestión del espectro radioeléctrico, ya que permite disminuir o corregir las ineficiencias que hayan ocurrido en la asignación de espectro (acumulación y ociosidad), así como permitir que el espectro se redistribuya hacia aquellos usuarios que lo requieren para satisfacer las demandas de tráfico de sus redes¹⁰. Por otra parte, es una alternativa que habilita a cualquier interesado obtener espectro sin depender de que el Estado lo licite, eliminando así barreras de entrada para los usuarios entrantes.

6.2.2 Compartición Vertical

Se denomina *compartición vertical* cuando un Usuario Titular Comercial (UTC) comparte su espectro con un Usuario Entrante Público (UEP), por ejemplo, gobierno, entidades militares, organizaciones de seguridad privada, etc.; y viceversa. La compartición vertical en donde un Usuario Titular Público (UTP) comparte su espectro con un Usuario Entrante Comercial

⁶ Deloitte, “The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum”, GSMA, Reino Unido, 23 de enero de 2014, p. 15. Consultado el 18 de septiembre de 2017, disponible en:

<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/02/The-Impacts-of-Licensed-Shared-Use-of-Spectrum.-Deloitte.-Feb-20142.pdf>

⁷ *Idem*, p. 16.

⁸ Para mayor información consúltese en:

<http://www.ift.org.mx/sites/default/files/industria/temasrelevantes/4722/documentos/proyectoacuerdooperadoresmovilvirtualesversionfinal16022016.pdf>

⁹ Para mayor información consúltese en:

http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5431448&fecha=30/03/2016

¹⁰ IFT, “ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones aprueba y emite los Lineamientos generales sobre la autorización de arrendamiento de espectro radioeléctrico”, *Diario Oficial de la Federación*, México, 30 de marzo de 2016. Consultado el 14 de septiembre de 2017, disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5431448&fecha=30/03/2016

(UEC) es considerada como la mejor opción para proveer de espectro a los Concesionarios móviles, dado que se tiene registro de numerosos casos en donde los UTP tienen espectro subutilizado o espectro sin utilizar. Este tipo de compartición “puede crear la oportunidad para mitigar la escases de espectro móvil, mejorar la eficiencia espectral y generar beneficios económicos más grandes mientras se minimiza el impacto a los servicios y a los beneficios sociales provistos por los tenedores del espectro”¹¹. Por lo anterior, los Estados Unidos y la UE han apostado por este tipo de compartición, de los cuales se hablará más adelante.

Sin embargo, la compartición vertical cuando el UTC comparte su espectro con los UEP, va en contra con el objetivo de buscar disponibilidad de espectro para banda ancha debido a que esta compartición reduce el espectro disponible de los UTC. Además, en un entendimiento colectivo de la eficiencia espectral, los UTC siempre han demostrado ser espectralmente más eficientes que los UTP¹².

6.3 Factores a considerar para la compartición

Las partes interesadas (el Regulador, el usuario titular y el usuario entrante) deben tomar en cuenta varios aspectos (tecnológicos, regulatorios y económicos) del ecosistema en el que se efectuará la compartición para que tanto el Regulador como los usuarios cuenten con incentivos suficientes para efectuar la compartición; de no ser observados estos factores, alguno de los interesados podría no ser beneficiado de la compartición o incluso, el objeto mismo de la compartición se perdería, con un potencial riesgo de convertirse en una regulación fallida. Los factores a observar son los siguientes:

- La banda de frecuencias en donde se efectuará la compartición.
- Las condiciones regulatorias del usuario titular.
- Las características técnicas con la que se efectuará la compartición.
- El entorno regulatorio que habilitará la compartición.
- Los beneficios que se obtendrán de la compartición.

¹¹ Deloitte, “The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum”, *GSMA*, Reino Unido, 23 de enero de 2014, p. 16. Consultado el 18 de septiembre de 2017, disponible en:

<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/02/The-Impacts-of-Licensed-Shared-Use-of-Spectrum.-Deloitte.-Feb-20142.pdf>

¹² *Ídem*.

6.3.1 La banda de frecuencias en donde se efectuará la compartición

Sin importar los fines de la compartición de espectro, el Regulador debe velar en todo momento que ésta se habilite en bandas de frecuencia que permitan una armonización a nivel internacional, y que cualquier tecnología que se desarrolle derivada de la compartición esté estandarizada. Lo anterior promovería un ambiente de certidumbre para la industria en la fabricación de dispositivos y así promovería el desarrollo de economías de escala¹³. Bajo esta tesitura, las bandas IMT son consideradas como las viables para implementar en ellas LSA¹⁴. En la siguiente tabla se describen las bandas de frecuencias IMT para las 3 regiones de la UIT:

Tabla 6.1. Bandas de frecuencias IMT (en MHz) en las tres Regiones de la UIT.

Región 1	Región 2	Región 3
450-470	450-470	450-470
694-790	698-960	698-790
790-960		
1710-1885	1710-1885	1710-1885
1885-2025	1885-2025	1885-2025
2110-2200	2110-2200	2110-2200
2300-2400	2300-2400	2300-2400
2500-2690	2500-2690	2500-2690
3400-3600	-----	3400-3600

6.3.2 Las condiciones regulatorias del usuario titular

Las condiciones técnico-regulatorias con las que los usuarios titulares (ya sea públicos o privados) prestan sus servicios son diferentes entre sí, incluso para aquellos usuarios titulares que prestan el mismo tipo de servicio. Lo anterior ocurre debido a que los títulos habilitantes fueron expedidos en diversas etapas administrativas, sin importar el país del que se trate. Así, el área geográfica en la cual el servicio es prestado y las características tecnológicas del servicio deben ser evaluadas por los interesados “caso por caso” para establecer las condiciones con las cuales se efectuará la compartición de espectro.

¹³ Deloitte, “The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum”, GSMA, Reino Unido, 23 de enero de 2014, p. 35. Consultado el 18 de septiembre de 2017, disponible en:

<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/02/The-Impacts-of-Licensed-Shared-Use-of-Spectrum.-Deloitte.-Feb-20142.pdf>

¹⁴ *Ídem*.

6.3.3 Las características técnicas con la que se efectuará la compartición

Como se ha mencionado en anteriores Capítulos, cuando el espectro es compartido en más de un dominio, aumenta la complejidad en su funcionamiento. Así, las tecnologías de acceso dinámico al espectro podrían ser implementadas como auxiliares a LSA para la gestión u operación de espectro entre los usuarios titulares y entrantes, por lo que entonces, la compartición tendría un grado de complejidad adicional dado que estaría efectuada en el dominio del tiempo, espacio y frecuencia.

Bajo este contexto, la compartición podría estar asignada bajo las siguientes modalidades: *estática*, donde los usuarios comparten el mismo espectro en diferentes áreas geográficas; *dinámica en tiempo*, donde los usuarios comparten el espectro en una misma área geográfica, pero en diferentes lapsos de tiempo; *dinámica en espacio*, donde los usuarios utilizan el mismo espectro pero en diferentes puntos geográficos dentro de una misma zona de cobertura; y *dinámica en tiempo y espacio*, cuando los usuarios comparten en el espectro, bajo un esquema de compartición dinámica de tiempo y espacio¹⁵.

6.3.4 El entorno regulatorio que habilitará la compartición. La participación del Regulador en el proceso de la compartición

El regulador debe establecer un entorno regulatorio de compartición lo suficientemente flexible para no entorpecer la compartición entre los usuarios ni provocar una barrera de ingreso para los nuevos usuarios entrantes. Además, el regulador debe establecer un marco regulatorio que asegure un equilibrio entre los usuarios titulares y los usuarios entrantes, es decir, que ambos sean iguales ante la ley en cuanto al uso del espectro se refiere. Asimismo, el Regulador debe establecer las reglas de compartición técnicas y regulatorias (consensuadas con los usuarios) que de ninguna manera entorpezcan la prestación de los servicios de los usuarios.

6.3.5 Los beneficios que se obtendrán de la compartición

Cada uno de los usuarios entrantes puede tener diferentes objetivos que lo motiven para buscar la compartición, tal como lo es el incremento de cobertura, la provisión de un servicio diferente, el incremento de la capacidad de sus redes, la mejora de la experiencia del usuario final, etc.¹⁶

¹⁵ Deloitte, "The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum", GSMA, Reino Unido, 23 de enero de 2014, p. 34. Consultado el 18 de septiembre de 2017, disponible en:

<https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/02/The-Impacts-of-Licensed-Shared-Use-of-Spectrum.-Deloitte.-Feb-20142.pdf>

¹⁶ *Idem*.

Mucho dependerá de qué tantos beneficios se pueden obtener de la compartición para poder efectuarla, dado que el proceso de compartición, al igual que otro proceso regulatorio, involucra la participación conjunta de los interesados, la cual repercute en tiempos y costos. Así, la compartición no debería ser efectuada si los beneficios de su implementación son menores al trabajo y a los costos de efectuar la compartición.

6.4 Implementación de LSA

6.4.1 Estados Unidos (FCC): banda 3.5 GHz

6.4.1.1 Preámbulo

EL modelo de LSA fue implementado oficialmente en el 2015 en Estados Unidos a través del servicio denominado *Citizens Broadband Radio Service* (CBRS), con el objetivo de promover la innovación e inversión en la banda de 3550-3700 MHz (la banda de 3.5 GHz), implementando tecnologías de *small cells*¹⁷. Las condiciones técnicas del CBRS se establecieron dentro del Título 47, parte 96, del Código de Regulaciones Federales (CRF)¹⁸.

Antes de que el CBRS fuera implementado, la banda 3550-3650 MHz estaba destinada al servicio de radiolocalización y al servicio de radionavegación aeronáutica (para uso a título primario por los usuarios federales), y al servicio fijo por satélite (para uso a título primario para usuarios no federales)¹⁹. En la banda operaban (y actualmente siguen operando) radares fijos y móviles de alta potencia, pertenecientes al departamento de defensa y la marina. Adicionalmente, dentro del segmento 3650-3700 MHz, se tiene a título primario el uso federal del servicio de radiolocalización.

