

**PROPUESTA DE IMPLEMENTACIÓN DE UNA
ARQUITECTURA DE RADIO ACCESO CENTRALIZADA
LTE USANDO SISTEMAS DE RADIO SOBRE FIBRA (RoF)
ENCAMINADOS AL DESARROLLO DE REDES 5G PARA
UN OPERADOR MÓVIL EN COLOMBIA EN LA CIUDAD DE
BOGOTÁ Y EN LA LOCALIDAD DE SOACHA**

Tesis presentada como requisito parcial para optar por el título de:

Magíster en Telecomunicaciones y Regulación TIC

ANDRÉS GUILLERMO RIVERA SÁNCHEZ

Director:

Ing. PhD. Gustavo Adolfo Puerto Leguizamón

Codirector:

Ing. PhD. Angela Tatiana Zona

UNIVERSIDAD SANTO TOMAS
FACULTAD DE INGENIERIA DE TELECOMUNICACIONES
MAESTRIA EN TELECOMUNICACIONES Y REGULACION TIC
BOGOTÁ, 2020

A Dios, a mis Padres Blanca y Guillermo y a mi esposa Claudia

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi esposa, a mis padres, a mis hermanas, y familia, los cuales son los motivos de trabajar día a día y con quien compartes tus logros, experiencias y conocimientos, y quienes te animan siempre a luchar por tus metas.

Gracias a la Universidad Santo Tomás por haber ofrecido una Maestría acorde a la realidad profesional de las Telecomunicaciones en Colombia, con la mejor calidad humana en sus docentes y directivos, a mis compañeros de clase que hicieron agradable los momentos de estudio, y finalmente a mi director Gustavo, por brindarme su apoyo y conocimiento para la realización de este trabajo de grado.

TABLA CONTENIDO

1	MARCO GENERAL DEL PROYECTO.....	4
1.1	OBJETIVOS.....	5
1.2	ALCANCE.....	5
2	EVOLUCION DE LAS REDES MOVILES	6
2.1	ARQUITECTURA BÁSICA DE UNA RED CELULAR.....	6
2.2	VARIABLES EN EL DISEÑO DE UNA RED CELULAR EN TÉRMINOS DE CAPACIDAD.....	8
2.3	GENERACION DE REDES CELULARES.....	10
2.3.1	Primera Generación de Redes Celulares (1G).....	10
2.3.2	Segunda Generación de Redes Celulares (2G).....	10
2.3.3	Tercera Generación de Redes Celulares (3G).....	15
2.3.4	Cuarta Generación de Redes Celulares (4G)	19
2.3.5	Quinta Generación de Redes celulares (5G)	22
2.4	ARQUITECTURA DE LTE	25
2.4.1	ARQUITECTURA DE RADIO ACCESO EVOLUCIONADA DE LTE (E-UTRAN) 26	
2.4.1.1	Nodo B Evolucionado (eNB)	27
2.4.1.2	Interfaz S1	28
2.4.1.3	Interfaz X2	28
2.4.2	Red Core de paquetes evolucionada (EPC)	29
2.5	SERVICIO PORTADOR EPS	30
2.6	ESTADOS DE USUARIO EN EL SISTEMA LTE	31
2.7	PROCESO DE HANDOVER EN LTE	32
2.8	CAPA FÍSICA DE LTE	33
2.8.1	Estructura de la Trama en LTE.....	35

2.9	PROTOSCOLOS EN LA INTERFAZ RADIO.....	38
2.10	SISTEMA DE RED CELULAR OFDMA	39
2.11	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2.....	42
3	LTE AVANZADO.....	44
3.1	AGREGACIÓN DE PORTADORA (CA).....	44
3.1.1	Distribución actual del espectro en Colombia	47
3.2	MULTIPLES ENTRADAS MULTIPLES SALIDAS (MIMO)	50
3.2.1	Multiplexación Espacial - MIMO.....	52
3.2.2	MIMO Masivo (Massive MIMO).....	56
3.3	REDES HETEROGENEAS	57
3.4	COORDINACION DE INTERFERENCIA ENTRE – CELDAS (ICIC).....	60
3.5	COORDINACION MULTIPUNTO (COMP)	61
3.6	CONCLUSIONES DE CAPÍTULO 3.....	63
4	RED DE RADIO ACCESO CENTRALIZADA (C-RAN)	64
4.1	ARQUITECTURA TRADICIONAL DE UNA ESTACIÓN BASE	64
4.2	ARQUITECTURA DE UNA ESTACIÓN BASE CON RRH	65
4.3	ARQUITECTURA DE ESTACIÓN BASE CENTRALIZADA - CRAN	67
4.4	CÁLCULO DE LA RED FRONTHAUL EN ANCHO DE BANDA Y LATENCIA.	68
4.5	DIVISIONES FUNCIONALES.....	73
4.6	RADIO ANÁLOGO SOBRE FIBRA (A-ROF).....	74
4.7	TECNOLOGÍAS DE TRANSPORTE DE FRONTHAUL	78
4.7.1	Radio enlaces.....	79
4.7.2	Ethernet.....	79
4.7.3	Red óptica	79
4.7.3.1	Conexión Punto a Punto.....	80
4.7.3.2	WDM/OTN.....	80
4.7.3.3	Fibra hasta la casa (Fiber to the Home).....	81

4.8	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4.....	84
5	VENTAJAS DE C-RAN	86
5.1	DESPLIEGUES DE C-RAN EN EL MUNDO	88
5.2	CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5.....	88
6	ESTRATEGIA DE DESPLIEGUE DE UNA C-RAN LTE PARA UN OPERADOR MÓVIL EN COLOMBIA (MOVISTAR), EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ Y SOACHA ENCAMINADA AL DESARROLLO DE REDES 5G.	90
7	CONCLUSIONES.....	109
	ANEXO A. LEY 1978 DE 2019.....	112
	ANEXO B. LEY 1341 DE 2009.....	114

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Arquitectura Básica de una red celular.....	7
Figura 2. Tabla de esquemas de Modulación y Codificación.....	9
Figura 3. Técnica de Acceso FDMA.....	10
Figura 4. Técnica de acceso CDMA.....	12
Figura 5. Técnica de acceso TDMA.....	12
Figura 6. Throughput en función de la calidad del canal medido C/I	14
Figura 7. Modos de uso del espectro	15
Figura 8. Arquitecturas comparativas de GSM y UMTS	18
Figura 9. Reducción de retardo asociado al Packet Scheduler en HSDPA	19
Figura 10. Panorámica de sistemas móviles celulares 3G/4G	21
Figura 11. Adopción Global de las tecnologías 2G-4G desde el 2015 al 2025.....	22
Figura 12. Requisitos de 5G	23
Figura 13. Opciones de despliegue de 4G y 5G.....	24
Figura 14. Camino evolutivo desde la Opción 3x	25
Figura 15. Arquitectura del sistema LTE	26
Figura 16. Red de Acceso E-UTRAN	27
Figura 17. Servicios Portadores de E-UTRAN	28
Figura 18. Arquitectura de la Red Troncal.....	29
Figura 19. Proceso de Handover en LTE	32
Figura 20. Multiplexación de usuarios en OFDMA	33
Figura 21. Esquemas de Modulación Codificación por subportadora.....	34
Figura 22. Estructura de la trama LTE (downlink)	36
Figura 23. Concepto de Radio Bloque (PRB).....	36
Figura 24. Protocolos de la Interfaz radio de E-UTRAN	38
Figura 25. Sistema de Red Celular	40
Figura 26. Asignación de Subportadoras con un factor de Reuso de $F=3$	41
Figura 27. Asignación de subportadoras con un factor de Reuso $F=1$	42
Figura 28. Tipos de agregación de Portadora	45
Figura 29. Evolución de Carrier Aggregation en 3GPP	46
Figura 30. Distribución de espectro en Colombia hasta mediados de 2018	48

Figura 31. Distribución actual del espectro en Colombia para los operadores móviles	49
Figura 32. Diversidad Espacial	51
Figura 33. Multiplexación Espacial.....	51
Figura 34. Escenarios de uso para Diversidad de Transmisión y Multiplexación espacial	52
Figura 35. Sistema MIMO 2x2	52
Figura 36. Matriz de canales.....	53
Figura 37. MIMO dimensión total	54
Figura 38. SU-MIMO Vs MU-MIMO	55
Figura 39. Efecto Beamforming	56
Figura 40. MIMO masivo.....	57
Figura 41. Esquema de una HetNet.....	58
Figura 42. Concepto de UDN.....	59
Figura 43. Instalación Small Cell en Fachada	60
Figura 44. UE en borde de celda	61
Figura 45. Modos de Coordinación Multipunto	62
Figura 46. Funcionalidades de una Estación Base.	64
Figura 47. Evolución de la arquitectura de una estación base	66
Figura 48. Red LTE con C-RAN.....	67
Figura 49. Previsión de los gastos en el fronthaul radio	68
Figura 50. Proceso envío de las muestras I/Q a través de la Interfaz CPRI	69
Figura 51. Posibles Divisiones Funcionales para C-RAN.....	73
Figura 52. Espectro Radio Eléctrico y Banda Milimétrica de 60GHz	74
Figura 53. a) Radio Frecuencia sobre Fibra. b) Frecuencia Intermedia sobre Fibra.....	75
Figura 54. Arquitectura convencional C-RAN Vs C-RoF	76
Figura 55. Técnica A-RoF asistido por un DSP.....	77
Figura 56. Comparación de Costos de las distintas soluciones de Fronthaul.....	78
Figura 57. Multiplexación de Longitudes de Onda para el ahorro de Fibras.....	81
Figura 58. Red FTTH.....	82
Figura 59. Arquitectura de red WDM-PON con TITAN OLT	83
Figura 60. Tecnologías de Transporte de Frothaul	84
Figura 61. Efecto marea	87
Figura 62. Pasos para el despliegue de una red de Radio Acceso Centralizada.....	91
Figura 63. Esquema del uso de WDM-PON usando CPRI en la red Fronthaul	95

Figura 64. Tramo de Fibra desde Morato a Soacha.....	95
Figura 65. Esquema de A-RoF, Punto a Multipunto para el transporte de portadoras de Movistar	96
Figura 66. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora de 850MHz	98
Figura 67. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora de 1900MHz	99
Figura 68. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora AWS	101
Figura 69. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora de 3500MHz	102
Figura 70. Esquema de A-RoF optimizado para el transporte de portadoras de Movistar	103
Figura 71. Espectro en dominio de RF y Óptico de las portadoras de Movistar	104
Figura 72. Diagrama de ojo en receptor de la portadora 850MHz en tramo de 24km	105
Figura 73. Diagrama de ojo en receptor de la portadora 1900MHz en tramo de 24km...	105
Figura 74. Diagrama de ojo en receptor de la portadora AWS en tramo de 24km.....	106
Figura 75. Diagrama de ojo en receptor de la portadora 3500MHz en tramo de 24km...	106
Figura 76. Arquitectura de C-RAN LTE para Bogotá y Soacha.....	108

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Clases de servicio para los tipos de tráfico en UMTS.....	17
Tabla 2. Valores de QCI estandarizados.....	31
Tabla 3. Canalización en el sistema LTE	34
Tabla 4. Bandas de Frecuencia de LTE.....	35
Tabla 5. Numero de PRB en función de la Canalización	37
Tabla 6. Velocidades Pico teóricas en función de la canalización.	37
Tabla 7. Velocidades de descarga para CA de acuerdo con el ancho de banda total agregado	47
Tabla 8. MIMO en Release 12 y 13.....	55
Tabla 9. Capacidad de Fronthaul requerida para cada canalización de LTE.....	70
Tabla 10. Modos de Operación de CPRI.....	70
Tabla 11. Requisitos del Fronthaul según el estándar y los operadores.....	71
Tabla 12. Capacidades futuras del Fronthaul respecto a la	72
Tabla 13. Requerimientos para diferentes divisiones funcionales para un sector LTE de 20MHz+MIMO 2x2.....	74
Tabla 14. Desempeño de Tecnologías de Transporte.....	79
Tabla 15. Cálculo de Thr aire / Thr CPRI para las Bandas del Operador Movistar.....	94

ACRÓNIMOS

<i>3GPP</i>	<i>Third Generation Partnership Project</i>
<i>3GPP2</i>	<i>Third Generation Partnership Project2</i>
<i>AMPS</i>	<i>Advanced Mobile Phone Services</i>
<i>ANE</i>	<i>Agencia Nacional del Espectro</i>
<i>A-RoF</i>	<i>Analog Radio Over Fiber</i>
<i>ARP</i>	<i>Allocation and Retention Priority</i>
<i>AWG</i>	<i>Arrayed Waveguide Grating</i>
<i>BBU</i>	<i>Base Band Unit</i>
<i>BER</i>	<i>Bit Error Rate</i>
<i>BSC</i>	<i>Base Station Controller</i>
<i>BTS</i>	<i>Base Transceiver Station</i>
<i>CA</i>	<i>Carrier Aggregation</i>
<i>CAPEX</i>	<i>Capital Expenditure</i>
<i>CC</i>	<i>Component Carrier</i>
<i>CDMA</i>	<i>Code Division Multiple Access</i>
<i>CEPT</i>	<i>European Conference of Postal and Telecommunications Administration</i>
<i>C/I</i>	<i>Carrier to Interference</i>
<i>CO</i>	<i>Central Office</i>
<i>CoMP</i>	<i>Coordinated Multipoint Transmission</i>
<i>CPRI</i>	<i>Common Pubic Radio Interface</i>
<i>CQI</i>	<i>Channel Quality Indicator</i>
<i>C-RAN</i>	<i>Centralized RAN</i>

<i>CRC</i>	<i>Comisión de Regulación de Telecomunicaciones</i>
<i>COMBO</i>	<i>Convergence of Fixed and Mobile Broadband Access</i>
<i>CWDM</i>	<i>Course Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>DAC/ADC</i>	<i>Digital to Analog Converter/Analog to Digital Converter</i>
<i>DAS</i>	<i>Distributed Antenna System</i>
<i>D-AMPS</i>	<i>Digital - Advanced Mobile Phone Services</i>
<i>DL</i>	<i>Downlink</i>
<i>DPS</i>	<i>Dynamic Point Selection</i>
<i>DRoF</i>	<i>Digital Radio Over Fiber</i>
<i>DSCH</i>	<i>Downlink Shared Channel</i>
<i>DSP</i>	<i>Digital Signal Processor</i>
<i>DU</i>	<i>Digital Unit</i>
<i>DWDM</i>	<i>Dense Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>EDGE</i>	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
<i>EGPRS</i>	<i>Enhanced General Packet Radio System</i>
<i>eICIC</i>	<i>Enhanced Inter-Cell Interference Coordination</i>
<i>eMBB</i>	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
<i>EPC</i>	<i>Evolved Packet Core</i>
<i>EPS</i>	<i>Evolved Packet System</i>
<i>E-RAB</i>	<i>E-UTRAN Radio Access Bearer</i>
<i>ERE</i>	<i>Espectro Radioeléctrico</i>
<i>ETSI</i>	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>
<i>E-UTRAN</i>	<i>Evolved - UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<i>EVM</i>	<i>Error Vector Magnitude</i>
<i>FDD</i>	<i>Frequency Division Duplexing</i>

<i>FDMA</i>	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
<i>FD-MIMO</i>	<i>Full Dimension MIMO</i>
<i>FMC</i>	<i>Fixed-Mobile Convergence</i>
<i>FPGA</i>	<i>Field Programmable Gate Array</i>
<i>FTTH</i>	<i>Fiber to the Home</i>
<i>GBR</i>	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
<i>GERAN</i>	<i>Gsm Edge Radio Access Network</i>
<i>GMSK</i>	<i>Gaussian Minimum Shift Keying</i>
<i>GPON</i>	<i>Gigabit – Capable Passive Optical Network</i>
<i>GPP</i>	<i>General Purpose Processor</i>
<i>GPRS</i>	<i>General Packet Radio System</i>
<i>GSM</i>	<i>Global System for Mobile Communications</i>
<i>HARQ</i>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
<i>HSDPA</i>	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
<i>HSPA</i>	<i>High Speed Packet Access</i>
<i>HSS</i>	<i>Home Subscriber Server</i>
<i>HSUPA</i>	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
<i>IEEE</i>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<i>ICIC</i>	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i>
<i>IMS</i>	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
<i>IMT</i>	<i>International Mobile Telecommunications</i>
<i>IoT</i>	<i>Internet of Things</i>
<i>IP</i>	<i>Internet Protocol</i>
<i>IQ</i>	<i>In-phase/Quadrature</i>
<i>ISDN</i>	<i>Integrated Service Digital Network</i>

<i>JT</i>	<i>Joint Transmission</i>
<i>ITU</i>	<i>International Telecommunication Union</i>
<i>LA</i>	<i>Link Adaptation</i>
<i>LTE</i>	<i>Long Term Evolution</i>
<i>LWA</i>	<i>LTE-WLAN Aggregation</i>
<i>M2M</i>	<i>Machine to Machine</i>
<i>MBR</i>	<i>Maximum Bit Rate</i>
<i>MCS</i>	<i>Modulation Coding Scheme</i>
<i>MIMO</i>	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
<i>MinTic</i>	<i>Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones</i>
<i>MIT</i>	<i>Massachusetts Institute Technology</i>
<i>MME</i>	<i>Mobility Management Entity</i>
<i>MMS</i>	<i>Multimedia Messaging Services</i>
<i>MS</i>	<i>Mobile Station</i>
<i>MSA</i>	<i>Mutual Standard Agreement</i>
<i>MU-MIMO</i>	<i>Multi user MIMO</i>
<i>NAS</i>	<i>Non Access Stratum</i>
<i>NGFI</i>	<i>Next Generation Fronthaul Interface</i>
<i>NMT</i>	<i>Nordic Mobile Telephone</i>
<i>NR</i>	<i>New Radio</i>
<i>NSA</i>	<i>Non Standalone</i>
<i>OBSAI</i>	<i>Open Base Station Architecture Initiative</i>
<i>OFDM</i>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<i>OFDMA</i>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
<i>OLT</i>	<i>Optical Line Terminal</i>

<i>ONU</i>	<i>Optical Network Unit</i>
<i>OPEX</i>	<i>Operational Expenditures</i>
<i>ORI</i>	<i>Open Radio Equipment Interface</i>
<i>OSS</i>	<i>Operation Support Subsystem</i>
<i>OTN</i>	<i>Optical Transport Network</i>
<i>PCC</i>	<i>Primary Component Carrier</i>
<i>PCELL</i>	<i>Primary Serving Cell</i>
<i>PCRF</i>	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
<i>PDCCH</i>	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
<i>PDCP</i>	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
<i>PDSCH</i>	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
<i>P-GW</i>	<i>Packet Data Network Gateway</i>
<i>PIC</i>	<i>Photonic Integrated Circuit</i>
<i>PON</i>	<i>Passive Optical Network</i>
<i>PSK</i>	<i>Phase Shift Keying</i>
<i>PRB</i>	<i>Physical Resource Block</i>
<i>PUSCH</i>	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
<i>QAM</i>	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<i>QCI</i>	<i>QoS Class Identifier</i>
<i>QoS</i>	<i>Quality of Services</i>
<i>QPSK</i>	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
<i>RAN</i>	<i>Radio Access Network</i>
<i>RANaaS</i>	<i>Radio Access Network as a Service</i>
<i>RB</i>	<i>Radio Bearer</i>
<i>RF</i>	<i>Radio Frequency</i>

<i>RLC</i>	<i>Radio Link Control</i>
<i>RNC</i>	<i>Radio Network Controller</i>
<i>RRH</i>	<i>Remote Radio Head</i>
<i>RRU</i>	<i>Remote Radio Unit</i>
<i>SA</i>	<i>Standalone</i>
<i>SCC</i>	<i>Secondary Component Carrier</i>
<i>SCELL</i>	<i>Secondary Serving Cell</i>
<i>SC-FDMA</i>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
<i>SDR</i>	<i>Software Defined Radio</i>
<i>SFP</i>	<i>Small Form-Factor Pluggable</i>
<i>S-GW</i>	<i>Serving Gateway</i>
<i>SIM</i>	<i>Subscriber Identity Module</i>
<i>SINR</i>	<i>Signal to Noise and Interference Ratio</i>
<i>SMG</i>	<i>Statistical Multiplexing Gain</i>
<i>SMS</i>	<i>Short Message Service</i>
<i>SON</i>	<i>Self Optimizing Network</i>
<i>SU-MIMO</i>	<i>Single User MIMO</i>
<i>TACS</i>	<i>Total Access Communication System</i>
<i>TB</i>	<i>Transport Block</i>
<i>TCO</i>	<i>Total Cost of Ownership</i>
<i>TDD</i>	<i>Time Division Duplexing</i>
<i>TDMA</i>	<i>Time Division Multiple Access</i>
<i>TTI</i>	<i>Transmission Time Interval</i>
<i>UDN</i>	<i>Ultra Dense Network</i>
<i>UE</i>	<i>User Equipment</i>

<i>UL</i>	<i>Uplink</i>
<i>UMTS</i>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<i>UTRAN</i>	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<i>VoLTE</i>	<i>Voice over LTE</i>
<i>WAN</i>	<i>Wide Area Network</i>
<i>WCDMA</i>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>
<i>WDM</i>	<i>Wavelength Division Multiplexing</i>
<i>WiFi</i>	<i>Wireless Fidelity</i>
<i>WiMAX</i>	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>

RESUMEN

El crecimiento continuo y exponencial del tráfico de datos en las redes móviles, plantea grandes retos en el despliegue de la red de acceso, debido a la necesidad de buscar novedosas soluciones, que hagan frente a esta tendencia. Actualmente, la densificación de la red y la arquitectura de radio acceso centralizada (C-RAN), son la principal forma que los operadores del primer mundo han encontrado para proveer de mayor capacidad a la red. En Colombia estos conceptos han sido poco relevantes, por lo que, en este trabajo, se plantea la necesidad de implementarlos, para un operador local en una ciudad principal. El fin es realizar una estrategia, teniendo en cuenta estudios relacionados con la temática, la regulación existente, y planes que ayuden a sustentarlo, además de los retos que surgen.

Palabras clave: Red de radio acceso centralizada; Radio sobre Fibra; LTE; Convergencia; FTTH

ABSTRACT

The continuous and exponential growth of data traffic in mobile networks, poses great challenges in the deployment of the access network, due to the need to find innovative solutions, to address this trend. Currently, densification network and centralized radio access architecture (C-RAN) are the main form that first world's operators have found to provide the network with greater capacity. In Colombia these concepts have been little relevant, so in this work the need to implement them for a local operator in a main city is raised. The aim is to carry out a strategy, considering studies related to the subject, the existing regulation and plans that help to sustain it, in addition to the challenge that arise.

Keywords: C-RAN; Radio over Fiber; LTE; Strategy; Convergence; FTTH

INTRODUCCIÓN

Debido a la creciente demanda de tráfico en las actuales redes celulares, la industria y la academia, han propuesto y desarrollado nuevas tecnologías, tendientes a proveer una mayor capacidad y cobertura a dichas redes, con el fin de mejorar la experiencia de usuario, mientras se reducen los tiempos de comercialización y costos [1]. A su vez los entes reguladores de cada país, alineados con las tendencias internacionales en las nuevas tecnologías, implementan planes y leyes que impulsan el avance del servicio de las telecomunicaciones, promoviendo su actualización, para que sea accesible a todos los ciudadanos, velando por una conexión de alta calidad.

En Colombia, operadores privados son los encargados de la comercialización de los servicios de comunicaciones móviles, por medios de redes propias desplegadas por ellos mismos, siendo vigilados y autorizados por el Ministerio de Tecnologías de Información y Comunicaciones (MinTic). Actualmente las tecnologías desplegadas son: GSM, UMTS y LTE, siendo esta última la más reciente, y por ende, la que brinda mayores rendimientos, sin embargo, con la aparición de nuevos servicios de conectividad, como el internet de las cosas (IoT) , comunicaciones maquina a máquina (M2M), realidad virtual, carros autónomos, aplicaciones basadas principalmente en transmisión de video de ultra alta definición, entre otras, los requerimientos en anchos de banda están quedando cortos, por lo que una nueva generación de redes móviles está siendo estandarizada, y será desplegada masivamente en los próximos años. Con base en ello, el MinTic ha desarrollado el plan 5G [2], el cual busca establecer con los operadores pruebas piloto con esta nueva tecnología, para tener un conocimiento previo, y revisar los requerimientos que sustenten los operadores.

Esta nueva generación busca entre otras cosas, sentar el concepto de virtualización de la red de acceso, la cual solo se podrá lograr, con la aplicación de una arquitectura Centralizada (C-RAN), ampliamente usada en países como China, Korea del Sur y Japón. En Colombia aún no se ha utilizado dicho tipo de arquitectura, por lo que este trabajo de grado propone una estrategia para implementarla en la red LTE, con base en estudios

realizados, y artículos que exponen los retos a tener en cuenta. Para el ejemplo, la estrategia se implementará en la ciudad de Bogotá y Soacha para el Operador Movistar.

Para esta red de radio acceso centralizada LTE, se propone integrar las plataformas de transporte bajo el concepto de convergencia de los sistemas inalámbricos y los sistemas de fibra óptica de redes fijas, para implementar la red fronthaul de la red móvil, con el fin de optimizar recursos, proveer grandes anchos de banda, reutilizar la infraestructura física, y facilitar la gestión de la red [3].

La implementación de la arquitectura C-RAN, requerirá de una fuerte inversión por parte de los operadores, por lo que el MinTic, más que actuar como regulador, deberá actuar como facilitador, para que dicho despliegue se lleve a cabo, considerando además que la cantidad de estaciones base de tipo macro y micro celdas, se multiplicarán en los próximos años, bajo el concepto de densificación, la cual es una de las principales soluciones para aumentar la capacidad de la red, ya que, se reduce el área de cubrimiento, y por ende, aumentan los recursos de radio disponibles, por la disminución de la cantidad de equipos de usuarios (UE) conectados a las estaciones base.

El libro muestra las tecnologías más relevantes tendientes a mejorar la capacidad de las redes actuales LTE, buscando una evolución natural a la red de nueva generación 5G, aplicando el concepto de C-RAN, analizando las ventajas de esta arquitectura, pero también los retos y sus posibles soluciones.

1 MARCO GENERAL DEL PROYECTO

Para realizar la estrategia de despliegue de una red de radio acceso Centralizada LTE, y aplicarla a un Operador móvil en Colombia, es necesario entender el concepto de las tecnologías entorno a las redes celulares, su evolución, y límites físicos, además de la distribución actual y futura del espectro, las nuevas técnicas de transporte de radio sobre fibra, y el porqué, es importante desplegar este tipo de soluciones.

Inicialmente en el capítulo dos, se explica los conceptos básicos de una red celular, así como de las variables a tener en cuenta para diseñarla, se detalla su evolución y cuales han sido los aspectos relevantes para hacerla posible, adicionalmente, se profundiza en todos los conceptos de la tecnología LTE, abarcando principalmente su red de acceso E-UTRAN.

En el tercer capítulo, se abarcan y se explican las tecnologías más relevantes tendientes a mejorar la capacidad en la red de acceso LTE, soportada en estudios y estándares de la 3GPP.

En el cuarto capítulo se profundiza en el concepto de arquitectura C-RAN, mostrando las diferencias con la arquitectura actual, así como las tecnologías de radio sobre fibra y las técnicas de transporte planteadas en la industria y la academia para la red fronthaul, entre los módulos de Unidad de Banda Base (BBU) y Cabeza remota de radio (RRH).

En el quinto capítulo se sustentan las ventajas que trae consigo implementar una arquitectura de radio acceso centralizada, con base en estudios académicos y en los resultados obtenidos por distintas operaciones en el mundo.

Finalmente en el sexto capítulo, después de contar con un conocimiento estructurado y reconociendo las tendencias internacionales, en los que influyen aspectos relevantes como, costos de despliegue, regulación TIC, y tecnologías novedosas de solución transversal, se propone una estrategia de implementación de una red de radio acceso centralizada C-RAN LTE, aplicando los conceptos de radio sobre fibra RoF para la red Fronthaul, teniendo en cuenta las tecnologías estandarizadas por la 3GPP, MIMO, CA, CoMP, ICIC y HetNets, que

están enfocadas en mejorar la capacidad de las redes, y que son base para el actual y el futuro despliegue de las redes móviles en el mundo.

1.1 OBJETIVOS

Establecer una estrategia de despliegue de una red de radio acceso LTE, usando el concepto de C-RAN y radio sobre fibra, para un operador móvil en Colombia, con el fin de mejorar la capacidad de la red celular, haciendo uso eficiente de los recursos de radio y procesamiento, evidenciando las ventajas frente a la arquitectura actual y una evolución natural hacia las redes 5G.

- Identificar las tendencias nacionales e internacionales, en la aplicación de nuevas tecnologías, arquitecturas, y desarrollos en la red de acceso LTE con tendencia a la evolución hacia 5G.
- Reconocer las diferentes iniciativas y formas de transporte de señales de radio sobre fibra óptica factibles de implementar en la interfaz entre las BBU's y RRH's.
- Evaluar el rendimiento y ventajas que traería consigo la implementación de la centralización de banda bases, usando sistemas de radio sobre fibra, en la, gestión, capacidad, y cobertura de la red celular.

1.2 ALCANCE

Establecer una estrategia de despliegue de radio acceso LTE, utilizando una arquitectura centralizada, usando sistemas de radio sobre fibra, como propuesta a un operador celular, mostrando los rendimientos y ventajas en: capacidad, calidad y gestión frente a la arquitectura actual distribuida.

2 EVOLUCION DE LAS REDES MOVILES

2.1 ARQUITECTURA BÁSICA DE UNA RED CELULAR

La telefonía celular se contempla como una extensión del servicio de la telefonía convencional fija a usuarios móviles, que en vez de utilizar cables para acceder a la central telefónica (i.e central de conmutación móvil), usa enlaces radioeléctricos. Desde la perspectiva de dichos usuarios, ellos contratan un servicio con capacidad de movilidad, sobre una cierta área geográfica o de cobertura, a la que asocia un cierto nivel de calidad a nivel cualitativo y/o cuantitativo [4].

En la Figura 1, se muestra una arquitectura básica de una red celular, la cual se divide en cuatro bloques conectados por interfaces, que hacen posible el intercambio de información. La Estación móvil o comúnmente llamado celular (MS), es el equipo donde el usuario se conecta a la red, y a través del cual recibe sus servicios. La red de Radio Acceso (RAN), la cual permite la movilidad del usuario dentro del área de cobertura de la red, y es la encargada de gestionar los recursos de radio. El subsistema de Conmutación o red núcleo (Core), responsable por el establecimiento de la trayectoria a través de la cual el intercambio de información tiene lugar, y donde se conecta a otras redes de área amplia (WAN) como: la Red Telefónica Pública conmutada, otras redes celulares, e Internet. Y finalmente, el subsistema de soporte a la Operación (OSS), que está a cargo de la administración de la red, como: la monitorización de alarmas, rendimiento, configuración de los elementos, recolección de información y funciones administrativas (suscripción de usuarios y facturación). Este último es la interfaz de la red con los Ingenieros del operador.

2.2 VARIABLES EN EL DISEÑO DE UNA RED CELULAR EN TÉRMINOS DE CAPACIDAD

Con base en la teoría de Shannon la capacidad máxima que puede obtenerse en un canal afectado por ruido gaussiano está dado por la fórmula (1):

$$C = B \log_2(1 + SINR) \quad (1)$$

Donde **B** es el ancho de banda del espectro, y **SINR**, es la relación señal a ruido e interferencia [5]. Con esta fórmula tenemos que, para incrementar la Capacidad en la RAN satisfaciendo los requerimientos crecientes de tráfico de los usuarios es necesario:

1. Aumentar **B**, accediendo a una mayor cantidad de espectro.
2. Aumentar la eficiencia espectral, a través de mejoras tecnológicas, que han ido acercándose progresivamente al límite de Shannon ($\log_2(1 + SINR)$).
3. Aumento de cantidad de Estaciones Base, reduciendo la distancia hasta la estación móvil y de esta forma aumentando el **SINR** en cada punto.

Como se había dicho, en Colombia, la atribución y asignación de frecuencias en el ERE, es potestad del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, asesorado técnicamente por la Agencia Nacional del Espectro (ANE), la cual se encargará de realizar la gestión, para habilitar nuevas bandas de frecuencias donde los operadores puedan desplegar portadoras adicionales. Esto se define en el artículo 26 de la ley 1341 de 2009 la cual se puede consultar en el ANEXO B.

En los últimos años, en Colombia el espectro ha sido asignado por subasta pública, por ende, para un operador, el aumento de **B**, tiene un impacto regulatorio, que puede tener latencias del orden de años, ya que, es necesario reorganizar el espectro para así tener espacio a subastar, siendo una inversión muy alta en la que debe ser analizada su relación costo-beneficio.

La forma de aumentar la eficiencia espectral se ha realizado históricamente con el despliegue de nuevos estándares que han aprovechado el uso de esquemas de modulación

y codificación adaptativas, que dependiendo del **SINR**, asignará modulaciones con una mayor cantidad de bits por símbolo y códigos con menor redundancia, aumentando la velocidad al usuario. Actualmente el estándar, evolución a largo plazo avanzado (LTE - Advanced), puede manejar modulaciones de hasta 256QAM (8 bits por símbolo), acercándose aún más a la eficiencia espectral del límite de Shannon como se muestra en la Figura 2.

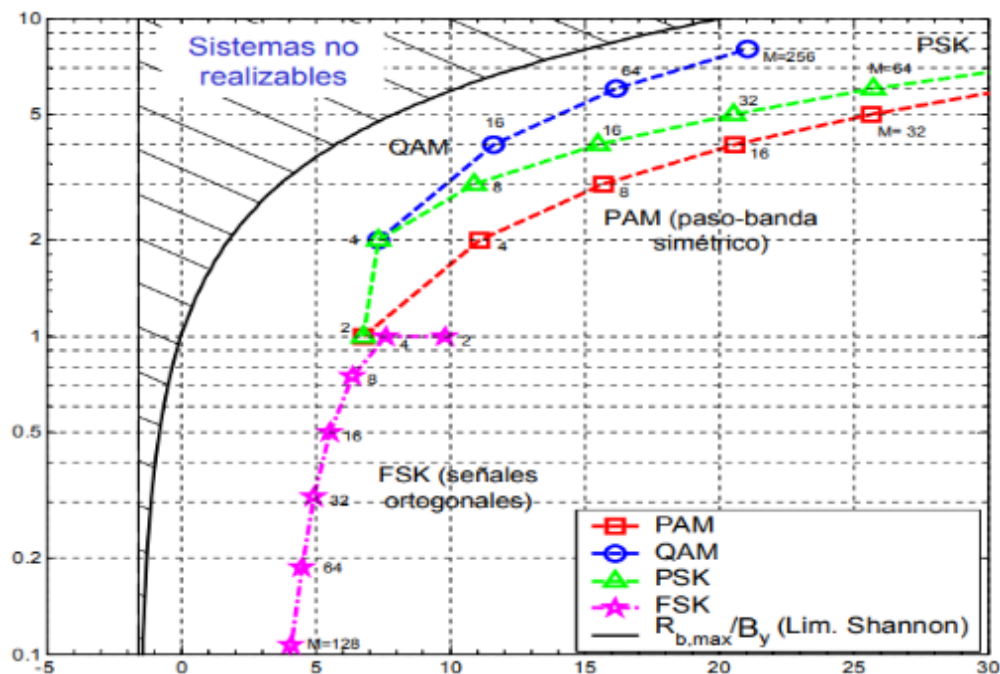


Figura 2. Tabla de esquemas de Modulación y Codificación

Fuente: LTE: Comunicaciones digitales. Escuela pública superior

Finalmente, el aumento del despliegue, con el uso de estaciones base de menor cobertura como Pico Celdas y Micro Celdas, estudiados bajo el concepto de redes heterogéneas, han aprovechado que el tráfico no es uniforme, ni en el espacio ni en el tiempo, y que comúnmente se presenta una alta concentración de usuarios, por ejemplo, en una torre de oficinas en horas laborales. Estas estaciones instaladas en dichos lugares ayudarán a descargar la celda macro en cantidad de usuarios y tráfico, la cual esta normalmente instalada en las azoteas, y tiene una gran área de cobertura. Este concepto se verá en detalle posteriormente.

2.3 GENERACION DE REDES CELULARES

2.3.1 Primera Generación de Redes Celulares (1G)

La industria de las telecomunicaciones y en particular la telefonía móvil, tiene su comienzo con sistemas análogos incompatibles propios, desarrollados en distintos países de Europa, Estados Unidos y Japón, los cuales no permitían interoperabilidad fuera de sus fronteras (i.e Roaming), y servían exclusivamente para el servicio de voz. Las tecnologías más representativas y predominantes de estos sistemas llamados de Primera Generación son: NMT-450, Sistema Nórdico de telefonía móvil – Banda 450MHz desarrollado en, Finlandia, Suecia, Noruega y Dinamarca, el sistema Avanzado de telefonía móvil – Banda 800MHz (AMPS), desarrollado en los Estados Unidos, y el sistema de comunicación de acceso total - Banda 900MHz (TACS), desarrollado en el Reino Unido.

Estos sistemas usaban la técnica de acceso múltiple por división de frecuencia (FDMA), donde el espectro disponible se divide en canales, los cuales se asignan a cada usuario de forma dedicada. Esta técnica era insegura y de fácil interceptación. La Figura 3 muestra una representación de la técnica de acceso FDMA.

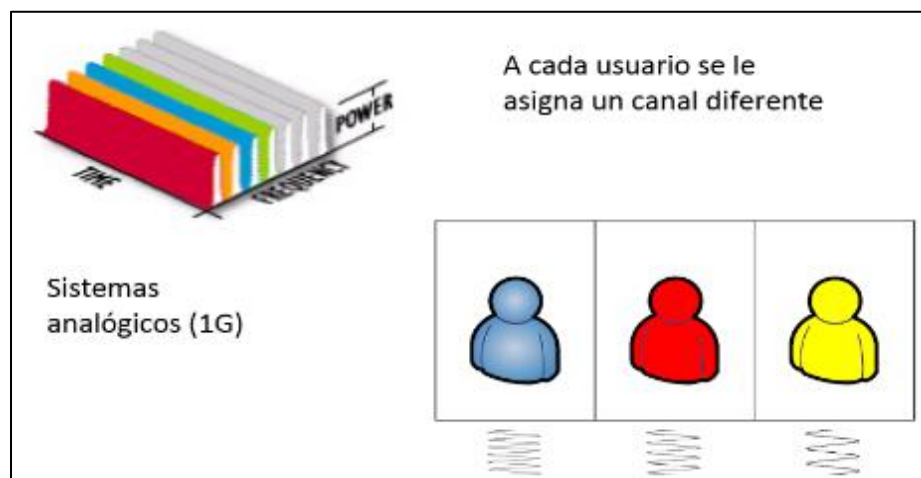


Figura 3. Técnica de Acceso FDMA

Fuente: *Sistemas de Conmutación. Telefonía Móvil. Universidad del Cauca*

2.3.2 Segunda Generación de Redes Celulares (2G)

En el año 1982, la Comisión Europea de Administraciones de correos y Telecomunicaciones (CEPT), crea el grupo GSM (Groupe Speciale Mobile por sus siglas

en francés), con el fin de desarrollar un estándar que se implementara en toda Europa, y que tuviera las siguientes características: el sistema debía ser digital, permitir Roaming, capacidad para introducir nuevos servicios, mejor eficiencia espectral y compatibilidad con Red digital de Servicio Integrados (ISDN). En 1989, la responsabilidad fue transferida al Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI), y debido a la gran adopción del sistema en todo el mundo, las siglas se transformaron en, Sistema Global para las comunicaciones móviles. A su vez en los Estados Unidos y Canadá, evoluciona el sistema AMPS a Digital AMPS (D-AMPS), llamado comúnmente TDMA, ya que usa Acceso múltiple por división de tiempo, el cual es la misma multiplexación usada por GSM.

También en los Estados Unidos, la empresa Qualcomm desarrolla CDMA, acceso múltiple por división de código, la cual es una multiplexación que usa todo el espectro de la portadora disponible (canalización de 1.25MHz), pero asigna a cada usuario un código que es ortogonal entre sí, para evitar interferencias. Estas nuevas técnicas de multiplexación permiten hacer un uso más eficiente del espectro radioeléctrico, aumentando la capacidad de los sistemas, y permitiendo una mayor cantidad de usuarios simultáneos en el canal.

Una analogía de estas técnicas de acceso es la siguiente: En una habitación que representa el canal, hay varias personas que quieren comunicarse al mismo tiempo, si varias personas hablan a la vez, la comunicación será intangible, lo que quiere decir, que habrá interferencia y la comprensión no será posible. Para evitar o reducir el problema, las personas podrían hablar por turnos (time slots), lo que se asemeja a la técnica de acceso TDMA, o hablar en distintos idiomas, donde solo las personas que hablen el mismo idioma (código) puedan comunicarse, lo que se asemejaría a la técnica CDMA. En la Figura 4 y en la Figura 5, se muestra una representación de las técnicas de acceso CDMA y TDMA, respectivamente. Estos sistemas fueron llamados de Segunda Generación.

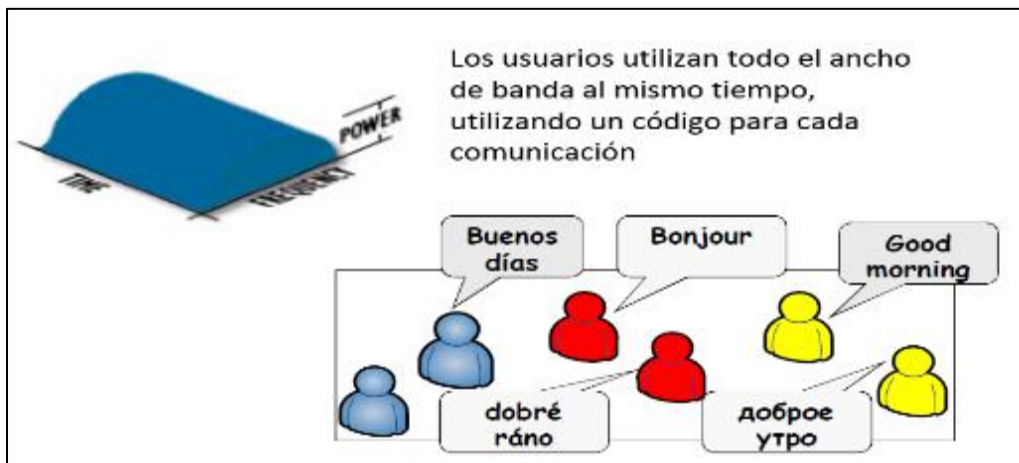


Figura 4. Técnica de acceso CDMA

Fuente: Sistemas de Conmutación. Telefonía Móvil. Universidad del Cauca

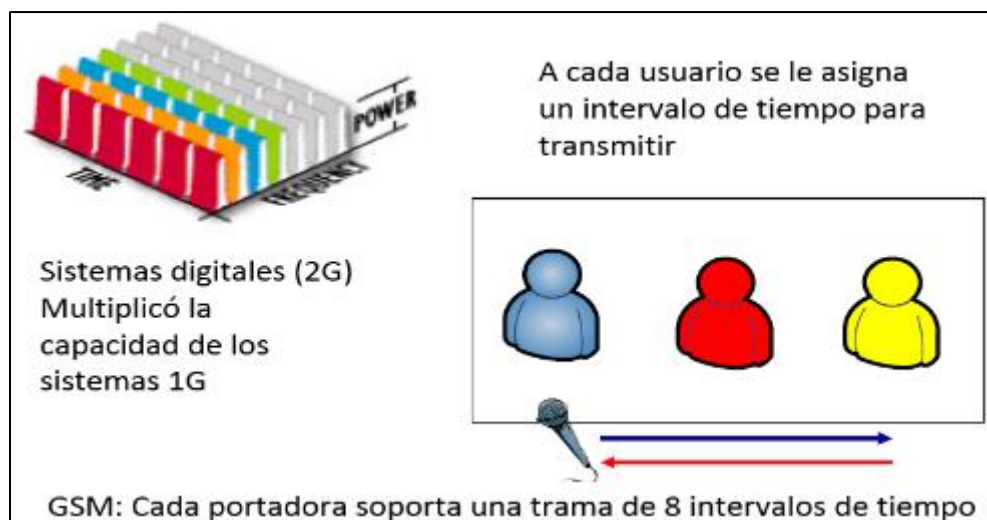


Figura 5. Técnica de acceso TDMA

Fuente: Sistemas de Conmutación. Telefonía Móvil. Universidad del Cauca

Durante los años 90, GSM se convierte en el estándar celular dominante en varias partes del mundo, ya que alentó el crecimiento exponencial de los usuarios de comunicaciones móviles al permitir la creación de economías de escala, que abarataron los costes de despliegue, a su vez, la evolución de la microelectrónica permitió dispositivos cada vez más pequeños y con mayores prestaciones, como la inclusión del módulo de identidad de abonado (SIM), el cual es un pequeño chip que permite separar la identidad del abonado

(i.e número celular), al del equipo móvil, capacidad que carecían los sistemas de su misma generación. Esto logró dotar de verdadera movilidad a los servicios de telefonía [5].

GSM es un sistema de conmutación de circuitos, diseñado originalmente para voz, al que posteriormente se le adicionaron algunos servicios de datos: servicios de mensajes cortos (SMS), un servicio de texto de hasta 160 caracteres, y un servicio de datos que permite una tasa de transferencia de 9.6kbps. La transmisión sobre el canal radio usa modulación por desplazamiento mínimo gaussiano (GMSK), donde se envían bits de datos de usuario, sincronización, ecualización y redundancia mediante un proceso de codificación de canal que permite la corrección de errores en la recepción. Esta codificación permite un enlace más robusto a interferencias en el canal, sin embargo, cuando un usuario no requiera de una codificación robusta, ya sea porque está muy cercano a la estación base o no tiene obstáculos, estos bits de redundancia se reemplazan por bits de datos de usuario, mejorando la eficiencia del canal.

Adicionando nuevos elementos de red a la arquitectura y con la aplicación de 4 técnicas diferentes de codificación adaptativas, dependiendo de la calidad del canal, evaluado por la relación señal a ruido (C/I), se obtuvieron tasas de descarga de hasta 177kbps teóricos. A este servicio que usaba conmutación de paquetes usando la red GSM existente se denominó Servicio General de Paquetes Vía Radio (GPRS). Posteriormente este servicio combinado con otra técnica de modulación diferente a GMSK (1 bit por símbolo de canal), modulación por desplazamiento de fase 8-PSK (3 bits por símbolo de canal) evoluciona a GPRS mejorado (EGPRS) también llamado EDGE, obteniendo 9 esquemas de modulación y codificación (MCS) llegando a tener tasas de descarga de hasta 384kbps teóricos [6]. En la Figura 6 se muestra un gráfico de los throughput alcanzables por cada MCS, en función de la relación señal a ruido (C/I)

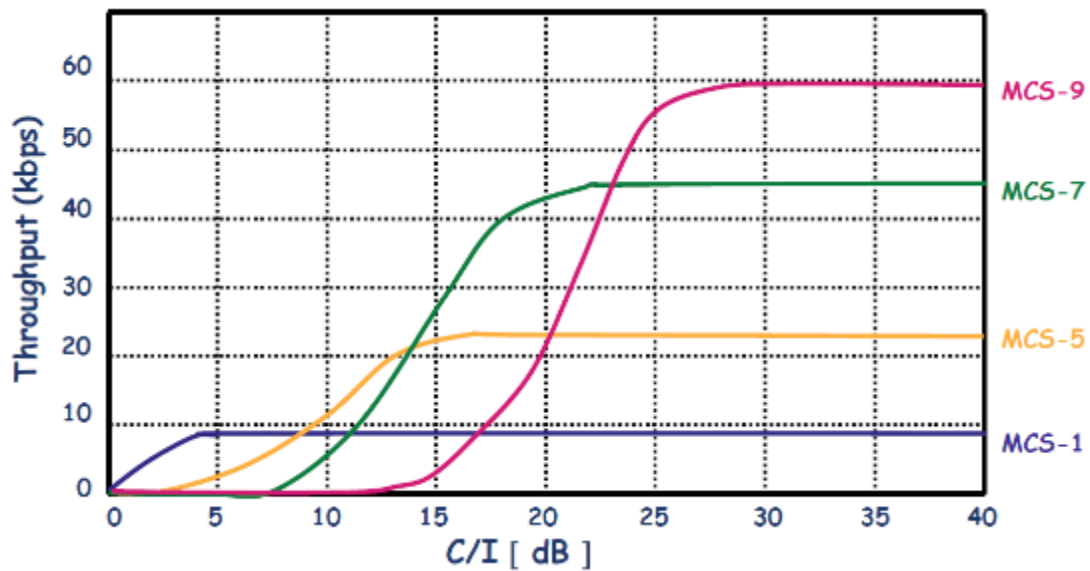


Figura 6. Throughput en función de la calidad del canal medido C/I

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Al realizarse la transmisión de voz, por conmutación de circuitos, los recursos de radio asignados al usuario son permanentes, desde el inicio de la llamada hasta el fin de la misma [7]. Para el caso de la transmisión de datos, la cual es por ráfagas, y usa conmutación de paquetes, la asignación de recursos de radio es de forma dinámica, dependiendo de las necesidades de cada momento. A estos mecanismos que gestionan la asignación de los recursos de radio en una transmisión por paquetes se denominan planificación de paquetes ó Packet Scheduling.

A su vez el modo de uso del espectro radioeléctrico en GSM es, Duplexación por División de Frecuencia (FDD por sus siglas en inglés), donde existe una banda de frecuencia para el enlace de subida - Uplink (transmisión desde el equipo móvil a la estación base) y otra banda para el enlace de bajada - Downlink (transmisión desde la estación base al equipo móvil). Es necesario entonces asignar un par de bandas de frecuencia para su operación, por lo que se denominan frecuencias emparejadas. Otro modo de transmisión es la Duplexación por División de Tiempo (TDD por sus siglas en inglés) en donde se usa una misma portadora para transmitir y recibir señales, pero en intervalos de tiempo diferentes. Dado que se utiliza una única banda, se dice que este modo opera en bandas de frecuencia no emparejadas.

En el caso particular de la banda de 900MHz, el enlace de subida está entre 890 a 915 MHz, y el enlace de bajada está entre los 935 a 960MHz, estas bandas se dividen en canales de 200KHz de tamaño (canalización usada en GSM), lo que da un total de 124 canales disponibles para cada banda. En la Figura 7 se muestra la definición de enlaces para dicha banda.

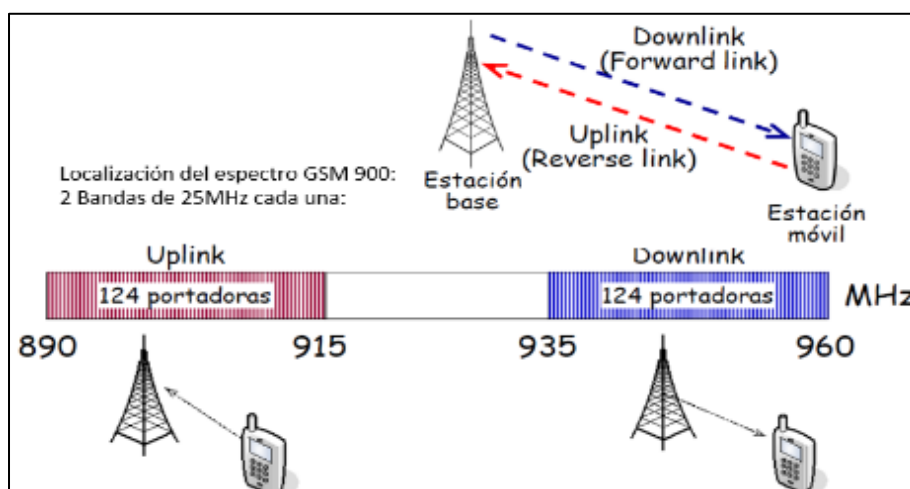


Figura 7. Modos de uso del espectro

Fuente: LTE: Sistemas de Conmutación. Telefonía Móvil. Universidad del Cauca

2.3.3 Tercera Generación de Redes Celulares (3G)

A finales de los años 90, con un aumento exponencial de los usuarios de telefonía móvil y con la consolidación de GSM como estándar dominante, la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), propone definir un sistema global de telefonía móvil avanzado que terminara reemplazándolo. Sin embargo, la falta de consenso desembocó en la definición de un sistema de familia diferentes bajo la denominación de Telecomunicaciones Móviles Internacionales-2000 (IMT-2000), que se catalogaron como de tercera generación [8]. IMT-2000 por ende, tuvo como objetivo definir las interfaces entre las redes de tercera generación y las redes que evolucionaron a partir de GSM y CDMA.

En Europa, la ETSI y un grupo de organismos asociados, decidieron emprender el Proyecto de Asociación de tercera generación (3GPP), que estableció los estándares para un sistema móvil 3G que tuviera una red núcleo basada en GSM, y cuya red de acceso soportara los modos (FDD y TDD), este nuevo estándar se denominó, Sistema Universal

de Telecomunicaciones Móviles (UMTS). En paralelo para su contraparte estadounidense se crea el grupo 3GPP2, que se encargaría de la estandarización de CDMA2000, la cual fue la evolución de CDMA.

Dentro de los requisitos en tasas de transferencia con los que debía contar este nuevo sistema, eran, cumplir con rendimientos de 144kbps en velocidades dentro de vehículos, 384kbps en velocidades peatonales y 2Mbps en entornos interiores, con lo que los usuarios tendrían la posibilidad de acceder a contenidos y servicios multimedia de banda ancha, independientemente del lugar en que se encontraran [9]. Para cumplir con estos requerimientos de eficiencia espectral, así como de mayor flexibilidad para acomodar servicios multimedia, la tecnología de acceso escogida fue WCDMA, acceso múltiple por división de código de banda ancha, utilizando una canalización de 5MHz.

De aquí en adelante, el desarrollo de GSM y UMTS se realizaría por etapas, correspondientes a entregas de especificaciones técnicas (i.e releases) y sus nuevas versiones hechas por la 3GPP. El primer Release fue lanzado en el año 1999, donde se realiza la primera entrega de las especificaciones técnicas del sistema UMTS, y por ello fue denominado Release 99. Cada desarrollo tecnológico y estudios son aplicados a los estándares en los diferentes elementos de red que componen su arquitectura (RAN y Core), obteniendo nuevas características o “features”, los cuales dan forma a la evolución de dichos sistemas.

Posteriormente, UMTS evoluciona en Acceso a datos de alta velocidad en enlace descendente (HSDPA) en el Release 5, utilizando modulación y codificaciones adaptativas como en GSM, transmisión en modo paquete, y uso del canal compartido en downlink (DSCH). Dependiendo de las condiciones del canal de radio y del servicio de datos requerido por el usuario, se asignará Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (QPSK), 2 bits por símbolo o modulación de amplitud en cuadratura 16QAM, 4 bits por símbolo [10]. Estas asignaciones son decisión de los algoritmos de Packet Scheduling, basado en el Indicador de Calidad del canal (CQI) reportado por los celulares en un intervalo de transmisión de paquetes (TTI) de 2 ms, lo cual fue una mejora considerable con respecto a UMTS donde el TTI era de 10ms. A su vez se recogen avances en el campo de la codificación de canal y se estandariza el uso de turbo-códigos.

Los servicios de datos serán provistos con diferente calidad de servicio QoS, dependiendo de su naturaleza y características. En la Tabla 1, se muestran todos los tipos de servicio manejados en UMTS.

Tabla 1. Clases de servicio para los tipos de tráfico en UMTS

Clase de Servicio	Naturaleza	Características Básicas	Ejemplos
Conversacional	Servicios de tiempo real	Preserva el límite del retardo y la variación de tiempo entre paquetes. El retardo es pequeño y constante.	Voz, videoteléfono
Afluente (Streaming)	Servicios de tiempo real	Preserva la variación de tiempo entre paquetes. Retardo constante pero no necesariamente reducido.	Flujo de video o audio
Interactiva	Servicios de tiempo NO real	Modelo de petición y respuesta. Preserva el contenido de los datos. Retardo moderado y bajas tasas de errores.	Navegación en internet
Diferida (Background)	Servicios de tiempo NO real	No es necesaria la interacción. Preserva el contenido de los datos.	Correo electrónico, descarga de datos.

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Como UMTS fue una evolución de GSM, su arquitectura es muy similar, existiendo en los 2 sistemas, elementos de red que controlan y gestionan las estaciones base, y donde se implementan los distintos mecanismos de decisión para el uso eficiente de los recursos de radio como el Packet Scheduling. Para el caso de GSM este elemento se denomina Controlador de Estaciones Base (BSC) y en UMTS Controlador de la red radio (RNC). También, UMTS emula una conexión de conmutación de circuitos para servicios en tiempo real, y conmutación de paquetes para el servicio de datos. En la Figura 8 se muestra la similitud de las 2 arquitecturas, y la forma jerárquica de la red de radio acceso de Gsm - Edge (GERAN) y la red de radio acceso terrestre de UMTS (UTRAN).

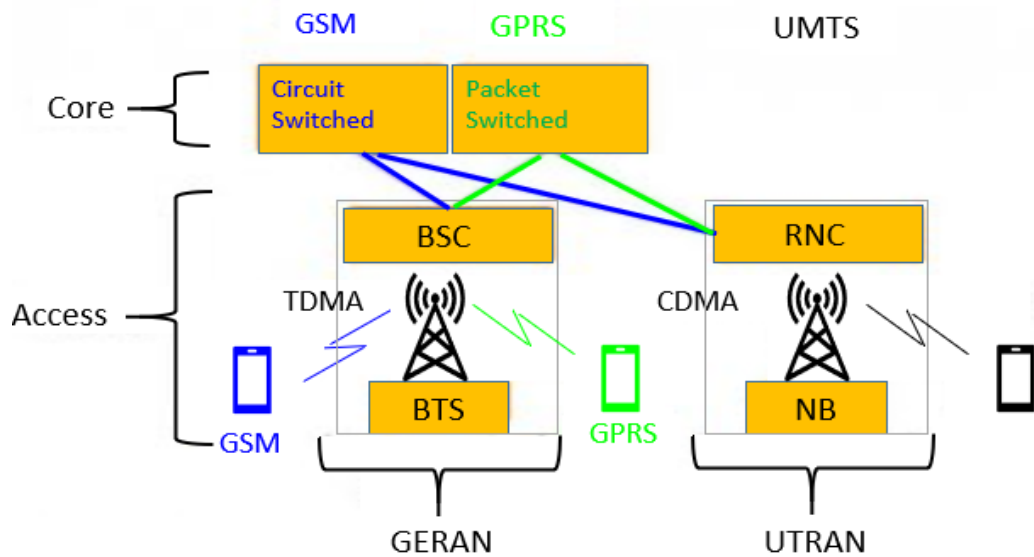


Figura 8. Arquitecturas comparativas de GSM y UMTS

Fuente: <http://www.3gpp.org>

Una de las mejoras que tuvo HSDPA, fue la de implementar el mecanismo de Packet Scheduling en la estación base (Nodo B en UMTS), mejorando notablemente los tiempos de retardo en la red, ya que permitió a la función de scheduling, disponer de información muy reciente sobre el canal, y así, seleccionar la modulación y codificación que mejor se adapten al canal en cada TTI. Esta implementación marcó un primer hito, en la descentralización de funciones en la RAN y trajo como consecuencia mejoras en la tasa pico de transferencia de datos desde la estación al usuario, llegando teóricamente a superar los 10Mbps [11].

En la Figura 9 se muestra la reducción del retardo, debido a la implementación del Packet Scheduling en el Nodo B.

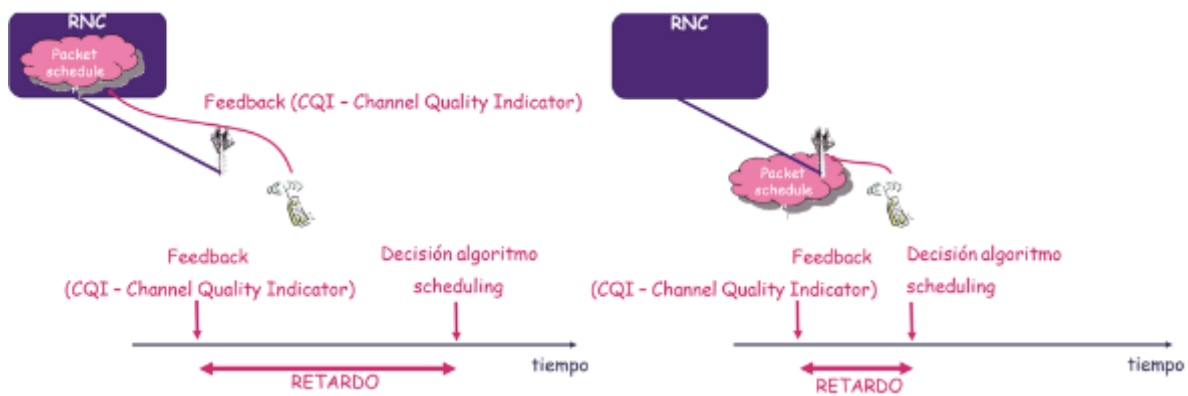


Figura 9. Reducción de retardo asociado al Packet Scheduler en HSDPA

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Aprovechando los menores tiempos de retardo en la red, y con el uso de un canal dedicado en el enlace ascendente mejorado (E-DCH), en Release 6 se lanza el nuevo protocolo, Acceso ascendente de paquetes de alta velocidad (HSUPA), alcanzando velocidades de la estación móvil al Nodo B de hasta 7.2Mbps teóricos. Combinando los 2 protocolos HSDPA y HSUPA, se tiene Acceso de paquetes de alta velocidad (HSPA) [12]. Su contraparte del 3GPP2 fue Evolución Optimizado para datos (EV-DO).

Posteriormente utilizando técnicas de multi-antena conocida como: múltiples entradas, múltiples salidas (MIMO), y modulación 64QAM (6 bits por símbolo), en Release 7, HSPA evoluciona a HSPA+, alcanzando velocidades pico de 84Mbps de bajada y 22Mbps de subida teóricos.

2.3.4 Cuarta Generación de Redes Celulares (4G)

En el año 2007, se introducen al mercado los primeros teléfonos inteligentes como el iphone, los cuales poseen una interfaz novedosa de fácil uso, con funcionalidades y aplicaciones, que permitieron cerrar el círculo virtuoso de internet en el segmento móvil, trayendo consigo un crecimiento exponencial del tráfico de datos, sin mejorar el negocio a los operadores. Esta problemática tiene varias causas. En primer lugar, la tecnología desplegada para servicios móviles, principalmente UMTS y HSPA, resultan incapaces de satisfacer la demanda de forma eficiente, debido a su baja escalabilidad en el Core y una interfaz de radio poco flexible, En segundo lugar, la competencia en el mercado hace que los precios por servicios de datos bajen por la adopción de tarifas planas, y tercero,

aparecen nuevas aplicaciones que sustituyen los servicios ya ofrecidos por los operadores como SMS, MMS y videollamadas [5].

Es por esto que en el Release 8, la 3GPP lanza el estándar, evolución a largo plazo (LTE), el cual presenta una interfaz de radio más flexible que la de su predecesora y una arquitectura de red “todo IP”.

La Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), define los requisitos técnicos con los que debe contar esta nueva familia de sistemas de cuarta generación 4G, denominadas IMT-Advanced. Estos sistemas deben ser completamente basados en tecnología IP, y ser capaces de soportar velocidades de 100Mbps en movilidad y 1Gbps en estático, latencias menores a 10ms, ancho de banda escalable e interoperabilidad con sistemas 3GPP y no 3GPP. Aunque la primera versión de LTE no soportaba estas velocidades y era más un 3.9G, comercialmente se conoció como 4G.

Para cumplir con estos requisitos, la tecnología de acceso escogida para LTE fue, Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA) en el enlace descendente, y acceso múltiple por división de frecuencias de portadora única (SC-FDMA) en el ascendente. Estas consisten en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras ortogonales entre sí, permitiendo transmitir una señal de banda ancha mediante la transmisión de un conjunto de señales de banda estrecha, resultando más robusta frente a la propagación multi camino y permitiendo tener una canalización flexible con portadoras de tamaño, 1.4MHz, 3MHz, 5MHz, 10MHz, 15MHz y 20MHz. Además, incluye la posibilidad de usar los modos FDD y TDD [4]. Esta es una de las características claves, ya que la existencia de distintos marcos regulatorios dependiendo de la zona geográfica del despliegue, así como la coexistencia con otros operadores u otros servicios y sistemas, hacen necesaria la flexibilidad en el ancho de banda usado dentro de la banda de despliegue.

En Colombia el artículo 11 de la Ley 1978 de 2019 - ANEXO A, se refiere al uso del espectro respetando la neutralidad tecnológica, lo que quiere decir que los operadores celulares tienen la libertad de desplegar una tecnología actual como LTE, en bandas donde antes existían redes como GSM y UMTS. De aquí la importancia que tienen la flexibilidad en la canalización de LTE, ya que permite una adopción paulatina, mientras se van apagando

portadoras de redes heredadas a medida que su tráfico baja, por la adopción de nuevas tecnologías.

LTE solo soporta transmisión en modo paquete, por lo que los mecanismos de Packet scheduling toman mayor relevancia en la asignación de los recursos de radio, de manera que pueda satisfacerse la QoS establecida para cada conexión. Se realiza una reducción en el número de canales de transporte manejando solo canales compartidos, uno en downlink (PDSCH) y otro en uplink (PUSCH). El TTI ahora es de 1ms, tiempo para decidir cuál esquema de codificación y modulación usar, además, emplea solicitud de repetición automática híbrida (HARQ) que con mecanismos de combinación suave, almacena los paquetes erróneos que también contienen información útil que al unirlos con paquetes retransmitidos, resulta en un paquete con mayor fiabilidad logrando una rápida adaptación a las variaciones del canal de radio [13].

Como puede verse, LTE adopta conceptos ya presentes de los sistemas heredados (legacy) GSM y UMTS, combinado con nuevos desarrollos tecnológicos, y avances en la computación y el nivel del procesamiento de datos.

Para esta instancia la 3GPP2 abandona el desarrollo de nuevos estándares, convirtiendo a LTE en la tecnología celular mundial preferida por todos los operadores, solo existiendo una competencia desarrollada desde la IEEE con los estándares de Interoperabilidad Mundial para acceso por microondas (WiMAX 802.16e y 802.16m). En la Figura 10, se muestra la panorámica actual de los sistemas celulares 3G/4G.



Figura 10. Panorámica de sistemas móviles celulares 3G/4G

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Para junio del 2016, más de 5.6 mil millones de suscripciones usaban redes GSM-HSPA, siendo el 75% de 7.4 mil millones totales. Para finales del 2020 se pronostica que el mercado mundial, abarque un total de 8.5 mil millones de suscripciones, con 8.3 mil millones usando tecnologías 3GPP, representando el 98% de la cuota de mercado, siendo LTE la tecnología de mayor y más rápido crecimiento por el momento, ya que, para el 2025 se pronostica 2.6 mil millones de suscripciones en 5G, como se muestra en la Figura 11 [14].

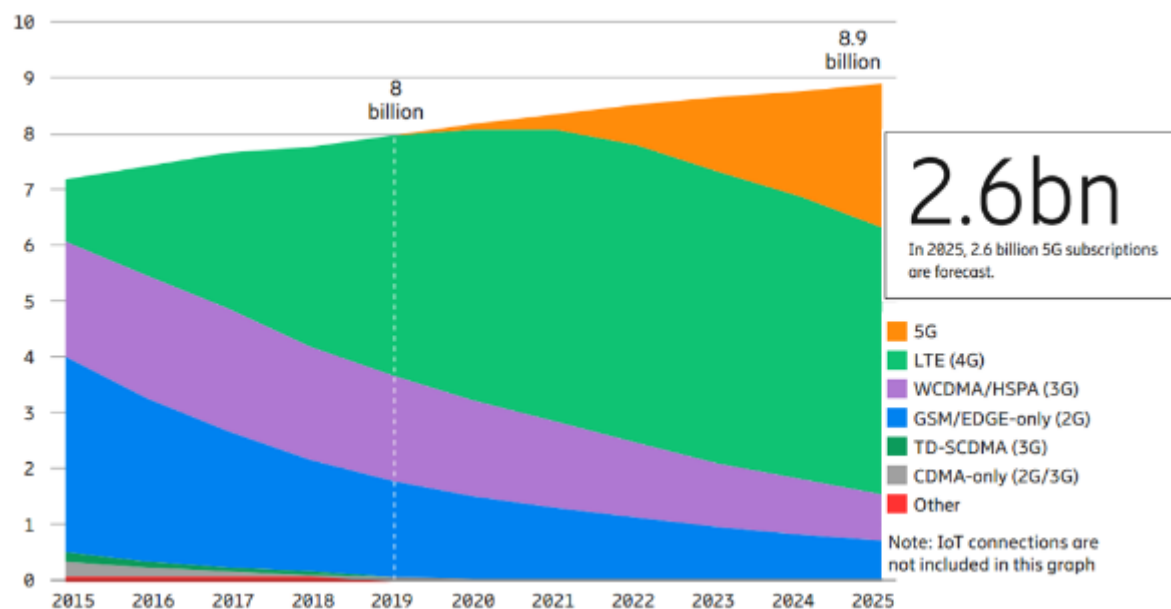


Figura 11. Adopción Global de las tecnologías 2G-4G desde el 2015 al 2025

Fuente: LTE: Ericsson Mobility Report November 2019

2.3.5 Quinta Generación de Redes celulares (5G)

Con los nuevos y crecientes requerimientos de los operadores, en ofrecer servicios avanzados de banda ancha mejorada (eMBB), conectividad inalámbrica a toda tipo de cosas (IoT), y servicios de ultra baja latencia, desde el 2015 la 3GPP dio comienzo al taller “3GPP red de radio acceso (5G)”, para buscar la estandarización de la quinta generación de redes celulares bajo la denominación de: Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2020 (IMT-2020) [15].

Los requerimientos que se especificaron para su estandarización fueron: Un sistema de mayor capacidad, que soportara el tráfico creciente medido en velocidad de bits total por unidad de área, mayores velocidades en tasa de bits, manejando throughputs de hasta 100

veces los de LTE, llegando a picos de 10Gbps, menores latencias, mayor fiabilidad y eficiencia espectral, mayor densidad de dispositivos, y una red completamente virtual más ágil y optimizada en costes. De este modo, 5G propiciará una nueva ola de servicios, como, video de alta definición, realidad virtual, conducción automática de vehículos, transporte de mercancías mediante drones, casas y ciudades inteligentes, control remoto de robots industriales y operaciones quirúrgicas remotas mediante robots [16]. En la Figura 12 se resumen dichos requerimientos.

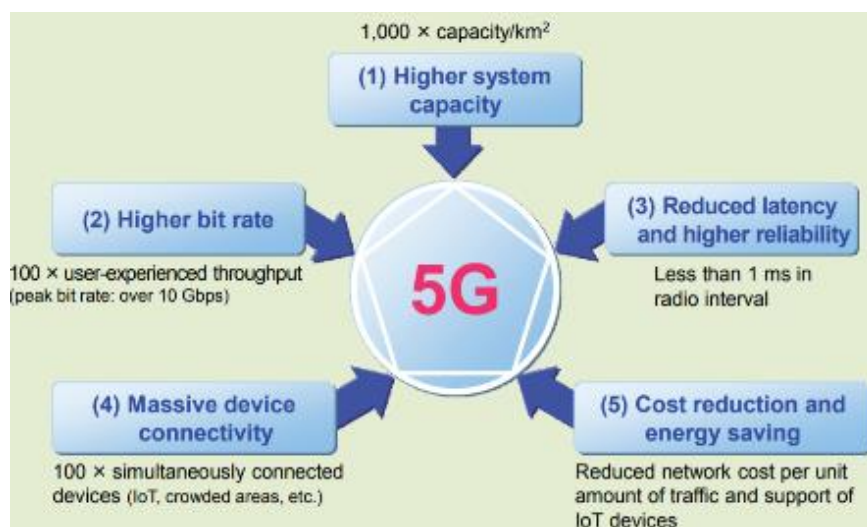


Figura 12. Requisitos de 5G

Fuente: LTE: NTT Docomo Technical Journal

Para lograr estos picos de throughputs, 5G manejará canalizaciones idealmente por encima de los 50MHz, por lo que la mayoría de las bandas estandarizadas están por encima de los 3GHz en modo TDD, lo que aumentará considerablemente su capacidad, pero reducirá su cobertura, teniendo que desplegar una mayor cantidad de nodos, para cubrir un área determinada. Esto aumenta la complejidad de la infraestructura, incluida la necesidad de desplegar equipos radioeléctricos en instalaciones callejeras como: semáforos, farolas, postes de luz, postes de electricidad y fuentes de suministro eléctrico [17].

Por lo tanto, para el despliegue inicial de esta tecnología se considera un escenario en el que se combinen con nodos LTE de mayor cobertura que por lo general están en una banda de menor frecuencia. Esta eficiente integración entre capas de cobertura y capacidad se realizará con una fuerte interoperabilidad en la que los nodos de las distintas tecnologías

combinen sus unidades de banda base logrando una conectividad dual, haciendo referencia a una arquitectura de radio acceso centralizada (C-RAN).

En la Figura 13 se muestran las opciones de despliegue de 4G y 5G que han sido propuestas y que gradualmente se irán implementando.

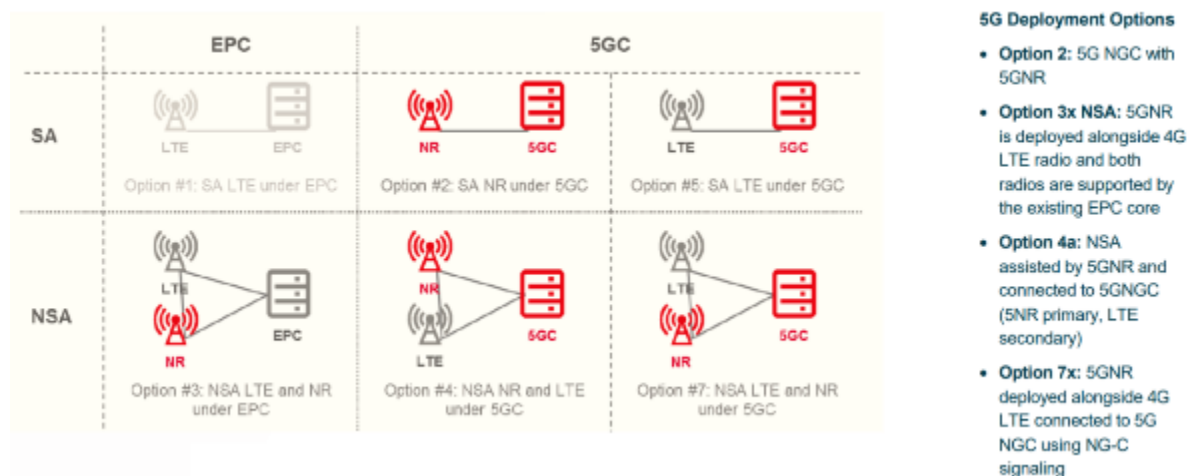


Figura 13. Opciones de despliegue de 4G y 5G

Fuente: 5G Core: How to get there

La opción 3x, combinada o compuesta (NSA), es el despliegue inicial solo en radio acceso que implementarán la mayoría de los operadores para el lanzamiento de 5G, con el fin de acelerar su tiempo de comercialización ofreciendo nuevos servicios, aprovechando el Core de 4G existente (EPC), rentabilizando las inversiones anteriormente realizadas. Esta opción se basa en el manejo del plano de control por LTE, que se realiza a través de la interfaz radio LTE al equipo de usuario (UE). La interfaz radio 5G sólo establecerá una conexión del plano de usuario al EPC a través de la señalización de la radio LTE [18]. En la Figura 14, se muestra un camino evolutivo del despliegue de la red 5G desde la opción 3x.

Finalmente, al tener una red 5G completa punto a punto autónoma (SA), el operador se beneficiará de importantes innovaciones como el “network slicing”, el cual permite a la red dividirse en subredes adaptadas a diferentes necesidades, como, por ejemplo, un vehículo no tiene por qué necesitar mucho ancho de banda, pero si baja latencia, mientras que un

servicio de video 4K en streaming requerirá grandes capacidades de transmisión. El concepto de “network slicing”, se ha desarrollado como respuesta a esta realidad [19].

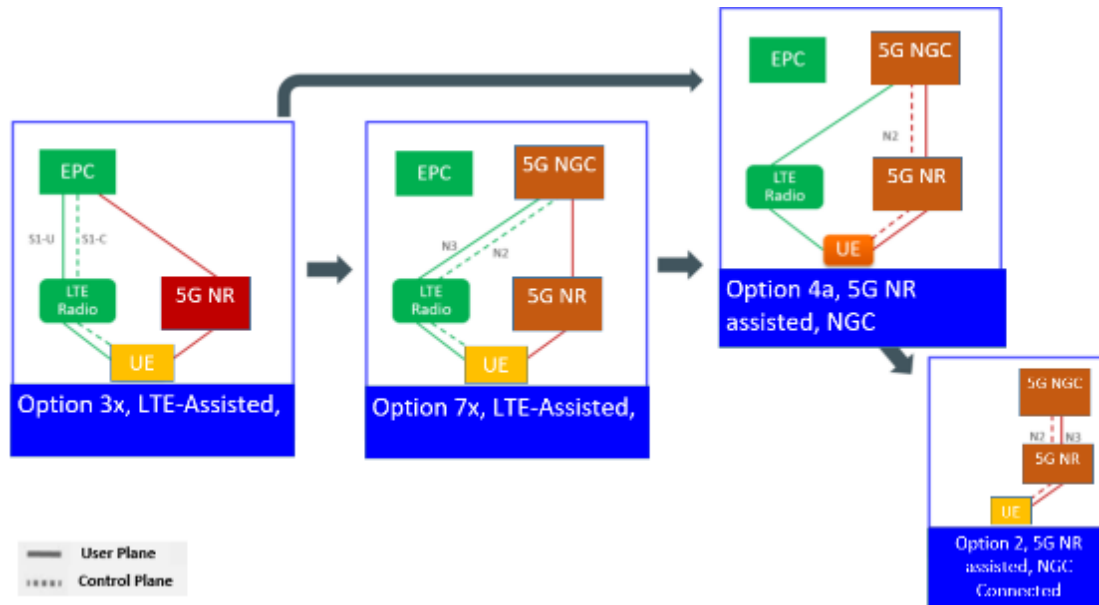


Figura 14. Camino evolutivo desde la Opción 3x

Fuente: 5G Core: How to get there

2.4 ARQUITECTURA DE LTE

La arquitectura del Sistema de Paquetes evolucionado (EPS) o LTE, está compuesta por la red de radio acceso UTRAN evolucionada (E-UTRAN), la red Core evolucionada de Paquetes (EPC) basados totalmente en el protocolo IP soportando los servicios de voz y datos por conmutación de paquetes, y, por los equipos de usuario (UE).

La interfaz entre la E-UTRAN y la EPC, se denomina S1, y proporciona a la EPC los mecanismos necesarios para gestionar el acceso a los equipos de usuario (UE) a través de la E-UTRAN. La interfaz radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN se denomina Uu.

La interfaz S1 se divide en dos interfaces S1-MME, que conecta la E-UTRAN a la entidad encargada de sustentar las funciones relacionadas al plano de control (MME), y S1-U la cual conecta la E-UTRAN a la entidad encargada de procesar el plano de usuario (S-GW). Esta división permite dimensionar de forma independiente los recursos de transmisión para señalización y para el tráfico de usuarios [4].

A la EPC también se conectan por medio de interfaces, sistemas comunes de redes 3GPP, como el Servidor de suscriptores local (HSS), el cual contiene toda la información de planes y servicios de los suscriptores, el Subsistema Multimedia IP (IMS), que pertenece a plataformas de servicios externas y donde se maneja la Voz sobre LTE (VoLTE), y redes de acceso 3GPP y no 3GPP. En la Figura 15 se muestra su arquitectura.