6.4.1.2 Implementación regulatoria

Para que la compartición de espectro pudiera efectuarse en Estados Unidos, se realizó un trabajo en conjunto entre el gobierno, la industria y la academia. A continuación se describen las etapas que dieron paso a la compartición de espectro en este país:

¹⁷ FCC, "REPORT AND ORDER AND SECOND FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550- 3650 MHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 21 de abril de 2015, p. 3. Consultado el 8 de noviembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-47A1.pdf

¹⁸ FCC, "3.5 GHz Band / Citizens Broadband Radio Service", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos. Consultado el 6 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.fcc.gov/rulemaking/12-354>

¹⁹ FCC, "REPORT AND ORDER AND SECOND FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550- 3650 MHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 21 de abril de 2015, p. 6. Consultado el 8 de noviembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-47A1.pdf

- **Etapa 1.** En marzo de 2010, el Plan Nacional de Banda Ancha recomendó, que para el 2020, la FCC debía liberar 500 MHz para banda ancha, con el objetivo a mediano plazo de liberar 300 MHz para el 2015. Este mandato no sólo ayudó a la obtención de espectro para banda ancha, si no al desarrollo de tecnologías oportunistas que permitiera el acceso compartido y dinámico del espectro²⁰.
- **Etapa 2.** El 28 de junio del 2010, a través del memorándum presidencial “Desencadenando la revolución de la banda ancha inalámbrica”, el entonces presidente de los Estados Unidos, Barak Obama, encomendó a la NTIA colaborar con la FCC para habilitar 500 MHz de espectro radioeléctrico para servicios inalámbricos comerciales²¹. En consecuencia, en octubre de 2010 la NTIA liberó el “Fast Track Report”²², en el cual se definió a la banda de 3.5 GHz como una de las viables para brindar servicios comerciales de banda ancha para el 2015. Además, este documento incluyó restricciones operativas para proteger a los usuarios existentes de los nuevos servicios comerciales en la banda y viceversa²³.
- **Etapa 3.** A finales de 2012, la FCC publicó el “NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING AND ORDER. In the Matter of Amendment of the Commission’s Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band”²⁴. En dicho documento se expuso el disponer de 100 MHz de espectro compartido en la banda de 3.5 GHz (3550-3650 MHz), usando *small cells* y bases de datos²⁵.
- **Etapa 4.** En 2013, el PCAST (*President’s Council of Advisors on Science and Technology*) publicó un reporte en el cual señaló que para incrementar la disponibilidad de espectro para banda ancha era necesario promover la compartición espectral entre los usuarios federales y comerciales a través del uso de nuevas tecnologías²⁶. Así, PCAST recomendó que para que el espectro fuera catalogado como compartido, éste debería de contemplar una compartición de tres

²⁰ *Ibidem*, p. 5.

²¹ Para mayor información consúltese en: <http://www.whitehouse.gov/the-press-office/presidential-memorandum-unleashing-wireless-broadbandrevolution>

²² Para mayor información consúltese en:

http://www.ntia.doc.gov/files/ntia/publications/fasttrackevaluation_11152010.pdf

²³ FCC, “REPORT AND ORDER AND SECOND FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission’s Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550- 3650 MHz Band”, *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 21 de abril de 2015, p. 77. Consultado el 8 de noviembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-47A1.pdf

²⁴ Para mayor información consúltese en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-14-49A1.pdf

²⁵ FCC, “Enabling Innovative Small Cell Use In 3.5 GHz Band NPRM & Order”, *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 12 de diciembre de 2012. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.fcc.gov/document/enabling-innovative-small-cell-use-35-ghz-band-nprm-order>

²⁶ Para mayor información consúltese en:

http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ostp/pcast_spectrum_report_final_july_20_2012.pdf

niveles (de los cuales se hablará más adelante). Además, dicha compartición debería estar gestionada con una base de datos denominada SAS (*Spectrum Access System*).

- **Etapa 5.** Posteriormente, el 13 de junio de 2013, a través de un segundo memorando presidencial llamado “Expandiendo el liderazgo de América en innovación inalámbrica”, y retomando a lo anteriormente señalado por el PCAST, Barack Obama señaló que para incrementar el acceso a la banda ancha, éste debería estar conducido por una compartición de espectro con los usuarios federales.
- **Etapa 6.** A finales de 2013, la FCC sometió a consulta pública los modelos de licenciamiento y los requerimientos técnicos de la banda de 3.5 GHz (3550-3650 MHz), así como someter a discusión la utilización del SAS para la gestión automática de frecuencias por el sistema.
- **Etapa 7.** En el 2014, la FCC publicó el documento “*FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission’s Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band*”²⁷. Con este documento el objetivo de la FCC fue adoptar reglas que promovieran el uso de la banda de 3.5 GHz de forma eficiente y extendida, a través del servicio CBRS, así como generar comentarios de las características de dicho servicio y así establecerlo dentro de una parte en el CRF²⁸.
- **Etapa 8.** Finalmente, el 17 de abril de 2015, la FCC a través del “*Report and Order and Second Further Notice of Proposed Rulemaking*”²⁹ adopta el servicio CBRS, estableciendo sus características de operación en la parte 96 del CRF.

6.4.1.3 Estructura de la compartición

La FCC consideró que la compartición de espectro en la banda de 3.5 GHz debería de estar establecida a través de reglas simples y flexibles que permitieran una amplia variedad de innovación de servicios, promovieran un rápido despliegue de redes, así como el desarrollo de un ecosistema robusto de servicios.

De esta forma, la estructura de la compartición de espectro en la banda de 3.5 GHz está conformada principalmente entre dos tipos de usuarios, los Usuarios Titulares (UT, quienes previamente tienen un derecho en el uso del

²⁷ Para mayor información consúltese en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-47A1.pdf

²⁸ FCC, “FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission’s Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band”, *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 23 de abril de 2014, p. 4. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-14-49A1.pdf

²⁹ Para mayor información consúltese en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-47A1_Rcd.pdf

espectro) y los usuarios del CBRS. A su vez, los usuarios CBRS se subdividen en dos tipos de usuarios: quienes tienen un Acceso Prioritario (AP) y quienes tienen una Autorización General de Acceso (AGA), cuyo sistema de gestión de interferencias y asignación de frecuencias es conocido como SAS³⁰. Así, la estructura de la compartición también puede ser entendida a través de un esquema jerárquico de 3 niveles: el nivel de UT, el nivel de los usuarios AP y el nivel de los usuarios con AGA.

Nivel de los Usuarios Titulares (UT)

El nivel de los UT es el nivel más alto dentro de la estructura de la compartición y, como su nombre lo indica, dentro de este nivel se encuentran todos los usuarios que tengan derechos en el uso del espectro: usuarios federales, cualquier usuario no federal que preste el servicio fijo por satélite y otros usuarios que se encuentren dentro del rango de 3650-3700 MHz. Los UT cuentan con protección contra interferencias provenientes de los usuarios CBRS.

Usuarios del CBRS

El nivel de AP fue destinado para aquellos usuarios que requirieran operar con cierto grado de interferencias perjudiciales dentro de la banda pero también con cierto grado de servicio (por ejemplo, hospitales, entidades de seguridad pública, etc.), cuya operación es habilitada a través de una Licencia de Acceso Prioritario (LAP) dentro del rango de frecuencias de 3550-3650 MHz³¹. Aquel usuario que desee poseer una LAP previamente, debe de cumplir con los requisitos impuestos por la FCC y deberá cumplir con las reglas del CBRS. Dentro de las LAP se establece el área de servicio del usuario, las frecuencias a operar (restrictivos a un canal de 10 MHz), las áreas de protección y los términos de la licencia, con duración de 3 años sin permiso de renovación. Un usuario puede tener como máximo cuatro LAP en una misma zona geográfica (40 MHz). Cabe señalar que las LAP no se pueden transferir a terceros ni ser divididas en porciones a otros usuarios.

Por otro lado, el nivel AGA fue destinado para aquellos usuarios que operan bajo un esquema dinámico y oportunista, dentro de una determinada área geográfica³², en el segmento 3550-3700 MHz. Los usuarios de AAG no deben

³⁰ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 96 —CITIZENS BROADBAND RADIO SERVICE", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 5 de diciembre de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=c80c8be60d7a909cb9ec34dfc28e7ada&mc=true&tpl=/ecfrbrowse/Title47/47cfrv5_02.tpl#0

³¹ *Ídem*.

³² FCC, "REPORT AND ORDER AND SECOND FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550- 3650 MHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 21 de abril de 2015, p. 3962. Consultado el 8 de noviembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-47A1.pdf

causar interferencia perjudicial a usuarios de otros niveles y así mismo deberán aceptar la interferencia perjudicial de éstos. Además, los usuarios AAG podrán utilizar las frecuencias de las LAP cuando éstas no estén en uso, previamente determinadas por el SAS.

6.4.1.4 Implementación tecnológica

Dispositivos CBRS

Los dispositivos CBRS (DCBRS) están compuestos de estaciones fijas y las redes que los conforman, sin incluir los dispositivos de los usuarios finales; están divididos en dos categorías: la categoría A (para operar en interiores) y la categoría B (para operar en exteriores), destinados para dispositivos de baja y alta potencia, respectivamente. Estos dispositivos pueden ser utilizados tanto para los usuarios de AP como para los usuarios de AGA. Los DCBRS no deben causar interferencia perjudicial y aceptar ésta de los usuarios titulares autorizados a operar en la banda de 3500-3700 MHz. De forma general, los DCBRS deben cumplir con lo siguiente:

- Tener la capacidad de geolocalizarse.
- Previo a emitir cualquier transmisión, todos los DCBRS deben estar registrados en el SAS. Los DCBRS proveerán al SAS su ubicación geográfica, su altura sobre el nivel de piso, su clase (A o B), su estatus de autorización (AP o AGA), su número de identificación de FCC, nombre de la estación, número de serie del fabricante, habilidades de detección (en caso de tenerlas), información adicional, etc. Lo anterior será transmitido al SAS cada 60 segundos.
- Además de las características técnicas de cada dispositivo (mencionadas en el punto anterior), los DCBRS deben reportar al SAS las características de la señal de transmisión (tasa de error de paquetes y otras métricas de interferencia) en las frecuencias que estén ocupando y en las frecuencias adyacentes.
- Reportar al SAS las frecuencias que ocuparán.
- Transmitir con una modulación digital.
- Incorporar medidas de seguridad que garanticen la comunicación con el SAS, entre los mismos DCBRS, y entre los DCBRS y los dispositivos del usuario final, para prevenir que un tercero corrompa o intercepte las comunicaciones. Así, los DCBRS y los dispositivos del usuario final deben tener características que los protejan contra la modificación del *software* y del *firmware*³³ por terceros no autorizados.

³³ El *firmware* es un *software* o un conjunto de instrucciones programadas sobre el *hardware* del dispositivo, el cual provee de instrucciones del como los componentes del *hardware* se deben de comunicar entre sí. Para mayor información consúltese en: <https://techterms.com/definition/firmware>

Dispositivos CBRS clase A (DCBRSA). Estos dispositivos están destinados para ser utilizados principalmente con tecnología de *small cells*, por lo que operan con bajas potencias (véase Tabla 6.2). Sin embargo, deben observar las instrucciones del SAS para poder operar. Adicionalmente, los DCBRSA no deberán ser instalados ni operados en sitios *outdoor* con antenas que excedan los 6 metros de HAAT³⁴.

Dispositivos CBRS clase B (DCBRSB). Este dispositivo está diseñado para operar con potencias mucho mayores que la categoría A, dentro del rango de frecuencias de 3650-3700 MHz. Para facilitar la coexistencia del CBRS, estos dispositivos deben proveer al SAS con información sobre la configuración de la antena, incluida su ganancia, ancho de banda, azimut, ángulo de inclinación y altura sobre el nivel de piso. En el segmento de 3550-3650 MHz, los DCBRSB operarán con previo consentimiento del ESC (*Environmental Sensing Capability*, de la cual se hablará más adelante) y del SAS.

Tabla 6.2. Características de los DCBRSA y los DCBRSB.

Categoría de DCBRS	Máxima PIRE (dBm/10 MHz)	Instalaciones del dispositivo CBSD	Condiciones para operar en el segmento 3550-3650 MHz	Condiciones para operar en el segmento 3650-3700 MHz
A	30	-Interiores -exteriores, como máximo 6 m de HAAT.	Puede operar donde sea, siempre y cuando se encuentre fuera de la zona de protección del Departamento de Defensa.	Puede operar donde sea, siempre y cuando se encuentre fuera de la zona de protección del Departamento de Defensa y del servicio fijo por satélite.
B (no rural)	40	-Solo exteriores. -Se necesita una instalación profesional.	Fuera de la zona de protección del Departamento de Defensa, previa autorización del ESC.	Puede operar donde sea, siempre y cuando se encuentre fuera de la zona de protección del Departamento de Defensa y del servicio fijo por satélite.
B (rural)	47	-Solo exteriores. -Se necesita de una instalación profesional.	Fuera de la zona de protección del Departamento de Defensa, previa autorización del ESC.	Puede operar donde sea, siempre y cuando se encuentre fuera de la zona de protección del Departamento de Defensa y del servicio fijo por satélite.

³⁴ *Height Above Average Terrain*, que en español significa "Altura Promedio Sobre el Terreno".

Spectrum Access System

EL SAS es un sistema que autoriza y gestiona el uso del espectro del CBRS³⁵. En este sentido, el SAS se encarga de asignar las potencias y las frecuencias a cualquier DCBRS con base en la información proporcionada por el propio DCBRS, de otros DCBRS que se encuentren en la misma zona geográfica, de la información proporcionada por el ESC y de otros SAS. Además, el SAS se encarga de garantizar la correcta operación (libre de interferencias perjudiciales) de los UT, así como también se encarga de proteger las comunicaciones entre los usuarios AP o AGA. Algunas de las funciones más importantes del SAS son:

- Almacena información de las zonas exclusivas y las zonas de protección.
- Se comunica con el ESC para obtener información sobre las transmisiones de los usuarios federales y así modificar las operaciones de los DCBRS.
- Es mediador de conflictos entre los usuarios de la banda.
- Recibe reportes de interferencias para asegurar protección adicional a los usuarios titulares.
- Únicamente mantiene registros de información o instrucciones recibidas de las transmisiones de los usuarios federales del ESC.

Debido a que los SAS son administrados por un tercero, previa autorización de la FCC, las bases de datos de estos sistemas no deben almacenar, retener, transmitir o revelar información sobre el movimiento o posición de cualquier sistema perteneciente a los usuarios federales.

Environmental Sensing Capability

El objetivo principal del ESC (*Environmental Sensing Capability*) es facilitar la coexistencia de los usuarios CBRS con los UT federales a través de la detección de señales (*spectrum sensing*). Un ESC es administrado por una entidad no gubernamental (al igual que el SAS), previa autorización de la FCC, cuya restricción es no depender de terceros para su operación ni de cualquier otro sistema de radiocomunicación³⁶. Un ESC debe cumplir con lo siguiente:

- Detectar señales de dependencias federales en la banda de 3550-3700 MHz usando técnicas que aseguren la operación de los DCBRS.

³⁵ FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 96 —CITIZENS BROADBAND RADIO SERVICE", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 5 de diciembre de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=c80c8be60d7a909cb9ec34dfc28e7ada&mc=true&tpl=/ecfrbrowse/Title47/47cfrv5_02.tpl#0

³⁶ *Ibidem*.

- Comunicar la presencia de señales de los usuarios federales a todos los SAS.
- Estar disponible en todo momento que la FCC lo requiera.
- No deberán operar con alguna conexión a cualquier base de datos que contenga información sensible de una entidad federal o militar, y no deberá retener, almacenar, transmitir o revelar información sobre el movimiento o posición de cualquier sistema perteneciente a los usuarios federales
- Dentro de los 300 segundos después de que el ESC comunica a los SAS que éste ha detectado una señal del sistema federal en una determinada área, el SAS debe de confirmar la suspensión del CBSD o su reubicación a otra frecuencia no ocupada (en caso de que exista disponibilidad). Si el presidente de los Estados Unidos (u otra entidad del Gobierno Federal) instruye a discontinuar el uso del servicio CBRS, los administradores deben de cesar sus operaciones tan pronto como sea posible.

6.4.2 Unión Europea (CEPT): banda 2.3 GHz

La implementación de LSA en la UE se habilitó en la banda de 2300-2400 MHz (la banda de 2.3 GHz) bajo un marco regulatorio regional impulsado por el ECC (*Electronic Communications Committee*) a través de la CEPT (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*), en respuesta a las propuestas impulsadas por la industria.

La CEPT buscó en todo momento que LSA fuera implementado por los Reguladores (pertenecientes a la CEPT) bajo los principios de simplicidad, fácil y rápido despliegue del servicio, cuidando en todo momento el principio de neutralidad tecnológica. Por lo anterior, el marco regulatorio que impulsa a LSA en Europa, presenta un esquema sumamente flexible en comparación con el que tiene Estados Unidos. Aunado a lo anterior, la CEPT estableció claramente que LSA en Europa, no iba a ser entendida como una solución a la gestión del espectro que necesitara forzosamente de tecnologías de acceso dinámico, sino todo lo contrario, la regulación se iba a enfocar únicamente en aquellos componentes de la red que habilitaran la compartición de espectro. Además, LSA no debería representar el diseño de nuevos protocolos de radio o el adicionar características funcionales adicionales que requieran un proceso largo de desarrollo para los dispositivos de usuario final, así como la implementación de estándares,

desarrollo de procesos para la evaluación de la conformidad de los equipos, etc.³⁷

Bajo este contexto, en la compartición del espectro en Europa están involucrados tres interesados: el Regulador, los Usuarios Titulares (UT) y los usuarios LSA (quienes accederán al espectro de los UT bajo el mecanismo de compartición).

6.4.2.1 Implementación regulatoria

Etapas 1. En el 2011, durante la 72ª reunión del Grupo de Trabajo de Gestión del Espectro del ECC, la industria propuso que con la finalidad de generar un uso dinámico del espectro se desbloquearan bandas de frecuencias adicionales para nuevos usuarios y así prestar el servicio de banda ancha móvil bajo un régimen individual de frecuencias, mientras se conserva el uso previo de los usuarios titulares. Además, se propuso a las bandas de 2.3 y 3.8 GHz como aquellas viables para efectuar dicho “desbloqueo”³⁸.

Etapas 2. A finales de 2012, derivado de lo comentado por la industria en la Etapa 1, la CE solicitó la opinión del RSPG sobre los aspectos regulatorios y económicos del espectro involucrados en la implementación de LSA. Como resultado (como se mencionó al principio del presente Capítulo), en el 2013 el RSPG definió el término LSA y consideró el cómo éste podría ser implementando en aquellas bandas principalmente usadas por los usuarios titulares en las cuáles las oportunidades de la compartición podrían mejorar la eficiencia del uso del espectro³⁹.