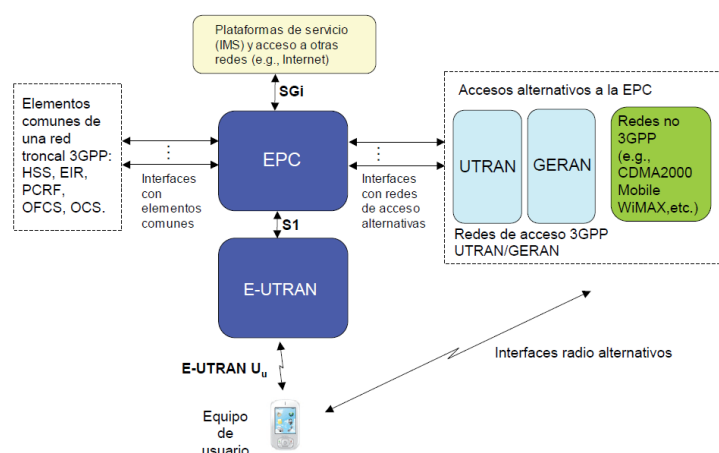


Figura 15. Arquitectura del sistema LTE

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

2.4.1 ARQUITECTURA DE RADIO ACCESO EVOLUCIONADA DE LTE (E-UTRAN)

La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada Nodo B evolucionado (eNB), que es la estación base de E-UTRAN [20]. El eNB integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de los sistemas GSM y UMTS, que estaban compuestos por equipos controladores BSC y RNC, los cuales ejecutaban las funciones del plano de control y parte de las funciones del plano de usuario de la interfaz radio. Esta arquitectura sin nivel de jerarquización adoptada por LTE, permite tener tiempos de latencia menores, además de manejar balanceo de carga en el EPC, por el hecho de que un EnodeB puede conectarse a varias entidades MME-SGW, con lo que puede entregar el tráfico a la entidad que esté más descargada. Esta propiedad facilita la posibilidad de compartir la red de acceso entre distintos operadores, dividiendo el tráfico y direccionándolo al EPC correspondiente del operador A o B. Esto hace alusión al artículo 2

numeral 3 de la ley 1341 de 2009 – Anexo B, el cual dicta el uso eficiente de la infraestructura y los recursos escasos.

En la Figura 16, se muestra una comparativa de las redes E-UTRAN y UTRAN. Como se había dicho, la E-UTRAN está formada solo por los eNBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red Core o troncal EPC, mediante las interfaces S1, X2 y Uu.

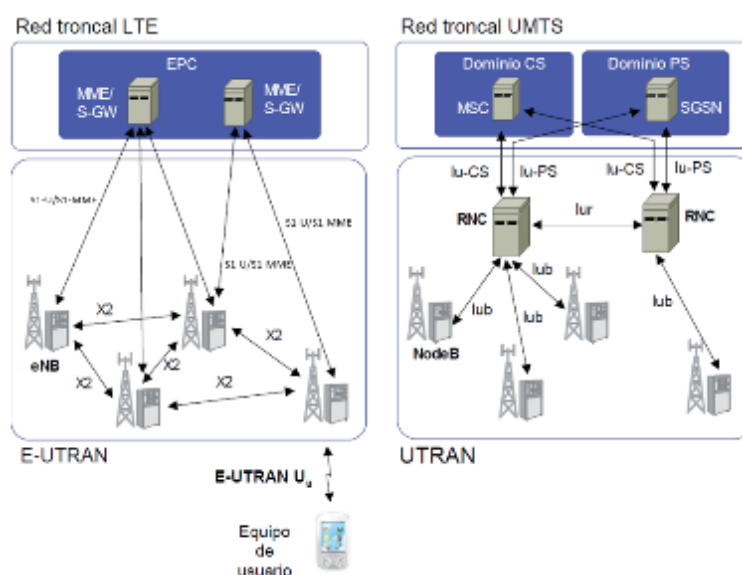


Figura 16. Red de Acceso E-UTRAN

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

2.4.1.1 Nodo B Evolucionado (eNB)

La entidad de red eNB, utiliza protocolos para transmitir y recibir paquetes IP desde y hacia los equipos de usuario, además de mensajes de señalización que controlan la interfaz radio. A este servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina servicio portador radio (RB).

El eNB es el encargado de la gestión de los recursos de radio, realizando funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad (proceso de handover), funciones de scheduling y control de interferencias [20].

2.4.1.2 Interfaz S1

La interfaz S1 se divide en S1-U y S1-MME. La interfaz S1-U, proporciona la conectividad entre el eNB y el SGW, y es donde ocurre la transferencia de datos de usuario. A este servicio de transferencia de datos se le denomina servicio portador S1. La unión entre un servicio portador radio y un servicio portador S1 dan como resultado el servicio portador completo de E-UTRAN (E-RAB).

La interfaz S1-MME, es la encargada de las funciones y procedimientos de control entre el eNB y el MME, dentro de los que se destacan el establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores tanto de la interfaz radio como de la interfaz S1. En la Figura 17 se muestran los servicios portadores que forman parte de E-UTRAN [21].

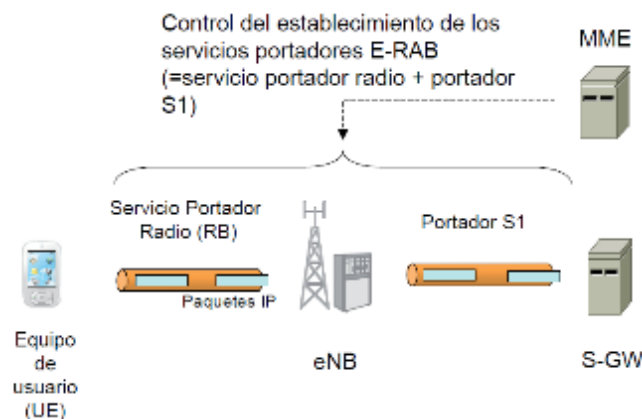


Figura 17. Servicios Portadores de E-UTRAN

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

2.4.1.3 Interfaz X2

La interfaz X2, proporciona conectividad entre los eNB, permitiendo intercambiar mensajes de señalización para realizar una gestión más eficiente de los recursos de radio. Por ejemplo, en los procesos de handover, puede realizar la transferencia del tráfico de usuario, pasando los datos que estaba cursando actualmente y que tenía guardado en buffer del eNB origen al eNB destino, reduciendo la pérdida de paquetes y mejorando las velocidades. También los mensajes entre eNB permiten tener interacción, con el fin de tener una coordinación para reducir las interferencias y a su vez mejorar la calidad del canal radio. Esta interfaz es opcional, y pueda que en algunas redes no exista [22].

2.4.2 Red Core de paquetes evolucionada (EPC)

La red troncal o Core evolucionada, está diseñada para soportar solo tráfico IP y manejar la nueva capacidad que ofrece la red E-UTRAN. En la Figura 18, se muestra la arquitectura del núcleo del sistema EPC y las interfaces entre ellas [23].

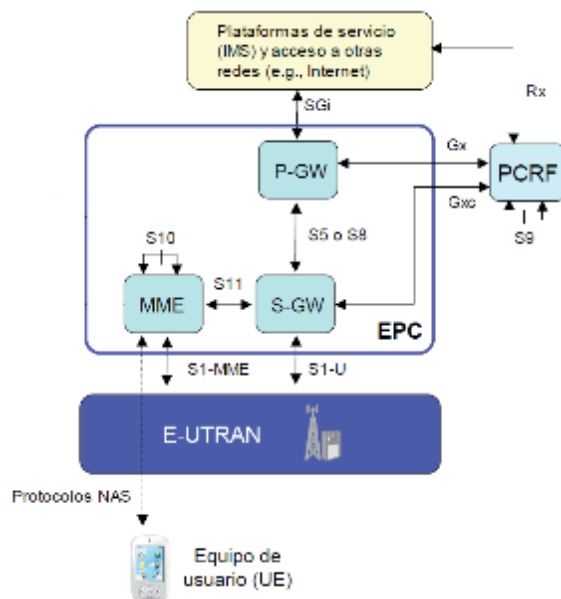


Figura 18. Arquitectura de la Red Troncal

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Los principales elementos del núcleo son: La entidad de gestión de movilidad (MME), la puerta de enlace de servicios (S-GW) y la puerta de enlace de la red de datos de paquetes (P-GW). En las entidades P-GW y S-GW, se sustentan funciones del plano de usuario, mientras que, en la MME, las funciones y señalización del plano de control. Estas entidades de la EPC y la EUTRAN hacen posible la conectividad IP de los UE con redes externas. El servicio portador E-RAB más el servicio portador hasta el P-GW forman en su conjunto el servicio portador completo del sistema EPS.

La MME a través de los protocolos (NAS), soportan los procedimientos relacionados con las funciones de control de acceso a la red LTE, y controla las funciones de transferencia del plano de usuario a través de la interfaz S11 con la pasarela S-GW. Las MME se comunican entre ellas por medio de la interfaz S10.

El P-GW es la puerta de enlaces con redes externas. Entre sus funciones están, asignar las direcciones IP a cada UE, y junto con la entidad de función de Políticas y cobros (PCRF), realizar funciones de control de los parámetros de calidad de servicio de las sesiones de datos, esto es, dependiendo del servicio portador EPS que solicite el suscriptor, el P-GW asignará una QoS asociada a él. También en esta entidad se realizan funciones de tarificación. La interfaz entre el S-GW y P-GW es la S5 cuando pertenecen al mismo operador, o S8 cuando son de distintos operadores y se proporciona un servicio de Roaming.

2.5 SERVICIO PORTADOR EPS

El servicio portador EPS, es el servicio de conectividad IP proporcionado por la red LTE, el cual soporta calidad de Servicio (QoS), esto quiere decir que dependiendo del servicio final que el suscriptor requiera, como por ejemplo Video llamadas o mensajería de texto, el sistema entregará una QoS con unas características de tasa de transferencia de bits, retardos y tasas de pérdidas de paquetes, con el fin de obtener la mejor prestación del servicio y realizar una gestión eficiente de recursos.

Los parámetros de QoS, se mapean a los servicios portadores integrantes (RB, S1 y S8/S5). Para la interfaz radio, los parámetros de QoS se fundamentan en la configuración apropiada de la capa de radio y de enlace, y en la utilización de mecanismos de Scheduling, que aseguren una capacidad de transmisión asignada para garantizar una buena experiencia de usuario [4].

Los parámetros de QoS que definen el comportamiento de un servicio portador son cuatro. Primero está el identificador de clase QoS (QCI), el cual contienen una serie de parámetros estandarizados por servicio portador [24]. En la Tabla 2, se definen los valores estandarizados de QCI.

Tabla 2. Valores de QCI estandarizados

QCI	Tipo de recurso	Prioridad ¹⁾	R e t a r d o Paquete ²⁾	Tasa de pérdida de paquetes ³⁾	Ejemplo de servicio
1	GBR	2	100ms	10^{-2}	Voz
2	GBR	4	150ms	10^{-3}	Videoconferencia
5	Non-GBR	1	100ms	10^{-6}	Señalización IMS
6	Non-GBR	6	300ms	10^{-6}	Videostreaming

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Segundo, la prioridad de asignación y retención (ARP), el cual es un indicador de prioridad, en los procesos de establecimiento, modificación y desactivación de un servicio portador. Este es un control de congestión el cual podría llegar a desconectar un servicio portador, para dar servicio a otro que tenga mayor prioridad.

Y los dos últimos son, la tasa de bits garantizada (GBR), y tasa máxima de bits (MBR), el cual algunos de los servicios portadores tienen como característica.

2.6 ESTADOS DE USUARIO EN EL SISTEMA LTE

En LTE se especifican dos estados de usuario:

Estado No Registrado: Es cuando el usuario no se encuentra visible en la red LTE, en este estado el sistema no dispone de la localización del usuario. Esto se presenta cuando el equipo de usuario está apagado.

Estado Registrado: El usuario esta visible en la red LTE y puede utilizar sus servicios a través del equipo de usuario. Tiene asignado un MME de la red troncal para realizar seguimiento.

Dentro del Estado registrado, existen otros dos tipos de modos, que se diferencian porque existe un plano de control activo entre el UE y el MME, estos son:

- Modo Idle: el usuario no tiene establecida una conexión de señalización con un MME. El propósito de mantener el equipo en modo idle es minimizar el uso de recursos y extender la carga de la batería.
- Modo Conectado: el usuario tiene establecida una conexión de señalización con un MME. En este estado se realiza el envío y recepción de datos de usuario.

2.7 PROCESO DE HANDOVER EN LTE

Un proceso de handover se realiza cuando un equipo de usuario encontrándose bajo la cobertura de un eNB origen en modo conectado, traspasa sus servicios a un eNB destino, normalmente en condiciones de nivel y calidad de señal mejores. Este proceso permite la movilidad del usuario en la red con un servicio continuo sin interrupciones. En LTE todos los traspasos que se realizan son del tipo duro (Hard-Handover) [25], es decir, el enlace con la celda servidora se interrumpe antes de establecer el nuevo enlace con la celda destino. La Figura 19 muestra cómo se realiza un proceso de handover, en el que un vehículo se desplaza de una cobertura de un eNB origen a otro destino, percibiendo el equipo de usuario una degradación de calidad del eNB origen y una mejor calidad del eNB destino.

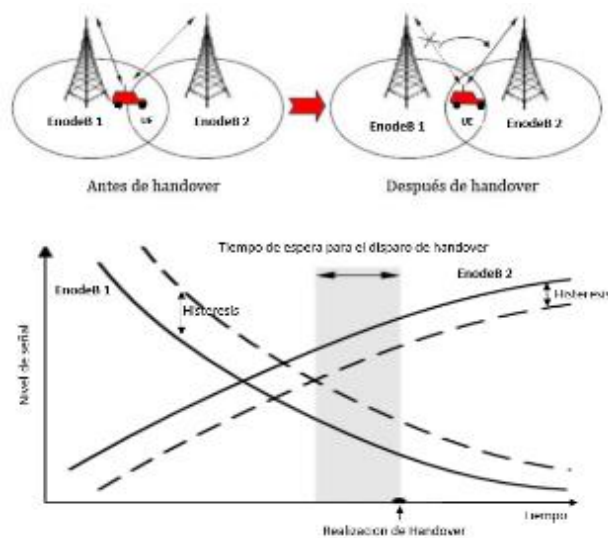


Figura 19. Proceso de Handover en LTE

Fuente: Estudio de estrategias de administración de recurso de radio en un sistema 3G

2.8 CAPA FÍSICA DE LTE

Como se había mencionado en el anterior capítulo, la técnica de acceso empleada por LTE en el enlace descendente es la de acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (OFDMA), y para el caso del enlace ascendente, acceso múltiple por división de frecuencias de portadora única (SC-FDMA). Estas técnicas son la versión multiusuario de la multiplexación por división de frecuencias ortogonales (OFDM), la cual es una técnica de transmisión multi portadora que consiste en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un grupo de subportadoras ortogonales entre sí, permitiendo la transmisión simultánea de los símbolos y su separación en la recepción.

La técnica OFDMA y SC-FDMA surge de forma natural, al considerar la modulación de una señal OFDM, donde los símbolos enviados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios diferentes, como se muestra en la Figura 20.

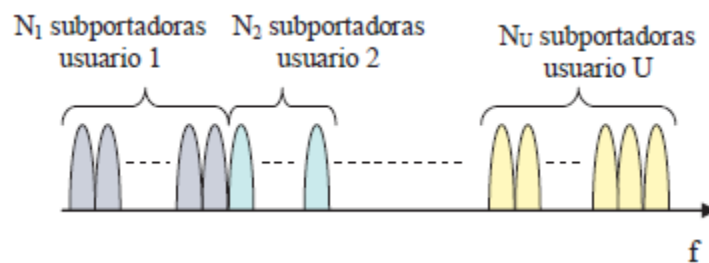


Figura 20. Multiplexación de usuarios en OFDMA

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

En el receptor, cada usuario obtendrá los símbolos enviados en sus subportadoras asignadas, previo envío de la información por mensajes de señalización de cuales pertenecen a cada usuario.

Esta forma de dividir el ancho de banda asignado es muy adecuada para flexibilizar el uso del espectro, ya que permite asignar dinámicamente, dependiendo del servicio requerido por el usuario (i.e servicio portador), más o menos cantidad de subportadoras, aumentando la tasa de bits por segundo mediante técnicas de scheduling manteniendo la QoS requerida.

A su vez, el desvanecimiento de las subportadoras es diferentes para cada usuario, por lo que su asignación dependerá de la relación señal a ruido, permitiendo usar esquemas de

modulación codificación (MCS), en los que se envíen más bits por símbolo, con base a técnicas de adaptación de enlace (LA), como se muestra en la Figura 21.

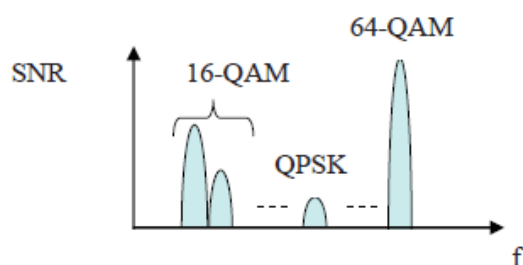


Figura 21. Esquemas de Modulación Codificación por subportadora

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

La separación entre subportadoras es de 15KHz, y su cantidad varía dependiendo de la canalización del sistema [26], como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Canalización en el sistema LTE

CANALIZACION	1.4MHz	3MHz	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Numero de Subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Las bandas de operación en el sistema LTE están en el rango de 450MHz a los 3.5GHz como muestra la Tabla 4 [27].

Tabla 4. Bandas de Frecuencia de LTE

E-UTRA Operatin g Band	Uplink (UL) operating band BS receive UE transmit		Downlink (DL) operating band BS transmit UE receive		Duplex Mode
	F _{UL,low} – F _{UL,high}		F _{DL,low} – F _{DL,high}		
1	1920 MHz	– 1980 MHz	2110 MHz	– 2170 MHz	FDD
2	1850 MHz	– 1910 MHz	1930 MHz	– 1990 MHz	FDD
3	1710 MHz	– 1785 MHz	1805 MHz	– 1880 MHz	FDD
4	1710 MHz	– 1755 MHz	2110 MHz	– 2155 MHz	FDD
5	824 MHz	– 849 MHz	869 MHz	– 894MHz	FDD
6 (NOTE 1)	830 MHz	– 840 MHz	875 MHz	– 885 MHz	FDD
7	2500 MHz	– 2570 MHz	2620 MHz	– 2690 MHz	FDD
8	880 MHz	– 915 MHz	925 MHz	– 960 MHz	FDD
9	1749.9 MHz	– 1784.9 MHz	1844.9 MHz	– 1879.9 MHz	FDD
10	1710 MHz	– 1770 MHz	2110 MHz	– 2170 MHz	FDD
11	1427.9 MHz	– 1447.9 MHz	1475.9 MHz	– 1495.9 MHz	FDD
12	699 MHz	– 716 MHz	729 MHz	– 746 MHz	FDD
13	777 MHz	– 787 MHz	746 MHz	– 756 MHz	FDD
14	788 MHz	– 798 MHz	758 MHz	– 768 MHz	FDD
15	Reserved		Reserved		FDD
16	Reserved		Reserved		FDD
17	704 MHz	– 716 MHz	734 MHz	– 746 MHz	FDD
18	815 MHz	– 830 MHz	860 MHz	– 875 MHz	FDD
19	830 MHz	– 845 MHz	875 MHz	– 890 MHz	FDD
20	832 MHz	– 862 MHz	791 MHz	– 821 MHz	
21	1447.9 MHz	– 1462.9 MHz	1495.9 MHz	– 1510.9 MHz	FDD
22	3410 MHz	– 3490 MHz	3510 MHz	– 3590 MHz	FDD
23	2000 MHz	– 2020 MHz	2180 MHz	– 2200 MHz	FDD
24	1626.5 MHz	– 1660.5 MHz	1525 MHz	– 1559 MHz	FDD
25	1850 MHz	– 1915 MHz	1930 MHz	– 1995 MHz	FDD
26	814 MHz	– 849 MHz	859 MHz	– 894 MHz	FDD
27	807 MHz	– 824 MHz	852 MHz	– 869 MHz	FDD
28	703 MHz	– 748 MHz	758 MHz	– 803 MHz	FDD
29	N/A		717 MHz	– 728 MHz	FDD (NOTE 2)
30	2305 MHz	– 2315 MHz	2350 MHz	– 2360 MHz	FDD
31	452.5 MHz	– 457.5 MHz	462.5 MHz	– 467.5 MHz	FDD
32	N/A		1452 MHz	– 1496 MHz	FDD (NOTE 2)
33	1900 MHz	– 1920 MHz	1900 MHz	– 1920 MHz	TDD
34	2010 MHz	– 2025 MHz	2010 MHz	– 2025 MHz	TDD
35	1850 MHz	– 1910 MHz	1850 MHz	– 1910 MHz	TDD
36	1930 MHz	– 1990 MHz	1930 MHz	– 1990 MHz	TDD
37	1910 MHz	– 1930 MHz	1910 MHz	– 1930 MHz	TDD
38	2570 MHz	– 2620 MHz	2570 MHz	– 2620 MHz	TDD
39	1880 MHz	– 1920 MHz	1880 MHz	– 1920 MHz	TDD
40	2300 MHz	– 2400 MHz	2300 MHz	– 2400 MHz	TDD
41	2496 MHz	– 2690 MHz	2496 MHz	– 2690 MHz	TDD
42	3400 MHz	– 3600 MHz	3400 MHz	– 3600 MHz	TDD
43	3600 MHz	– 3800 MHz	3600 MHz	– 3800 MHz	TDD
44	703 MHz	– 803 MHz	703 MHz	– 803 MHz	TDD
NOTE 1: Band 6 is not applicable.					
NOTE 2: Restricted to E-UTRA operation when carrier aggregation is configured. The downlink operating band is paired with the uplink operating band (external) of the carrier aggregation configuration that is supporting the configured Pcell.					

Fuente: 3GPP TS 36.104

2.8.1 Estructura de la Trama en LTE

En FDD la estructura de la trama y subtrama son iguales tanto en el enlace descendente como en el enlace ascendente, mientras que la estructura de la ranura depende del método de acceso múltiple por lo tanto es diferente en cada caso. La ranura en el enlace descendente incluye 7 símbolos OFDM. En el enlace ascendente, el número de símbolos depende del ancho de banda utilizado. La transmisión se organiza en tramas con una

duración de 10ms y cada una de estas se divide en 10 subtramas, como se muestra en la Figura 22.

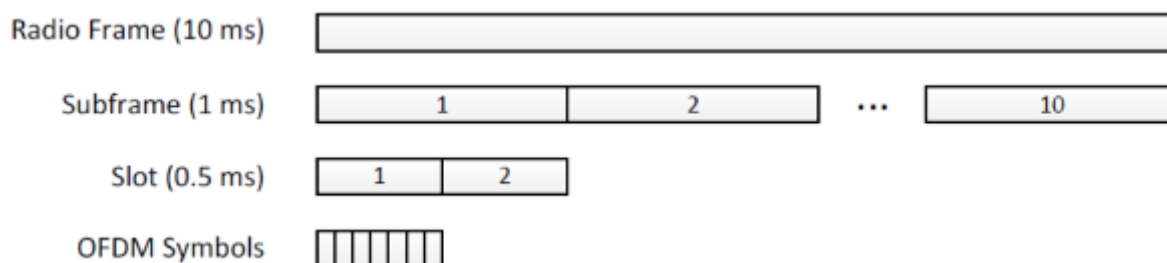


Figura 22. Estructura de la trama LTE (downlink)

Estudio de Carrier Aggregation para optimizar el uso del espectro asignado a los operadores móviles en Colombia

Cada subtrama consta de dos ranuras temporales de igual duración, denominado bloque de recursos físicos (PRB). Un PRB es la unidad mínima que un eNB asigna a un equipo de usuario. Está conformado por un total de 12 subportadoras espaciadas 15KHz, ocupando un espectro de 180KHz. La duración de un PRB es de 0.5ms, es decir la duración de un slot o ranura temporal. En la Figura 23, se muestra una representación gráfica de un PRB.

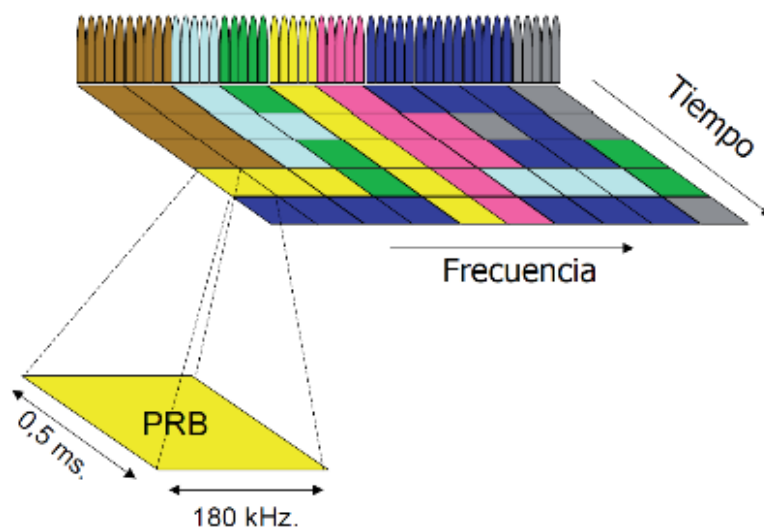


Figura 23. Concepto de Radio Bloque (PRB)

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

La cantidad de PRB disponibles dependerá de la canalización, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5. Numero de PRB en función de la Canalización

CANALIZACION	1.4MHz	3MHz	5MHz	10MHz	15MHz	20MHz
Numero de PRB	6	15	25	50	75	100

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

En cada subportadora se pueden enviar un total de 7 símbolos, por lo tanto, se tiene un total de 84 símbolos por cada PRB, donde se asignarán modulación QPSK, 16QAM y 64QAM. Si se considera una Modulación 64QAM (6 bits por símbolo), se tiene un total de 504bits, por cada 0.5ms, lo que da aproximadamente una tasa de velocidad bruta de 1Mb/s. En las Tabla 6, se muestra las velocidades pico teóricas alcanzadas por cada tipo de canalización.

Tabla 6. Velocidades Pico teóricas en función de la canalización.

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz.
Velocidad de Pico Total (Mb/s)	$\cong 6$	$\cong 15$	$\cong 25$	$\cong 50$	$\cong 75$	$\cong 100$
Velocidad de pico bruta de usuario (Mb/s) (15% de los recursos destinados a control y señalización)	$\cong 5,1$	$\cong 12,8$	$\cong 21$	$\cong 42,5$	$\cong 63,7$	$\cong 85$

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Esta es una primera estimación de la capacidad del sistema, ya que las velocidades pico alcanzables reales, dependerán de la calidad del canal radio, el número de usuarios simultáneos en la celda, el tipo de servicio portador que tiene asociado una QoS, las capacidades del equipo de usuario, el uso de multiplexación espacial (MIMO), entre otras [4].

2.9 PROTOCOLOS EN LA INTERFAZ RADIO

La torre de protocolos de la interfaz radio que sustentan el envío de paquetes IP desde el eNB y el equipo de usuarios, se muestra en la Figura 24. Cada capa se ocupa de una función en concreto y define el formato de los paquetes de datos (e.g cabeceras y colas).

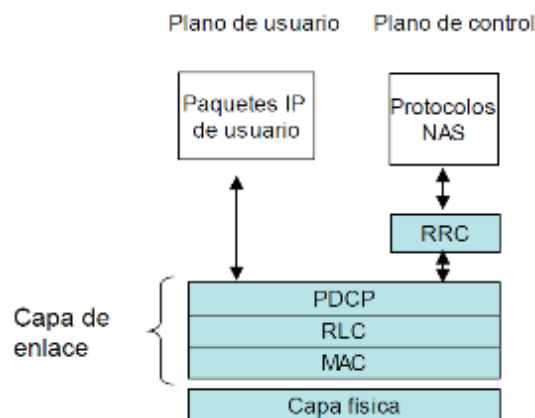


Figura 24. Protocolos de la Interfaz radio de E-UTRAN

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Packet Data Convergence Protocol (PDCP): Es la encargada de proporcionar el punto de acceso al servicio portador radio (Radio Bearer), es decir los paquetes de usuario se entregan y se reciben a través del servicio de transferencia proporcionado por PDCP. Las funciones principales de esta capa son la compresión de cabeceras de los paquetes IP, y el cifrado de la información para garantizar su confidencialidad e integridad. La cabecera añadida por la capa PDCP contiene un número de secuencia que permite reordenar los paquetes en el extremo receptor.

Radio Link Control (RLC): Permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y el equipo de usuario. Para ello soporta funciones de corrección de errores, concatenación, segmentación, re-ensamblado y detección de duplicados. Multiplexa los paquetes PDCP en los canales lógicos ofrecidos por la capa MAC.

Medium Access Control (MAC): Es la capa encargada de controlar el acceso al canal radio. Para ello, la capa MAC soporta funciones de Scheduling dinámico entre equipos de usuario atendiendo a prioridades, multiplexa los paquetes RLC de diferentes servicios portadores radio en los canales de transporte ofrecidos por la capa física.

Capa Física: Es la capa encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Cumple las funciones de codificación de canal, modulación, procesamiento asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión/recepción, y mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia- tiempo apropiados.

Para el plano de control existen otros dos protocolos donde se envían todos los paquetes que tiene que ver con la señalización.

Radio Resource Control (RRC): Permite establecer una conexión de control entre un eNB y un equipo de usuario. Entre sus funciones están los mecanismos de gestión de los servicios portadores radio (establecimiento, modificación, liberación de los portadores radio), señalización para los procesos de handover, difusión de los parámetros del sistema cuando el equipo de usuario está en modo idle.

Protocolos NAS: Se extienden entre la entidad MME y el equipo de usuario. Los paquetes de este protocolo se transmiten encapsulados dentro de los mensajes RRC. Entre sus funciones está la autenticación, autorización de los equipos de usuario y gestión de los servicios portadores EPS.

2.10 SISTEMA DE RED CELULAR OFDMA

La red de radio acceso LTE, está compuesta por una cantidad de eNB, los cuales tienen una zona de cubrimiento determinada. Uniendo todas las coberturas de las celdas sectorizadas que forman un eNB, da lugar a lo que se denomina sistema de red celular, como se representa en La Figura 25. Esta forma de despliegue también se ha realizado en tecnologías previas como GSM y UMTS, habilitando la utilización de los mismos sitios físicos para la instalación de eNB, compartiendo así su infraestructura y permitiendo un rápido despliegue.

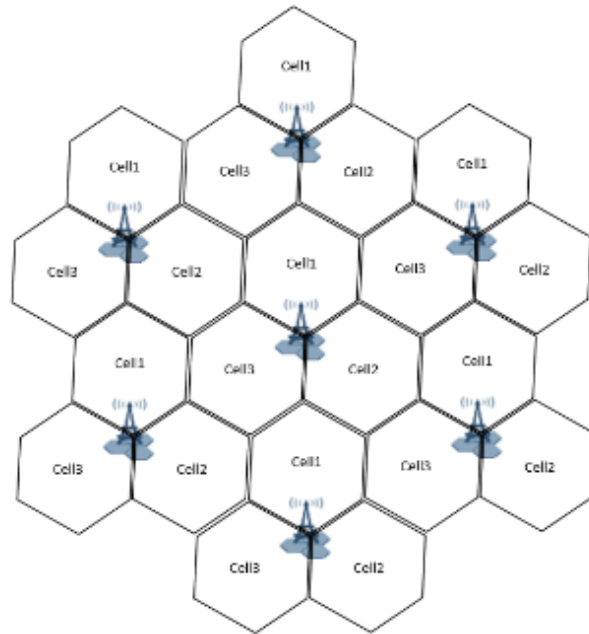


Figura 25. Sistema de Red Celular

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

La red utilizará el espectro disponible para, asignar recursos de radio a los distintos equipos de usuario que se encuentren bajo su cobertura. Para el caso de sistemas celulares basados en OFDMA, donde la banda se divide en varias subportadoras, una forma conveniente de asignar los radio canales es la de subdividir las subportadoras en un factor de reuso de $F=3$, con el fin de que células adyacentes no utilicen las mismas subportadoras y por lo tanto no se interfieran entre sí, como se muestra en la Figura 26.

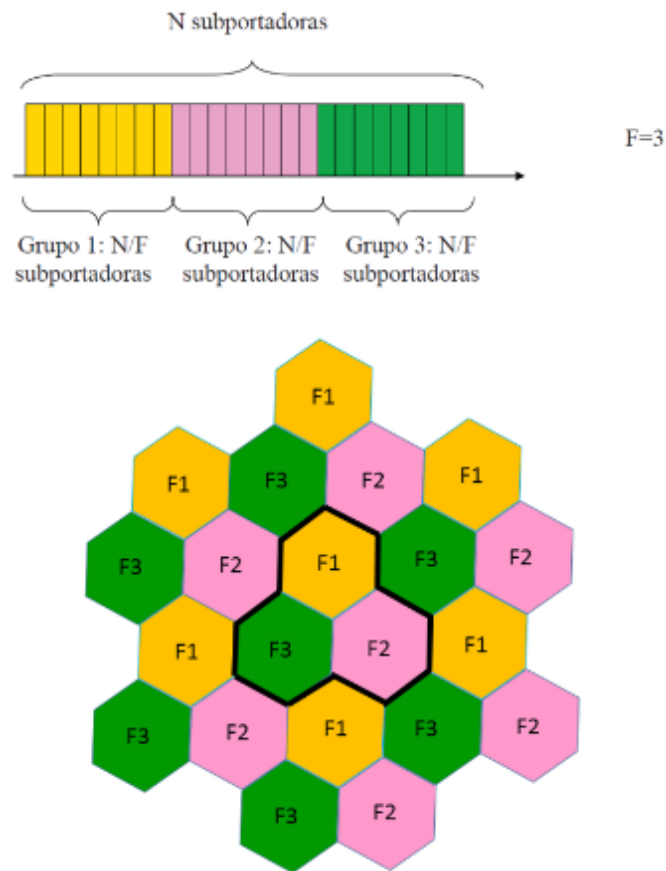


Figura 26. Asignación de Subportadoras con un factor de Reuso de $F=3$

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

Ahora bien, en OFDMA la asignación de subportadoras también dependerá de las técnicas de scheduling y adaptación de enlace, pudiendo realizar una asignación dinámica de subportadoras disponibles según las condiciones de canal radio medidos por la relación señal a ruido e interferencia, llegando hasta un factor de reuso $F=1$, asignando todas las subportadoras disponibles a todas las células.

Con este factor de reuso, el eNB podría asignar todas las subportadoras a los equipos de usuario que este cercanos a él, sin embargo, los que este en borde de celda por medio de mecanismos de coordinación, asignará subportadoras que no estén siendo utilizadas en ese momento en celdas adyacentes.

Un ejemplo se muestra en la Figura 27 donde se observan los equipos de usuario UE1 y UE2 conectados a la celda 1 y el equipo de usuario UE3 conectado a la celda 2. Como el

UE2 y UE3, están muy cercanos a sus respectivos eNB, pueden utilizar el mismo conjunto de subportadoras, pero para UE1, el cual está al borde de la celda 1, el scheduling seleccionará un grupo de subportadoras que no esté siendo utilizado por la celda 2, ya que si no podría presentar interferencia.

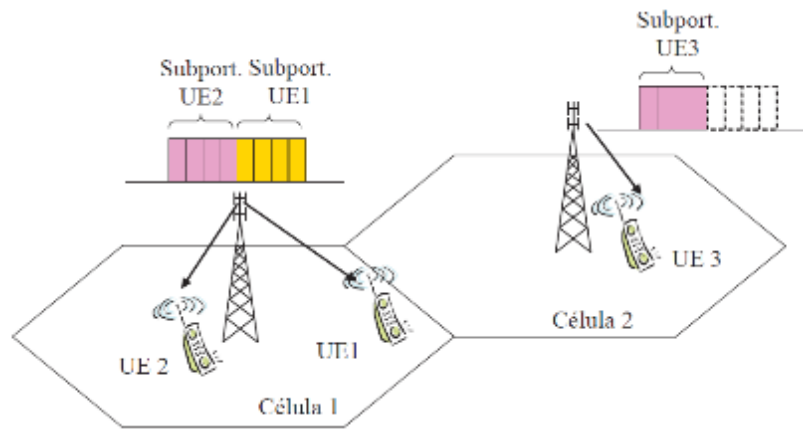


Figura 27. Asignación de subportadoras con un factor de Reuso $F=1$

Fuente: LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles

En el caso de GSM, la asignación de frecuencias a las celdas es realizada previo diseño y planeación por los ingenieros del operador con una canalización de 200KHz, para así evitar interferencias intra-celda e inter-celda. Esto limita el uso del espectro disponible y no permite manejar de forma eficiente los recursos de radio.

2.11 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 2

La evolución de las redes móviles y en particular la evolución de la red de acceso ha tenido como objetivo principal, realizar un uso eficiente de los recursos de radio disponibles medidos en eficiencia espectral E [bits/s/Hz], los cuales son escasos y costosos.

La estandarización es la principal característica que permite un desarrollo acelerado de nuevas generaciones de redes celulares, creando economías de escala que abaratan los costos de los equipos y ayudan a desarrollos de nuevos avances tecnológicos comunes, dotando de mayor inteligencia a la estación base y al equipo de usuario.

LTE como la cuarta generación de la 3GPP, usa conceptos ya presentes de los sistemas heredados GSM y UMTS combinados con nuevos desarrollos tecnológicos y avances en la computación y en el nivel de procesamiento de datos.

Esta tecnología ha sido la de mayor y más rápido crecimiento, ya que se ha adoptado en todas las operaciones del mundo debido principalmente, a su arquitectura de red “todo IP”, a la flexibilidad en el ancho de banda clave para el despliegue, a su arquitectura no jerárquica, y a la transmisión en modo paquete que hace más dinámica la asignación de los recursos de radio. Su evolución ha desembocado en la quinta generación de redes celulares (5G), que se ha empezado a comercializar desde el año 2019, y que se calcula cerrará dicho año con aproximadamente 13 millones de suscripciones.

3 LTE AVANZADO

A medida que las presiones competitivas en el mercado de banda ancha se intensifican y la demanda de capacidad crece de manera persistente, LTE sigue evolucionando, adquiriendo mejoras continuas que incluyen mayores velocidades (De hasta 3Gbps en DL y 1.5Gbps en UL), mayor eficiencia espectral y capacidad de agregar espectro de forma flexible. Dichas mejoras desarrolladas en los Release 10 al 12 entre los años 2013 a 2016, son denominadas LTE avanzado y sus versiones posteriores Release 13 y 14 desarrollados hasta principios del 2017 son denominadas LTE Avanzado Pro.

Dentro de los avances tecnológicos a la RAN, que más se destacan tenemos: Agregación de portadora (CA), Multiplexación espacial (MIMO) más configuraciones avanzadas de antena, Redes Heterogeneas (HetNets), Coordinación de Interferencia entre celdas (ICIC), Coordinación Multipunto (CoMP), y una nueva forma de arquitectura de la red de acceso, denominada RAN centralizada (C-RAN) [28].

3.1 AGREGACIÓN DE PORTADORA (CA)

Para llegar a proveer tasas de bits pico de gran velocidad, sabiendo que los recursos del espectro son escasos y que los operadores manejan porciones de espectro no adyacentes, la 3GPP introdujo en su Release 10, Agregación de portadora (CA) para redes LTE avanzadas.

La agregación de portadora se usa para combinar portadoras de distintos tamaños, aumentando el ancho de banda y así aumentar la tasa de bits transmitida. Esta característica se puede usar tanto para los modos FDD y TDD, proveyendo de flexibilidad al operador para utilizar todo su espectro disponible.

CA maneja una celda primaria servidora (Pcell), que es donde el UE acampa y donde se maneja toda la señalización y el control, y las celdas servidoras secundarias (Scell), las cuales operan en diferentes frecuencias que la Pcell, y provee al UE de CA, con adicionales recursos de radio. En un Scell, puede haber transmisión en DL o en ambas direcciones DL y UL.

Cada portadora agregada se denomina portadora componente (CC) y puede tener el tamaño de 1.4, 3, 5, 10 y 20MHz. La Portadora componente primaria (PCC), es la frecuencia portadora de la Pcell, y la portadora componente secundaria (SCC), es la frecuencia portadora de la Scell. En el Release 12, se especifica un total de 5 CCs y un máximo de ancho de banda de 100MHz de portadoras agregadas [29].

Los tipos de agregación de portadora se pueden realizar con canales adyacentes o no adyacentes de la misma banda (intra-band) o en banda distintas (inter-band), como se muestra en la Figura 28.