Etapas 3. Tomando en cuenta la opinión del RSPG, el marco regulatorio sobre el uso del espectro, las prácticas sobre la gestión y la asignación del espectro, en el 2014 el ECC, a través del Reporte 205, habilitó el uso de LSA bajo los siguientes considerandos⁴⁰:

³⁷ ETSI, “ETSI TR 103 113 Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference document (SRdoc); Mobile broadband services in the 2 300 MHz – 2 400 MHz frequency band under Licensed Shared Access regime”, *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, julio de 2013, p. 30. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103100_103199/103113/01.01.01_60/tr_103113v010101p.pdf

³⁸ ECC, “Licensed Spectrum Access opens new opportunities”, *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, octubre de 2013. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <http://apps.ero.dk/eccnews/october-2013/index.html>

³⁹ RSPG, “RSPG Opinion on Licensed Shared Access”, *EUROPEAN COMMISSION*, Bélgica, 12 de noviembre de 2013, p. 2. Consultado el 16 de octubre de 2017, disponible en: https://circabc.europa.eu/sd/d/3958ecef-c25e-4e4f-8e3b-469d1db6bc07/RSPG13-538_RSPG-Opinion-on-LSA%20.pdf

⁴⁰ ECC, “ECC Report 205 Licensed Shared Access (LSA)”, *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, febrero de 2014, p. 2. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <http://www.ero.docdb.dk/Docs/doc98/official/Word/ECCREP205.DOCX>

- Sería implementada como una “herramienta” que complementaría a los Reguladores en la gestión del uso del espectro.
- Aseguraría protección contra interferencias perjudiciales y un cierto grado de calidad en el servicio (en términos de acceso al espectro) tanto para los UT como para los usuarios LSA.
- Excluiría conceptos tales como “acceso oportunista al espectro”, “uso secundario” o “servicio secundario” dado que éstos no garantizan ninguna protección a los usuarios primarios.
- El primer uso de LSA sería el proveer de acceso a espectro adicional para los servicios móviles de banda ancha (conocidos en Europa como *Mobile/Fixed Communications Network*, MFCN).
- La implementación de LSA dependería de un mecanismo de compartición establecido de forma puntual por los Reguladores (evaluando caso por caso), en el cual se especificaran las reglas y condiciones (tanto técnicas como regulatorias) para la compartición del espectro.

A partir de este momento es cuando se habilita oficialmente la implementación de LSA en la UE, sin embargo, dentro del Reporte 205, no se especificaron las características técnicas ni regulatorias de forma precisa, por lo que en los eventos posteriores se buscó consolidar la implementación regulatoria de LSA.

Etapas 4. Dentro del Reporte 205 se encomendó a la CEPT asignar una banda de frecuencias y las condiciones de armonización a través de un estándar que incluyera las herramientas necesarias para su implementación de LSA, así como sus mecanismos de compartición. Como resultado, a mediados de 2014, la CEPT a través del ECC publicó el documento “*ECC Decision (14)02. Harmonised technical and regulatory conditions for the use of the band 2300-2400 MHz for Mobile/Fixed Communications Networks (MFCN)*”, en el cual define a la banda de 2300-2400 MHz (la banda de 2.3 GHz) como la óptima para desplegar los servicios MFCN a través de la implementación de LSA.

Etapas 5. A mediados del 2015, el ECC en continuidad del Reporte 205, a través de su Recomendación (15)04, “*Guidance for the implementation of a sharing framework between MFCN and PMSE within 2300-2400 MHz*”⁴¹, estableció un esquema de compartición técnico regulatorio con el servicio PMSE para aquellos Reguladores (pertenecientes a la CEPT) que desearan

⁴¹ ECC, “ECC Recommendation 15(04) Guidance for the implementation of a sharing framework between MFCN and PMSE within 2300-2400 MHz”, *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, 3 de julio de 2015, pp. 4-10. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/Word/REC1504.DOCX>

introducir en su territorio el servicio MFCN en la banda de 2300-2400 MHz a través de LSA.

Etapas 6. Derivado de lo establecido en el Reporte 205 del ECC, la CEPT publicó diferidamente tres reportes en los cuales se establecieron las condiciones técnico regulatorias para la compartición de espectro en la banda de 2.3 GHz a través de LSA, los cuales son:

- (Noviembre 2014). *CEPT Report 55. Report A from CEPT to the European Commission in response to the Mandate on 'Harmonised technical conditions for the 2300-2400 MHz ('2.3 GHz') frequency band in the EU for the provision of wireless broadband electronic communications services'*⁴².
- (Marzo 2015). *CEPT Report 56. Report B1 from CEPT to the European Commission in response to the Mandate on 'Harmonised technical conditions for the 2300-2400 MHz ('2.3 GHz') frequency band in the EU for the provision of wireless broadband electronic communications services'*⁴³.
- (Julio 2015). *CEPT Report 58. Report B2 from CEPT to the European Commission in response to the Mandate on 'Harmonised technical conditions for the 2300-2400 MHz ('2.3 GHz') frequency band in the EU for the provision of wireless broadband electronic communications services'*⁴⁴.

Etapas 7. Finalmente, a finales de 2017, el ETSI consolida la información publicada por la CEPT a través de los Reportes 55, 56 y 58 en cuatro estándares, añadiendo el diseño de la arquitectura de la compartición y las interfaces de comunicación de LSA (compatibles con las especificaciones del servicio MFCN), los cuales son:

- ETSI TR 103 113: *System Reference document (SRdoc); Mobile broadband services in the 2 300 MHz – 2 400 MHz frequency band under Licensed Shared Access regime*⁴⁵.
- ETSI TS 103 154: *System requirements for operation of Mobile Broadband Systems in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band under Licensed Shared Access (LSA)*⁴⁶.

⁴² Para mayor información consúltese en:

<http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/Word/CEPTREP055.DOCX>

⁴³ Para mayor información consúltese en:

<http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/Word/CEPTREP056.DOCX>

⁴⁴ Para mayor información consúltese en:

<http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/Word/CEPTREP058.DOCX>

⁴⁵ Para mayor información consúltese en:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103100_103199/103113/01.01.01_60/tr_103113v010101p.pdf

⁴⁶ Para mayor información consúltese en:

- ETSI TS 103 235: *System architecture and high level procedures for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band*⁴⁷.
- ETSI TS 103 379: *Information elements and protocols for the interface between LSA Controller (LC) and LSA Repository (LR) for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band*⁴⁸.

6.4.2.2 Mecanismo de compartición

La compartición del espectro puede ser impulsada tanto por el UT como por el usuario LSA, donde el Regulador deberá estar involucrado en desarrollo de los términos a los que lleguen los usuarios y se asegurará de que existan condiciones en las cuales se garantice una protección a los UT. Como se mencionó anteriormente, LSA por sí solo no implica la implementación de tecnologías de acceso dinámico, sin embargo, dependiendo a la naturaleza de la compartición, ésta puede implementar tecnologías de acceso dinámico, las cuales influirán en qué tan rápido se puede habilitar la compartición de espectro.

Una vez que los usuarios lleguen a un acuerdo para la compartición del espectro, el UT deberá reportar al Regulador las condiciones en las cuales efectuará la compartición del espectro con el usuario LSA: frecuencias a compartir, estadísticas en el uso del espectro, tiempos de utilización, área de servicio, etc. Asimismo, los usuarios LSA deberán indicar al Regulador el tiempo por el cual efectuarán la compartición con el UT, así como sus frecuencias de operación, ubicación de sus estaciones base, etc.

A pesar de que la CEPT considera que tanto los UT como los usuarios LSA deben explotar sus servicios garantizando el acceso al espectro para ambos usuarios, en el Reporte 205 se establece que en situaciones de emergencia, el UT puede solicitar el acceso al espectro utilizado por el usuario LSA⁴⁹.

6.4.2.3 Arquitectura de LSA

En aras de habilitar la compartición de espectro bajo un esquema flexible, la CEPT no estableció una arquitectura de red estricta para implementar LSA, ni tampoco el ETSI a través de los estándares para LSA. No obstante, de forma general tanto la CEPT como el ETSI propusieron una arquitectura

http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103100_103199/103154/01.01.01_60/ts_103154v010101p.pdf

⁴⁷ Para mayor información consúltese en:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103200_103299/103235/01.01.01_60/ts_103235v010101p.pdf

⁴⁸ Para mayor información consúltese en:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103300_103399/103379/01.01.01_60/ts_103379v010101p.pdf

⁴⁹ ECC, "ECC Report 205 Licensed Shared Access (LSA)", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, febrero de 2014, pp. 24 y 25. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <http://www.erdocdb.dk/Docs/doc98/official/Word/ECCREP205.DOCX>

avanzada de compartición (la cual podría ser un ejemplo de muchos en los cuales se podría habilitar la compartición de espectro). Este esquema avanzado está compuesto de los siguientes elementos:

- Repositorio LSA (RLSA): es una base de datos que contiene la información sobre el mecanismo de compartición, el usuario LSA, los acuerdos de la compartición y las condiciones de protección para los UT⁵⁰. Su principal función es de asegurar que los sistemas LSA operen de acuerdo al mecanismo de compartición y al régimen de autorización acordado por los interesados⁵¹. Debido a que la información que contienen es de carácter sensible, la CEPT recomendó que el RLSA debería ser gestionado por el Regulador (aunque también lo pueden hacer los UT o un tercero autorizado).
- Controlador LSA (CLSA): calcula la disponibilidad de espectro LSA en el dominio del espacio, la frecuencia y el tiempo, con base en las reglas de compartición de los usuarios LSA e información sobre el uso de los UT, proporcionada por los RLSA. El CLSA puede conectarse con uno o muchos RLSA, así también como con uno o muchos usuarios LSA, a través de interfaces seguras y confiables (establecidas en los estándares del ETSI). El CLSA puede ser gestionado por el Regulador, un usuario LSA o una tercera parte.
- NOA&M (*Network Operations, Administration and Maintenance*). Se encarga de gestionar el espectro autorizado para LSA. A través de comandos de gestión de recursos radio, el NOA&M informa a las estaciones base del usuario LSA sobre la disponibilidad de espectro destinado para LSA, con base en la información proporcionada por el CLSA. Con base en esta información, las estaciones base habilitan a los dispositivos del usuario final operar con el espectro LSA.

⁵⁰ ETSI, "ETSI TS 103 235 Reconfigurable Radio Systems (RRS); System architecture and high level procedures for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, octubre de 2015, pp. 8 y 9. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103200_103299/103235/01.01.01_60/ts_103235v010101p.pdf

⁵¹ *Ídem*, p. 8.

Para ejemplificar lo anterior, en la Figura 6.1 se ilustra la arquitectura antes descrita para el caso donde LSA es implementado para proveer capacidad de banda ancha móvil a un determinado operador. De color azul claro se observa la cobertura y las frecuencias utilizadas por un operador, y de color dorado se indica la cobertura y las frecuencias adquiridas a través de LSA. En el caso de la Terminal 1, dado que la localización donde se encuentra convergen las frecuencias del operador y las adquiridas a través de LSA, y toda vez que el terminal esté habilitado para implementar alguna de las técnicas para utilizar el espectro LSA, la Terminal 1 podrá operar con ambas frecuencias. Sin embargo, para el caso de la terminal 2, dado que se encuentra localizado fuera de la cobertura de las frecuencias adquiridas por LSA, solo podrá operar con las frecuencias del operador.

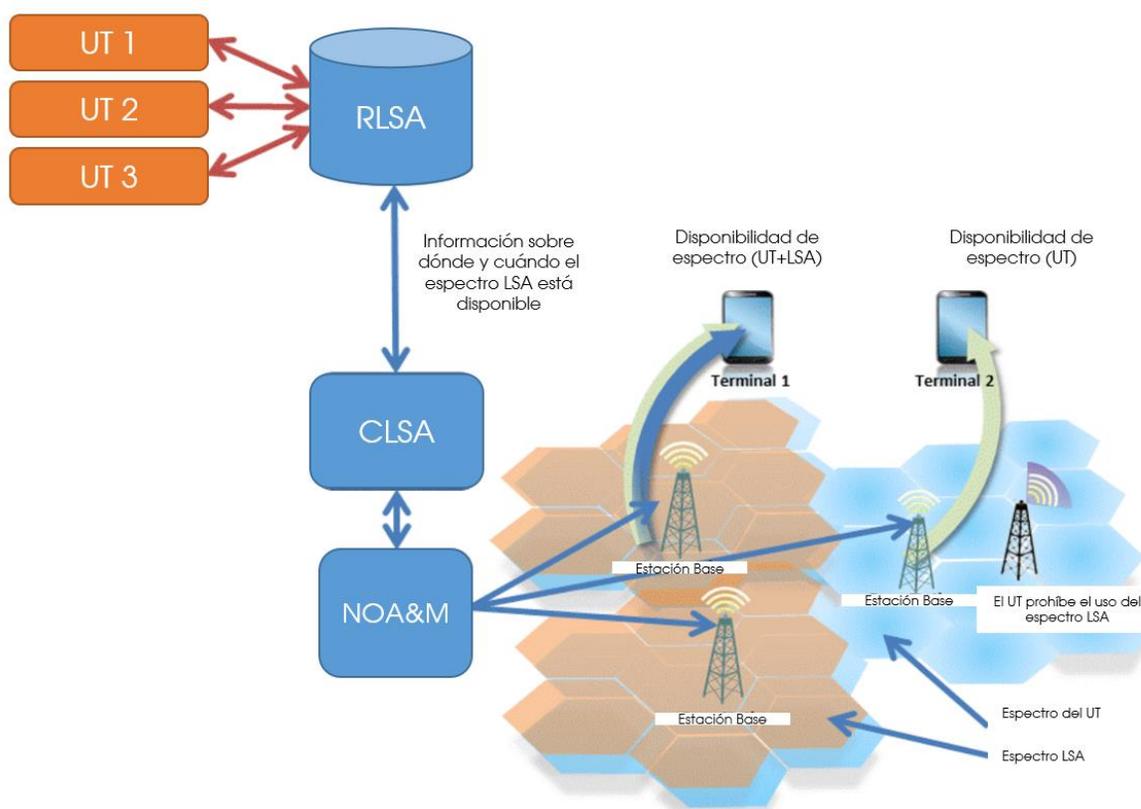


Fig. 6.1 Arquitectura del esquema de compartición espectral en LSA propuesto por el ETSI.⁵²

⁵² ETSI, "ETSI TR 103 113 Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference document (SRdoc); Mobile broadband services in the 2 300 MHz – 2 400 MHz frequency band under Licensed Shared Access regime", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, julio de 2013, p. 31. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:

http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103100_103199/103113/01.01.01_60/tr_103113v010101p.pdf

6.4.2.4 Técnicas para utilizar el espectro LSA

Se puede utilizar el espectro LSA a partir de diferentes técnicas, las cuales pueden ser diferentes entre los usuarios LSA e incluso, ser diferentes entre áreas de cobertura o estaciones base. Las técnicas que se pueden implementar en LSA son:

- Procedimiento de reelección: las terminales de usuario se configuran en modo *Idle* para migrar dentro y fuera del área de cobertura de las frecuencias LSA.
- Procedimientos de *Handover*: la RAN (*Radio Access Network*) inicia los procedimientos de *handover* para transferir las terminales de usuario en las bandas de LSA.
- Procedimiento de *Carrier Aggregation*: la RAN reconfigura los terminales de usuario para operar en modo *Carrier Aggregation*.

6.4.2.5 Pruebas de LSA en Europa

España

Durante el 2014-2015, la Secretaría de Estado para las Telecomunicaciones y la Sociedad de la Información del Ministerio de Industria, Energía y Turismo, elaboró un estudio cuyo objetivo fue el de identificar espectro para banda ancha móvil en la banda de 2.3 GHz para la compartición de espectro a través de LSA con los usuarios del servicio PMSE (*Programme Making and Special Events*). Los resultados tentativos del estudio propusieron implementar criterios para establecer zonas de protección entre los servicios MFCN y PMSE. Las implementaciones futuras del estudio buscan que el gobierno español lleve a cabo casos de coexistencia reales del servicio PMSE con el servicio MFCN, a través de comparticiones de espectro dinámicas y estáticas, para así poder calibrar los criterios de protección previamente desarrollados⁵³.

Italia

En el 2015, el Ministerio Italiano de Desarrollo Económico y el Centro Común de Investigación de la CE probaron la compartición de espectro entre el servicio de banda ancha móvil (LTE) y el servicio PMSE, a través de LSA en la banda de 2.3 GHz⁵⁴. Las pruebas piloto fueron coordinadas por la Fundación

⁵³ Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España, "STUDY REPORT on availability of spectrum in the 2.3 GHz in Spain", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, 15 de enero de 2015, p. 12. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: https://www.cept.org/Documents/fm-52/22508/FM52%2815%2905_Update-of-Spanish-PMSE-usage-pattern-in-the-23-24GHz-band

⁵⁴ MISE, "Licensed Shared Access (LSA) Pilot", *Ministry of Economic Development*, Italia, 5 de octubre de 2016. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <http://www.mise.gov.it/index.php/en/2014-06-27-15-06-15/2033594-licensed-shared-access-lsa-pilot>

Ugo Bordoni y diferentes agentes de la industria como son PosteMobile (Italia), Qualcomm Technologies, Inc. (Italia), Nokia Networks (Italia/Finlandia), CumuCore (Finlandia), Fairspectrum (Finlandia) and Red Technologies (Francia). Los resultados de las pruebas se presentaron en Roma, en septiembre de 2016, las cuales concluyeron la viabilidad de la banda para implementar la compartición de espectro entre los sistemas LTE y el servicio PMSE⁵⁵.

Francia

Derivado del Reporte 205 publicado por la CEPT, la Agencia Nacional de Frecuencias (ANFR), elaboró un estudio técnico en el cual evaluó diferentes escenarios de compartición de espectro con el servicio de banda ancha móvil (LTE). Entre ellos se evaluó la coexistencia con los servicios PMSE, telemetría (para aplicaciones militares e industriales)⁵⁶.

Posteriormente, en 2016 se realizó una prueba piloto (gestionada por Ericsson, Red Technologies y Qualcomm) para la implementación de LSA, donde se consideró utilizar la tecnología LTE (con *Carrier Aggregation*) y un mecanismo dinámico de LSA. Como resultado, las pruebas fueron exitosas y probaron que LSA no impactó en la QoS de los servicios de telemetría, PMSE y PMR destinados a operaciones militares⁵⁷.

Finlandia.

Desde el 2013, institutos de investigaciones finlandeses y la industria, en cooperación con el Regulador finlandés (FICORA) fueron los primeros en probar la viabilidad de LSA, en la banda de 2.36-2.4 GHz, para la compartición de espectro entre el servicio de banda ancha móvil y el servicio PMSE. Desde ese entonces, en el periodo del 2014 al 2015 se han realizado 7 pruebas, las cuales han considerado diferentes características como variaciones entre estaciones base LTE (desplegadas en interiores como en exteriores), despliegue de *small cells*, la implementación de SON (*Self-Organized Networks*) dentro de la red, transmisiones LTE con TDD y FDD, etc⁵⁸.

⁵⁵ Para mayor información, consúltese en:

http://www.mise.gov.it/images/stories/documenti/Report_LSA_05_rev.pdf

⁵⁶ Para mayor información consúltese en: https://www.anfr.fr/fileadmin/mediatheque/documents/etudes/15-04-17_CCE_2015_01_Rapport_LSA_VersionDiffusable.pdf

⁵⁷ CEPT, "LSA Trial - PARIS - S1 2016", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, pp. 2 y 4. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <https://cept.org/files/17171/LSA%20Trial-Paris%20S1.docx>

⁵⁸ ECC, "LSA Implementation", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, 23 de octubre de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <https://cept.org/ecc/topics/lsa-implementation>

6.4.3 Comparación de los modelos regulatorios

Tabla 6.2 Comparación entre los modelos regulatorios estadounidense y europeo de LSA.