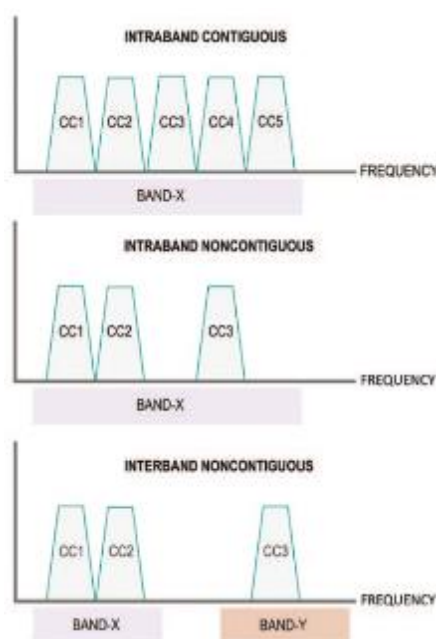


Figura 28. Tipos de agregación de Portadora

Fuente: LTE: rf&Wireless Europe

En todos los nuevos Release ha habido una mejora en la cantidad de portadoras a agregar, y en incluir todas las posibles combinaciones de bandas que pueden existir en las distintas operaciones en el mundo. En la sección 5.6.A.1" channel bandwidths per operating band per CA" [29], muestra todas las combinaciones definidas por la 3GPP.

En el Release 13 se han definido CA en downlink, que combine LTE en bandas licenciadas y no licencias, en los 5GHz, utilizando por ejemplo el espectro de WiFi, manejando la celda macro como PCC, y el WiFi como SCC [14], a esta tecnología se le conoce como

agregación LTE-WLAN (LWA). Esta difiere de LTE en espectro no licenciado (LTE-U), donde LTE usa el espectro de WiFi, como se muestra en el estudio [30], donde se analiza el impacto de utilizar LTE en el mismo espectro que el WiFi, los mecanismos de coexistencia y las diferencias de rendimiento.

A su vez en Release 13, se especifican combinaciones de bandas FDD y TDD como resta en [31], y se estandariza un total de 32 CCs, con un total de agregación de 640MHz [32]. En la Figura 29, se muestra la evolución de CA en todos los Release.

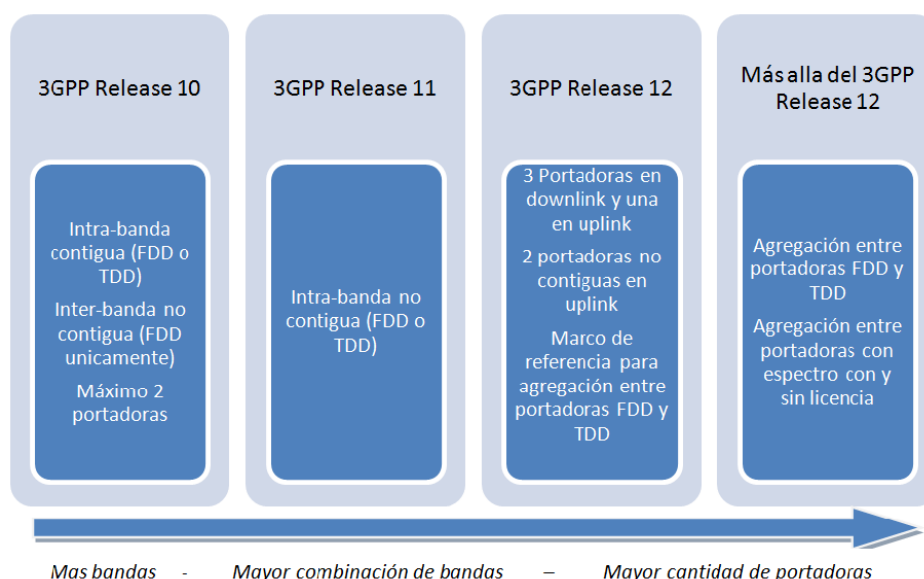


Figura 29. Evolución de Carrier Aggregation en 3GPP

Fuente: Estudio de Carrier Aggregation para Optimizar el uso del espectro asignado a los operadores móviles en Colombia

Para que CA, funcione de forma adecuada, el UE tiene que soportar la combinación de las distintas bandas en particular (i.e 850 – AWS, 1900 – AWS, 850 -1900 – AWS), por lo que no todos los UE soportan CA, y dependerá de la categoría a la que pertenezcan [29].

En la Tabla 7, se muestran las velocidades pico teóricas alcanzadas de acuerdo con el ancho de banda total agregado, considerando el uso de MIMO 2x2 y un 25% de recursos destinados a control y señalización. Por ejemplo, para un ancho de banda de 5MHz, se tiene un total de 25 PRB, si por cada PRB se logra alcanzar 1Mb/s, se tendría 25Mb/s,

considerando el doble de la transmisión por el uso de MIMO 2x2, serían 50Mb/s, menos el 25% en señalización daría un total de 37.5Mb/s [33].

Tabla 7. Velocidades de descarga para CA de acuerdo con el ancho de banda total agregado

Ancho de banda total (MHz)	Máxima velocidad de descarga (Mbps)
5	37.5
10	75
15	112.5
20	150
25	187.5
30	225
35	262.5
40	300
60	450

Fuente: Commercial Development of LTE- Advanced applying Advanced C-RAN architecture

3.1.1 Distribución actual del espectro en Colombia

En Colombia, la telefonía móvil inició con la expedición y reglamentación de la ley 37 de 1993, a través de la cual se reguló la prestación de servicios de telefonía móvil celular TMC, y se le adjudicaron al ministerio de las Telecomunicaciones responsabilidades asociadas a la planeación, asignación y administración del espectro radioeléctrico. Un año más tarde se asigna inicialmente 25MHz de espectro radioeléctrico a cada uno de los operadores móviles (hoy Claro y Movistar) en la banda de 850MHz. Después de varios decretos y resoluciones, en los que se han definido nuevos topes de espectro, se han renovado permisos de uso y se tienen más actores en el mercado (Tigo, Avantel, Directv), se muestra en la Figura 30 la distribución del espectro por operador de telefonía móvil, hasta mediados del año 2018 [34].

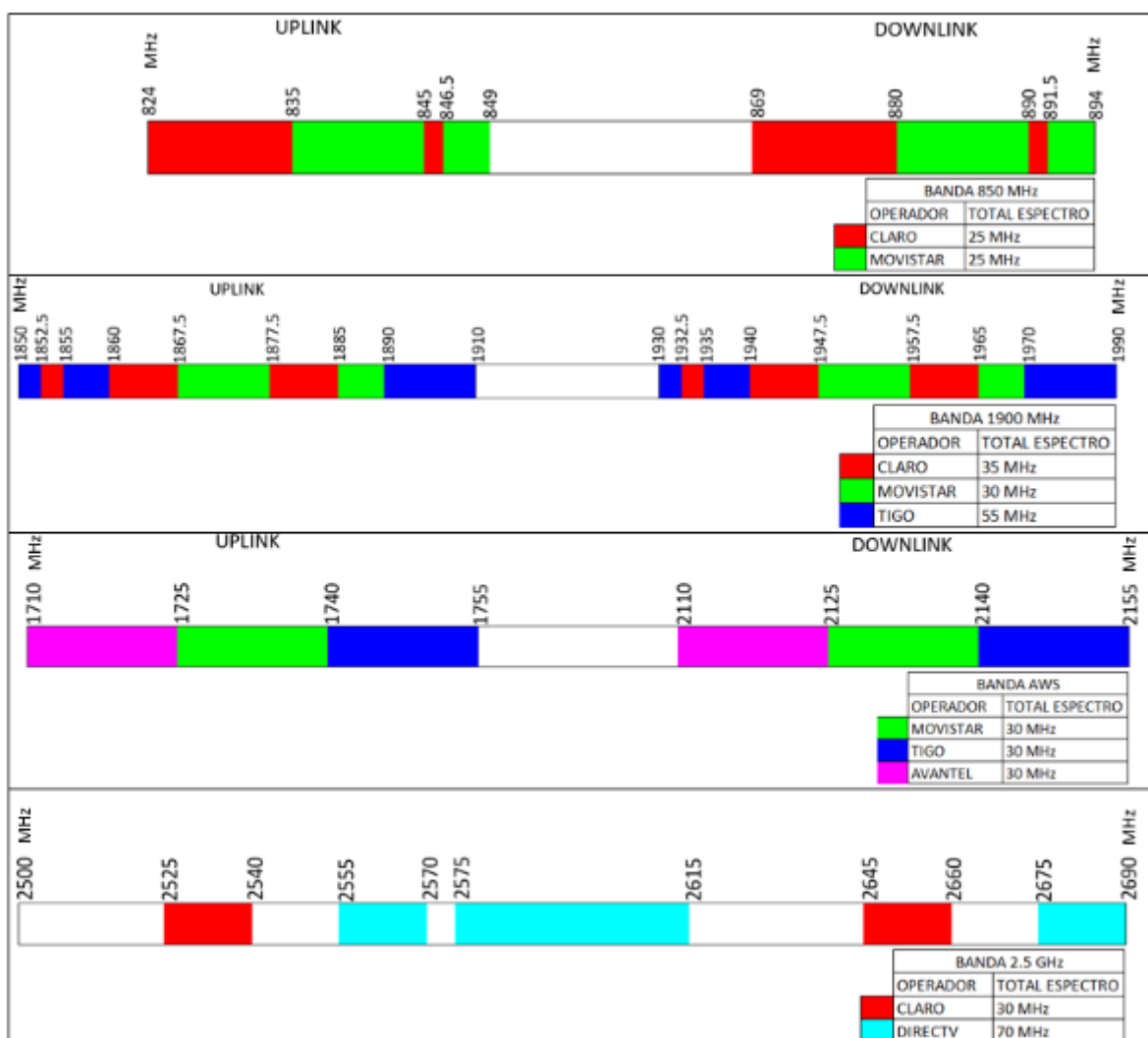


Figura 30. Distribución de espectro en Colombia hasta mediados de 2018

Fuente: Estudio de Carrier Aggregation para Optimizar el uso del espectro asignado a los operadores móviles en Colombia

Debido a la necesidad que vieron los operadores de contar con un espectro continuo, para manejar de forma más eficiente su espectro y principalmente poder combinar portadoras LTE de mayor ancho de banda, a mediados del año 2018, se realizó una re-distribución del espectro en las bandas 850MHz y 1900MHz, quedando como muestra la Figura 31.

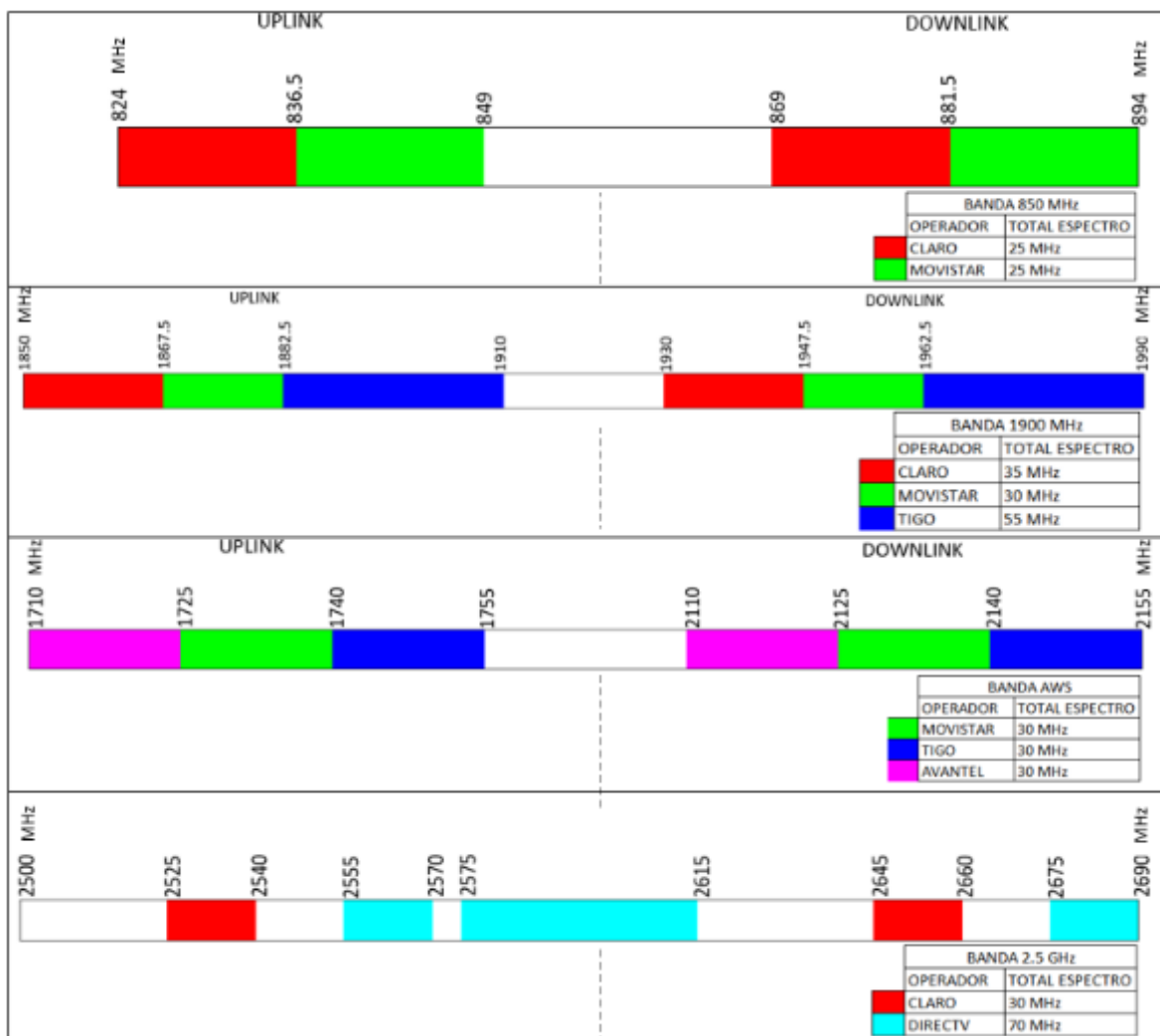


Figura 31. Distribución actual del espectro en Colombia para los operadores móviles

Fuente: Creación propia

Así, con esta distribución, los operadores pueden tener combinaciones de CA con portadoras de mayor ancho de banda en canalización LTE, logrando aumentar los throughputs en UL y DL, mejorando la experiencia de usuario.

Al tiempo de la escritura de este documento, el día veinte de diciembre de 2019, se subastan en Colombia espectro adicional en las bandas de 700MHz, 1900MHz y 2100MHz, dejando el panorama de la siguiente forma: Claro obtiene 20MHz en la banda de 700 y 30MHz en la de 2500. Tigo queda con 40MHz en la banda de 700, y un nuevo Operador

Partners queda con 20MHz en la banda de 700 y 30MHz en la banda de 2500. Movistar no obtuvo espectro adicional.

3.2 MULTIPLES ENTRADAS MULTIPLES SALIDAS (MIMO)

Antes del desarrollo de MIMO, los sistemas de comunicaciones inalámbricos veían la propagación multicamino, como un problema que tenía que ser solventado, ya que, al transmitir una señal, en el receptor se recibe la señal directa, y múltiples señales reflejadas debido a obstáculos (edificios, paredes), que, dependiendo del desfase, pueden atenuar o reforzar la señal original.

MIMO es la primera tecnología que trata el multicamino como una característica inherente de un sistema de transmisión, que hay que aprovechar para poder multiplicar su capacidad, al incrementar el caudal efectivo, el rango, y la fiabilidad del sistema, sin un incremento en el ancho de banda o de la potencia transmitida [35].

Esta tecnología refiere al uso de múltiples antenas para la transmisión y recepción en una estación base. Las configuraciones de múltiples antenas se expresan de la forma $m \times n$, donde m representa el número de antenas de transmisión (TX), y n representa el número de antenas de recepción (RX). Por ejemplo, downlink MIMO 2x2, significa que el eNodeB usa dos antenas para la transmisión y el UE usa dos antenas para la recepción; downlink MIMO 4x4 significa que el eNodeB usa cuatro antenas para la transmisión y el UE usa cuatro antenas para recepción.

Los tipos de ganancia que se obtienen con MIMO son:

Diversidad Espacial: Combate el desvanecimiento de la señal al transmitir por cada antena la misma información simultáneamente. La implementación de este esquema incrementa el SINR, y mejora la calidad de la señal recibida (BER) ya que se genera redundancia, lo cual contrarresta los efectos generados por desvanecimientos de la señal. En la Figura 32, se muestra lo enunciado.

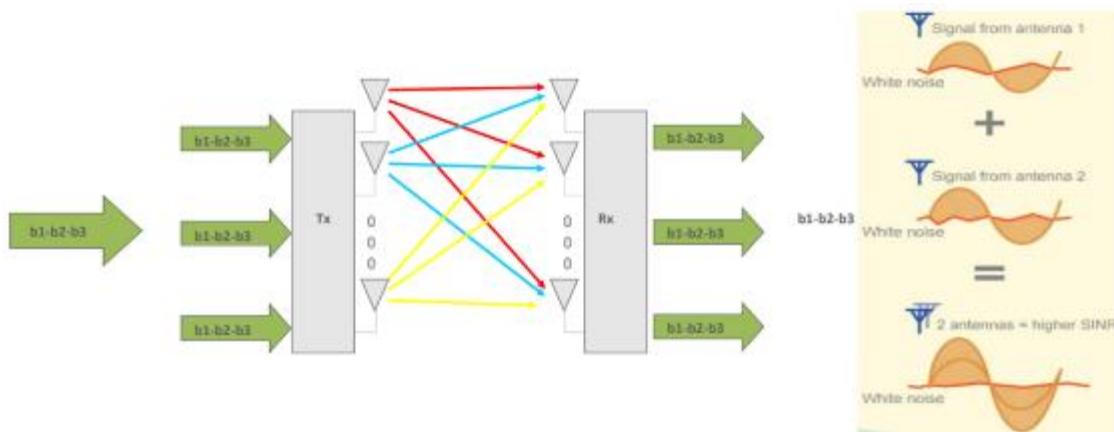


Figura 32. Diversidad Espacial

Fuente: Comunicaciones Inalámbricas. Universidad del Cauca

Multiplexación Espacial: La señal a transmitir se divide entre el número de antenas usadas en el transmisor, generando subcadenas de información. Las subcadenas son enviadas desde las antenas transmisoras, dentro de las mismas bandas de frecuencias. Esto provee capacidad adicional utilizando los diferentes caminos, aumentando los throughputs de datos, como se muestra en la Figura 33.

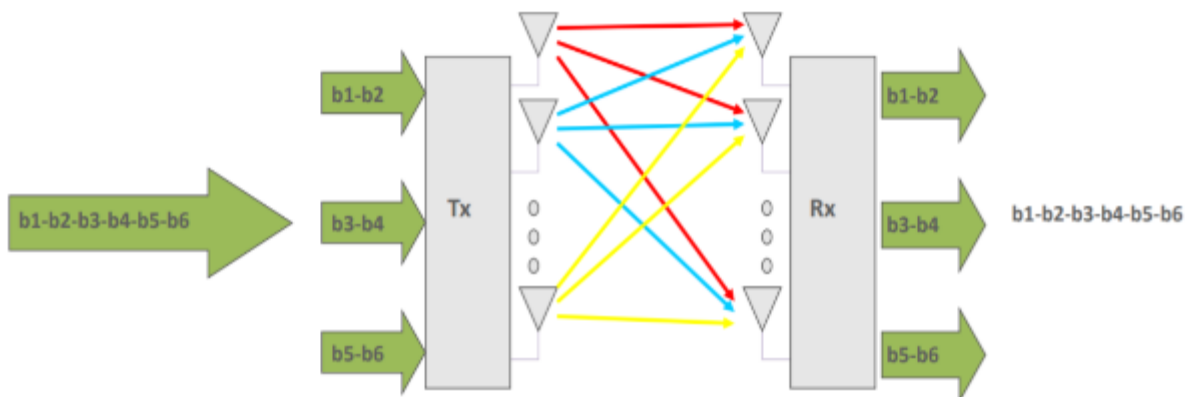


Figura 33. Multiplexación Espacial

Fuente: Comunicaciones inalámbricas. Universidad del Cauca

Dependiendo del SINR, que tenga un determinado UE, se utilizará diversidad en transmisión o multiplexación espacial como muestra la Figura 34.

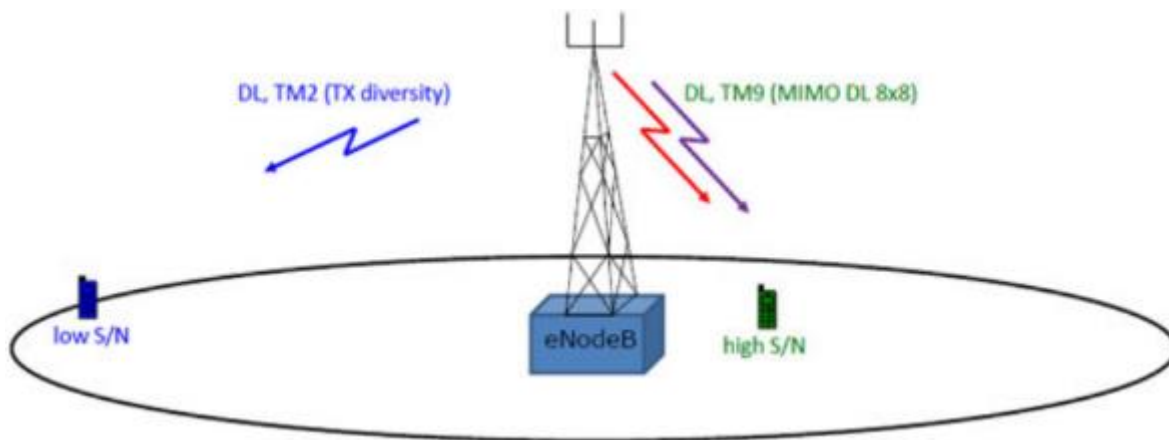


Figura 34. Escenarios de uso para Diversidad de Transmisión y Multiplexación espacial

Fuente: <http://www.3gpp.org>

3.2.1 Multiplexación Espacial - MIMO

En la multiplexación espacial - MIMO, los múltiples caminos logran ser utilizados como “canales” adicionales para transportar datos, con los límites de capacidad enunciados por la ley de Shannon [36].

Los datos que serán transmitidos se dividen en múltiples flujos y luego son codificados en diferentes antenas de transmisión. Para identificar las señales independientes que se transmiten en un sistema MIMO, se forma una matriz de canales H , como se muestra en la Figura 35, en el extremo destino, el receptor identifica la matriz H , y las señales transmitidas individuales son separadas y estimadas [37].

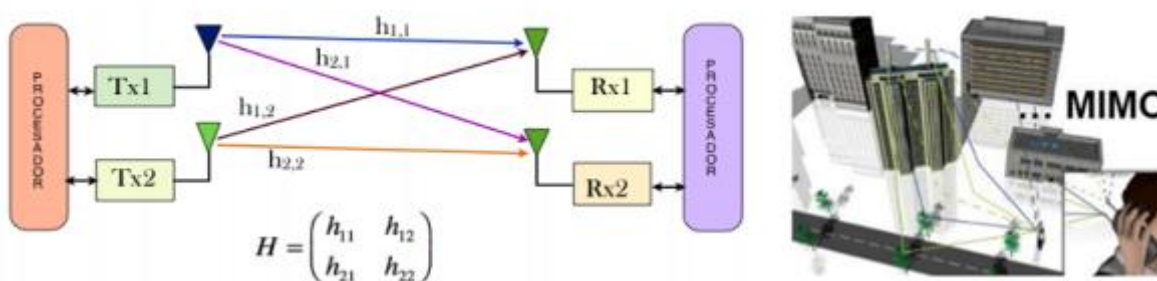


Figura 35. Sistema MIMO 2x2

Fuente: Comunicaciones inalámbricas. Universidad del Cauca

El tamaño de la matriz es igual a $T_x \times R_x$, donde T_x es el número de antenas transmisoras y R_x es el número de antenas receptoras. Aquí el elemento h_{ij} corresponde al canal generado entre la antena transmisora j y la antena receptora i , como muestra la Figura 36.

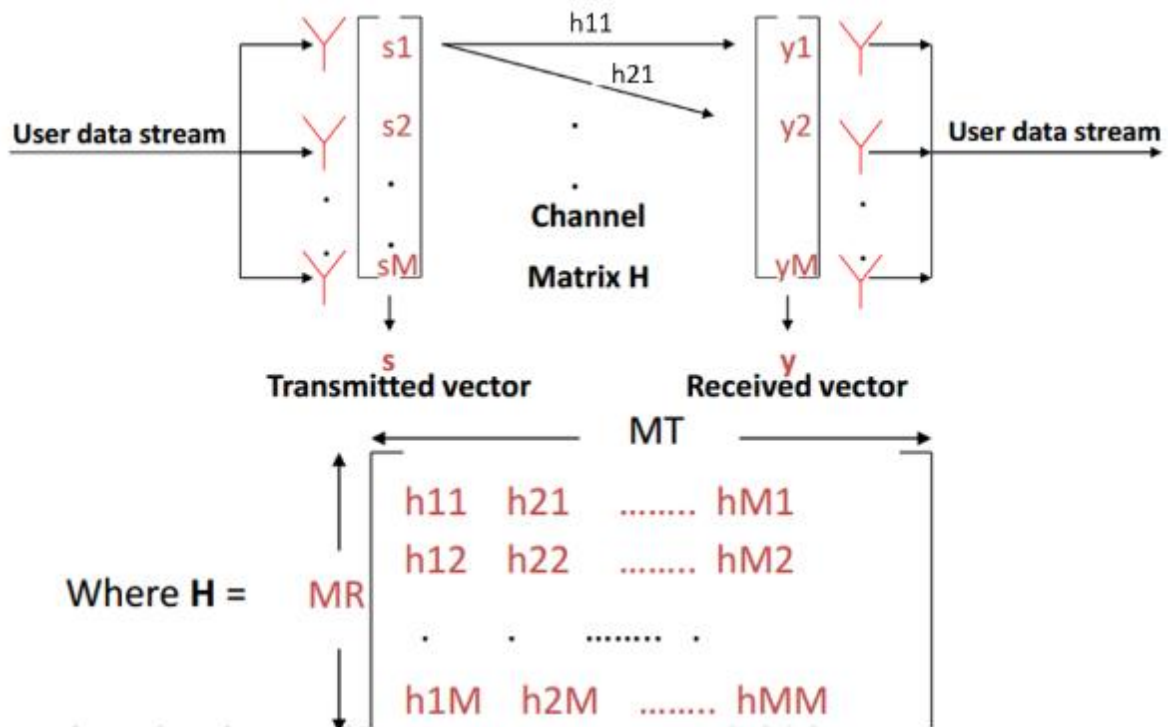


Figura 36. Matriz de canales

Fuente: Comunicaciones inalámbricas. Universidad del Cauca

Matemáticamente, esto se representa como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{n}$$

Donde $\mathbf{y}$ es el vector de datos recibido, $\mathbf{H}$, es la matriz de canales de tamaño $T_x \times R_x$, $\mathbf{s}$ es el vector de datos transmitido y $\mathbf{n}$ es el vector de ruido Gaussiano blanco.

Es así como MIMO, se define como un tipo de diversidad espacial, en el que se utilizan distintos caminos de propagación para transmitir una señal, además de complejos algoritmos de procesamiento, con los que se logra aumentar la eficiencia espectral [35].

La multiplexación espacial - MIMO, es la forma de diversidad espacial en la que se logra mayor rendimiento, pero teniendo unas buenas condiciones de SINR, así como se demuestra en los estudios realizados en [37] y [38].

El Release 12 de la 3GPP, estandariza un máximo de 8 puertos de antena en la transmisión para Downlink MIMO, además que habita el control de precodificación que proporciona direccionalidad a las señales de transmisión de forma horizontal, mientras que en el Release 13, se tienen hasta 16 puertos, y habilita el control de precodificación horizontal y vertical, permitiendo controlar la dirección del haz en tres dimensiones, lo que se conoce como formación de haz tridimensional o MIMO dimensión total (FD-MIMO) como se muestra en la Figura 37. La precodificación es un proceso que mejora la calidad de la recepción de la señal, multiplicando las señales antes de la transmisión con pesos de acuerdo con el canal de propagación de radio actual, dotando de direccionalidad al haz.

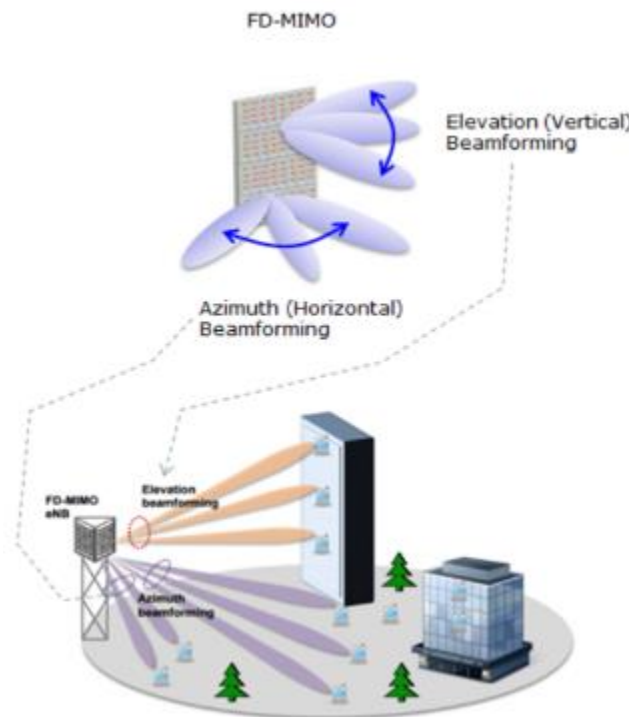


Figura 37. MIMO dimensión total

Fuente: www.sharetechnote.com

MIMO tiene dos esquemas de transmisión, MIMO de usuario único (SU-MIMO) y MIMO multi usuario (MU-MIMO). En SU-MIMO, múltiples flujos de datos son transmitidos hacia un

UE único, mientras que los datos se multiplexan espacialmente a múltiples UE en MU-MIMO [39], dotando de mayor capacidad y dinámica al sistema como se muestra en la Figura 38.

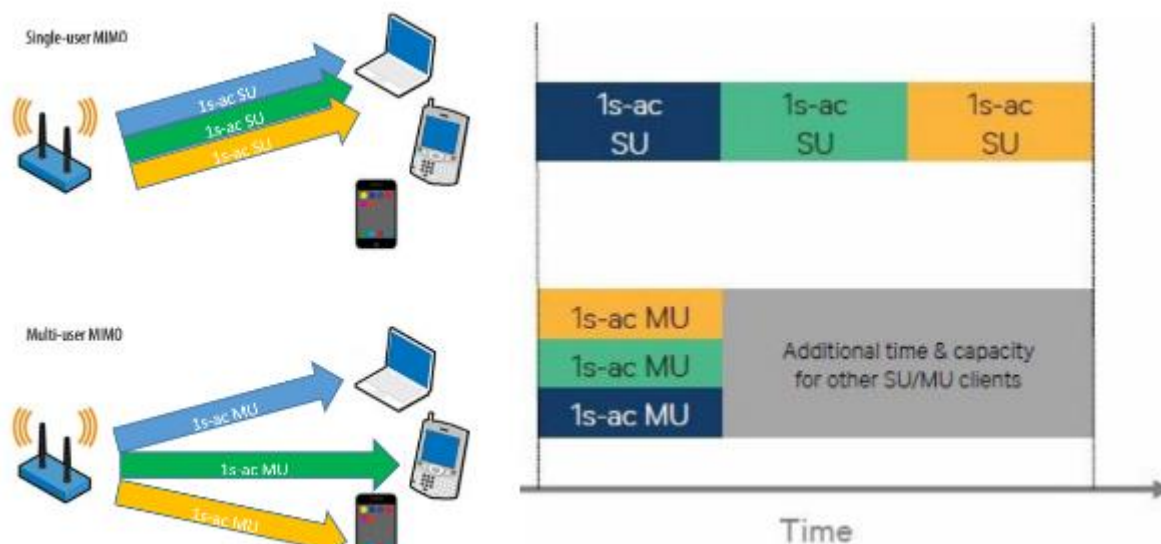


Figura 38. SU-MIMO Vs MU-MIMO

Fuente: <https://ytd2525.wordpress.com>

En la Tabla 8 se muestra las características de la tecnología MIMO en los Release 12 y 13.

Tabla 8. MIMO en Release 12 y 13

	Release 12	Release 13
Number of transmission antenna ports	1, 2, 4, 8	1, 2, 4, 8, 12, 16
Transmission antenna configuration	One dimension (horizontal direction arrangement)	Two dimension (horizontal and vertical direction arrangement)
Number of SU-MIMO streams	Max. 8	Max. 8
Number of MU-MIMO streams	Max. 4 (Max. 4 mobile terminals, max. 2 streams per mobile terminal)	Max. 8 (Max. 8 mobile terminals, max. 2 streams per mobile terminal)

Fuente: NTT Docomo Technical Journal

3.2.2 MIMO Masivo (Massive MIMO)

Para el desarrollo de la nueva generación de la telefonía móvil 5G, se están probando el uso de bandas de frecuencias altas ($>3\text{GHz}$), que poseen grandes anchos de banda por la disponibilidad en el espectro, pero, que tienen altas pérdidas por radio propagación. Dichas pérdidas pueden ser solventadas manejando la directividad de las antenas dotando a la señal de una mayor ganancia con el uso de elementos masivos, o diciéndolo de otra forma, antenas formadas por múltiples de ellas.

El estudio realizado en [40], muestran los resultados experimentales, simulaciones y problemas técnicos al usar antenas de elementos masivos, realizados por el operador japonés NTT DOCOMO. Uno de los efectos al usar antenas de elementos masivos es la formación de haz o beamforming, el cual se logra controlando la amplitud y la fase de las señales transmitidas de los elementos (antenas), dotando de directividad al haz, con lo que se logra, una mayor ganancia de la señal. En la Figura 39, se muestra los resultados de llegada del haz, para una potencia de transmisión total de 33dBm, en distintas bandas de frecuencia.

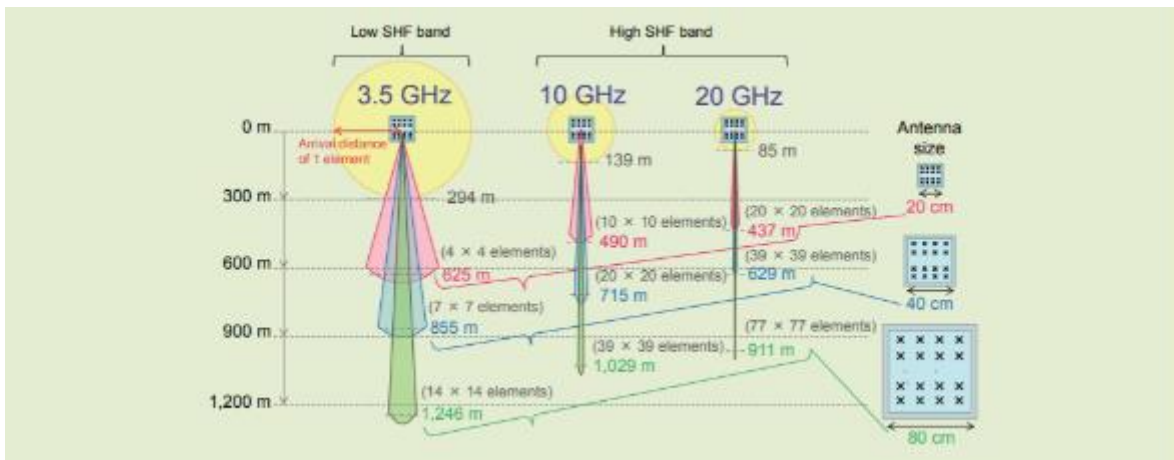


Figura 39. Efecto Beamforming

Fuente: NTT Docomo Technical Journal

El otro efecto es la transmisión MIMO, usando antenas de elementos masivos, lo que se conoce como MIMO masivo. Con el uso de esta tecnología se pueden lograr una mayor cobertura y capacidad conectando múltiples usuarios como se muestra en la Figura 40.

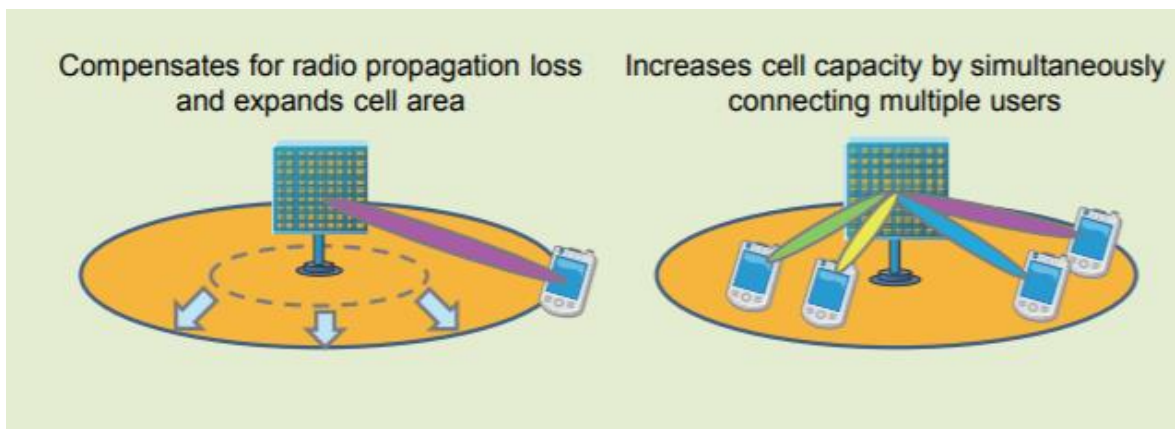


Figura 40. MIMO masivo

Fuente: NTT Docomo Technical Journal

En el estudio realizado en [41], se muestran múltiples investigaciones realizadas en radio propagación en bandas altas, así como modelos de simulación con sus principales factores de afectación, además de resultados en campo en ambientes reales. En [42], se muestran los resultados experimentales realizados por distintos fabricantes de tecnologías centrándose en el uso de tecnologías de múltiples antenas en bandas altas.

3.3 REDES HETEROGENEAS

Con el incremento del tráfico de datos en las redes actuales de 4G, se sugiere un concepto en el diseño de la red, en el cual se combine el uso de radio bases de distintas potencias de transmisión y por ende de distintas coberturas, acercando aún más la red de radio acceso al UE. Este concepto se denomina redes heterogéneas (Hetnets).

Este tipo de radio base de menor potencia comúnmente se le conoce como celda pequeña (small cell), y se pueden desplegar en ambientes interiores o exteriores. Dentro de dichas small cells, podemos encontrar las celdas de tipo (femtocelda y picoceldas) y hasta puntos de acceso de WiFi, con los cuales se podrán balancear el tráfico con la celda macro, reduciendo su carga y aumentando su capacidad. A su vez, al disminuir la distancia entre el UE y la Radio Base, los UE transmitirán a menor potencia para poder ser escuchados, disminuyendo así la interferencia en UL, aumentando las velocidades de subida de la red. En la Figura 41 se muestra el esquema de una Hetnet.

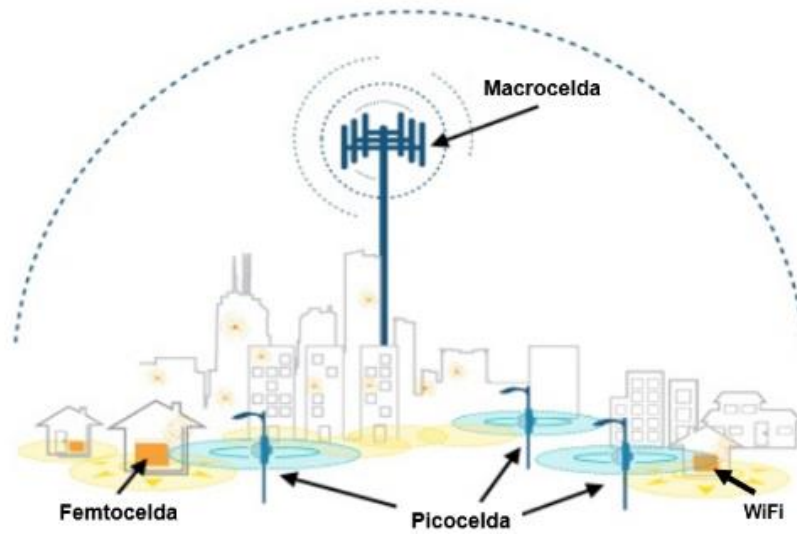


Figura 41. Esquema de una HetNet

Fuente: <https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/redes-heterogeneas/>

Con su cobertura reducida, este tipo de radio base puede manejar la misma cantidad de UEs que una celda macro reusando el mismo espectro, además, al tener línea de vista con los UE bajos su cobertura, manejaría un mayor SINR aumentando exponencialmente su capacidad, haciéndola especialmente atractiva en un despliegue de red ultra denso (UDN), instalándose donde haya una gran concentración de personas en áreas pequeñas con baja movilidad, como por ejemplo una estación de metro o Transmilenio, plaza pública, centro de eventos o dentro de un edificio de oficinas. Para este último caso se puede utilizar en combinación con un sistema distribuido de antenas (DAS), el cual dividirá la señal en varios pisos del edificio donde según estudios se genera hasta el 80% del tráfico móvil [43].