Característica/Modelo regulatorio	Caso EU	Caso UE
País de implementación	Estados Unidos	*Aplicable a toda la UE
Banda de frecuencias	3.5 GHz	2.3 GHz
Servicio desplegado en la banda	CBRS	MFCN
Madurez de la compartición de espectro	Solo se han efectuado pruebas piloto.	Solo se han efectuado pruebas piloto.
Nivel de la compartición	Tiempo, espacio y frecuencia	Espacio y frecuencia (dependerá del usuario LSA implementarlo en tiempo).
Estándares	NA	ETSI TR 103 113 ETSI TS 103 154 ETSI TS 103 235 ETSI TS 103 379
Participación del Regulador en marco de compartición	Alta	Alta
Flexibilidad de los usuarios en el diseño de la arquitectura para efectuar la compartición	Baja	Alta (solo deben de cumplir con los protocolos de comunicación establecidos en los estándares ETSI).

6.5 Ventajas y Desventajas

6.5.1 Ventajas

- Permite que se utilicen nuevas bandas del espectro que anteriormente no eran posibles de compartirse a través de las autorizaciones tradicionales.
- Genera nuevos modelos de negocios tanto para quien comparte el espectro como para los usuarios entrantes.
- Promueve la competencia entre los usuarios en la prestación de servicios de banda ancha al introducir nuevos operadores.
- Mejora la calidad de servicio cuando LSA es utilizado para aumentar la capacidad para los operadores ya existentes.
- Puede ser utilizado como una alternativa del *refarming*.
- Asegura una calidad de servicio para todos los usuarios que busquen operar con espectro LSA.

6.5.2 Desventajas

- Hasta ahora no se ha implementado de forma oficial la compartición LSA (tanto para Estados Unidos como en Europa), por lo que sigue

existiendo incertidumbre de su éxito como nueva forma de gestión del espectro.

- De estar mal diseñado el esquema de compartición de LSA, alguno de los interesados podría no ser beneficiado de la compartición o incluso, el objeto mismo de la compartición se perdería, con un potencial riesgo de convertirse en una regulación fallida.
- LSA no debería ser implementado con autorizaciones cuya vigencia no permita un retorno de inversión para los usuarios entrantes.
- Dado que la implementación de LSA (hasta ahora) depende de la jurisdicción de cada país, existe un potencial riesgo de que no exista una armonización en las bandas para el despliegue de LSA, provocando que no se generen economías de escala.

6.6 Referencias

1. UIT-R, "Recomendación UIT-R SM.1603-2. Reorganización del espectro como método de gestión nacional del espectro", *Sector de Radiocomunicaciones de la UIT (Serie SM, Gestión del Espectro)*, Suiza, agosto de 2014. Consultado el 10 de Octubre de 2017, disponible en: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1603-2-201408-!!!PDF-S.pdf
2. RSPG, "RSPG Opinion on Licensed Shared Access", *EUROPEAN COMMISSION*, Bélgica, 12 de noviembre de 2013. Consultado el 16 de octubre de 2017, disponible en: https://circabc.europa.eu/sd/d/3958ecef-c25e-4e4f-8e3b-469d1db6bc07/RSPG13-538_RSPG-Opinion-on-LSA%20.pdf
3. Deloitte, "The Impact of Licensed Shared Use of Spectrum", *GSMA*, Reino Unido, 23 de enero de 2014. Consultado el 18 de septiembre de 2017, disponible en: <https://www.gsma.com/spectrum/wp-content/uploads/2014/02/The-Impacts-of-Licensed-Shared-Use-of-Spectrum.-Deloitte.-Feb-20142.pdf>
4. IFT, "ACUERDO mediante el cual el Pleno del Instituto Federal de Telecomunicaciones aprueba y emite los Lineamientos generales sobre la autorización de arrendamiento de espectro radioeléctrico", *Diario Oficial de la Federación*, México, 30 de marzo de 2016. Consultado el 14 de septiembre de 2017, disponible en: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5431448&fecha=30/03/2016
5. FCC, "REPORT AND ORDER AND SECOND FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 21 de abril de 2015. Consultado el 8 de noviembre de 2017, disponible en: https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-15-47A1.pdf
6. FCC, "3.5 GHz Band / Citizens Broadband Radio Service", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos. Consultado el 6 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.fcc.gov/rulemaking/12-354>
7. FCC, "Enabling Innovative Small Cell Use In 3.5 GHz Band NPRM & Order", *Federal Communications Commission*, Estados Unidos, 12 de diciembre de 2012. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <https://www.fcc.gov/document/enabling-innovative-small-cell-use-35-ghz-band-nprm-order>
8. FCC, "FURTHER NOTICE OF PROPOSED RULEMAKING. In the Matter of Amendment of the Commission's Rules with Regard to Commercial Operations in the 3550-3650 MHz Band", *Federal Communications*

- Commission*, Estados Unidos, 23 de abril de 2014. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
https://apps.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/FCC-14-49A1.pdf
9. FCC, "Title 47, Chapter I, Subchapter D, Part 96 —CITIZENS BROADBAND RADIO SERVICE", *Electronic Code of Federal Regulations*, Estados Unidos, 5 de diciembre de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-idx?SID=c80c8be60d7a909cb9ec34dfc28e7ada&mc=true&tpl=/ecfrbrowse/Title47/47cfrv5_02.tpl#0
 10. ETSI, "ETSI TR 103 113 Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); System Reference document (SRdoc); Mobile broadband services in the 2 300 MHz – 2 400 MHz frequency band under Licensed Shared Access regime", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, julio de 2013. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_tr/103100_103199/103113/01.01.01_60/tr_103113v010101p.pdf
 11. ECC, "Licensed Spectrum Access opens new opportunities", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, octubre de 2013. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en: <http://apps.ero.dk/eccnews/october-2013/index.html>
 12. ECC, "ECC Report 205 Licensed Shared Access (LSA)", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, febrero de 2014. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
<http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/Word/ECCREP205.DOCX>
 13. ECC, "ECC Recommendation 15(04) Guidance for the implementation of a sharing framework between MFCN and PMSE within 2300-2400 MHz", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, 3 de julio de 2015. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
<http://www.erodocdb.dk/Docs/doc98/official/Word/REC1504.DOCX>
 14. ETSI, "ETSI TS 103 235 Reconfigurable Radio Systems (RRS); System architecture and high level procedures for operation of Licensed Shared Access (LSA) in the 2 300 MHz - 2 400 MHz band", *European Telecommunications Standards Institute*, Francia, octubre de 2015. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/103200_103299/103235/01.01.01_60/ts_103235v010101p.pdf
 15. Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España, "STUDY REPORT on availability of spectrum in the 2.3 GHz in Spain", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, 15 de

enero de 2015. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en :
https://www.cept.org/Documents/fm-52/22508/FM52%2815%2905_Update-of-Spanish-PMSE-usage-pattern-in-the-23-24GHz-band

16. MISE, "Licensed Shared Access (LSA) Pilot", *Ministry of Economic Development*, Italia, 5 de octubre de 2016. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
<http://www.mise.gov.it/index.php/en/2014-06-27-15-06-15/2033594-licensed-shared-access-lsa-pilot>
17. CEPT, "LSA Trial – PARIS – S1 2016", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://cept.org/files/17171/LSA%20Trial-Paris%20S1.docx>
18. ECC, "LSA Implementation", *European Conference of Postal and Telecommunications Administrations*, Dinamarca, 23 de octubre de 2017. Consultado el 7 de diciembre de 2017, disponible en:
<https://cept.org/ecc/topics/lisa-implementation>



VII. Recomendaciones para la implementación en México de las tecnologías de acceso dinámico y uso compartido del espectro

Después de haber analizado y estudiado a las tecnologías de acceso dinámico y uso compartido (TADUC) en los capítulos anteriores, con seguridad es posible afirmar que dichas tecnologías son de naturaleza disruptiva y su existencia implica grandes retos para los Reguladores en habilitar su implementación. Así, bajo el esquema actual de regulación establecida en la Ley Federal de Telecomunicaciones y Radiodifusión, así como en disposiciones técnicas y lineamientos emitidos por el Instituto Federal de Telecomunicaciones (en adelante “el Instituto”) vigentes, no es posible implementar alguna de las tecnologías de acceso dinámico y uso compartido del espectro abordadas en los capítulos anteriores²³².

Sin embargo, en el ámbito de las atribuciones del Instituto como órgano encargado del uso eficiente del espectro, así como en el desarrollo eficiente de las telecomunicaciones y la radiodifusión, es posible que gradualmente pueda establecer mecanismos que permitan la introducción de las TADUC en México. Por lo anterior, la Dirección de Ingeniería del Espectro y Estudios Técnicos y la Dirección de Ingeniería y Tecnología recomiendan una serie de acciones que el Instituto debería de implementar para poder habilitar el uso de las TADUC, las cuales se mencionan en los siguientes numerales.

7.1 Sobre el problema actual de la regulación mexicana ante las TADUC

Como ya se ha dicho, las TADUC representan un reto regulatorio para cualquier Regulador que desee implementarlas en su país, ya que su naturaleza hace que no coincidan con el sistema tradicional de asignación de espectro. Al respecto, el caso de México no es la excepción, ya que la regulación mexicana en materia de telecomunicaciones y radiodifusión concibe la asignación de espectro bajo un régimen de concesión en el cual el espectro es asignado a un único usuario, dentro de una zona geográfica

²³² Aunque se podría pensar que las Comunicaciones D2D ya se están implementando en México, lo cierto es que el esquema estricto de operación de esta solución tecnológica convergente no ha sido implementada por los operadores móviles.

determinada, por medio de una Concesión que brinda certeza jurídica al Concesionario sobre el uso y explotación del espectro asignado. Así, este mecanismo de asignación se ha empleado desde décadas atrás y no se ha modificado con el tiempo, y aunque actualmente el Instituto ha emitido regulaciones que hagan un uso eficiente del espectro, por ejemplo, los Lineamientos en materia de Arrendamiento de Espectro, en esencia no existe ninguna regulación emitida que habilite la compartición de espectro.