Uno de los inconvenientes que se tendría con este despliegue masivo es que se aumentarían las zonas borde y por ende la interferencia entre celdas como se muestra la Figura 42, por lo que estudios para mitigar el impacto de la interferencia son presentados en [44] donde se propone mitigar el impacto de la interferencia en Downlink adoptando algoritmos de inteligencia artificial, que mejoran el sincronismo y la coordinación entre las estaciones base.

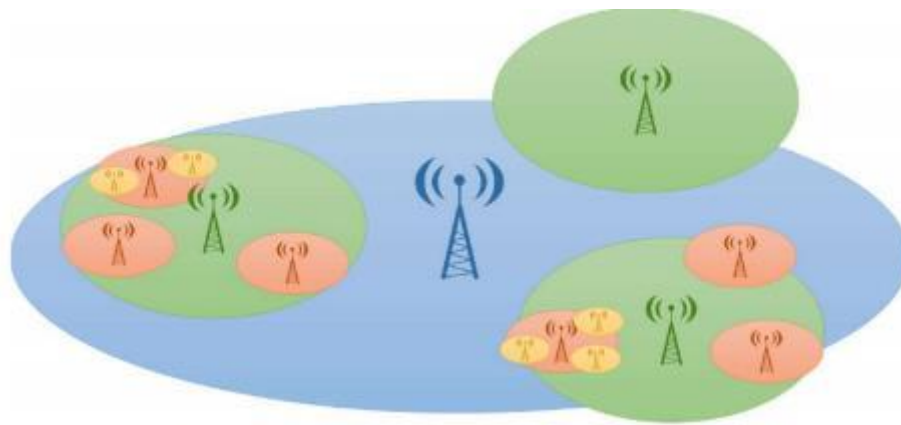


Figura 42. Concepto de UDN

Fuente: Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio

En Colombia el despliegue de infraestructura de telecomunicaciones dependen de las estrategias, políticas y normativas locales de cada municipio, por ende, la Comisión de regulación de Comunicaciones (CRC) ha creado el código de buenas prácticas para el despliegue de infraestructura de redes de comunicaciones, el cual, con base en la ley 1753 de 2015, contempla el despliegue de small cells, que por sus características no requieren de obra civil para ser instaladas, por lo que no es necesaria licencia de autorización ante los entes territoriales, además, sugieren promover convenios entre los proveedores de redes y servicios y los gobiernos a fin aprovechar el mobiliario urbano como posibles ubicación de este tipo de radio bases, así como utilizar estructuras existentes o fachadas de los edificios.

Una de las características que facilitarán el despliegue y reducirán las brechas para la instalación de small cells, es su reducido tamaño y su bajo consumo de potencia, además al implementarse en altas frecuencias, el tamaño de sus antenas también se verá reducido, pudiendo ser instaladas en las fachadas de los edificios como se muestra en la Figura 43.



Figura 43. Instalación Small Cell en Fachada

Fuente: <https://www.nobbot.com/firmas/small-cells-cobertura-movil/>

3.4 COORDINACION DE INTERFERENCIA ENTRE – CELDAS (ICIC)

En LTE los UE que están cubiertos por una misma celda, no presentan interferencia entre ellos, ya que, la función de scheduling asegura que un PRB solamente pueda ser asignado a las transmisiones de un único UE en cada subtrama, evitando colisiones entre transmisiones de múltiples de ellos, al acceder a los canales compartidos físicos del sistema en Downlink y Uplink, PDSCH y PUSCH respectivamente. Sin embargo, para UE cubiertos por celdas distintas existe generalmente interferencia entre ellos, ya que es muy probable que se asignen en la transmisión el mismo PRB en un mismo instante de tiempo.

En GSM, estas interferencias se evitaban en la fase de despliegue y de asignación de frecuencias, donde se empleaban técnicas de agrupación de celdas y factores de reuso, permaneciendo estáticas hasta nuevas resintonizaciones. Esto reducía mucho la capacidad del sistema, ya que no se aprovechaba todo el espectro disponible.

En LTE todos los PRB están disponibles en todos los eNodeB, maximizando la capacidad de la celda, sin embargo, la interferencia entre celdas puede llegar a ser muy alta, por lo que LTE define una función de gestión de recursos de radio denominada Coordinación de

interferencia entre celdas (ICIC), cuya función es gestionar de forma dinámica y durante la operativa del sistema la interferencia intercelular.

La función ICIC, trata de una funcionalidad de gestión de recursos de radio multicelda. Para ello utiliza indicadores (reactivos y proactivos) estandarizados, que se intercambian a través de la interfaz X2 [45], consiguiendo una coordinación entre los schedulers de paquetes de los eNodeB, manejando restricciones y preferencias sobre el uso y la potencia de transmisión por PRB.

3.5 COORDINACION MULTIPUNTO (COMP)

Coordinación Multipunto (CoMP) es una característica introducida en el Realese 11 y fue especificada principalmente para mejorar el servicio en los usuarios que se encuentren en borde de celda, ya que dichos usuarios son los que experimentan mayor interferencia intercelular, al estar ubicados en el límite de las coberturas de dos o más de ellas [46].

En la Figura 44, se muestra la cobertura real de una red celular conformada por varios eNB. Particularmente el UE en el recuadro verde, esta en el borde de las coberturas de los eNB 21 y 32. Antes de especificarse CoMP, el UE puede enviar(UL) o recibir(DL) datos solo hacia/desde la celda servidora en ese instante, ya sea, 21 o 32.

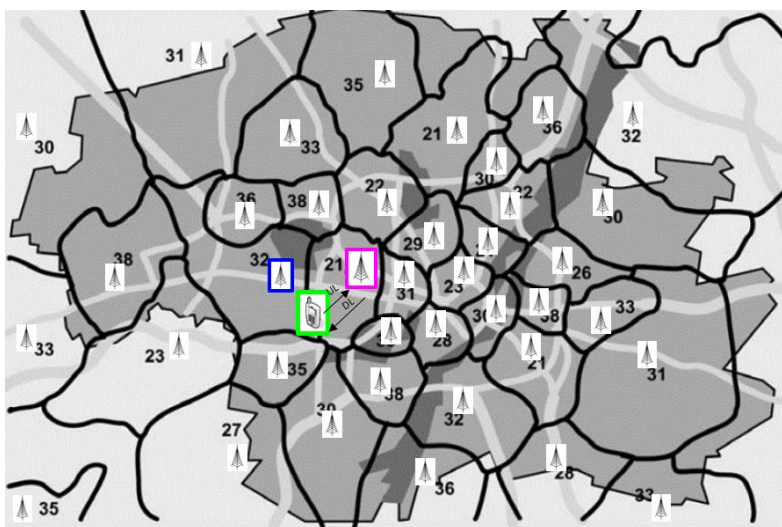


Figura 44. UE en borde de celda

Fuente: *Sistemas de Conmutación. Telefonía Móvil. Universidad del Cauca*

CoMP habilita la capacidad de que múltiples celdas cooperen para el envío o recepción de datos, realizándose en dos modos: Selección de punto Dinámico (DPS) o Transmisión conjunta (JT), con el fin de mejorar las velocidades en datos de un UE en borde de celda como muestra la Figura 45 [47].

En el modo DPS, la celda servidora se encarga de enviar la señalización a través del canal de control PDCCH, mientras que los datos son enviados o recibidos hacia/desde la celda coordinada a través de los canales compartidos PUSCH y PDSCH respectivamente, mientras que en JT la señalización es enviada por la celda servidora y los datos son enviados tanto por la celda servidora como por la celda coordinada. El eNB escogerá en qué modo operar con base en la carga de la celda y la calidad del canal radio.

Para que CoMP funcione, debe haber comunicación entre las celdas a través de la interfaz X2 y tener una estricta sincronización temporal. Esto obliga a que la comunicación entre las estaciones base deba ser lo más rápida posible, por lo que solo se puede conseguir si están muy cercanas entre sí. Debido a esta razón principal y a otras, nace un nuevo concepto de arquitectura denominada RAN Centralizada (C-RAN).

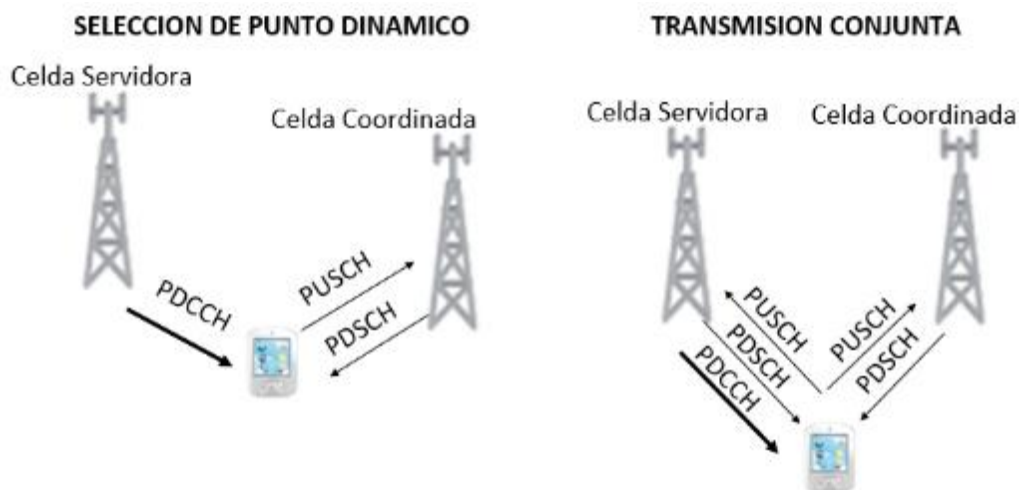


Figura 45. Modos de Coordinación Multipunto

Fuente: <http://www.3gpp.org>

3.6 CONCLUSIONES DE CAPÍTULO 3

LTE sigue su evolución en la red de acceso hasta principios de 2017, estandarizando nuevas tecnologías enfocadas en hacer un uso más eficiente del espectro, por medio de la aplicación de conceptos como: Agregación de Portadora (CA), múltiples entradas - múltiples salidas (MIMO), Coordinación de Interferencia entre celdas (ICIC), y Coordinación Multipunto (CoMP).

A su vez la forma de realizar el despliegue cambia con la combinación de estaciones base de distintas potencias y por ende de distintas coberturas, bajo el concepto de redes heterogéneas (Hetnets), instalando gran cantidad de ellas, densificando la red, siendo la forma más atractiva para los operadores de aumentar su capacidad.

CA, permite utilizar todo el espectro disponible del operador y asignarlo a los equipos de usuario (UE), combinando portadoras de la misma banda o de distintas de ellas, aprovechando todos los recursos de radio al tiempo. Cada vez un mayor número de combinaciones de bandas se especifican con base a las distintas operaciones en el mundo, por lo que se deben realizar actualizaciones en los eNBs y en los UE.

MIMO, es la tecnología que aprovecha la propagación multicamino, para enviar información redundante o adicional, dependiendo del SINR, creando nuevos canales de transmisión y recepción aumentando la fiabilidad y capacidad en la red. También se hace necesario realizar actualización tanto en los eNBs como en los UE.

Debido a la tendencia del despliegue ultradenso en las que se crean mayores bordes de celdas, las tecnologías de coordinación de interferencias entre celdas (ICIC) y la coordinación multipunto (CoMP), surgen para hacer frente a ello, haciendo uso de la interfaz X2 permitiendo una comunicación directa entre eNBs, aumentando el tráfico de señalización en el backhaul.

Es así como un nuevo concepto de arquitectura nace, mejorando la aplicación de coordinación entre eNB, realizando una centralización de la banda base, y creando una nueva red fronthaul. Este concepto se verá en detalle en el capítulo siguiente, y corresponde a un nuevo tipo de arquitectura, que será aplicado a la nueva generación de redes celulares 5G.

4 RED DE RADIO ACCESO CENTRALIZADA (C-RAN)

Como se había mencionado en capítulos anteriores, la red de radio acceso en LTE está conformada por un conjunto de estaciones base llamados nodo B mejorado (eNB), los cuales dividen un área geográfica o de cobertura en celdas, y son los encargados de recibir las señales del UE y enviarlas al Core y de recibir las señales del Core y enviarlas al UE, organizando la información y administrando los canales de radio frecuencia disponibles en el espectro.

Cada eNB está compuesto por antenas, cabezas de radio (RRH) o también llamadas unidades remotas de radio (RRU). y una unidad de Banda Base (BBU). Las RRH son las encargadas de recibir, transmitir, amplificar y filtrar las señales de RF, además de convertir las señales de análogo-digital, digital-análogo. La BBU es la unidad que procesa las señales de banda base y se compone de un procesador digital de señales (DSP), que procesa las señales de voz directas para su transmisión a un UE, y procesa las señales de voz inversas recibidas desde un UE. Las principales sub-funciones de la BBU o también llamada Unidad Digital (DU) y de la RRH se resumen en la Figura 46 [48].

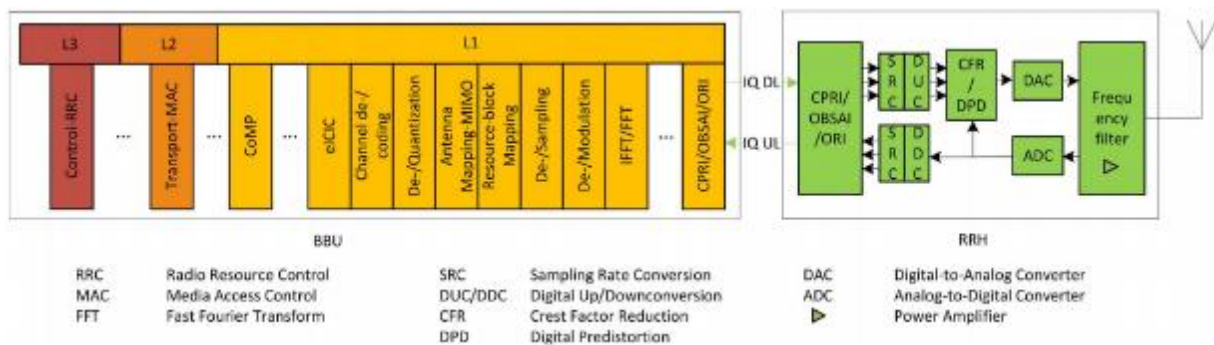


Figura 46. Funcionalidades de una Estación Base.

Fuente: Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview

4.1 ARQUITECTURA TRADICIONAL DE UNA ESTACIÓN BASE

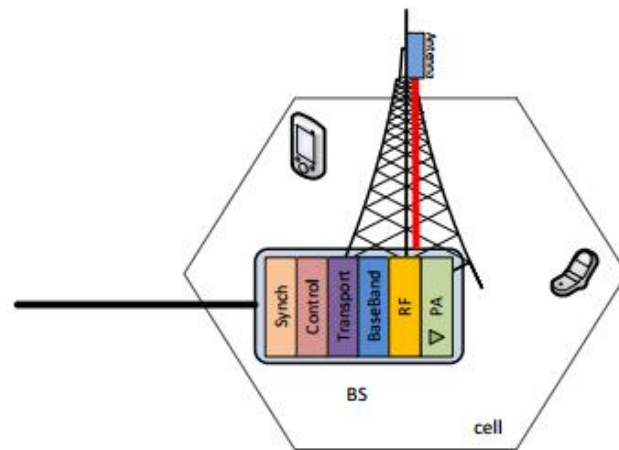
En una arquitectura tradicional, todas las funcionalidades de radio y de procesamiento de banda base son ubicadas dentro de una estación base. La unidad de Radio se ubica cerca de las antenas para contrarrestar las pérdidas ya que se conectan por cable coaxial, como

se muestra en la Figura 47a. Esta arquitectura fue normalmente aplicada en los despliegues de 1G y 2G.

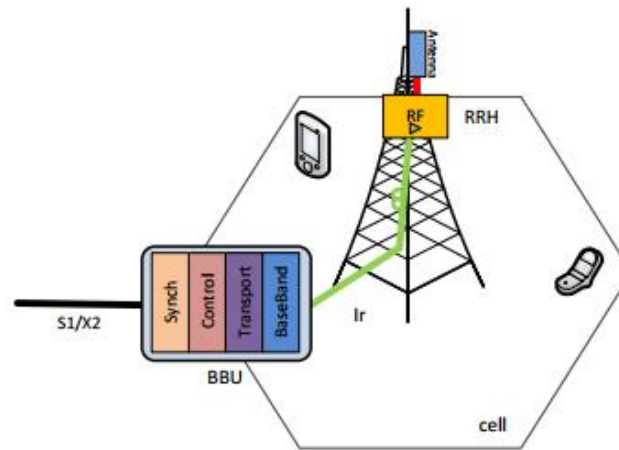
4.2 ARQUITECTURA DE UNA ESTACIÓN BASE CON RRH

En esta arquitectura la estación base se divide en dos módulos: la unidad de radio o cabeza de radio remota (RRH) y la unidad de procesamiento de banda base (BBU) como se muestra en la Figura 47b. La interconexión entre las RRH y la BBU se puede realizar por Fibra óptica, microondas o cobre. Para el caso de la interconexión por fibra, la distancia máxima teórica es de 40km, dependiendo también de la capacidad de los equipos transceptores SFP, que sirven de interfaz de conexión entre la fibra óptica y los módulos, sin ningún equipo pasivo ni activo en el enlace. Esta arquitectura fue implementada con el despliegue de la red 3G, y a partir de ese momento es usada por los operadores celulares en Colombia.

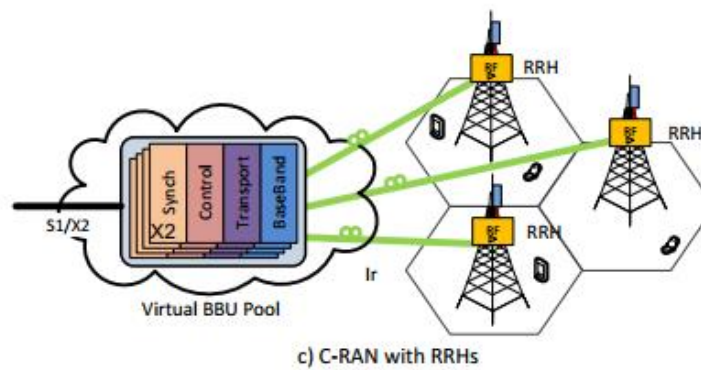
El protocolo en su mayoría implementado de la interfaz I_r entre las RRH y la BBU, usado para la transmisión de datos en fase/cuadratura I/Q es, Interfaz de radio pública común (CPRI) [49], el cual es un protocolo bidireccional de velocidad de bits constante independiente de la actividad del usuario, que requiere sincronización precisa y un control de latencia estricto [48]. Otros protocolos usados, pero no tan comunes son: Iniciativa de arquitectura de estación base abierta (OBSAI) [50], e Interfaz de equipo radio abierta (ORI) [51]. Estos protocolos son de tipo, radio digital sobre fibra (D-RoF), donde la señal de radio es muestreada y cuantificada, para después de la codificación enviarse al módulo del sistema [52].



a) Traditional macro base station



b) Base station with RRH



c) C-RAN with RRHs

 Fiber – Digital BaseBand  Coax cable – RF

Figura 47. Evolución de la arquitectura de una estación base
Fuente: *Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview*

4.3 ARQUITECTURA DE ESTACIÓN BASE CENTRALIZADA - CRAN

La arquitectura (C-RAN), en una novedosa forma de despliegue de la red de radio acceso propuesto inicialmente en [53] y especificada más a profundidad en [54]. Esta arquitectura fue propuesta con el fin de buscar una solución a los altos costos de despliegue en CAPEX y OPEX, que conlleva aumentar la capacidad de la red adicionando más estaciones base, creando una compleja red heterogénea de macro y micro celdas que puedan manejar el tráfico creciente.

Al notar que dicha inversión no crece igual a los ingresos, ya que, el promedio de ingresos por usuario (ARPU) es plano o decreciente, C-RAN se especifica como una solución transversal la cual mejorará el consumo de energía, permitirá un despliegue rápido y dinámico, hará uso eficiente de los recursos de procesamiento, reducirá costos de operación y mantenimiento, facilitará la implementación de funcionalidades como CA, ICIC, CoMP y será un primer paso para la virtualización de la RAN, con el uso posterior de procesadores de uso general (GPP), haciendo alusión al concepto de radio definido por software (SDR), donde algunas de las funciones a nivel físico pueden modificarse por software [55].

La arquitectura C-RAN consiste en centralizar las unidades de banda base (BBU) de varias estaciones base, en una oficina central (CO), formando un Pool de BBU, estableciendo una nueva red Fronthaul que conecta el Pool de BBU con las RRH, mediante un enlace normalmente de fibra, por medio de un transceptor SFP. En la Figura 48, se muestra una red LTE con una arquitectura C-RAN.

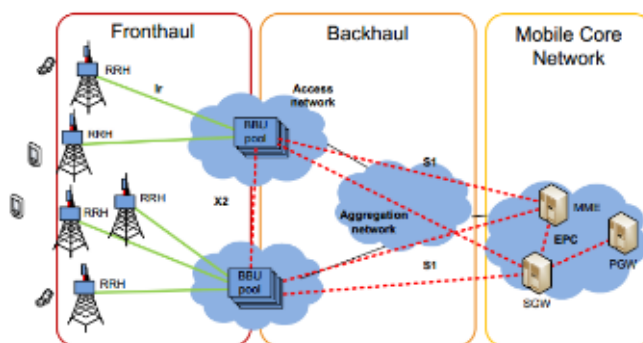


Figura 48. Red LTE con C-RAN

Fuente: *Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview*

Dados los beneficios, C-RAN ha llamado la atención de la industria y la academia, ya que, aborda los desafíos que los operadores enfrentan al satisfacer las necesidades de sus clientes, y se presenta como una base tecnológica importante para las redes 5G como se muestran en los estudios realizados en [56], [57], [58], [59].

Con este tipo de arquitectura, la red Fronthaul toma una mayor importancia dentro de las redes celulares, donde según estudios realizados por el SNR research, la inversión de los operadores en dicha red crecerá en gran medida en los próximos años, principalmente en Asia como se muestra en la Figura 49 [60].

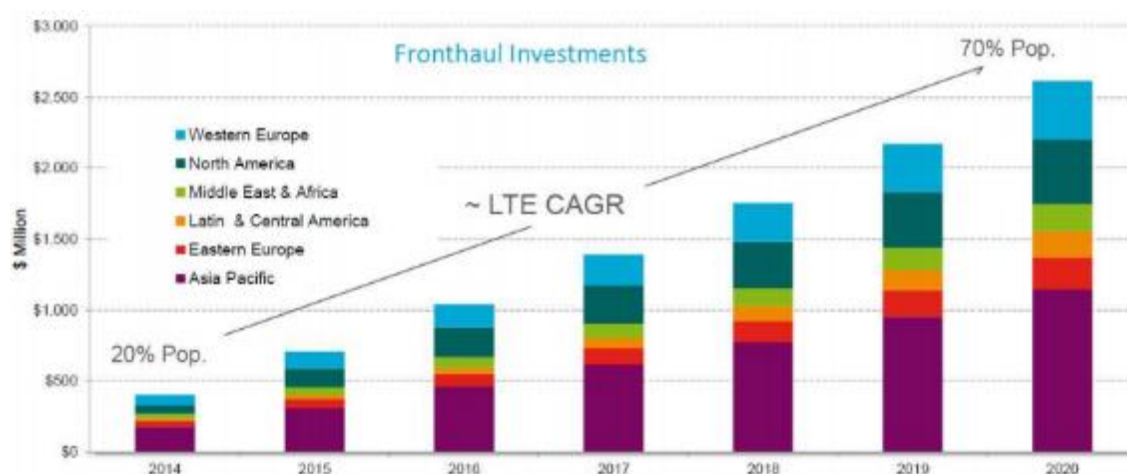


Figura 49. Previsión de los gastos en el fronthaul radio

Fuente: *The Hetnet Bible (Small Cells, Carrier WiFi, DAS & C-RAN)*

4.4 CÁLCULO DE LA RED FRONTHAUL EN ANCHO DE BANDA Y LATENCIA

Uno de los aspectos más importantes de la red fronthaul es que en este tramo, la información que se envía no son datos IP como en otros enlaces, sino la propia señal de radio digitalizada, lo que supone que su tasa de bits (throughput), es considerablemente más alta que su correspondiente en IP [61]. Para realizar el cálculo de la red frontahul se utilizará el protocolo de radio digitalizada (CPRI), el cual es el mayormente usado por los fabricantes de equipos debido a que los métodos de mapeo son más eficientes que los de OBSAI. CPRI no es una interfaz estandarizada, sino un estándar de mutuo acuerdo (MSA), entre fabricantes que diseñaron un protocolo para manejar el fronthaul.

Según CPRI y como muestra la Figura 50, en la capa física LTE dentro de la banda base (BBU), se generan las formas de onda I y Q (Fase y Cuadratura) de los símbolos OFDM. Al muestrear estas dos formas de onda, consigues un conjunto de datos digitales muestreados, en concreto, 15 bits de la muestra I, y otros 15 bits de la muestra Q, los cuales son enviados a través de la interfaz CPRI hacia el módulo de radio (RRH), donde un DAC, convierte la señal a analógica, y tras subirlo a RF, se radia la señal a través de la antena.

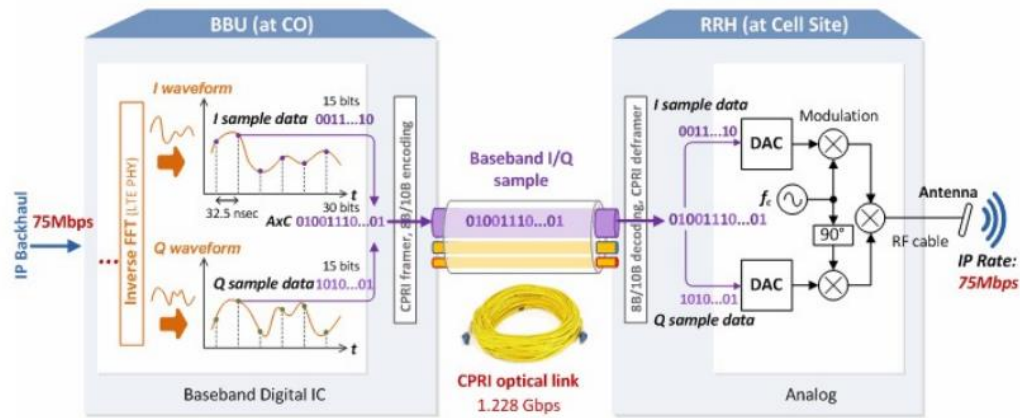


Figura 50. Proceso envío de las muestras I/Q a través de la Interfaz CPRI

Fuente: Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio

La fórmula general para calcular el fronthaul viene dada por la expresión (2):

$$B_{CPRI} = S * A * f_s * b_s * 2 * \frac{16}{15} * LC \quad (2)$$

Donde **S** es el número de sectores en la estación base, **A** es el número de antenas, f_s es la frecuencia de muestreo, la cual es un múltiplo de 3.84MHz (se hizo teniendo en cuenta aspectos de compatibilidad con los sistemas UMTS) [4], b_s es el número de bits por muestra, **2** por tener dos muestras que se procesan en paralelo (I y Q), $\frac{16}{15}$, por la cabecera del protocolo y LC, que es la codificación que es de $\frac{10}{8}$ o $\frac{66}{64}$ dependiendo del modo del CPRI [52].

Aplicando la fórmula, se realiza el cálculo para cada canalización de LTE, de una sola celda para distintas configuraciones de MIMO, y los resultados se muestran en la Tabla 9.

Tabla 9. Capacidad de Fronthaul requerida para cada canalización de LTE

Ancho de Canal LTE (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Nº Bloques de recurso (RB)	6	15	25	50	75	100
Frecuencia de Muestreo (MHz)	1,92	3,84	7,68	15,36	23,04	30,72
Muestras I/Q (bits)	30	30	30	30	30	30
Tasa de datos muestreados por antena (Mbps)	57,6	115,2	230,4	460,8	691,2	921,6
+ Palabra de control (Mbps)	61,438	122,88	245,75	491,5	737,25	983
+ Codificación 8B/10B (Mbps)	76,798	153,6	307,19	614,4	921,56	1.228,8
En configuración MIMO 2x2 (Mbps)	153,6	307,2	614,4	1.228,8	1.843,12	2.457,6
En configuración MIMO 4x4 (Mbps)	307,2	614,4	1.228,8	2.457,6	3.686,24	4.915,2
En configuración MIMO 8x8 (Mbps)	614,4	1.228,8	2.457,6	4.915,2	7.372,48	9.830,4

Fuente: Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio

CPRI especifica modos de operación que definen la velocidad máxima que puede ser transmitida entre la BBU y la RRH, llegando a soportar en su última versión CPRI V7.0 [49], velocidades de hasta 25Gbps, como se muestra la Tabla 10.

Tabla 10. Modos de Operación de CPRI

Opción	Longitud Datos	Longitud CW	Tasa Datos (Gbps)	Incluyendo CW (Gbps)	Tasa CPRI tras 8B/10B (Gbps)
1	120	8	0,4608	0,4951	0,6144
2	240	16	0,9216	0,983	1,2288
3	480	32	1,8432	1,9661	2,4576
4	600	40	2,3040	2,4576	3,0720
5	960	64	3,6864	3,9322	4,9152
6	1200	80	4,6080	4,9152	6,144
7	1920	128	7,3728	7,8643	9,8304
8	2400	160	7,6032	8,11	10,1376
9	2880	192	9,1238	9,732	12,165
10	5760	384	18,246	19,464	24,33

Fuente: Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio

A su vez, el retraso de procesamiento de una subtrama entre la RRH y la BBU, debe mantenerse por debajo de 1ms, para cumplir con los requisitos de HARQ [62], y de 150us si se requiere usar la funcionalidad de CoMP correctamente [63], por lo que sabiendo, que la velocidad de la luz dentro de la fibra óptica es de 1 kilómetro por 5us, si se tienen 75us de ida y 75us de vuelta, la distancia máxima del enlace debe ser de 15km. En la Tabla 11 se muestran los requisitos de fronthaul según el estándar y los operadores.

Tabla 11. Requisitos del Fronthaul según el estándar y los operadores.

Requisitos del fronthaul	Requisitos de los estándares	Requisitos de los operadores de telecomunicaciones
latencia	Máximo 500μs para las redes de nueva generación.	No recomendado más de 150μs (30km entre ida y vuelta) para implementar CoMP
Desbalanceo de latencia en <i>uplink</i> y <i>downlink</i>	±163ns, para garantizar la precisión del usuario	±125ns, que equivalen a una diferencia de 25 metros de fibra, o 20km de dispersión cromática
Precisión de la latencia	CPRI: Precisión del tiempo del enlace de ±8ns (±16ns con ida y vuelta) 3GPP: ±130ns en la transmisión desde el usuario	-
Jitter	CPRI: ±2ppb (<i>parts per billion</i> o partes por billón) 3GPP: ±50ppb	Media: 1,8ps Pico a Pico: 26ps
BER	10^{-12}	10^{-12}

Fuente: Evaluating the different fronthaul options and the technical requirements for the different scenarios

Una de las soluciones propuestas para hacer frente a estos requerimientos de anchos de banda, son las técnicas de compresión de fronthaul, que consiste en comprimir la tasa de velocidad I/Q, adaptándola a la capacidad disponible. La compresión se realiza en ambos sentidos (UL y DL) y consisten en tres pasos como se explica [64]: eliminación de redundancias en el dominio espectral, escalado de bloques, y cuantificación. En [65], se explica la necesidad de recurrir a estos métodos de compresión por el crecimiento exponencial de la capacidad del CPRI.

Múltiples estudios se han realizado en torno a la compresión del CPRI como se muestran en [66], [67] y [68], sin embargo el costo de incrementar la complejidad de la BBU y la RRH debe considerarse.

Ahora bien, para tecnologías futuras como 5G, donde la cantidad de antenas se multiplicará con el uso de MIMO masivo y se contará con canalizaciones grandes con el uso de bandas milimétricas, la capacidad del CPRI requerida, se ampliará en varios Gbps como muestra la Tabla 12, y ni aun con las técnicas de compresión se lograría reducirlo para las capacidades actuales, por lo que son necesarias soluciones más radicales.

Tabla 12. Capacidades futuras del Fronthaul respecto a la cantidad de antenas y al ancho de banda usando CPRI.

N° de Antenas	Ancho de banda del espectro			
	10MHz	20MHz	100MHz	500MHz
2	1,2288Gbps	$2 \times 1,2288 = 2,4576\text{Gbps}$	$10 \times 1,2288 = 12,288\text{Gbps}$	$50 \times 1,2288 = 61,44\text{Gbps}$
4	$2 \times 1,2288 = 2,4576\text{Gbps}$	$4 \times 1,2288 = 4,9152\text{Gbps}$	$20 \times 1,2288 = 24,576\text{Gbps}$	$100 \times 1,2288 = 122,88\text{Gbps}$
8	$4 \times 1,2288 = 4,9152\text{Gbps}$	$16 \times 1,2288 = 19,661\text{Gbps}$	$40 \times 1,2288 = 49,152\text{Gbps}$	$200 \times 1,2288 = 245,76\text{Gbps}$
32	$16 \times 1,2288 = 19,661\text{Gbps}$	$32 \times 1,2288 = 39,322\text{Gbps}$	$160 \times 1,2288 = 196,61\text{Gbps}$	$800 \times 1,2288 = 983,04\text{Gbps}$
64	$32 \times 1,2288 = 39,322\text{Gbps}$	$64 \times 1,2288 = 78,643\text{Gbps}$	$320 \times 1,2288 = 393,22\text{Gbps}$	$1600 \times 1,2288 = 1.966,1\text{Gbps}$
128	$64 \times 1,2288 = 78,643\text{Gbps}$	$64 \times 1,2288 = 157,286\text{Gbps}$	$640 \times 1,2288 = 786,43\text{Gbps}$	$3200 \times 1,2288 = 3.932,2\text{Gbps}$

Fuente: Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio

Es así como la comunidad académica y la industria proponen utilizar una centralización parcial, definiendo una nueva división funcional entre los RRH y las BBU, sacrificando las ganancias de procesamiento y de técnicas colaborativas que trae consigo la centralización completa, pero logrando una reducción en las necesidades de capacidad del Fronthaul [69].

En [70], se estudia el rendimiento de CoMP, según el punto en que se realice la división funcional, y la penalización que supone aumentar la complejidad de la radio.

4.5 DIVISIONES FUNCIONALES

Las divisiones funcionales propuestas son mostradas en Figura 51. Las Funciones a la izquierda de las flechas son ejecutadas en el Pool de BBU, mientras que las mostradas a la derecha son ejecutadas por la RRH.

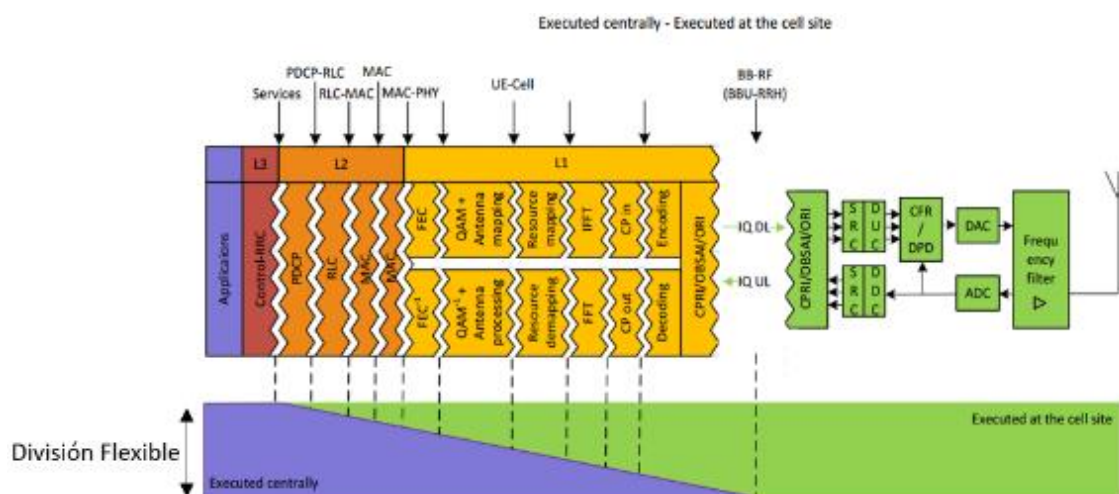


Figura 51. Posibles Divisiones Funcionales para C-RAN

Fuente: *Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview*

Para el caso de un sector LTE con 20MHz + MIMO 2x2, los requerimientos de throughput y delay, cambian, como se muestra la Tabla 13 [71].

Debido a esto, propuestas interesantes han surgido, como la de Telecom Italia [72], que habla del concepto de RAN como servicio (RANaaS), realizando una división de funcionalidades flexible, que hace posible un punto de operación óptimo dependiendo de las capacidades disponibles del fronthaul.

Tabla 13. Requerimientos para diferentes divisiones funcionales para un sector LTE de 20MHz+MIMO 2x2

Split	Latency	DL bandwidth	UL bandwidth
PDCP-RLC	30 ms	151 Mbps	48 Mbps
MAC	6 ms	151 Mbps	49 Mbps
MAC-PHY	2 ms	152 Mbps	49 Mbps
UE-Cell	250 μ s	1075 Mbps	922 Mbps
BB-RF	250 μ s	2457.6 Mbps	2457.6 Mbps

Fuente: Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview

4.6 RADIO ANÁLOGO SOBRE FIBRA (A-ROF)

A-RoF es una opción de transporte de señales sobre fibra de forma análoga, que está siendo altamente estudiada, ya que tiene la capacidad de soportar la demanda que tiene y tendrá la red fronthaul, por el uso de bandas milimétricas, como el caso de la banda de 60GHz, con un espectro disponible de hasta 8GHz (Figura 52). En A-RoF, la luz se modula con una señal de RF y es transmitida a través de un enlace óptico, sin necesidad de agregar tiempo extra de procesamiento al digitalizar la señal como en el caso del CPRI. Este método se divide en dos subcategorías. Radio Frecuencia sobre fibra (RFoF), y Frecuencia intermedia sobre fibra (IFoF) [73].

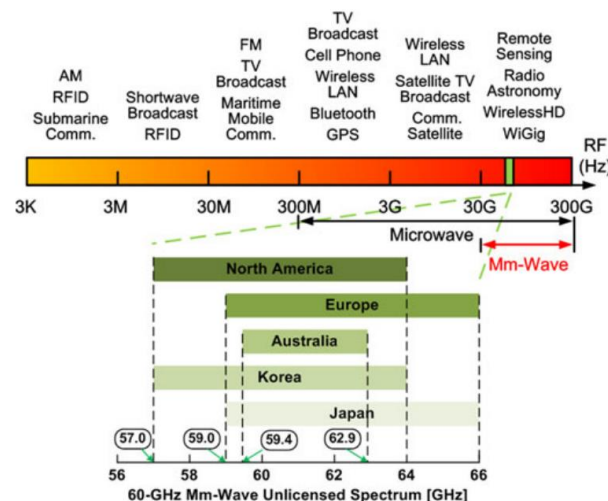


Figura 52. Espectro Radio Eléctrico y Banda Milimétrica de 60GHz

Fuente: Key microwave-photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks

En la arquitectura RFoF, la señal de RF que lleva los datos es convertida a una señal óptica en forma de onda análoga, y transmitida sobre el enlace de fibra. La señal se transmite directamente al RRH en la banda de frecuencia licenciada, que después de la conversión óptico/eléctrica es radiada por la antena. Esto habilita una implementación de RRH simple y rentable como muestra la Figura 53a.

La tecnología IFoF, similar a RFoF, transmite la señal móvil como una forma de onda análoga, pero la señal de la frecuencia portadora es transformada a una frecuencia intermedia, que es relativamente más baja que la frecuencia portadora de RF, como se muestra en la Figura 53b. En la RRH las señales de datos móviles son recuperadas de la señal óptica y convertidas a la frecuencia licenciada antes de ser emitidas. Aunque IFoF aumenta la complejidad de la RRH, requiriendo circuitos de conversión de frecuencia adicionales, puede proporcionar una asignación de ancho de banda flexible y una transmisión eficiente, ya que se podrían transmitir múltiples portadoras IF, utilizando una sola longitud de onda. Esta tecnología se aplica cuando la frecuencia portadora es muy alta, como en el caso de las bandas milimétricas, ya que la transmisión se ve afectada debido a la dispersión de la fibra inducida por el desvanecimiento.

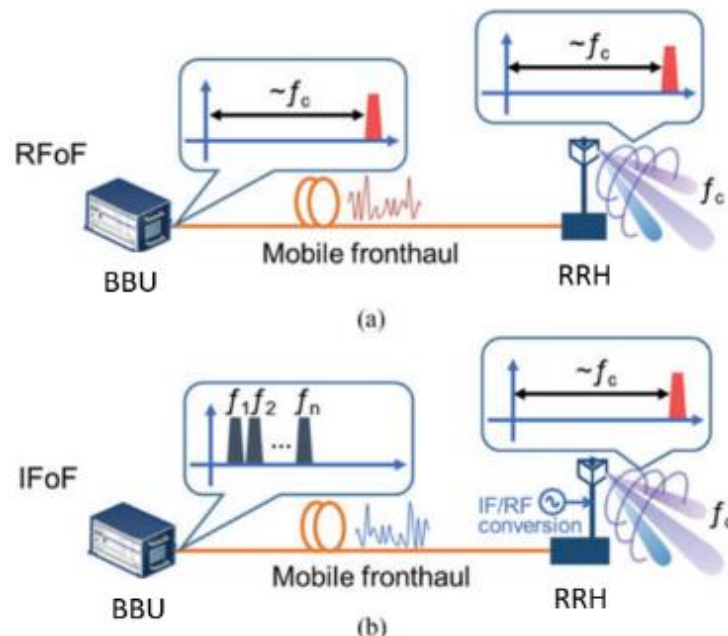


Figura 53. a) Radio Frecuencia sobre Fibra. b) Frecuencia Intermedia sobre Fibra
Fuente: *Demonstration of IFoF-Based Mobile Fronthaul in 5G Prototype with 28-GHz Millimeter wave*

Múltiples estudios se han realizado en torno a este método, como en [74], donde se presentan una arquitectura de acceso multiservicios inalámbrica de micro celdas, aplicando la tecnología C-RAN y técnicas avanzadas de fotónica para el transporte de señales de radio análogo sobre fibra.

El método implementado habilita la posibilidad de transportar, múltiples bandas, múltiples tecnologías, múltiples servicios y la coexistencia de múltiples operadores en una infraestructura compartida sin interferencias, usando multiplexación por división de longitud de onda (WDM). En la Figura 54, se muestra la comparación de la arquitectura A-RoF propuesta, con D-RoF.

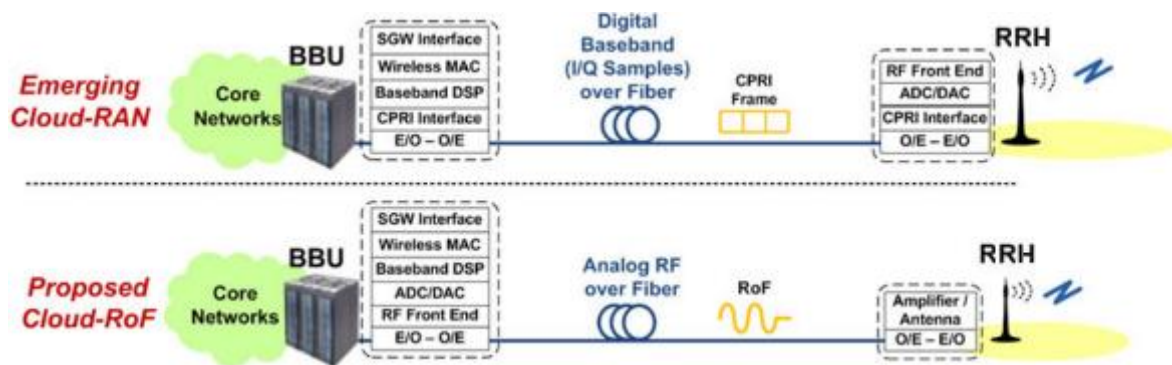


Figura 54. Arquitectura convencional C-RAN Vs C-RoF

Fuente: Key microwave-photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks

En el estudio mostrado en [75], se aplica la tecnología IFOF con WDM para satisfacer las necesidades en lugares de alta carga como un estadio. Para el enlace de fronthaul se usan circuitos integrados fotónicos (PIC) en el lado de la BBU y multiplexores ópticos reconfigurables de extracción e inserción (ROADM) de lado de la RRH, logrando velocidades de hasta 100Gbps, transportando múltiples portadoras de frecuencias intermedias.

En el estudio mostrado en [76], se propone usar la técnica A-RoF, asistida por un procesador digital de señales (DSP), implementado sobre una tarjeta de arreglo de compuertas programables en campo (FPGA). En esta técnica, una serie de canales IQ que corresponde a un canal CPRI, son multiplexados y transmitidos a través del enlace fronthaul

en un esquema de frecuencia intermedio sobre fibra (IFoF) como se muestran en la Figura 55.

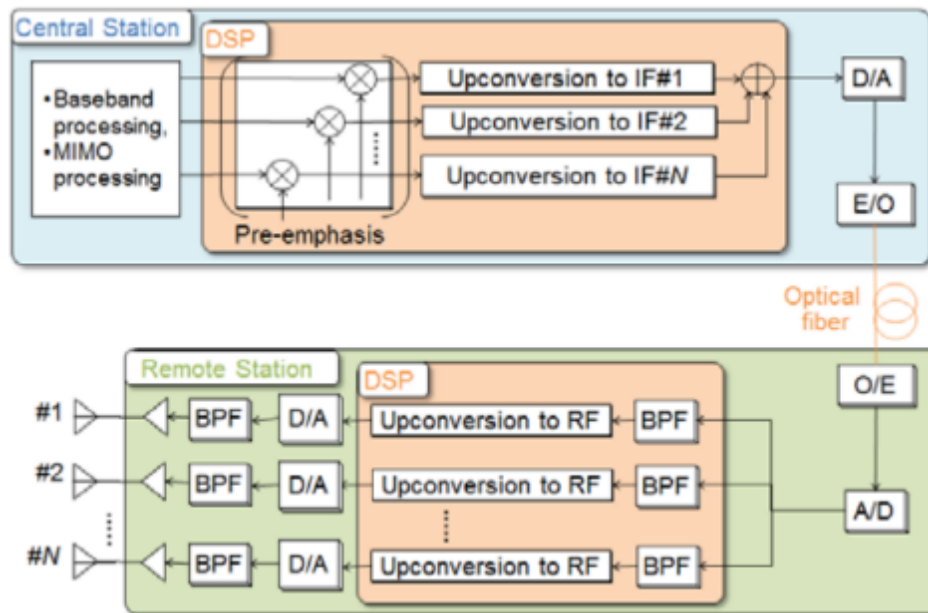


Figura 55. Técnica A-RoF asistido por un DSP

Fuente: *Solutions for future mobile fronthaul and access-network convergence*

En [77], se propone un esquema de transmisión híbrido analógico-digital, para entregar simultáneamente señales de banda base digital y señales de frecuencia intermedia (IF), para usuarios fijos e inalámbricos respectivamente, usando la red pasiva óptica.

Aunque el consenso industrial parece acordar que las soluciones a corto y mediano plazo sean de tipo D-RoF, en los estudios [78] y [79], dan como ganador a la tecnología A-RoF, comparando los costos de despliegue y los anchos de banda alcanzados, frente a la tecnología D-RoF, lo cual será crucial a la hora de desplegar la nueva generación 5G.

En la Figura 56 se muestra una comparación de los costos de despliegue para las distintas soluciones de Fronthaul: CPRI, A-RoF y División Funcional de Capa Física (PLS), con dos distintos escenarios en los que se tiene un cubrimiento del 40% y 90% de la población. Se considera que la solución de CPRI con un cubrimiento del 90% de la población corresponde al 100% de los costos.

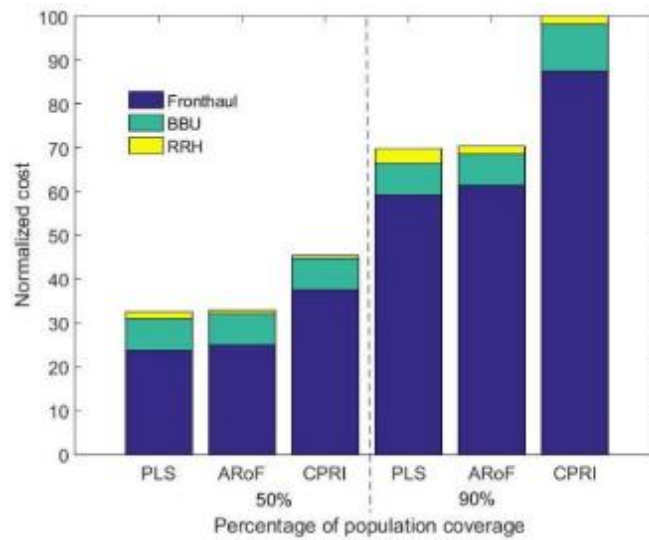


Figura 56. Comparación de Costos de las distintas soluciones de Fronthaul

Fuente: 5G C-RAN Architecture: A Comparison of Multiple Optical Fronthaul Networks

4.7 TECNOLOGÍAS DE TRANSPORTE DE FRONTHAUL

Dados los requerimientos de capacidad de la red fronthaul para una Centralización completa, la red de transporte solo será posible por Fibra óptica, ya que la capacidad ofrecida por otras tecnologías de transporte no alcanza las requeridas (Tabla 14). Sin embargo, si se realiza una Centralización parcial, es posible considerar una conexión por microondas, si además las distancias entre la BBU y la RRH no son muy grandes.

Son tres las posibles tecnologías de transporte a utilizar en la red fronthaul: microondas, ethernet y ópticas, las cuales deben ser capaces de satisfacer la estricta latencia, la fluctuación de fase y los requerimientos en anchos de banda de una forma costo eficiente [80].

Tabla 14. Desempeño de Tecnologías de Transporte

Fronthaul Technology	One-way Latency	Per-hop Latency	Throughput
NG-PON	2.5 μs	5 $\mu s/km$	Over 10 <i>Gbps</i>
GE-PON	10-30 <i>ms</i>	1 <i>ms</i>	10 <i>Mbps</i> -10 <i>Gbps</i>
EPON	5-10 <i>ms</i>	1 <i>ms</i>	10 <i>Mbps</i> -1 <i>Gbps</i>
Digital Subscriber Line Access	5-35 <i>ms</i>	5-35 <i>ms</i>	10 <i>Mbps</i> -100 <i>Mbps</i>
Cable	25-35 <i>ms</i>	25-35 <i>ms</i>	10 <i>Mbps</i> -100 <i>Mbps</i>
Wireless Communication (200 MHz - 6 GHz)	5-10 <i>ms</i>	5 <i>ms</i>	50 <i>Mbps</i> -1 <i>Gbps</i>
Microwave	< 1 <i>ms</i>	200 μs	100 <i>Mbps</i> -1 <i>Gbps</i>
Millimeter wave radio	< 1 <i>ms</i>	200 μs	500 <i>Mbps</i> -2 <i>Gbps</i>

Fuente: Recent Advanced in Cloud Radio Access Network

4.7.1 Radio enlaces

El uso de radio enlaces como fronthaul es ideal en aquellos escenarios en los que desplegar una solución física sea inviable, ya sea por coste o por la situación geográfica, y además donde la capacidad necesaria no sea tan exigente. Para estos enlaces se han considerado el uso de ondas milimétricas por los requerimientos de capacidad.

4.7.2 Ethernet

El transporte de fronthaul sobre Ethernet, consiste en encapsular el CPRI a través de Ethernet y transmitir los paquetes IQ sobre este, de modo que la cabeza remota se comporte como si fuese un Switch o un Router [61]. En el instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (IEEE) se define como el estándar 1904.3. Esta tecnología aplicada a la interfaz fronthaul es novedosa, ya que se pueden aprovechar las interfaces Ethernet y los equipos de conmutación existentes, pero no resuelve el problema de capacidad del enlace.

4.7.3 Red óptica

La red óptica es la tecnología de transporte más apropiada para la red fronthaul, debido a su alta capacidad y a la habilidad de garantizar la sincronización en tiempo entre los flujos

de tráfico. Dependiendo de los recursos en fibra que tenga el operador y el nivel de centralización, se pueden escoger entre distintos tipos de arquitecturas.

4.7.3.1 Conexión Punto a Punto

La conexión Punto a Punto es la solución preferida para un Pool de BBU con menos de 10 Macro estaciones [54] debido a los requerimientos de capacidad, siendo en este escenario, una solución de bajo costo, ya que no son necesarios equipos adicionales. Es utilizada ampliamente en las actuales redes tipo arquitectura de estación base con RRH. Para una arquitectura C-RAN, con un despliegue denso, no se considera viable por la cantidad de recursos de fibra necesarios.

4.7.3.2 WDM/OTN

Las tecnologías de multiplexación de longitud de Onda como WDM y redes de transporte óptico OTN, son soluciones adecuadas cuando hay recursos limitados de Fibra. Estas soluciones mejoran el ancho de banda permitiendo la transmisión de 20 a 80 longitudes de onda sobre un hilo de fibra. Usando estos conceptos en los despliegues de fibra ya existentes como las redes ópticas Pasivas (PON) o los anillos de área metropolitana, dichas redes pueden ser reusadas para cualquier tipo de tráfico incluido el de fronthaul. Estas tecnologías aumentan el precio del despliegue ya que deben ser utilizados equipos al principio y al final del enlace como se muestra en la Figura 57, pero a su vez reducen el costo total de la propiedad (TCO) al reutilizar redes existentes.

En el estudio [81], se propone una arquitectura red PON – móvil, mapeando los bloques de recursos físicos (PRB) de LTE en un bloque de transporte (TB) de PON de forma estática, sin sobrecarga adicional en el fronthaul, y un mapeo dinámico flexible, para mejorar la eficiencia. En [82], se propone una red fronthaul usando WDM, mostrando las ventajas en costos que se pueden llegar a tener. El autor propone usar PON o anillos metro para soportar el tráfico CPRI, implementando una solución WDM punto a punto llevando hasta 48 longitudes de Onda por fibra.

Sistemas como Multiplexación por longitud de Onda Gruesa (CWDM) y Multiplexación por Longitud de Onda Densa (DWDM), permiten multiplexar varias longitudes de Onda sobre una única fibra, reduciendo significativamente el número de fibras necesarias. Sus diferencias son el espaciado entre longitudes de onda, de 20nm en el caso de CWDM y de

4nm en el caso de DWDM. Como las longitudes de Onda se encuentran entre 1270 y 1610, tenemos que CWDM soporta hasta 18 canales independientes, mientras DWDM podrá llegar a 90.

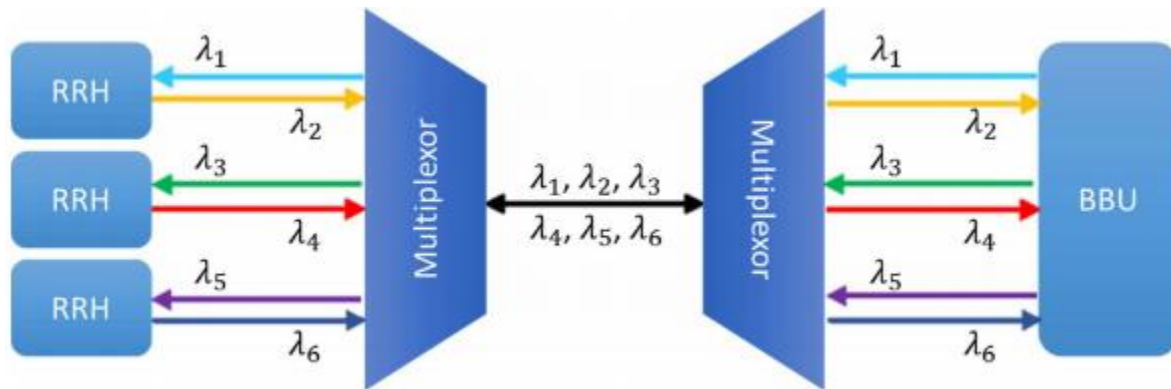


Figura 57. Multiplexación de Longitudes de Onda para el ahorro de Fibras

Fuente: Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio

4.7.3.3 Fibra hasta la casa (Fiber to the Home)

FTTH es una tecnología de acceso fijo conformada básicamente por un transmisor/receptor en la oficina central (CO) denominado terminal de línea óptica (OLT), que convierte los impulsos eléctricos en pulsos de luz, para ser transmitidos por la red de fibra óptica. En el punto terminal del cliente se incorpora un equipo capaz de convertir la luz que llega por la fibra nuevamente en impulsos eléctricos. Este equipo se denomina Unidad de Red Óptica (ONU) [83].

La topología utilizada comúnmente para la red FTTH es de tipo árbol punto a multi-punto, (una OLT compartida por múltiples ONUs), la cual es la tecnología usada por GPON. Como es necesario compartir el medio entre varios clientes, la red óptica cuenta con dos niveles de splitting (Splitting de 1er nivel y 2do nivel), donde parten las bifurcaciones de la fibra, como se muestra en la Figura 58.

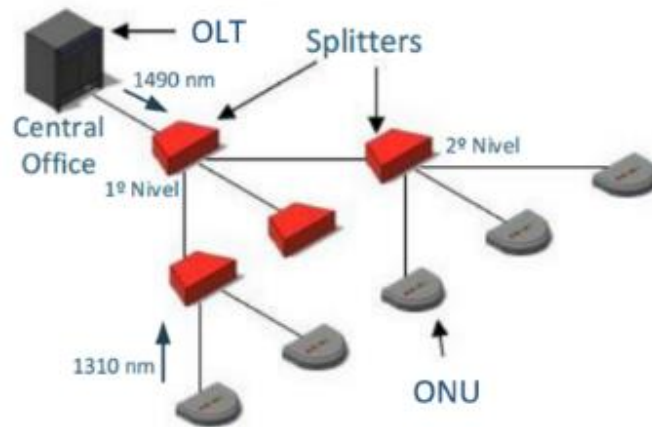


Figura 58. Red FTTH

Fuente: FTTH Course

Múltiples esfuerzos se han centrado en utilizar estas redes de acceso fijas para el transporte de la red de backhaul y fronthaul de las redes móviles, bajo el concepto de convergencia fijo-móvil (FMC), como en [84], donde Nokia Bell Labs muestra la posibilidad de usar las redes comerciales de próxima generación (NG-PON), para transportar transmisiones de CPRI de latencia ultra baja en un hilo de fibra, permitiendo realizar despliegues de small cells de forma rápida y rentable.

También, a finales de 2018, ZTE lanza su plataforma de acceso para fronthaul de 4G y 5G [85]. La plataforma provee tarjetas que manejan una capacidad de hasta 25Gbps por longitud de Onda y puede evolucionar a 50Gbps en un futuro próximo. Maneja una alta densidad de hasta 20x25G en cada canal, baja latencia y alta precisión en la sincronización temporal. Esta arquitectura de red propuesta que integra los servicios fijos y de fronthaul móvil, es nombrada TITAN OLT y se muestra en la Figura 59.

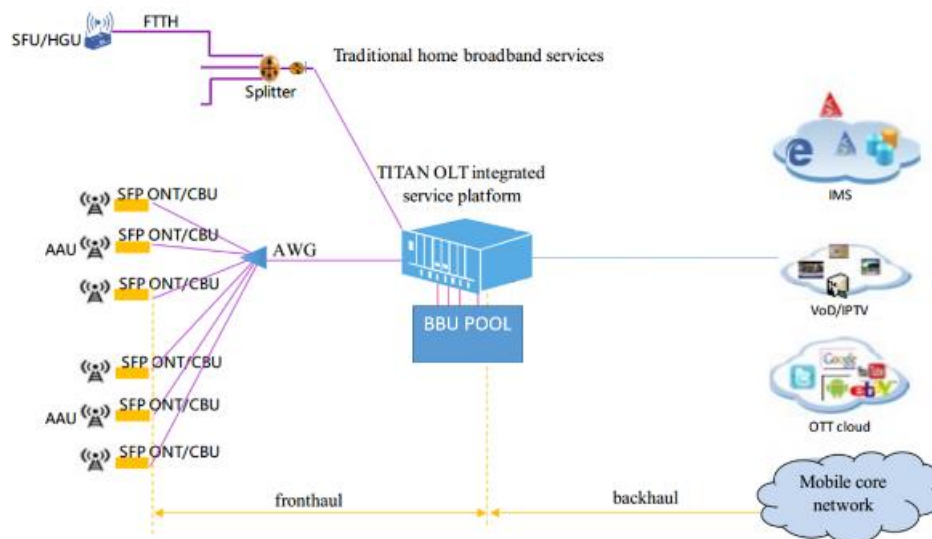


Figura 59. Arquitectura de red WDM-PON con TITAN OLT

Fuente: Research on 25G WDM-PON Bearer for 5G Fronthaul

En Europa se crea el proyecto de convergencia de acceso fijo y móvil de banda ancha (COMBO) [86], donde se analizan dos posibles soluciones, DWDM y NG-PON2 con fibra dedicada WDM para el fronthaul. DWDM permite la asignación flexible de longitudes de onda para el fronthaul móvil y backhaul de los servicios fijos. La flexibilidad es factible con el uso de multiplexores ópticos reconfigurables de extracción e inserción (ROADM). Para la segunda solución, las redes de distribución óptica basadas en divisores de potencia se compartirían para todos los servicios, excepto para los enlaces de fronthaul, los cuales se implementan con una fibra dedicada con WDM, por la necesidad de mayores requisitos de ancho de banda.

En resumen, en la Figura 60 se muestra una imagen con varias opciones de tecnologías de transporte, que pueden ser implementadas para la red fronthaul.

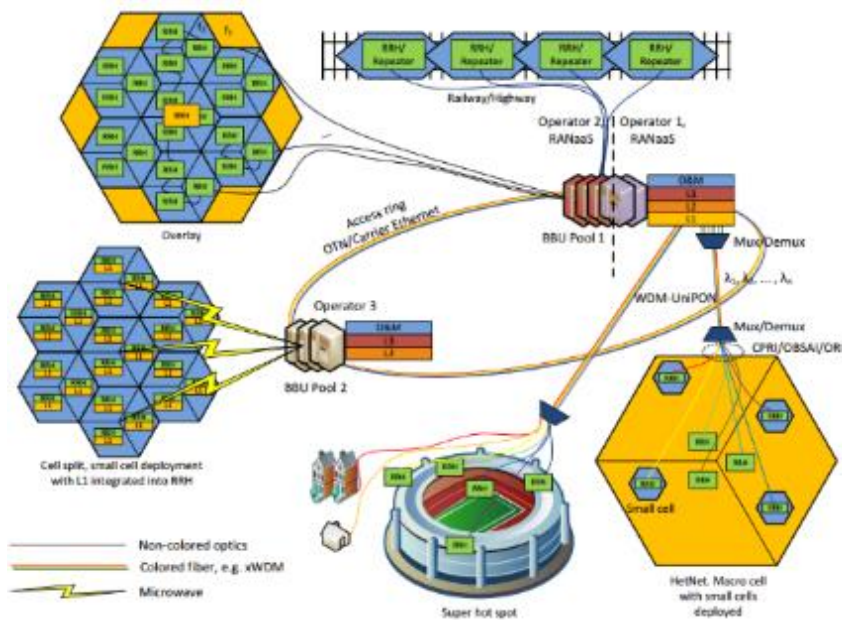


Figura 60. Tecnologías de Transporte de Fronthaul

Fuente: *Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview*

4.8 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 4

La arquitectura C-RAN nace como una solución novedosa propuesta por IBM e implementada y profundizada por China Mobile, con el fin de reducir costos Operativos.

Múltiples operadores en el mundo están adoptando este tipo de arquitectura realizando grandes inversiones para su implementación, más aún con el nuevo despliegue de la nueva generación 5G.

La interfaz fronthaul que conecta las unidades de procesamiento de banda base (BBU) con las cabezas remotas de radio (RRH), tienen grandes requerimientos en throughputs debido a la utilización de protocolos ampliamente usados de radio digital sobre fibra (D-RoF) como CPRI, los cuales son aproximadamente doce veces mayor a los requerimientos en aire, creciendo aún más con el uso de bandas milimétricas por los anchos de banda disponibles, y por la aplicación de la tecnología MIMO.

Varias soluciones han sido propuestas para hacer frente al throughput necesario para el fronthaul como: técnicas de compresión, división funcional entre la BBU y la RRH, y

aplicación de tecnologías de radio sobre fibra análogo (A-RoF), sin embargo, la industria ha dejado como primera opción la aplicación de técnicas (D-RoF) con división funcional a pesar de la reducción en las ganancias de procesamiento y de técnicas colaborativas que trae consigo la centralización completa , aunque las otras opciones no se dejan de lado, ya que con 5G la red fronthaul crecerá de forma exponencial.

De las opciones de transporte que pueden ser implementadas en C-RAN (Figura 60), como ethernet, microondas y ópticas, los fabricantes y operadores, se ha enfocado en utilizar las redes ópticas pasivas (PON), de los despliegues de las redes fijas FTTH, aprovechando los recursos disponibles en un concepto denominado, convergencia fijo móvil (FMC), combinándolo con WDM, así como se muestran las propuestas comerciales lanzadas por Huawei y China Unicom [87].

5 VENTAJAS DE C-RAN

Dentro de las ventajas que trae consigo la C-RAN están: eficiente utilización dinámica de los recursos de procesamiento, ya que posibilita la compartición entre distintas estaciones base, optimizando el rendimiento y mejorando la coordinación, con balanceo de carga y redundancia. Facilitar la implementación de features como CoMP, CA e ICIC debido a la cercanía de los equipos BBU de distintas estaciones base, permitiendo un scheduling inter-celular. Reducir el costo de despliegue y de operación, ya que disminuye el espacio de la estación por área de arrendamiento, y a su vez, mejorar los tiempos de respuesta de la Operación y actualizaciones, evitando el desplazamiento a los distintos lugares donde se ubican los emplazamientos. Reducir el consumo de potencia, al no utilizar aires acondicionados en todas las estaciones base, sino solo uno centralizado para el control de temperatura en la CO, además, por la utilización de menores recursos de procesamiento.

Resumiendo, las motivaciones de CRAN se pueden clasificar en: Adaptabilidad al tráfico no uniforme y escalabilidad, ahorro de energía y costos, Incremento en Throughput y disminución de latencia, y Facilidad en actualizaciones y mantenimiento de la red.

La Adaptabilidad al tráfico no uniforme y escalabilidad, tiene que ver con lo dicho anteriormente, de que el tráfico en una red celular no es uniforme, ni en el espacio, ni en el tiempo, y que al realizar el diseño de una estación base conforme al tráfico pico que esta tiene durante el día, los recursos de procesamiento se desperdician en las horas valle. Por lo tanto, al centralizar las BBU, se mejora el promedio de utilización, ya que los recursos de procesamiento serán menores, respecto a la suma de todas las estaciones base. La relación entre la suma de los recursos de procesamiento de las estaciones base y la capacidad requerida en el Pool es llamada Ganancia de Multiplexación estadística (SMG).

En la Figura 61, se muestra el comportamiento del tráfico de una celda que cubre una zona de oficinas y otra que cubre una zona residencial. Al efecto donde el tráfico es mayor en horario laboral en la zona de oficinas, y en las noches en la zona residencial, se le denomina, marea.

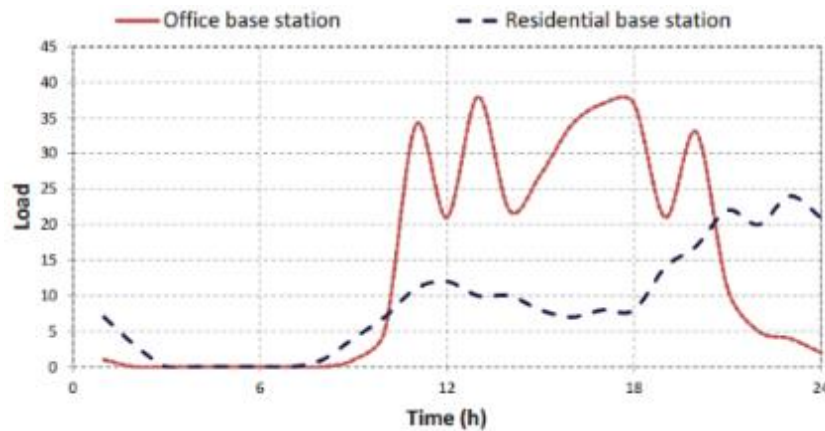


Figura 61. Efecto marea

Fuente: C-RAN. The Road Towards Green RAN

Teniendo en cuenta el efecto marea expuesto en [54], en el estudio realizado en [88] se realizaron simulaciones con distintos modelos para determinar la mayor ganancia en C-RAN dependiendo del perfil de tráfico analizado. Al centralizar el 20-30% de eNBs de oficina y 70-80% de eNBs residenciales, se logró una máxima SMG de 1.6 que corresponde a una reducción de BBU del 38%. Además, dicho estudio determinó que, si hay una relación de tres o más, entre el costo de una BBU, frente al costo de despliegue de 1km de fibra, la centralización es viable, logrando obtener mejores resultados centralizando áreas pequeñas de 100km² en comparación a 400km², por lo tanto, C-RAN es más prometedor para zonas urbanas con alta densificación de celdas.

En el estudio realizado en [89], se realiza una comparación entre las ganancias de Multiplexación para las distintas divisiones funcionales, concluyendo que la mayor ganancia es lograda con la C-RAN completa (BB-RF).

En términos de escalabilidad, la instalación de una nueva estación base para ampliar cobertura en una arquitectura C-RAN, representaría en conectar nuevas RRH's al Pool de BBU existente, haciendo mucho más fácil y ágil el despliegue [48], asemejándose a la instalación de líneas telefónicas fijas.

Con respecto a la reducción en los costos de energía, en [54], se especifica un ahorro del 71% en comparación con una arquitectura RAN tradicional, además, se calcula que el costo total de la propiedad (TCO) se divide en 60% OPEX y 40% CAPEX, y que con el uso de C-

RAN se tendrá un ahorro en 15% en el CAPEX y 50% en el Opex, debido a la menor cantidad de BBU necesarias por la centralización y reducción en potencia por un menor uso de aires acondicionados.

En lo que respecta a la mejora en Througputs y demoras, C-RAN facilita la implementación de ICIC, CoMP y CA, ya que dichos features tienen altos requerimientos en sincronismo temporal y debido a que las BBU se encuentran a poca distancia, estos requerimientos son cumplidos fácilmente. Las estaciones base pueden compartir señalización, datos de tráfico e información del estado del canal, permitiendo un scheduling conjunto y control de potencia sobre múltiples celdas en vez de una. En el estudio presentado en [54], se muestran las ganancias de CoMP Intra-eNB e Inter-eNB con C-RAN, logrando una mejora en la eficiencia espectral de 13% y 20% respectivamente para usuarios cercanos, y 75% y 119% para usuarios en borde de celda.

5.1 DESPLIEGUES DE C-RAN EN EL MUNDO

C-RAN ha sido un tipo de arquitectura novedosa, que desde el 2010, ha sido implementada en varias operaciones en el mundo. Operadores como China Mobile (China), SK Telecom (Sur Korea), AT&T, Sprint, Verizon (Estados Unidos), Orange, Vodafone, Telecom Italia Mobile, Telefónica (Europa), Soft Bank, NTT Docomo (Japón), están adoptando C-RAN, como preparación al despliegue de redes 5G. Según el estudio realizado por SNS Telecom a finales de 2017, las inversiones globales de C-RAN estarían cerca de los 9 Billones de dólares, y estima que el mercado crezca a una tasa anual compuesta del 24% entre el 2017 y 2020 [90].

5.2 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO 5

Muchas son las ventajas que trae consigo desplegar una red de radio acceso centralizada, sin embargo, los operadores que no han implementado este tipo de solución deben extrapolarlas a dinero, para ver si el retorno de la inversión es viable y se puede llegar a un punto de equilibrio.

A pesar de que C-RAN, no es un estándar definido por la 3GPP, los operadores en el mundo están apostando por este tipo de despliegue, por lo que las experiencias adquiridas serán un punto de referencia para los fabricantes que ofrezcan este tipo de solución.

6 ESTRATEGIA DE DESPLIEGUE DE UNA C-RAN LTE PARA UN OPERADOR MÓVIL EN COLOMBIA (MOVISTAR), EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ Y SOACHA, ENCAMINADA AL DESARROLLO DE REDES 5G.

En una red celular, la RAN es el activo más importante del operador, porque se requiere de una gran inversión de dinero, tiempo y recursos, ya que, para su despliegue, es necesario contar con permisos de uso del espectro, licencias de construcción de las redes que interconectan las estaciones base con la red núcleo, así como de la instalación de las estaciones base mismas, cánones de arrendamiento, inversión en equipos de transmisión, radio y energía, y contratación de personal calificado, entre otros.

En la RAN, ha habido cambios en los métodos de acceso, así como en la aplicación de nuevas tecnologías y arquitecturas, tendientes a facilitar el despliegue con equipos cada vez más sofisticados y de menor tamaño, y en aprovechar al máximo el espectro disponible de los operadores, trazando una tendencia a nuevas estrategias para su instalación.

La regulación en las TIC cumple un papel fundamental, en el desarrollo de las redes de telecomunicaciones y está fuertemente ligado al despliegue de la RAN celular, ya que influirá en muchos aspectos importantes y estará en todo el proceso de principio a fin.

En Colombia, el MinTic actualmente está trabajando de la mano con las gobernaciones y alcaldías de todos los municipios, para eliminar las barreras normativas, revisando los planes de ordenamiento territorial y definiendo condiciones y procedimientos para la instalación de infraestructuras de telecomunicaciones, ya que este despliegue depende de las políticas públicas de cada municipio. Actualmente 774 municipios de los 1103 totales, ya se alinearon a la normativa promovida a nivel nacional, en los que están Bogotá y Soacha [91].

Todos estos esfuerzos están enfocados a promover la conectividad de todas las personas del territorio nacional, ofreciendo servicios de alta calidad, adelantándose a las necesidades con las que deberá contarse, para el despliegue de la quinta generación de red celular.

Actualmente en Colombia se tienen desplegadas las tecnologías GSM, UMTS y LTE, y se está en curso con pruebas piloto para el despliegue de redes 5G [2]. Por lo tanto, partiendo

de la última tecnología desplegada por los operadores, LTE, y aplicando un tipo de arquitectura inicialmente combinada o compuesta (NSA), en este trabajo de grado se define una estrategia para implementar una red de acceso novedosa de tipo C-RAN, viendo la importancia que en un futuro traerá consigo, alineado con el concepto de la quinta generación, de tener una red completamente virtual, más ágil y optimizada en costes.

En la Figura 62 se identifican los pasos para la realización de la estrategia de despliegue de la red de acceso centralizada.

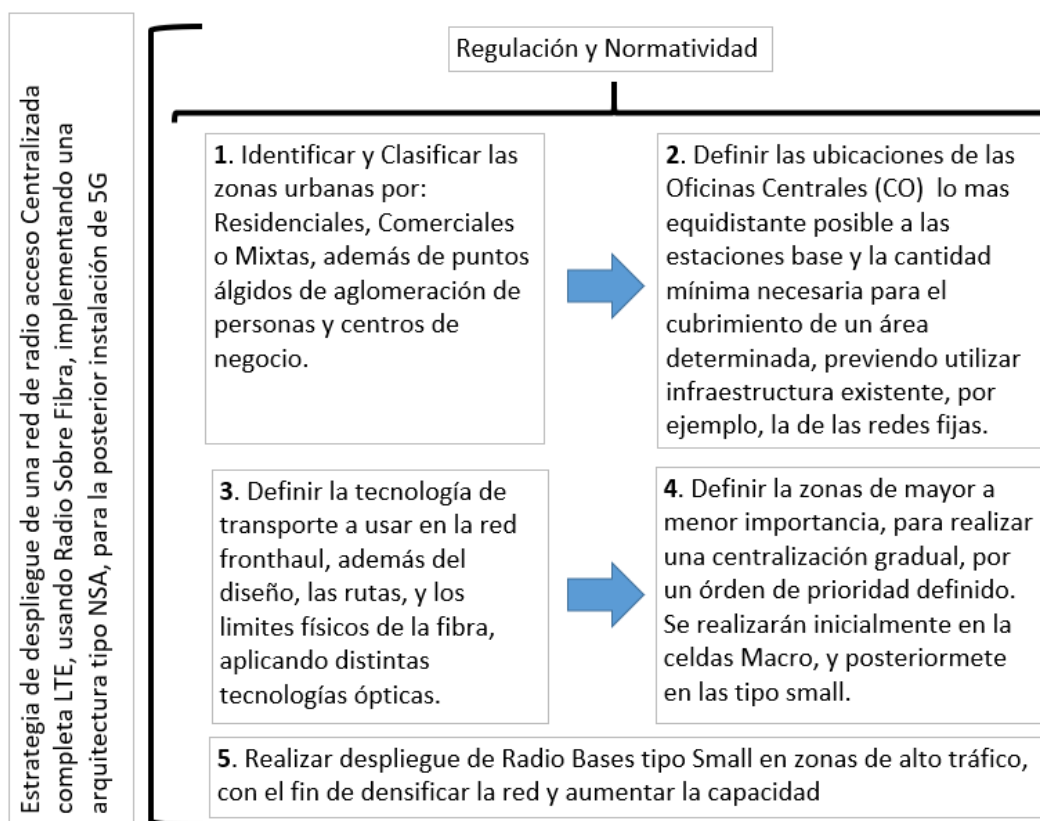


Figura 62. Pasos para el despliegue de una red de Radio Acceso Centralizada

Fuente: Creación propia

La regulación y normatividad como se había dicho, cumple un papel fundamental para el despliegue de la RAN y es transversal a todos sus procesos, ya que es necesario contar con permisos y licencias de construcción para la red de transporte (fronthaul y backhaul), así como para las estaciones base, definiendo costos regularizados de uso del espacio

público, que permitan una densificación de la red, como se ha venido implementando en otros países [92].

Inicialmente viendo la importancia que tendría el despliegue de la C-RAN, es necesario realizar una planeación general, para después ir implementando de forma gradual, con una meta ya establecida.

Por lo tanto, el primer paso es identificar y clasificar las zonas urbanas por, residenciales, comerciales, o mixtas, además de los puntos donde existan aglomeración de personas, como por ejemplo en Bogotá, El Campin, Movistar Arena, Centros Comerciales, etc. También será necesario identificar los centros de negocios como los son, Parque Bavaria, Calle 72, y Teleport.

Esto se hace con el fin de lograr una ganancia en la cantidad de recursos de procesamiento, agrupando eNBs con distintos perfiles de tráfico, aprovechando el efecto marea que poseen las redes celulares en todo el mundo, como se muestran en [93].

Para redes ya existentes LTE, los eNBs se podrían clasificar de la forma anteriormente dicha, y así realizar de forma directa la agrupación. Con base en el estudio [88], los mejores resultados se dan agrupando el 20-30% de eNBs de oficina con el 70-80% de eNBs residenciales.

El segundo paso es definir las ubicaciones de las oficinas centrales (CO), y que cantidad mínima son necesarias para cubrir un área determinada, que en nuestro caso, son los cascos urbanos de Bogotá y Soacha. Con base en las conclusiones del estudio [88] se realiza el cálculo, donde se especifica, que se logra una mejor relación entre el costo del despliegue de fibra frente al costo de una BBU, al centralizar áreas de aproximadamente 100 kilómetros cuadrados o menores.

Por lo tanto, si dividimos el área total del casco urbano de Bogotá y Soacha el cual es de aproximadamente 381 kilómetros cuadrados, entre áreas de 100 kilómetros cuadrados, la cantidad mínima de Oficinas Centrales (CO) necesarias, será de 4.

La cantidad de COs pueden variar procurando que siempre sean mayor al número ya especificado. Hay que recalcar que sus ubicaciones deben ser en puntos equidistantes a

los eNBs, además de que en redes existentes se puedan utilizar las mismas centrales de las redes fijas, con sus ducterías, postes y armarios, lo que para nuestro ejemplo es decisivo, ya que Movistar cuenta con esta infraestructura.

El tercer paso corresponde en definir la interconexión de las RRH con el Pool de BBU, por lo que se considera el uso de enlaces de fibra óptica, debido principalmente a los requerimientos en ancho de banda y latencia, que se necesitarán para la red fronthaul, y que serán aún más estrictos con el despliegue de las redes 5G.