En este orden de ideas, la implementación de las TADUC no solo impacta en el modelo de administración del espectro sino que además impacta en el mecanismo de pago de derechos en el uso del espectro. Por ejemplo, ¿cómo la Secretaría de Hacienda y Crédito Público, en conjunto con el Instituto, debería de tasar el pago de derechos por el uso del espectro a un usuario beneficiado de la compartición, el cual bajo tecnologías oportunistas utiliza cierta cantidad de espectro de forma aleatoria (en un instante ocupa 10 MHz y en otro ocupa 5 MHz) y cuyas bandas de frecuencia no siempre son las mismas (en un instante opera en la banda de 800 MHz, en otro en la banda de 5 GHz y en otro en ambas bandas)?

Por si fuera poco, las TADUC incluso pueden habilitar diferentes servicios de radiocomunicaciones en una determinada banda de frecuencias, los cuales no necesariamente están acorde al Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias o incluso para las atribuciones establecidas por la UIT para la Región 2 (de la cual México es parte). Como muestra, en el Capítulo VI se estudió que en la banda de 3.5 GHz la FCC, en conjunto con el gobierno de los Estados Unidos, estableció un nuevo tipo de servicio, el CBRS, el cual brinda conectividad de banda ancha móvil en una banda de frecuencias que por mucho tiempo fue destinada para el servicio de radiolocalización. Así, la FCC decidió agregar el servicio CBRS a su tabla de atribuciones de frecuencias, y además agregó y modificó notas nacionales que brindan cierta protección al servicio.

Por lo anterior, si el Instituto quisiera implementar las TADUC, en la medida de sus atribuciones, debería desarrollar un sistema de regulación flexible que permitiera el desarrollo e implementación de las tecnologías de acceso dinámico y con ello impulsar la compartición de espectro. La experiencia internacional de las regulaciones de otros países para implementar las TADUC, expuestas en los capítulos anteriores, dicta que la regulación debe estar estructurada de tal manera que sea vanguardista, flexible y muy bien diseñada; todo en un trabajo en conjunto con la Academia y la Industria (tanto fabricantes de equipos como operadores móviles).

En caso contrario que la regulación no fuera así, ésta terminaría por frenar el desarrollo tecnológico y romper el objetivo de la compartición. Además, se convertiría en una barrera a la entrada para aquellos Concesionarios que buscaran compartir el espectro, así como para los usuarios interesados en adquirir el espectro. Por lo anterior, el Instituto debe buscar una regulación equilibrada en el cual se permita a la continua innovación tecnológica, la correcta operación de las TADUC con otras tecnologías y que se garantice el mínimo posible de interferencia perjudicial entre los usuarios del espectro.

También, la experiencia internacional ha demostrado que el avance tecnológico va muy de la mano con la regulación y los casos de éxitos de las TADUC se deben a que las regulaciones en los países en donde se implementaron han sido lo suficientemente flexibles para modificarse de forma rápida una vez que el Regulador identificó una falla o una mejora en la regulación. Por ejemplo, cuando la regulación no era lo suficientemente robusta en cuanto a los parámetros de coexistencia de las TADUC con otras tecnologías; cuando los parámetros técnicos no eran los adecuados para asegurar la no interferencia perjudicial entre diferentes usuarios del espectro; o incluso cuando la regulación emitida por el propio Regulador era tan rígida que no permitía que el desarrollo pleno de los servicios ofertados por la tecnología por lo que fue necesario proceder a una desregulación.

Bajo esta tesitura, la regulación de la tecnología en México tiene una gran área de oportunidad respecto a su actualización y mejora. Como sabemos, en México existen algunas regulaciones que tardan años e incluso décadas para ser actualizadas y que además establecen criterios y condiciones rígidas, tanto que la tecnología en otros países avanza y es de vanguardia, mientras que en México esa misma tecnología queda obsoleta repercutiendo en el cómo los operadores móviles ofertan los servicios y ésta a su vez en la calidad del servicio percibida por el usuario final.

Asimismo, para algunas TADUC (como LSA) la compartición se hace a través de un instrumento legal que brinda protección a los usuarios del espectro (Concesionarios y usuarios interesados) para el uso y explotación del espectro, motivo por el cual el Instituto también debería modificar su régimen de concesiones para la implementación de la compartición de espectro. En tal sentido, también el Instituto debería de emplear un mecanismo de protección regulatoria a través del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias para proteger la operación de los servicios objeto de la compartición. Recordemos que algunas que en algunas de las TADUC deben garantizar al usuario final una cierta calidad en el servicio, la cual es respaldada por la operación misma de la tecnología, el instrumento legal

en el que se le asigne el espectro al Concesionario, así como la lineamientos o disposiciones técnicas en las que se defina la operación del servicio.

En otro orden de ideas, las bandas de frecuencia de uso libre son una opción muy atractiva para aquellos operadores que desean implementar una red sin la necesidad de contar con un instrumento que legitime su uso y explotación, toda vez que observen las condiciones de operación establecidas por el Regulador. Además, como se estudió en el Capítulo I, las bandas de frecuencia uso libre representan a nivel mundial una excelente opción para descargar el tráfico de las redes móviles LTE a través de las TADUC, en este caso, de las tecnologías basadas en LTE. Por esto, es necesario que el Instituto, previo análisis, emplee una forma de regulación para ciertas bandas de frecuencia de uso libre más allá del establecimiento de parámetros técnicos de operación (como potencia o técnicas de acceso al medio) que garantice una calidad en el servicio a todos aquellos Concesionarios que deseen descargar tráfico de sus redes.

7.2 Sobre los incentivos para implementar las TADUC

En los países en donde se investigaron, desarrollaron e implementaron las TADUC existe un apoyo e iniciativa fuertemente impulsada por los Gobiernos para hacer un uso eficiente del espectro, tan es así que desde los mandatos presidenciales se ordena a los Reguladores en buscar espectro para la provisión de servicios de banda ancha móvil (véase la sección 6.4.1.2). Como resultado de esto, no solo se logra la obtención de más espectro para el servicio de banda ancha móvil, sino que como consecuencia se habilita la exploración a nuevas formas de compartición del espectro, en este caso de las TADUC. Además, es también reconocido que en aquellos países donde se implementaron las TADUC existen fuertes vínculos de colaboración entre la Academia, la Industria y el Gobierno para la investigación, el desarrollo y la implementación de nuevas tecnologías.

Por consiguiente, la responsabilidad de explorar nuevas formas de compartición de espectro con la implementación de nuevas tecnologías no solo es responsabilidad del Regulador, sino que es necesario establecer un trabajo en conjunto con la Industria y la Academia y sobre todo de otras entidades del Gobierno que de forma secundaria están relacionadas con la compartición de espectro (por ejemplo, instituciones de seguridad, de desarrollo digital, de comunicaciones, etc.).

En este sentido, si el Instituto busca implementar las TADUC debe formar lazos de colaboración con las universidades mexicanas así como la industria de las telecomunicaciones, tanto fabricantes de equipos como operadores

móviles, para que en conjunto trabajen en la investigación, desarrollo y mejora de las TADUC. Como se explicó anteriormente, las TADUC antes de ser implementadas pasan por una fase de pruebas en las cuales se garantiza que operen conforme al estándar y cumplan con las condiciones regulatorias establecidas por el Regulador. Así, es necesario que el Instituto se encargue de diseñar planes estratégicos para la adopción de las TADUC y que coordine con la Industria y la Academia las pruebas piloto necesarias para la evaluación operativa de las TADUC.

Por otro lado, en la compartición de espectro se encuentran involucrados principalmente tres agentes: el Regulador, los Concesionarios (tanto públicos como privados) y aquellos interesados en tener espectro. Por lo cual, si alguno de los agentes no contara con los incentivos suficientes para poder realizar la compartición de espectro entonces ésta sería imposible de ejecutarse. Como se ha abordado en los anteriores capítulos, el compartir espectro es una acción que permite que aquellos tenedores del espectro hagan un uso eficiente del mismo a través de la compartición, y que a su vez aquellos a quienes se le facilitará el acceder a ese espectro deberían también hacer un uso eficiente del mismo.

Sin embargo, lo anterior también podría ser reflejado en los Concesionarios como una forma de “quitarles” un recurso, ya que ese espectro que se compartirá podría ser aprovechado por los Concesionarios de forma parcial (es decir, en un lapso de tiempo o en una determinada zona geográfica), o en el peor de los casos, sería un recurso que ya no podrían utilizar (todo depende de la/las TADUC que se busque implementar). Aunado a lo anterior, la compartición de espectro puede repercutir en tiempos y costos tanto para los Concesionarios como para los usuarios interesados.

Por consiguiente, el Instituto debe garantizar que existan incentivos para ejecutar la compartición para cada uno de los interesados, sin estos, los Concesionarios ni siquiera evaluarían la opción de compartir el espectro ni mucho menos los usuarios interesados buscarían espectro a través de la compartición. En este sentido, de primera instancia el Instituto debería buscar que estos incentivos fueran atractivos para todos los interesados. Cabe señalar que para el Instituto los incentivos fundamentales para habilitar la compartición son el hacer un uso eficiente del espectro, la contribución a la reducción de la brecha digital a través de nueva conectividad por medio de las TADUC y el generar un entorno de competencia dentro de la banda de frecuencias en donde vayan a ser adoptadas las tecnologías oportunistas.