En la red de transporte, con base en las tendencias internacionales, se sugiere utilizar la tecnología PON desplegada para los servicios de FTTH, debido principalmente a ahorros significativos en inversión y costos operativos, que supone tener la reutilización de los recursos en ductos, postes y armarios, usando el concepto de redes convergentes y no físicamente separadas [3]. Esta arquitectura tipo árbol con la tecnología WDM-PON [85], se especifica para manejar velocidades de hasta 25Gbps por longitud de onda, lo cual corresponde a la tasa máxima actual del protocolo CPRI, y una densidad de 20 longitudes de onda por fibra.

Considerando que los recursos de fibra óptica del operador sean limitados, la solución más factible es la centralización parcial, con división funcional de la capa física o MAC, para reducir y adaptar el Fronthaul, usando el protocolo actual CPRI. La centralización parcial, sin embargo, reduce la coordinación entre celdas, usa un menor procesamiento en el pool de BBU y tiene un mayor consumo de energía, frente a una centralización completa [89], por lo que la segunda, debe ser el objetivo final del operador y será considerada para realizar los cálculos de los límites físicos de la fibra óptica.

Los cálculos se realizarán para un despliegue en la ciudad de Bogotá y Soacha, de una C-RAN completa LTE, para el Operador Movistar, considerando que cada eNB estará conformado por tres sectores y MIMO 4x4.

Se calcula la capacidad necesaria para cada eNB, teniendo en cuenta el transporte de las portadoras del Operador en el enlace descendente, más una portadora en la banda de 3.5GHz con 50MHz de ancho de banda, como posible futura banda de 5G, según el plan del ministerio de las TIC, aplicando una arquitectura NSA [2].

En la Tabla 15, se muestran los cálculos en capacidad en CPRI y aire, necesarios para transportar cada banda aplicando las fórmulas (2) y (3) respectivamente.

$$B_{CPRI} = \#Sectores * CantAntenas * f_s * 15 * 2 * \frac{16}{15} * \frac{10}{8} \quad (2)$$

$$B_{aire} = \#Sectores * CantAntenas * CantPRB * 1Mbps_{(Modulación\ 64QAM)} \quad (3)$$

Tabla 15. Cálculo de Thr aire / Thr CPRI para las Bandas del Operador Movistar
+ MIMO 4x4 + 3Sectores

	BANDA 850MHz	BANDA 1900MHz	BANDA AWS	BANDA 3.5MHz (Supuesta Para 5G)
Espectro(MHz)	894MHz - 881.5MHz	1962.5MHz - 1947.5MHz	2140MHz - 2125MHz	3550MHz - 3500
Ancho de Banda(MHz)	12.5Mhz	15MHz	15MHz	50MHz
Canalización LTE	1Port(10MHz) + 1Pot(1.4MHz)	1Port(15MHz)	1Port(15MHz)	1Port(50MHz)
Cantidad de PRB	56	75	75	250
Thr Aire(Mbps)/Thr CPRI(Mbps)	56Mbps/691.98	75Mbps/921.56	75Mbps/921.56	250Mbps/3072Mbps
MIMO 4X4(Mbps)	224/2762	300/3686	300/3686	1000/12288
3 Sectores (Mbps)	672/8286	900/11058	900/11058	3000/36864

Fuente: Creación propia

De aquí podemos ver que la relación de capacidad en aire versus la capacidad en CPRI, es aproximadamente 12 veces mayor, siendo la de aire, 5472Mbps y la de CPRI, 67266Mbps. Aplicando técnicas de compresión, se puede llegar a reducir hasta en un 50%, la capacidad en CPRI [94], obteniendo un ancho de banda final de 33633Mbps. Como la capacidad máxima de CPRI actual es de 25Gbps, se requeriría un total de 2 longitudes de onda en la red fronthaul por cada eNB, por lo tanto, si tenemos una densidad de 20 longitudes de onda por fibra, se manejaría una agrupación de 10 eNBs por fibra, como se muestra en la Figura 63. La Fibra iniciará desde la OLT, donde estará ubicada el Pool de BBU en la CO, y llegará hasta un Multiplexor-Demultiplexor (AWG), que conectará al eNB por medio de una ONU.

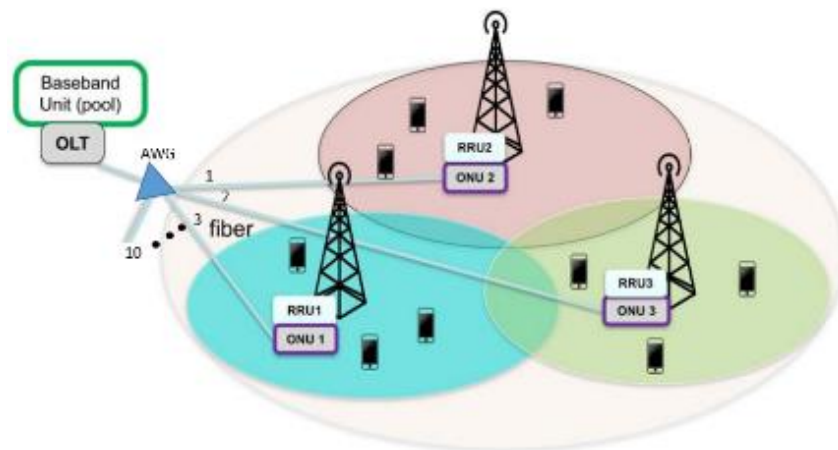


Figura 63. Esquema del uso de WDM-PON usando CPRI en la red Fronthaul

Fuente: Low-latency high-efficiency mobile fronthaul with TDM-PON

Otra forma de realizar el transporte de las portadoras es haciendo uso de la tecnología A-RoF. Para evaluar esta tecnología, supondremos dos enlaces de fibra de 3 y 24 kilómetros que equivaldrían a conectar una (CO) ubicada en las oficinas de Morato en la dirección Av Suba # 114ª 55, con una zona céntrica del parque de la 93, y con una zona céntrica del municipio de Soacha respectivamente. Usando paquetes de simulación, podremos especificar límites físicos según los resultados.



Figura 64. Tramo de Fibra desde Morato a Soacha

Fuente: Creación propia

Usando el paquete de simulación Optisystem versión 11.0.1, se realiza el esquema mostrado en la Figura 65 . Este esquema se utiliza para realizar las simulaciones en cada banda del operador, o sea, 850MHz, 1900MHz, AWS y 3500MHz, ya que, cada portadora se transportará en una longitud de onda diferente. Utilizando tercera ventana de longitudes de onda que van desde 1530 a 1565 nanómetros y una separación de longitudes de onda de 0.8nm, la cantidad de longitudes de onda disponibles serán de 43, por lo que cada fibra manejará una agrupación de 10 eNBs, igual a como se especificó al utilizar CPRI.

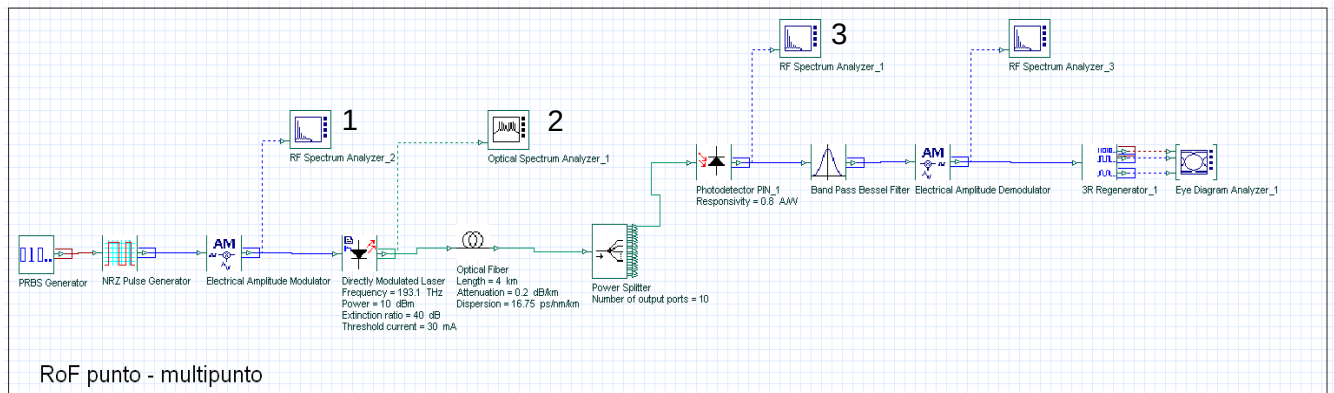


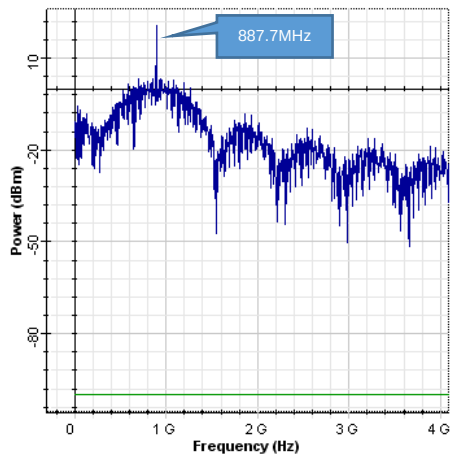
Figura 65. Esquema de A-RoF, Punto a Multipunto para el transporte de portadoras de Movistar

Fuente: Creación propia

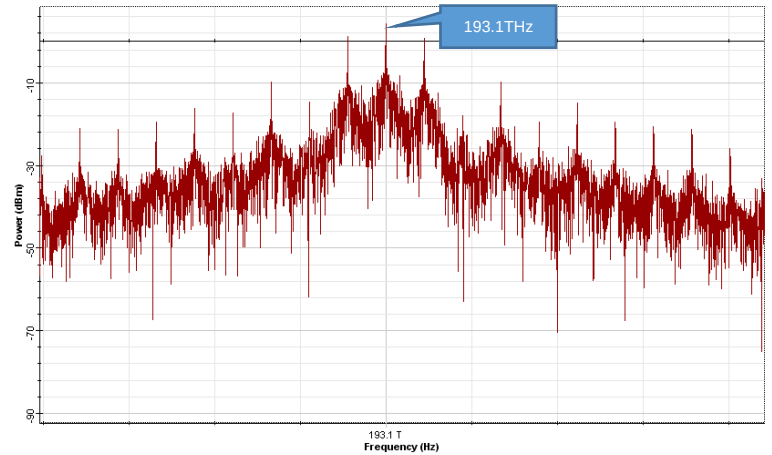
El esquema muestra un generador de pulsos pseudoaleatorio que simula la capacidad en aire alcanzados en cada banda del operador, de, 672Mbps, 900Mbps y 3000Mbps como muestra la Tabla 15, los cuales representan la información a enviar. Estos bits se mezclan con las señales portadoras en su frecuencia central, 887.7MHz, 1955MHz, 2132.5MHz y 3525MHz, obteniendo la señal modulada en AM, la cual se muestra en el literal a, de la Figura 66, Figura 67, Figura 68 y Figura 69 , para las bandas, 850MHz, 1900MHz, AWS y 3500MHz, respectivamente. Posteriormente, esta señal se mezcla con una portadora óptica en 193.1THz para ser enviada sobre la fibra, el resultado de esta señal modulada se muestra en el literal b, de las figuras. En el receptor, la señal se recupera con un fotodetector y se muestra su resultado en el literal c de las figuras, para después de filtrada, transmitirse a través de la antena.

La forma de visualización y análisis de los datos en el receptor se realizan usando diagramas de ojo, analizando las formas de onda de los pulsos recibidos en un tiempo de

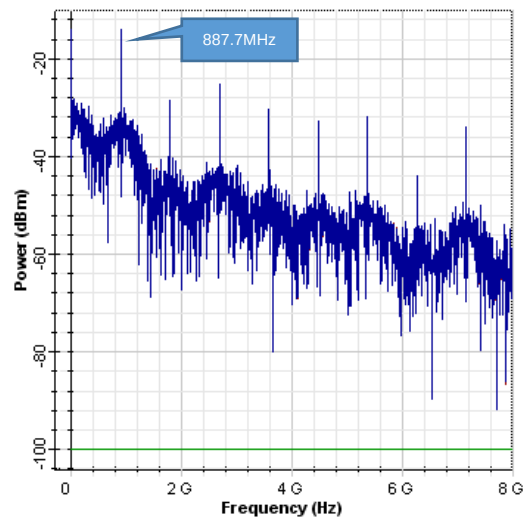
bit, determinando: desfases, niveles de ruido, potencia de las señales, y tasa de error binario (BER), para cada una de las distancias de los enlaces evaluados. En el literal d de las figuras, se muestra el resultado para 3km, y en literal e, para 24km.



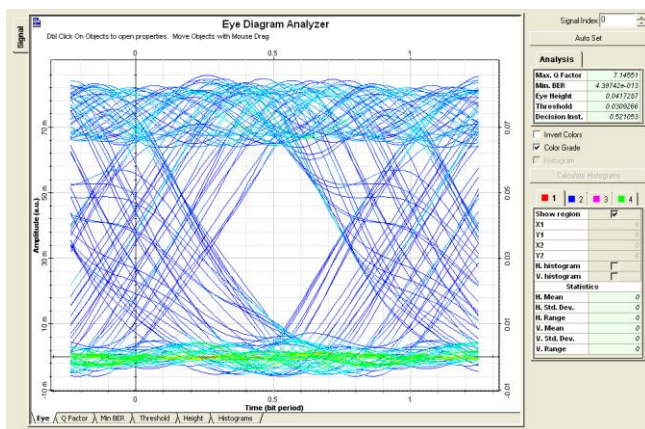
a) Señal modulada en AM. Punto 1 del esquema



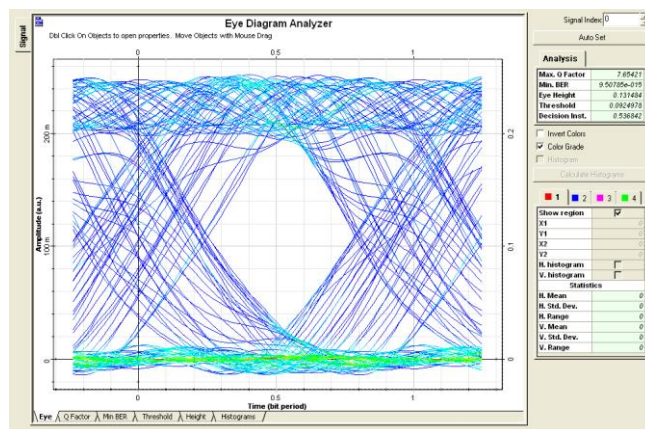
b) Mezcla señal AM y portadora óptica. Punto 2 del esquema



c) Señal recuperada en receptor. Punto 3 del esquema



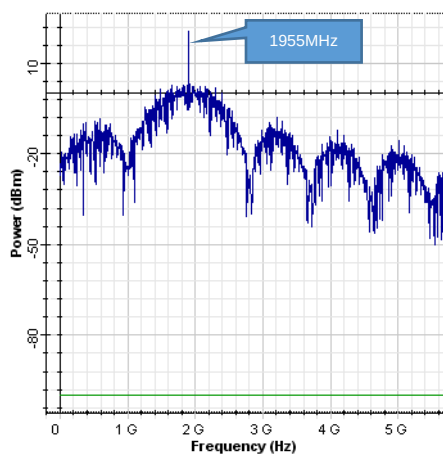
d) Diagrama de ojo para enlace de 3km



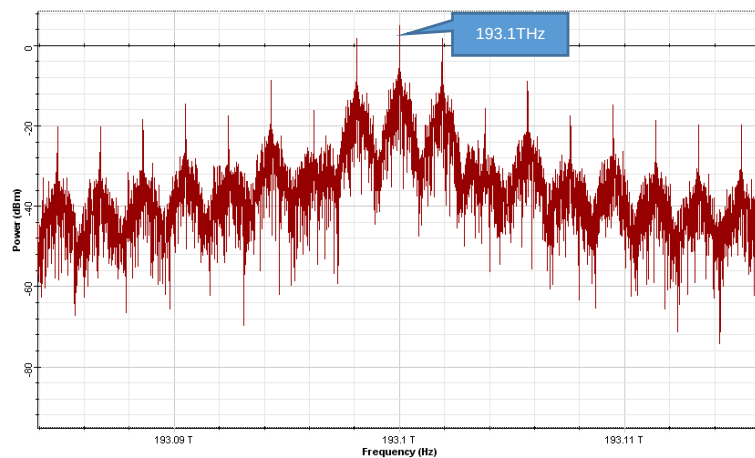
e) Diagrama de ojo para enlace de 24km

Figura 66. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora de 850MHz

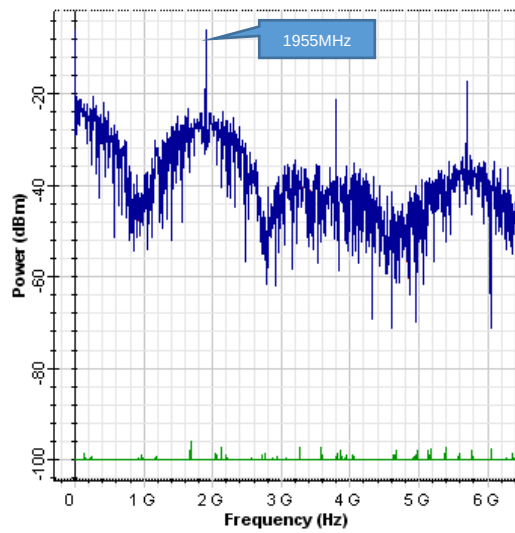
Fuente: Creación propia



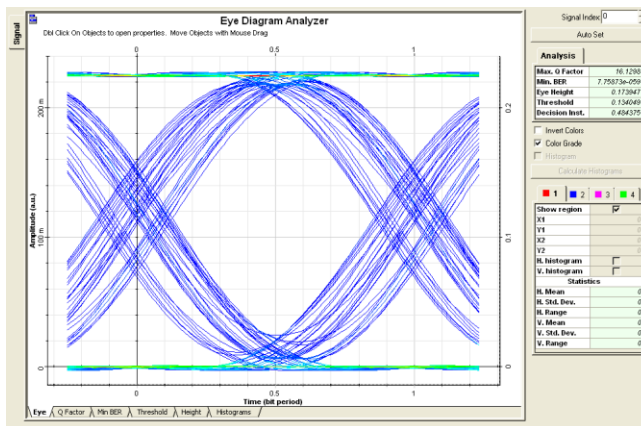
a) Señal modulada en AM. Punto 1 del esquema



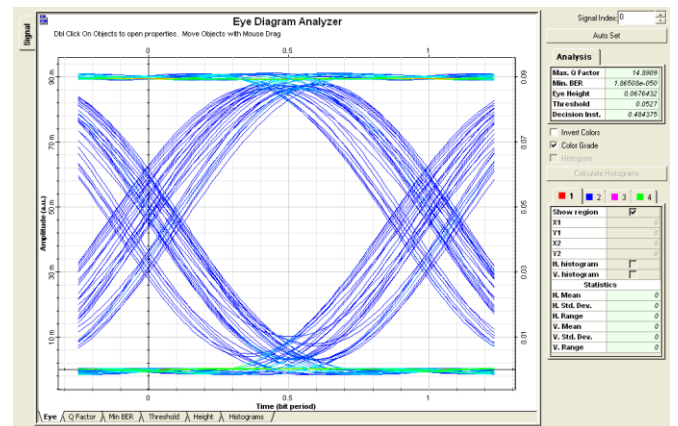
b) Mezcla señal AM y portadora óptica. Punto 2 del esquema



c) Señal recuperada en receptor. Punto 3 del esquema



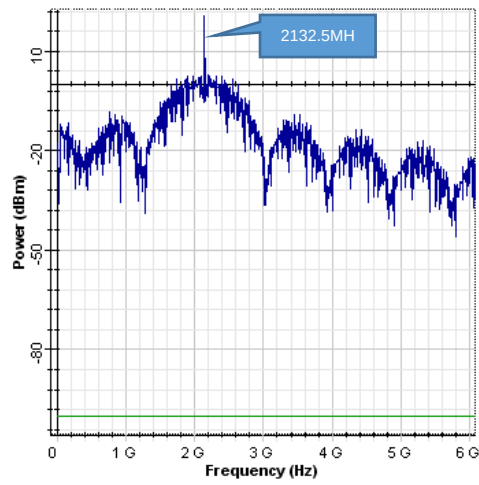
d) Diagrama de ojo para enlace de 3km



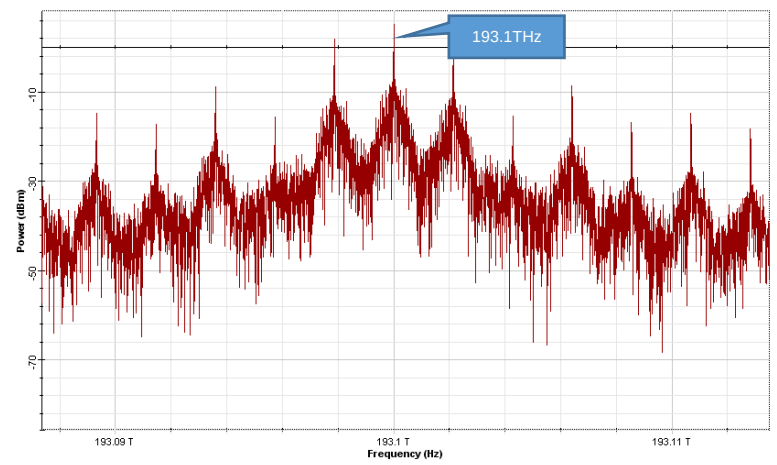
e) Diagrama de ojo para enlace de 24km

Figura 67. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora de 1900MHz

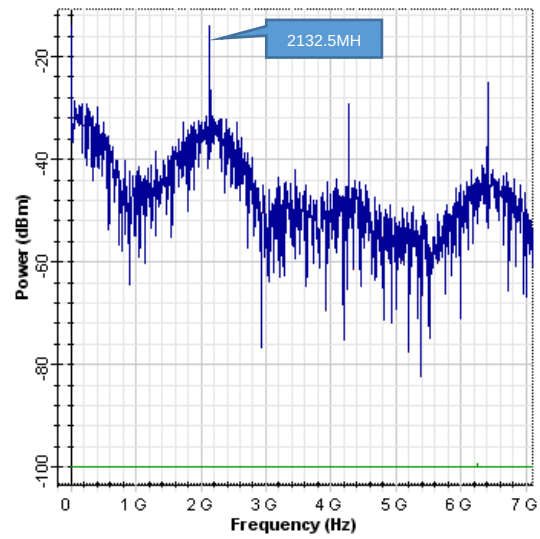
Fuente: Creación propia



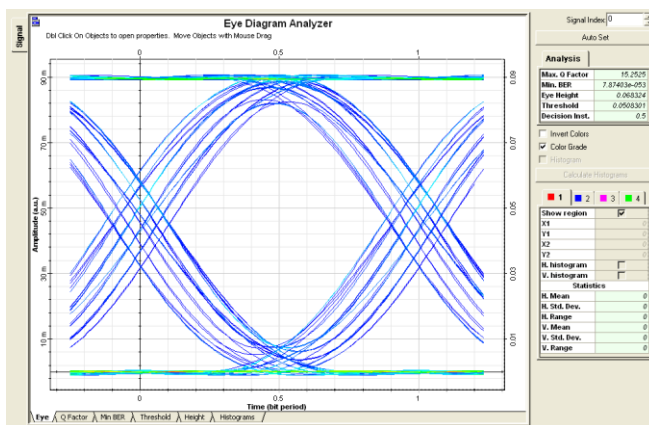
a) Señal modulada en AM. Punto 1 del esquema



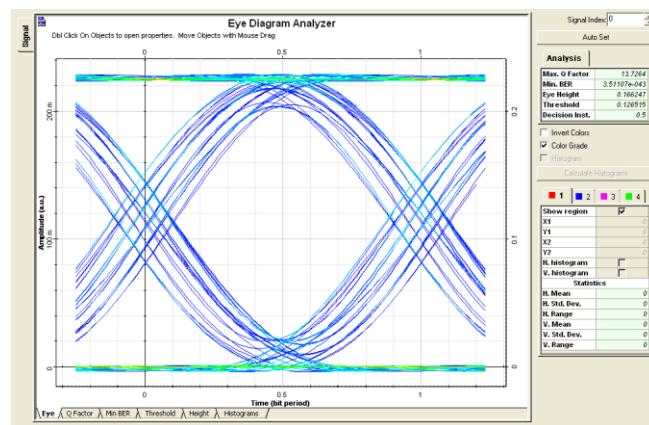
b) Mezcla señal AM y portadora óptica. Punto 2 del esquema



c) Señal recuperada en receptor. Punto 3 del esquema



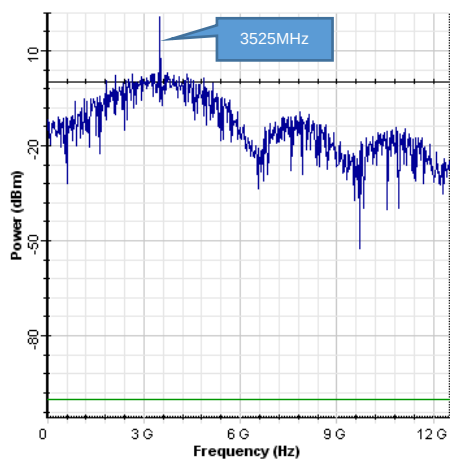
d) Diagrama de ojo para enlace de 3km



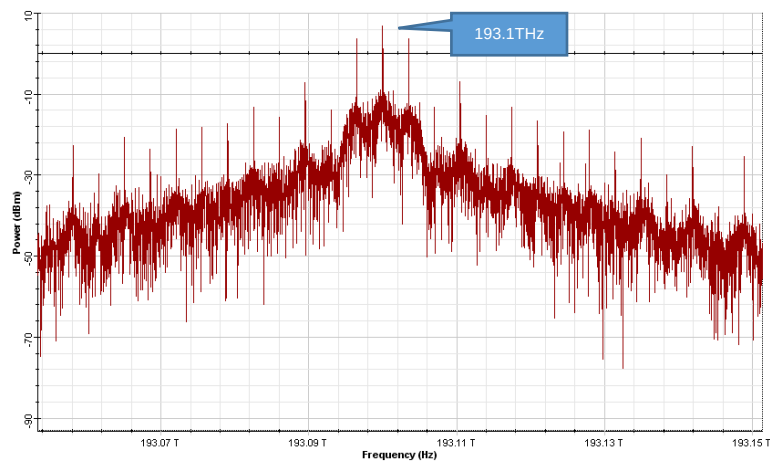
e) Diagrama de ojo para enlace de 24km

Figura 68. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora AWS

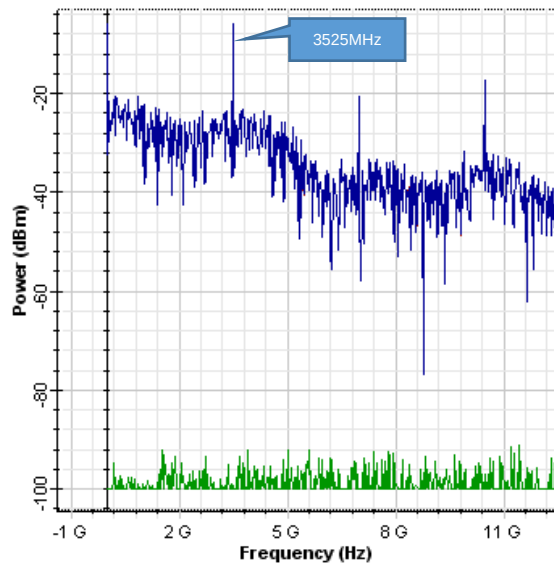
Fuente: Creación propia



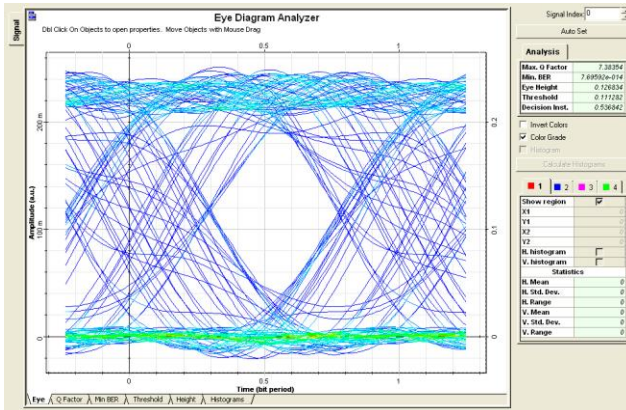
a) Señal modulada en AM. Punto 1 del esquema



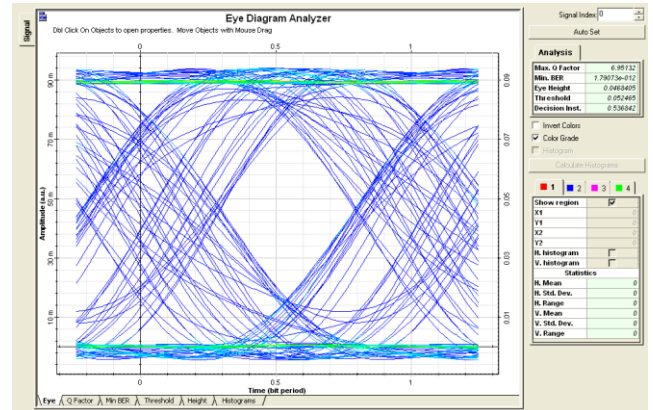
b) Mezcla señal AM y portadora óptica. Punto 2 del esquema



c) Señal recuperada en receptor. Punto 3 del esquema



d) Diagrama de ojo para enlace de 3km



e) Diagrama de ojo para enlace de 24km

Figura 69. Espectro en dominio RF - óptico y Diagrama de ojo para portadora de 3500MHz

Fuente: Creación propia

De los resultados podemos ver que para una distancia de hasta 24km, transportando cada portadora sobre una longitud de onda diferente, los resultados en BER de 10^{-12} , son cumplidos satisfactoriamente, como dicta el estudio [63] .

Ahora, con el fin de optimizar los recursos de fibra, se prueba realizar una simulación donde se combinen todas las cuatro portadoras, y se envíen sobre una sola longitud de onda. Sin

embargo, debido a que las portadoras de 1900 y AWS están muy cercanas y se solapan, es necesario implementar un WDM, por lo que una longitud de onda transportaría las portadoras de 850MHz, 1900MHz y 3500MHz, y otra transportaría la portadora de AWS, de esta forma cada fibra manejará una agrupación de 21 eNBs, logrando una ganancia en la utilización de recursos de fibra.

En la Figura 70, se muestra el esquema implementado, combinando varias portadoras en una sola longitud de onda.

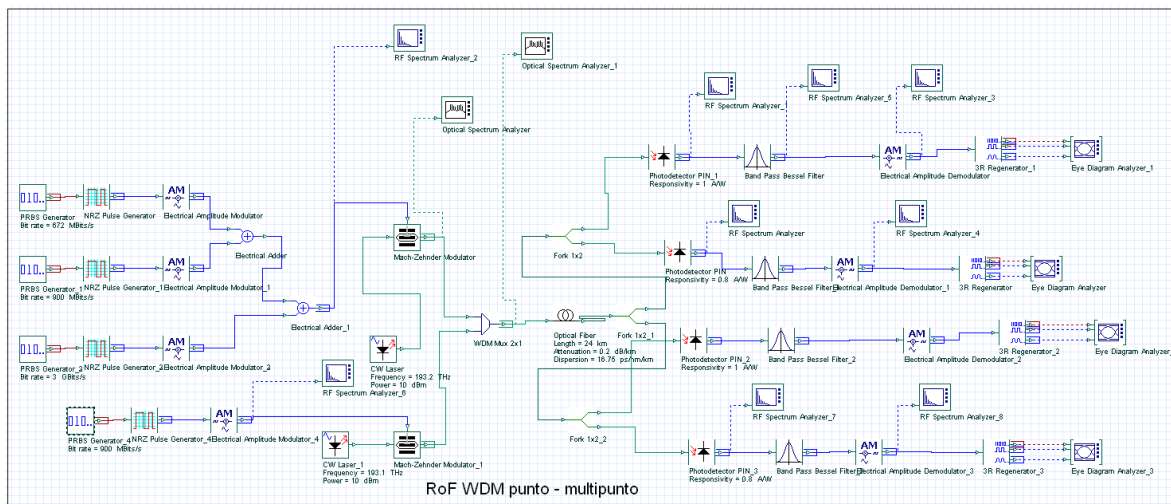


Figura 70. Esquema de A-RoF optimizado para el transporte de portadoras de Movistar

Fuente: Creación propia

Al igual que en el esquema anterior, el generador de pulsos envía la información a la capacidad soportada por cada banda, y es mezclada con las portadoras en su frecuencia central, obteniendo las señales moduladas en AM. Como se había dicho anteriormente las señales moduladas de las bandas 850MHz, 1900MHz y 3500MHz, se adicionan para luego mezclarse con una señal óptica generadas por un modulador externo tipo Mach-Zehnder para posteriormente ser enviadas sobre un enlace de fibra de 24km. Del otro lado, la señal se recupera, con un fotodetector, y después de filtradas las señales se transmiten por la antena. La señal modulada en AM para la banda AWS es enviada en una longitud de onda diferente.

Los resultados en el dominio eléctrico y óptico de las portadoras son mostrados en la Figura 71, en el literal a, se muestra la señal modulada en AM para la banda AWS, en literal b, se muestra la señal modulada en AM para las bandas 850MHz, 1900MHz y 3500MHz, en el literal c, se muestra la señal modulada sobre la portadora óptica en 193.1THz para la banda de AWS y en el literal d, se muestra la señal modulada sobre la portadora óptica en 193.2THz, para las bandas 850MHz, 1900MHz y 3500MHz. Los diagramas de ojo del lado del receptor son mostrados en la Figura 72, Figura 73, Figura 74 y Figura 75 para las bandas 850MHz, 1900MHz, AWS y 3500MHz respectivamente.

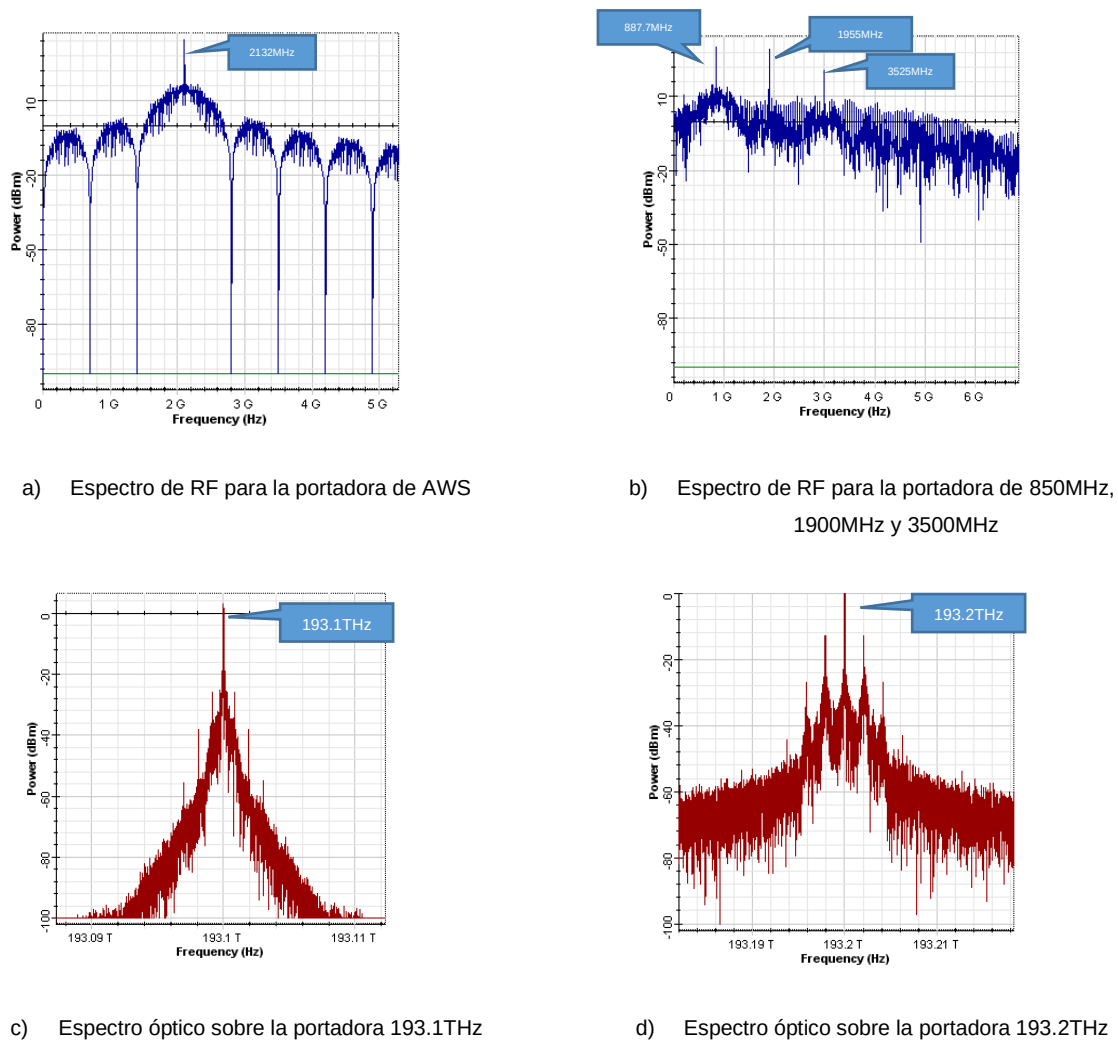


Figura 71. Espectro en dominio de RF y Óptico de las portadoras de Movistar

Fuente: Creación propia

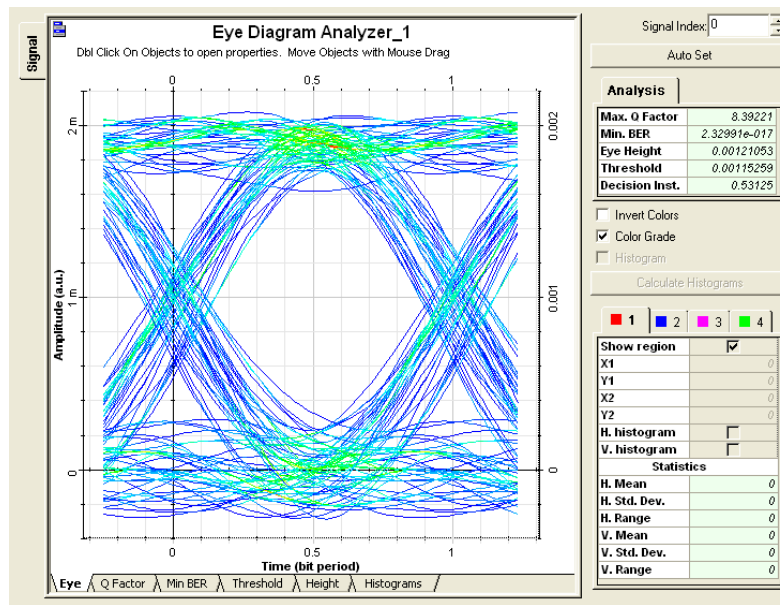


Figura 72. Diagrama de ojo en receptor de la portadora 850MHz en tramo de 24km

Fuente: Creación propia

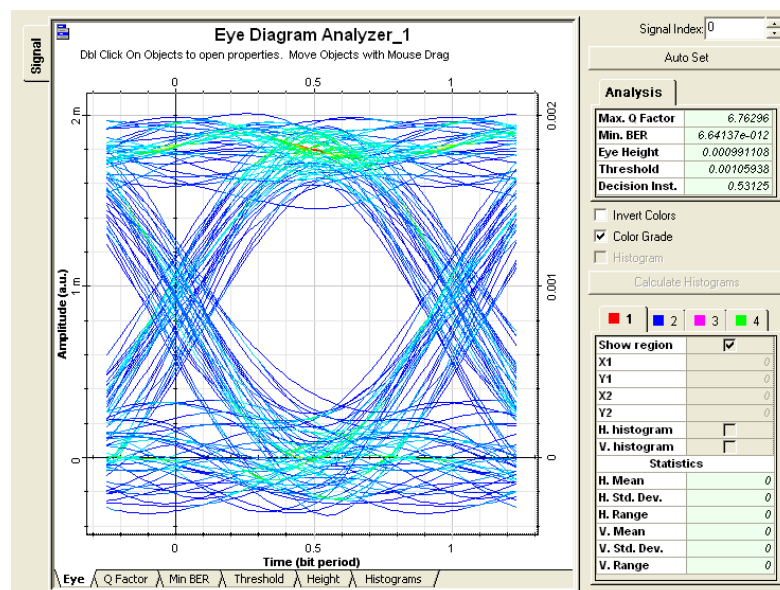


Figura 73. Diagrama de ojo en receptor de la portadora 1900MHz en tramo de 24km

Fuente: Creación propia

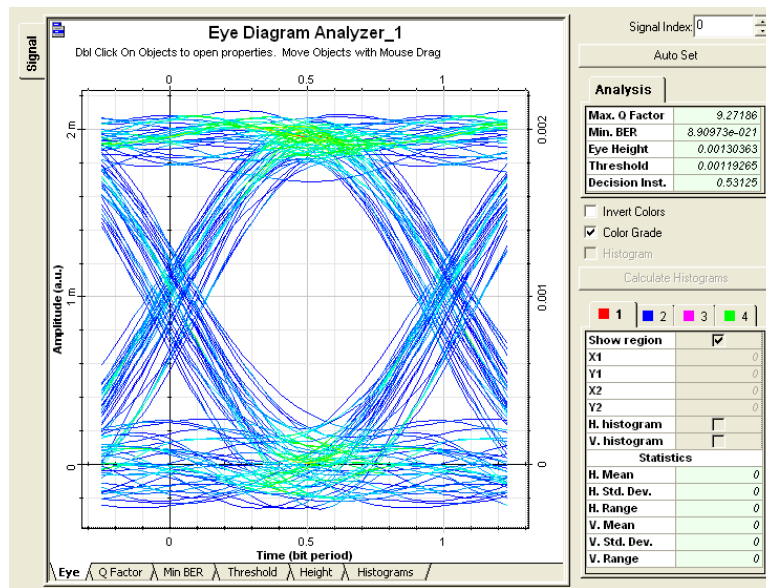


Figura 74. Diagrama de ojo en receptor de la portadora AWS en tramo de 24km

Fuente: Creación propia

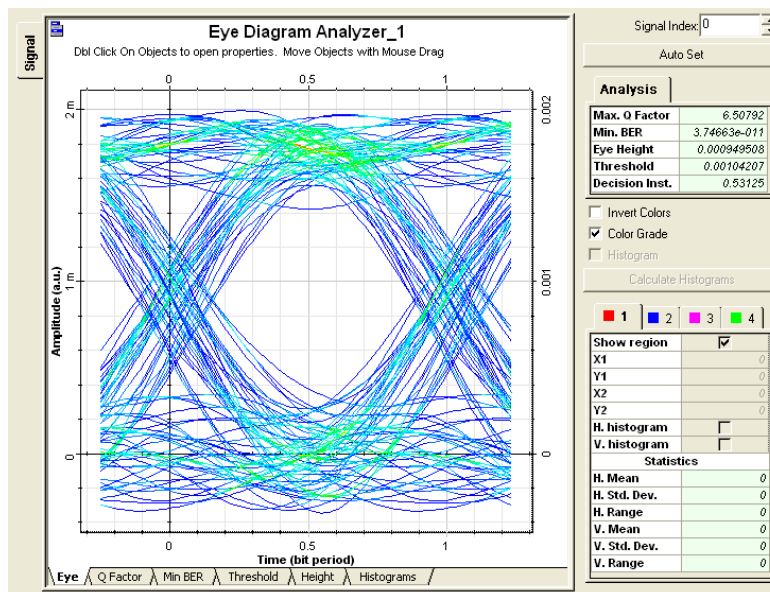


Figura 75. Diagrama de ojo en receptor de la portadora 3500MHz en tramo de 24km

Fuente: Creación propia

Como puede observarse en los resultados de calidad, los datos enviados en las portadoras de 1900 y 3500, cumplen aproximadamente con los requisitos de BER de 10^{-12} , por lo tanto, con base en el estudio [63], teniendo en cuenta los requerimientos de latencia, se

define que la distancia máxima del tramo de fibra entre el Pool de BBU y la RRH debe ser de 15km. Realizando de nuevo la simulación para un enlace con esta distancia, vemos que los requerimiento de BER se cumplen satisfactoriamente como muestra la Figura 75.