Respecto a los Concesionarios comerciales los incentivos podrían ser de carácter económico, por ejemplo, que aquellos Concesionarios que realicen la compartición con otros usuarios del espectro pudieran tener una reducción en el pago de derechos por el uso del espectro; o que los Concesionarios reciban una contribución económica de aquellos usuarios interesados, con base en el área geográfica, la cantidad de espectro y el tiempo de uso. No obstante, los Concesionarios pudieran tener incentivos no necesariamente económicos, por ejemplo el Instituto podría ayudarles a disminuir cargas regulatorias y facilitarles el proceso administrativo con otras entidades involucradas para agilizar la compartición de espectro.

Por otra parte, es muy bien sabido que a nivel internacional y nacional los Concesionarios públicos suelen ser los que menos hacen un uso eficiente del espectro ya cuentan con grandes cantidades de espectro muchas veces sin utilizar y/o porque no actualizan sus redes con tecnología de vanguardia, ya que dependen del erario público para hacerlo. Razón por la cual, previo un exhaustivo análisis, el Instituto debe identificar aquellas dependencias gubernamentales que estén haciendo un uso ineficiente del espectro y posteriormente ejecutar un plan de acción que promueva la compartición del mismo.

Es importante señalar que el Instituto debe buscar que los Concesionarios públicos realmente colaboren con el plan de acción para compartir el espectro puesto que muchos de estos Concesionarios operan en bandas de frecuencias óptimas para servicio móvil. Además, el que exista una plena colaboración entre el Instituto y los Concesionarios Públicos disminuye tiempos para habilitar la compartición y promueve que las TADUC se implementen más rápido en el país. Como, por ejemplo, en el Capítulo VI se abordó que para ejecutar la compartición de espectro en la banda de 3.5 GHz, el Gobierno de los Estados Unidos, en específico el Departamento de Defensa, fue uno de los primeros interesados en efectuar la compartición de espectro, colaborando con las mediciones en campo para establecer los umbrales de coexistencia de la tecnología CBRS.

Finalmente para los usuarios interesados en acceder al espectro resultado de la compartición, los incentivos no necesariamente deberían estar evidenciados, ya que su incentivo fundamental es el de poder obtener espectro, por lo que el incentivo de dichos usuarios sería la compartición misma y/o que el Instituto estableciera un proceso ágil de compartición de espectro.

7.3 Sobre la estandarización tecnológica

Algunas tecnologías (por ejemplo, las basadas en LTE como LTE-U y MulteFire) operan bajo parámetros técnicos que han sido probados por la Industria, cuyo diseño y operación se basan en estándares, pero que para su propia operación no cuentan con un estándar emitido por un Organismo de Estandarización (por ejemplo, el 3GPP o el ETSI). En otras palabras, estas tecnologías operan con parámetros acordados por agentes de la Industria los cuales no han sido evaluados por expertos a nivel global que validen la operación y el correcto funcionamiento de la tecnología, y sobre todo que garanticen una coexistencia con otras tecnologías que operen en la misma banda de frecuencias.

En este orden de ideas, el contar con un estándar no solo brinda certeza a los Reguladores sobre la funcionalidad y comportamiento de la tecnología, sino que además el Regulador promueve el desarrollo de economías de escala en la banda de frecuencias de operación. Asimismo, con la implementación de un estándar (o estándares) los Organismos de Estandarización establecen los mecanismos de coexistencia para que la tecnología pueda convivir con otras.

De igual modo, el no contar con un estándar dificulta a los Reguladores el poder autorizar la venta de equipos en su país dado a la falta certidumbre respecto a la correcta operación de los equipos con otras tecnologías en la banda de frecuencia de operación, por ejemplo, que las técnicas de acceso al medio que empleen dichos equipos no sean ventajosas y causen un detrimento en el desempeño de otras tecnologías. Además, los equipos que no cuenten con un estándar podrían operar con diferentes niveles de potencia, lo cual podría repercutir negativamente causando interferencias perjudiciales a otros usuarios del espectro.

Cabe aclarar que en el ámbito de sus competencias, los Reguladores podrían adoptar tecnologías que no necesariamente se encuentren estandarizadas, sin embargo, esto no resulta ser atractivo ya que no promueve que se generen economías de escala. Además, se ha aprendido de la experiencia internacional que cuando los Reguladores deciden adoptar este tipo de tecnologías las redes móviles terminan siendo obsoletas a corto plazo, repercutiendo en la inversión de los operadores móviles. Lo anterior se debe a que por su escasa adopción a nivel internacional, estas tecnologías dejan de ser investigadas por la Industria encargada de su operación.

Por otro lado, aunque las TADUC estén estandarizadas (por ejemplo, TVWS o Radio Cognitivo), no dejan de representar para los Reguladores un completo desafío regulatorio para lograr su adopción. En este sentido, en algunos casos los Reguladores proceden (en menor o mayor medida) a “modificar” las reglas de operación de la tecnología con la finalidad de que se ajusten a la regulación local, propiciando así que el objeto del “estandarizar” se pierda. Lo anterior se ve perfectamente ejemplificado en los casos donde Estados Unidos y la Unión Europea han adoptado ciertas tecnologías que aunque en esencia sean las mismas, si se hace un análisis de sus reglas de operación y parámetros técnicos se observará que son diferentes, aunado al marco regulatorio que las habilita. Así, pareciera que para que las TADUC puedan ser habilitadas en un país deben ser modificadas para que puedan empatar con la regulación local, existiendo diferentes versiones de una misma tecnología.

Otro punto a señalar sobre la estandarización es que actualmente existe una disputa entre los Organismos de Estandarización para saber cuál de su tecnología debería ser la única en operar en una determinada banda de frecuencias: el caso de la IEEE (WiFi) *versus* 3GPP (LTE). Al respecto, derivado de la investigación efectuada en el Capítulo I, se encontró que existe mucha controversia sobre si LTE debería o no operar en la banda de 5 GHz (donde actualmente opera WiFi). A pesar de que los argumentos a favor y en contra están equilibrados, parecería que el trasfondo de discusión versa más en cuál de estos dos Organismos de Estandarización busca monopolizar el mercado al únicamente habilitando la banda de 5 GHz para la operación de una sola tecnología²³³.

Por lo anterior, si el Instituto opta por la adopción de alguna de las TADUC es necesario que verifique que cuenten con un estándar que garantice la correcta operación de los equipos y no así con parámetros técnicos establecidos por grupos de la Industria de forma aislada. Lo anterior también contribuye a la homologación de los equipos para su venta en el país. Aunado a lo anterior, previo a la adopción de las TADUC, el IFT debe hacer un análisis de la experiencia comparada de otros países respecto al desempeño de las TADUC (funcionalidad, rendimiento, compatibilidad electromagnética, etc.), para que en caso de detectar un mal funcionamiento, el Instituto pueda modificar la forma de operar de ciertos dispositivos (por ejemplo, estableciendo nuevos umbrales de potencia para la transmisión de señales).

²³³Aunque se ha visto en el Capítulo I que existen otras tecnologías que operan en la banda de 5 GHz, como Zegbe, realmente WiFi es la líder en dicha banda de frecuencias.

Es importante señalar que el Instituto debe de garantizar en todo momento el principio de neutralidad tecnológica en cualquier banda de frecuencias que desee implementar las TADUC. Así, si los Concesionarios quisieran operara en na banda de forma dinámica y oportunista, lo podrían hacer a través de equipos de diferentes fabricantes. Con esto se eliminaría cualquier intento de “monopolizar” una banda de frecuencias con un solo tipo de tecnología o fabricante de equipos.

En otro orden de ideas, con base en lo plasmado en la sección 7.1 del presente Capítulo, el Instituto debe de contar con un mecanismo flexible de regulación que garantice el funcionamiento de la tecnología y no así que la tecnología deba ser modificada para adecuarse a la regulación. Un buen ejemplo es el caso de Ofcom para la implementación de TVWS, en el cual fueron más de 4 años de investigación para que ETSI pudiera establecer un estándar y a la par Ofcom pudiera establecer la regulación con la que habilita TVWS. En este caso, la regulación es un complemento del estándar y viceversa, el estándar es un complemento de la regulación.

7.4 Sobre la viabilidad de la adopción de las tecnologías

Con la adopción de las TADUC sin duda alguna se podrían desprender una cantidad de beneficios sociales inmensurables. Sin embargo, el Instituto debe proceder a hacer una análisis de impacto regulatorio sobre su implementación, el cual debe ser efectuado caso por caso y jamás suponer que con los resultados que se obtengan para una tecnología en particular, se pretenda argumentar que será el mismo resultado para todas las demás. Cabe señalar que las TADUC impactan en el dominio del tiempo, espacio y frecuencia, por lo que el impacto regulatorio que se podría obtener sería totalmente diferente a lo largo de todo el país. Además, el Instituto debe de proceder a analizar exhaustivamente las ventajas y desventajas que conlleva a la adopción de TADUC y de igual forma se debería de ejecutar caso por caso.

Por otro lado, el Instituto y en especial énfasis los operadores móviles, deben tomar en cuenta que debido a que las TADUC son de reciente creación, resultan ser muy costosas de implementar y muchas de ellas no cuentan aún con dispositivos de usuario final (aunque algunas que ya cuenta con algunos equipos terminales, éstos aún no se han masificado). Por lo anterior, si se habilita la compartición de espectro a través de una TADUC lo no suficiente madura en el mercado, podría repercutir enormemente en los costos de inversión del operador móvil, resultado un fracaso de implementación tecnológica.

Martínez Cruz, Gerardo, *Tecnologías de acceso dinámico y uso compartido del espectro*, México, Instituto Federal de Telecomunicaciones, 22 de diciembre de 2017.

Ciudad de México, México.

Instituto Federal de Telecomunicaciones © 2017