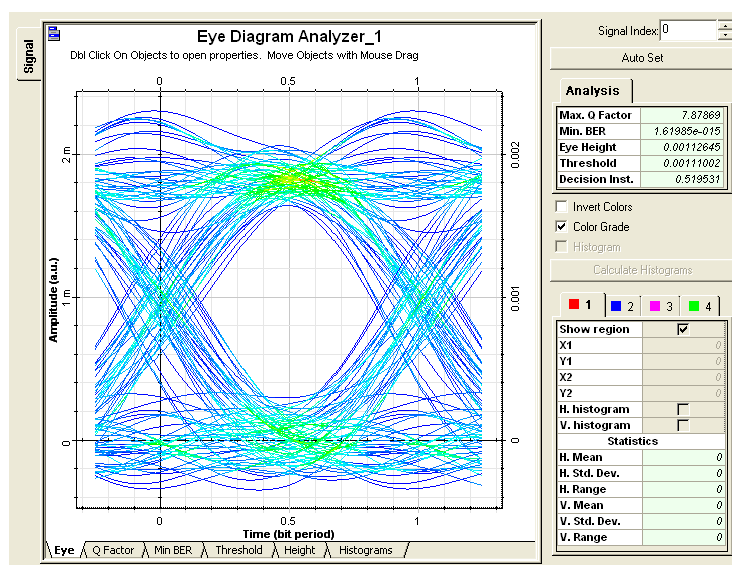


Figura 75. Diagrama de ojo en receptor de la portadora 3500MHz en tramo de 15km

Fuente: Creación propia

Definidas la agrupación de eNB por fibra, la cantidad mínima de CO para cubrir las 2 ciudades, y la distancia máxima del tramo de fibra entre la RRU y el Pool de BBU, en la Figura 76, se muestra la arquitectura general, de la C-RAN propuesta.

La interfaz X2+ entre CO vecinas, puede realizarse de forma lógica a través del backhaul, o físicamente, conectando los Pool de BBU.

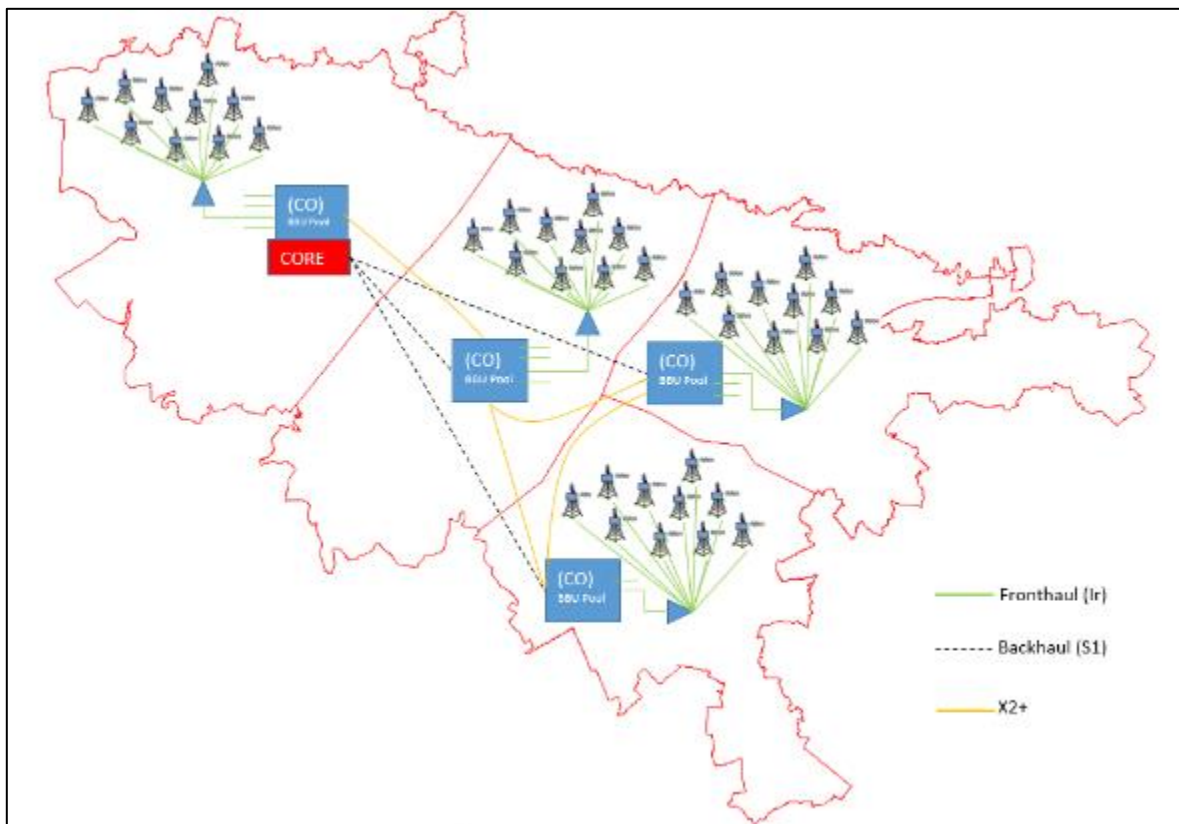


Figura 76. Arquitectura de C-RAN LTE para Bogotá y Soacha

Fuente: Creación propia

Después de tener definida una estrategia general, el cuarto paso consistirá en su implementación gradual. Para ello el operador definirá prioridades a zonas de la ciudad, con base principalmente en su densidad de eNBs.

Finalmente, el quinto paso corresponde a la densificación de la red, la cual, desde un punto de vista de red fija, consistirá en la instalación de estaciones base de forma masiva, realizando conexiones de la RRU's al punto de fibra más cercano que las unirá al Pool de BBU.

7 CONCLUSIONES

Buscando brindar un servicio celular de alta calidad, con base en las nuevas exigencias de velocidades en datos, latencias y manejo de gran cantidad de dispositivos, los operadores, han implementado tecnologías con mayor eficiencia espectral, se han hecho acreedores de mayor cantidad de espectro, y han aumentado su cantidad de estaciones base. Esto ha conllevado a realizar grandes inversiones, que no se han visto reflejadas en los ingresos, principalmente por el uso de tarifas planas y por el reemplazo de servicios que antes prestaban los operadores, y que han sido reemplazados por novedosas aplicaciones.

La red de radio acceso centralizada (C-RAN), es una nueva estrategia de despliegue que han adoptado operadores en el mundo, con el fin de reducir gastos en Opex y Capex, ya que permite disminuir en costos de energía y recursos de procesamiento, agilizar en la actualización y mantenimiento de la red, implementar nuevos features como CoMP, CA e ICIC inter-celda, y flexibilizar el despliegue disminuyendo los espacios de arrendamiento por utilizar una menor cantidad de equipos. Además, es el primer paso para la virtualización de la RAN, con la utilización de procesadores de uso general.

Debido a esto, este tipo de despliegue es una solución que tarde o temprano todas las operaciones en el mundo deberán implementar, a pesar de que se requiere de una fuerte inversión en la red fronthaul. Este tipo de soluciones deben ser dadas a conocer a los entes reguladores con el fin de que se impongan leyes que faciliten su adopción.

El plan 5G presentado por el Ministerio de Tecnologías de la información y Comunicaciones [2], es una oportunidad que los operadores tienen para realizar pilotos de prueba de esta nueva tecnología, y a su vez, dar a conocer las necesidades y tendencia que traería consigo implementarla, como por ejemplo, densificar la red con la instalación de estaciones base de distintas coberturas y potencias, e implementar una arquitectura tipo C-RAN a largo plazo, con todos los retos que esta supone, ya que a pesar de los esfuerzos que ha realizado la CRC con la implementación del código de buenas prácticas para el despliegue de redes de infraestructura de redes de comunicaciones, con base en la experiencia de Estados Unidos [92], la regulación para el despliegue de nuevas estaciones base tipo small cell, deben limitar el control local de los municipios y establecer precios fijos y justos para el uso del

espacio público, claro está, siguiendo parámetros de diseño, para evitar problemas con la comunidad.

Para la instalación de la fibra de la red fronthaul, con base en tendencias internacionales, se propone diseñar y planear dicha red, haciendo uso de la infraestructura de la red fija, buscando sinergias que ayuden a reducir gastos y aprovechen la experiencia de un despliegue conocido por los operadores, ya que con el uso de bandas milimétricas la red móvil tendrá un enfoque de red fija al reducir su cobertura a pocos metros de distancia.

Las redes ópticas pasivas (PON), de las redes FTTH, combinadas con WDM, se consideran el diseño más adecuado para la red fronthaul de la red móvil, debido a un mayor aprovechamiento de los recursos de fibra óptica.

Los protocolos usados para transportar las portadoras de radio son de tipo radio digital sobre fibra (D-RoF) y radio análogo sobre fibra (A-RoF). A pesar de que el tipo D-RoF, se ha implementado en su mayoría y la industria lo ha estandarizado como un protocolo de uso común (CPRI), la tecnología A-RoF es una propuesta novedosa que está siendo altamente estudiada en la actualidad y que se vislumbra como una solución a los altos requerimientos de ancho de banda de la red fronthaul, al contemplar una red de radio acceso centralizada completa.

La arquitectura de C-RAN LTE propuesta, tiene un alto grado de viabilidad a ser implementada por el operador a largo plazo, debido principalmente a las ventajas que trae consigo tener una red completamente virtual, donde se aprovechen mayormente los recursos tanto de procesamiento, como de espectro, además debido a los últimos acontecimientos en el mundo, principalmente al cambio que ha habido en el tráfico de las redes debido al confinamiento por la pandemia del Covid-19, marcando una fuerte migración a áreas residenciales, esta se sustenta totalmente [95]. A pesar de ello, lo más probable es que esta implementación se realice de forma gradual, ya que la inversión en el despliegue de la red fronthaul es alta, además que la regulación debe estar muy alineada con el objetivo final, siendo facilitadora para su despliegue.

La virtualización en la RAN es muy importante, ya que, permitirá realizar actualizaciones a la red de forma rápida y eficiente, además, con el uso de algoritmos de auto optimización

(SON) y antenas dinámicas las cuales pueden cambiar su patrón de radiación, la red se auto modificará mejorando las condiciones de calidad de red y entregará la mejor experiencia de usuario posible.

ANEXO A. LEY 1978 DE 2019

POR LA CUAL SE MODERNIZA EL SECTOR DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES -TIC, SE DISTRIBUYEN COMPETENCIAS, SE CREA UN REGULADOR ÚNICO Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES

Decreta: La presente Ley tiene por objeto alinear los incentivos de los agentes y autoridades del sector de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (TIC), aumentar su certidumbre jurídica, simplificar y modernizar el marco institucional del sector, focalizar las inversiones para el cierre efectivo de la brecha digital y potenciar la vinculación del sector privado en el desarrollo de los proyectos asociados, así como aumentar la eficiencia en el pago de las contraprestaciones y cargas económicas de los agentes del sector.

Artículo 11. Acceso al uso del espectro radioeléctrico. El uso del espectro radioeléctrico requiere permiso previo, expreso y otorgado por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

El permiso de uso del espectro respetará la neutralidad en la tecnología siempre y cuando esté coordinado con las políticas del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, no generen interferencias sobre otros servicios, sean compatibles con las tendencias internacionales del mercado, no afecten la seguridad nacional, y contribuyan al desarrollo sostenible. El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones adelantará mecanismos de selección objetiva, que fomenten la inversión en infraestructura y maximicen el bienestar social, previa convocatoria pública, para el otorgamiento del permiso para el uso del espectro radioeléctrico y exigirá las garantías correspondientes. En aquellos casos, en que prime la continuidad del servicio, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones podrá otorgar los permisos de uso del espectro de manera directa, únicamente por el término estrictamente necesario para asignar los permisos de uso del espectro radioeléctrico mediante un proceso de selección objetiva.

En la asignación de las frecuencias necesarias para la defensa y seguridad nacional, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones tendrá en cuenta las necesidades de los organismos de seguridad del Estado. El trámite, resultado e información relativa a la asignación de este tipo de frecuencias tiene carácter reservado. El Gobierno nacional podrá establecer bandas de frecuencias de uso libre de acuerdo con las recomendaciones de la UIT. Así mismo, podrá establecer bandas exentas del pago de contraprestaciones para programas sociales del Estado que permitan la ampliación de cobertura en zonas rurales.

Parágrafo 1º. Para efectos de la aplicación de presente artículo, se debe entender que la neutralidad tecnológica implica la libertad que tienen los proveedores de redes y servicios de usar las tecnologías para la prestación de todos los servicios sin restricción distintas a las posibles interferencias perjudiciales y el uso eficiente de los recursos escasos.

Parágrafo 2°. Los permisos para el uso del espectro radioeléctrico podrán ser cedidos hasta por el plazo del permiso inicial o el de su renovación, previa autorización del Ministerio de Tecnologías de la Información y las

Comunicaciones en los términos que este determine sin desmejora de los requisitos, calidad y garantías del uso, acceso y beneficio común del espectro previamente establecidos en el acto de asignación del mismo. Se deberá actualizar la información respectiva en el Registro Único de TIC. La cesión de los permisos de uso del espectro radioeléctrico solo podrá realizarse siempre y cuando el asignatario, a la fecha de la cesión, esté cumpliendo con todas las obligaciones dispuestas en el acto de asignación, dentro de los plazos definidos en el mismo, incluyendo la ejecución de obligaciones de hacer cuando estas hayan sido establecidas. El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones incorporará en el acto que autoriza la cesión las condiciones técnicas y económicas de mercado, que se evidencien al momento de la autorización.

El Gobierno nacional reglamentará la materia teniendo en cuenta criterios, entre otros, como el uso eficiente del espectro, el tipo de servicio para el cual se esté utilizando el espectro radioeléctrico objeto del permiso, y las condiciones específicas del acto de asignación del permiso para el uso del espectro radioeléctrico a ceder e igualmente, un término mínimo a partir del cual se podrá realizar la cesión.

Parágrafo 3°. Se entiende como maximización del bienestar social en el acceso y uso del espectro radioeléctrico, principalmente, la reducción de la brecha digital, el acceso universal, la ampliación de la cobertura, el despliegue y uso de redes e infraestructuras y la mejora en la calidad de la prestación de los servicios a los usuarios. Lo anterior, de acuerdo con las mejores prácticas internacionales y las recomendaciones de la UIT. En cualquier caso, la determinación de la maximización del bienestar social en el acceso y uso del espectro radioeléctrico estará sujeta a valoración económica previa.

ANEXO B. LEY 1341 DE 2009

POR LA CUAL SE DEFINEN PRINCIPIOS Y CONCEPTOS SOBRE LA SOCIEDAD DE LA INFORMACIÓN Y LA ORGANIZACIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN Y LAS COMUNICACIONES - TIC- SE CREA LA AGENCIA NACIONAL DE ESPECTRO Y SE DICTAN OTRAS DISPOSICIONES.

Decreta: La presente Ley determina el marco general para la formulación de las políticas públicas que regirán el sector de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, su ordenamiento general, el régimen de competencia, la protección al usuario, así como lo concerniente a la cobertura, la calidad del servicio, la promoción de la inversión en el sector y el desarrollo de estas tecnologías, el uso eficiente de las redes y del espectro radioeléctrico, así como las potestades del Estado en relación con la planeación, la gestión, la administración adecuada y eficiente de los recursos, regulación, control y vigilancia del mismo y facilitando el libre acceso y sin discriminación de los habitantes del territorio nacional a la Sociedad de la Información.

Artículo 2.- PRINCIPIOS ORIENTADORES. La investigación, el fomento, la promoción y el desarrollo de las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones son una política de Estado que involucra a todos los sectores y niveles de la administración pública y de la sociedad, para contribuir al desarrollo educativo, cultural, económico, social y político e incrementar la productividad, la competitividad, el respeto a los derechos humanos inherentes y la inclusión social.

Las Tecnologías de la Información y las Comunicaciones deben servir al interés general y es deber del Estado promover su acceso eficiente y en igualdad de oportunidades, a todos los habitantes del territorio nacional.

Son principios orientadores de la presente Ley:

3. Uso eficiente de la infraestructura y de los recursos escasos. El Estado fomentará el despliegue y uso eficiente de la infraestructura para la provisión de redes de telecomunicaciones y los servicios que sobre ellas se puedan prestar, y promoverá el óptimo aprovechamiento de los recursos escasos con el ánimo de generar competencia, calidad y eficiencia, en beneficio de los usuarios, siempre y cuando se remunere dicha infraestructura a costos de oportunidad sea técnicamente factible, no degrade la calidad de servicio que el propietario de la red viene prestando a sus usuarios y a los terceros, no afecte la prestación de sus propios servicios y se cuente con suficiente infraestructura, teniendo en cuenta la factibilidad técnica y la remuneración a costos eficientes del acceso a dicha infraestructura. Para tal efecto, dentro del ámbito de sus competencias, las entidades de orden nacional y territorial están obligadas a adoptar todas las medidas que sean necesarias para facilitar y garantizar el desarrollo de la infraestructura requerida, estableciendo las garantías y medidas necesarias que contribuyan en la prevención, cuidado y conservación para que no se deteriore el patrimonio público y el interés general.

Artículo 26.- FUNCIONES DE LA AGENCIA NACIONAL DEL ESPECTRO.

La Agencia Nacional del Espectro tendrá, entre otras, las siguientes funciones:

1. Asesorar al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en el diseño y formulación de políticas, planes y programas relacionados con el espectro radioeléctrico.
2. Diseñar y formular políticas, planes y programas relacionados con la vigilancia y control del Espectro, en concordancia con las políticas nacionales y sectoriales y las propuestas por los organismos internacionales competentes, cuando sea del caso.
3. Estudiar y proponer, acorde con las tendencias del sector y las evoluciones tecnológicas, esquemas óptimos de vigilancia y control del espectro radioeléctrico, incluyendo los satelitales, con excepción a lo dispuesto en el artículo 76 de la Constitución Política y conforme a la normatividad vigente.
4. Ejercer la vigilancia y control del espectro radioeléctrico, con excepción de lo dispuesto en el artículo 76 de la Constitución Política.
5. Realizar la gestión técnica del espectro radioeléctrico.
6. Investigar e identificar las nuevas tendencias nacionales e internacionales en cuanto a la administración, vigilancia y control del espectro.
7. Estudiar y proponer los parámetros de valoración por el derecho al uso del espectro radioeléctrico y la estructura de contraprestaciones.
8. Notificar ante los organismos internacionales las interferencias detectadas por señales originadas en otros países, previa coordinación con el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
9. Apoyar al Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones en el establecimiento de estrategias para la participación en las diversas conferencias y grupos de estudio especializados de la Unión Internacional de Telecomunicaciones y otros organismos internacionales.
10. Adelantar las investigaciones a que haya lugar, por posibles infracciones al régimen del espectro definido por el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, así como imponer las sanciones, con excepción de lo dispuesto en el artículo 76 de la Constitución Política.
11. Ordenar el cese de operaciones no autorizadas de redes, el decomiso provisional y definitivo de equipos y demás bienes utilizados para el efecto, y disponer su destino con arreglo a lo dispuesto en la Ley, sin perjuicio de las competencias que tienen las autoridades Militares y de Policía para el decomiso de equipos.
12. Actualizar, mantener y garantizar la seguridad y confiabilidad de la información que se genere de los actos administrativos de su competencia.
13. Las demás que por su naturaleza le sean asignadas o le correspondan por Ley.

Parágrafo 1º. La atribución y asignación de frecuencias del espectro radioeléctrico seguirá siendo potestad del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

Parágrafo 2º. Para el ejercicio de las funciones de vigilancia y control, la Agencia Nacional del Espectro podrá contar con Estaciones Monitoras fijas y móviles para la medición de parámetros técnicos; la verificación de la ocupación

del espectro radioeléctrico; y la realización de visitas técnicas a efectos de establecer el uso indebido o clandestino del espectro, en coordinación y con el apoyo del Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.

REFERENCIAS

- [1] Ericsson, "Cloud RAN Architecture for 5G," Madrid, 2016.
- [2] MinTic, «www.mintic.gov.co,» 12 2019. [En línea]. Available: https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-118058_plan_5g_2019120.pdf. [Último acceso: 20 4 2020].
- [3] G. Puerto, Redes ópticas de acceso Convergente, Bogotá: UD, 2016.
- [4] R. Agustí, F. Alvarez, F.Casadevall, R.Ferrús, J.Pérez y O.Sallent, LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles, Barcelona: Fundacion Vodafone, 2010.
- [5] Z.Frías, Análisis Prospectivo del Despliegue de Redes de Comunicaciones Móviles LTE en Nuevas Bandas de Frecuencia Mediante el Desarrollo de Modelos Tecnoeconómicos, Madrid, 2016.
- [6] Á. Pachón de la Cruz, «Evolución de los Sistemas Móviles celulares GSM,» Cali, 2004.
- [7] M.Mouly and M.Pautet, The GSM System for Mobile Communication, Washington: &Sys, 1992.
- [8] N.Cardona, J.Olmos, M. García, J.Monserrat, J.Cabrejas, A.Fernandez, M.Lozano, D.Gonzales, D.Martín-Sacristán y S.Ruiz, 3GPP LTE: Hacia la 4G Móvil, Marcombo Universitaria, 2011.
- [9] Rysavy Research for 4G Americas, "Mobile Broadband Explosion- The 3GPP Wireless Evolution," 2013.
- [10] H.Holma and A.Toskala, HSDPA/HSUPA for UMTS - High Speed Radio Access for Mobile Communications, Jhon Wiley & Sons, 2006.

- [11] A. Del Valle, Diseño, Integración y Optimización de Estaciones Base de Segunda Generación, Sevilla, 2010.
- [12] M. Glabowski, S. Hanczewski y M. Stasiak, «Available bandwidth for HSDPA and HSUPA services,» de *Proceeding - 2007 IEEE International Conference on Telecommunications and Malaysia International Conference on Communications, ICT-MICC 2007*, 2007.
- [13] 3GPP, "3GPP 25.814, Physical Layer Aspects for Evolved Terrestrial Radio Access," [Online]. Available: ftp://ftp.freecalypso.org/GSM/3GPP/archive/25_series/25.814/25814-710.pdf. [Accessed 19 04 2020].
- [14] 5G Américas, Mobile Broadband Transformation LTE to 5G, 2016.
- [15] Y. Kishiyama, A. Benjebbour, S. Nagata, Y. Okumura and T. Nakamura, "NTT DOCOMO 5G Activities Toward 2020 Launch of 5G Services," *NTT Docomo Technical Journal*, vol. 17, no. 4, 2016.
- [16] R. J. Millán, «Coit.es,» 2019. [En línea]. Available: https://www.coit.es/sites/default/files/archivobit/pdf/bit_211_que_es_5g_quinta_generacion_de_tecnologias_de_telefonia_movil.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].
- [17] ITU, «ITU,» 12 2019. [En línea]. Available: <https://www.itu.int/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>. [Último acceso: 19 04 2020].
- [18] Oracle, «5G Core: How to Get There,» 2018.
- [19] Orange, «blog.orange.es,» 22 04 2019. [En línea]. Available: <http://blog.orange.es/noticias/network-slicing-la-red-5g-se-servira-en-rebanadas/>. [Último acceso: 26 04 2020].

- [20] ETSI, "TS 136 401, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description," 04 2015. [Online]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136400_136499/136401/12.02.00_60/ts_136401v120200p.pdf. [Accessed 10 04 2020].
- [21] ETSI, «TS 136 410, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); S1 General aspects and principles,» 02 2015. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136400_136499/136410/12.01.00_60/ts_136410v120100p.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].
- [22] ETSI, «TS 136 420, Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 General aspects and principles,» 01 2020. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136400_136499/136420/15.02.00_60/ts_136420v150200p.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].
- [23] ETSI, «TS 123 401, General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network,» 05 2017. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123400_123499/123401/14.03.00_60/ts_123401v140300p.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].
- [24] ETSI, «TS 23 203, "Policy and Charging Control Architecture".,» 09 2018. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123200_123299/123203/15.04.00_60/ts_123203v150400p.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].
- [25] E. Trejo y C. Hernández, «Handover algorithms in LTE networks for massive means of transport,» *Sistemas & Telemática*, vol. 16, nº 46, pp. 21-36, 2018.
- [26] ETSI, «TS 136 213 "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical Layer Procedures",» 05 2016. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/13.00.00_60/ts_136213v130000p.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].

- [27] ETSI, «TS 136 104 "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Base Station (BS) radio transmission and reception",» 04 2017. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136104/14.03.00_60/ts_136104v140300p.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].
- [28] 3GPP, «3GPP TR36.814 V9.0.0:"Further Advancements for E-UTRA Physical Layer Aspects",» 03 2010. [En línea]. Available: <https://pdfs.semanticscholar.org/d6e8/93efee6bcd1654321eec6a44130fa5b016fe.pdf>. [Último acceso: 26 04 2020].
- [29] ETSI, «TS36.101 V14.5.0: "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception," Abril. 2017,» 11 2017. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136100_136199/136101/14.05.00_60/ts_136101v140500p.pdf. [Último acceso: 26 04 2020].
- [30] B. Chen, J. Chen, Y. Gao y J. Zhang, *Coexistence of LTE-LAA and Wi-Fi on 5 GHz with Corresponding Deployment Scenarios: A Survey*, vol. 19, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2017, pp. 7-32.
- [31] T. Uchino, K. Teshima y K. Takeda, «Carrier Aggregation Enhancement and Dual Connectivity Promising Higher Throughput and Capacity,» *NTT Docomo technical Journal*, vol. 17, nº 2, 2015.
- [32] H. H, K. Takeda, T. Uchino, K. Teshima y L. Liu, «Broadband Frequency Technologies in LTE-Advanced Release 13,» *NTT Docomo Technical Journal*, vol. 18, nº 2, 2016.
- [33] K. Kiyoshima, T. Takiguchi, Y. Kawabe y Y. Sasaki, «Commercial Development of LTE-Advanced Applying Advanced C-RAN Architecture,» *NTT DOCOMO Technical Journal*, vol. 17, nº 2, 2015.
- [34] D. Ortiz y G. José, *Estudio de Carrier Aggregation para Optimizar el uso del espectro asignado a los operadores Móviles en Colombia*, Bogotá, 2016.

- [35] J. Anguís, *Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College, Sevilla, 2018, Proyecto Fin de Grado, Universidad de Sevilla.*
- [36] «electronicsnotes, Incorporating Radio-Electronics.com,» [En línea]. Available: <https://www.electronics-notes.com/articles/antennas-propagation/mimo/spatial-multiplexing.php>.
- [37] S. Taruna, «Analysis of Multiple - Input - Multiple - Output (MIMO) System with Transmit and Receive Diversity,» *International Journal of Computer Applications* , vol. 79, nº 12, 2013.
- [38] G. Casu, L. Tutâ, I. Nicolaescu y C. Moraru, «Some aspects about the advantage of using MIMO Systems,» *22nd Telecommunications forum* , 2014.
- [39] Y. Sano, A. Fukuda, S. Okuyama, Y. Kakishima y C. Na, «LTE-Advanced Release 13 Multiple Antenna Technologies and Improved Reception Technologies,» *NTT Docomo Technical Journal*, vol. 18, nº 2, 2016.
- [40] S. Suyama, T. Oyukama, Y. Inoue y Y. Kishiyama, «5G Multi-antenna Technology,» *NTT Docomo Technical Journal*, vol. 17, nº 4, 2016.
- [41] T. Imai, K. Kitao, N. Tran y N. Omaki, «Radio Propagation for 5G,» *NTT Docomo Technical Journal*, vol. 17, nº 4, 2016.
- [42] A. Harada, Y. Inoue, D. Kurita y T. Obara, «5G Trials with major Global Vendors,» *NTT Docomo Technical Journal*, vol. 17, nº 4, 2016.
- [43] R. Lyer, J. Zeto, D. Schneider y L. Kurtz, *Small Cells, Big Challenge: A Definitive Guide to Designing and Deploying Hetnets*, Independent Publishing Platform, 2014.
- [44] X. Zhu, J. Zeng, X. Su, C. Xiao, J. Wang y L. Huang, «On the virtual cell transmission in ultra dense networks,» *Entropy*, vol. 18, nº 10, 2016.

- [45] ETSI, «TS 136 423 V15.3.0 "Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); X2 Application Protocol (X2AP)",» 10 2018. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136400_136499/136423/15.03.00_60/ts_136423v150300p.pdf. [Último acceso: 27 04 2020].
- [46] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, S. Bruek, H.-P. Mayer, L. Thiele y V. Jungnickel, «Coordinated Multipoint: Concepts, Performance, and Field Trial Results,» *IEEE Communication Magazine*, 2011.
- [47] 3GPP, «3GPP.org. LTE Advanced,» 06 2013. [En línea]. Available: <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>. [Último acceso: 27 04 2020].
- [48] A. Checko, H. L. Christiansen, Y. Yan, L. Scolari, G. Kardaras, M. S. Berger y L. Dittmann, «Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview,» *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, vol. 17, nº 1, pp. 405-426, 1 1 2015.
- [49] CPRI, «CPRI Specification V7.0 Common Public Radio Interface,» 09 10 2015. [En línea]. Available: http://www.cpri.info/downloads/CPRI_v_7_0_2015-10-09.pdf. [Último acceso: 09 10 2020].
- [50] Optcore, «Optcore.net Open Base Station Architecture Initiative,» 04 2017. [En línea]. Available: https://www.optcore.net/wp-content/uploads/2017/04/OBSAI_System_Spec_V2.0.pdf. [Último acceso: 27 04 2020].
- [51] ETSI, «GS ORI 001 V4.1.1 Open Radio Equipment Interface (ORI); Requirements for Open Radio Equipment Interface (ORI),» 10 2014. [En línea]. Available: https://www.etsi.org/deliver/etsi_gs/ORI/001_099/001/04.01.01_60/gs_ORI001v040101p.pdf. [Último acceso: 27 04 2020].
- [52] A. de la Oliva, J. Hernandez, D. Larrabeiti y A. Azcorra, «An Overview of the CPRI Specification and Its Application to C-RAN - Based LTE Scenarios,» *IEEE Communications Magazine*, 2016.

- [53] Y. Lin, L. Shao, Z. Zhu, Q. Wang y R. K. Sabhikhi, «Wireless network cloud: Architecture and system requirements,» *IBM Journal of Research and Development*, vol. 54, nº 1, 1 2010.
- [54] China Mobile Research Institute, «C-RAN The Road Towards Green RAN. White Paper, Version 3.0, Diciembre 2013».
- [55] L. Guangjie, Senjie, Z, Y. Xuebin, L. Fanglan y Z. Sunny, «Architecture of GPP based, scalable, large-scale C-RAN BBU Pool,» *Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 2012.
- [56] B. NGMN Alliance, R. El Hattachi y J. Erfanian, «NGMN 5G White Paper,» 2015.
- [57] P. Demestichas, A. Georgakopoulos, D. Karvounas, K. Tsagkaris, V. Stavroulaki, J. Lu, C. Xiong y J. Yao, «5G on the Horizon: Key challenges for the radio-access network,» *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 8, nº 3, pp. 47-53, 2013.
- [58] C. Lin, C. Rowell, S. Han, Z. Xu, G. Li y Z. Pan, «Toward Green and Soft: A 5G Perspective,» *IEEE Communication Magazine*, 2014.
- [59] L. B. Le, V. Lau, E. Jorswieck, N. D. Dao, A. Haghighat, D. I. Kim y T. Le-Ngoc, *Enabling 5G mobile wireless technologies*, vol. 2015, Springer International Publishing, 2015.
- [60] S. Research, The Hetnet Bible (Small Cells, Carrier WiFi, DAS & C-RAN): 2015 - 2020 - Opportunities, Challenges, Strategies, & Forecasts, PRNNewswire, 2015.
- [61] J. Madrazo, Análisis y estudio de soluciones para fronthaul radio, España, 2018.
- [62] J. Liu, S. Xu, S. Zhou y Z. Niu, «Redesing fronthaul for next-generation networks: beyond baseband samples and point - to - point links,» *IEEE wireless Communications*, 2015.
- [63] P. Chanclou y S. Randazzo, «Evaluating the different fronthaul options and the technical requirements for the different scenarios,» 2015.

- [64] B. Guo, W. Cao y A. Tao, «CPRI Compression transport for LTE and LTE-A signal in C-RAN,» de *International ICST Conference on Communications and Networking in China*, Ming, 2012.
- [65] D. Brubaker, S. Marketing Manager, W. Qian, F. Manager y M. Akhter, «June 2016 Altera Corporation The Emerging Need for Fronthaul Compression,» 2016.
- [66] A. Mohammad, «Front-haul compression for emerging C-RAN and small cell networks,» 2013.
- [67] L. Liu y R. Zhang, «Optimized uplink transmission in multi-antenna C-RAN with spatial compression and forward,» *IEEE*, 2015.
- [68] M. Peng, C. Wang, V. Lau y P. H Vincent, «Fronthaul - Constrained Cloud Radio Access Networks: Insights and Challenges,» *IEEE wireless Communications*, 2015.
- [69] I. Chih-Lin, J. Huang, R. Duan, C. Cui, J. Jiang y L. Li, «Recent progress on C-RAN centralization and cloudification,» *IEEE Access*, vol. 2, pp. 1030-1039, 2014.
- [70] K. Miyamoto, S. Kuwano, T. Shimizu, J. Terada y A. Otaka, «Performance evaluation of ethernet- based mobile fronthaul and wireless comp in split-PHY processing,» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 9, nº 1, pp. A46-A54, 1 1 2017.
- [71] S. C. Forum, «Small Cell Virtualization Functional Splits and use cases,» 2016.
- [72] D. Sabella, P. Rost, Y. Sheng, E. Pateromichelakis, U. Salim, P. Guitton-Ouhamou, M. Di Girolamo y G. Giuliani, «RAN as a Service: Challenges of Designing a Flexible RAN Architecture in a Cloud-based Heterogeneous Mobile Network,» *FutureNetwork Summit*, 2013.
- [73] M. Sung, S. H. Cho, J. Kim, J. K. Lee, J. H. Lee y H. S. Chung, «Demonstration of IFoF-Based Mobile Fronthaul in 5G Prototype with 28-GHz Millimeter wave,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, nº 2, pp. 601-609, 15 1 2018.

- [74] C. Liu, J. Wang, L. Cheng, M. Zhu y G. K. Chang, «Key microwave-photonics technologies for next-generation cloud-based radio access networks,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, nº 20, pp. 3452-3460, 15 10 2014.
- [75] C. Mitsolidou, C. Vagionas, A. Mesodiakaki, P. Maniotis, G. Kalfas, C. G. H. Roeloffzen, P. W. L. van Dijk, R. M. Oldenbeuving, A. Miliou y N. Pleros, «A 5G C-RAN Optical Fronthaul Architecture for Hotspot Areas Using OFDM-Based Analog IFoF Waveforms,» *Applied Sciences*, vol. 9, nº 19, p. 4059, 28 9 2019.
- [76] M. Ruffini, «Analog Radio-over-Fiber Solutions in Support of 5G,» de *22nd Conference on Optical Network Design and Modelling (ONDM 18) : conference proceedings*, 2018.
- [77] X. Hu, Y. Chenhui y K. Zhang, «Converged Mobile Fronthaul and Passive Optical Network Based on Hybrid Analog-Digital Transmission Scheme,» *Optical Fiber Communications Conference and Exhibition*, 2016.
- [78] A. Haddad y M. Gagnaire, «Radio-aver-Fiber (RoF) for Mobile Backhauling: a technical and economic comparison between Analog and Digitized RoF,» 2014.
- [79] C. Ranaweera, E. Wong, A. Nirmalathas, C. Jayasundara y C. Lim, «5G C-RAN Architecture: A Comparison of Multiple Optical Fronthaul Networks,» 2018.
- [80] M. Waqar, A. Kim y P. K. Cho, «A study of fronthaul networks in crans-requirements and recent advancements,» *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, vol. 12, nº 10, pp. 4618-4639, 2018.
- [81] S. Zhou, X. Liu, F. Effenberger y J. Chao, «Low-latency high-efficiency mobile fronthaul with TDM-PON (mobile-PON),» *Journal of Optical Communications and Networking*, vol. 10, nº 1, pp. A20-A26, 1 1 2018.
- [82] F. Ponzini, L. Giorgi, A. Bianchi y R. Sabella, «Centralized Radio Access Networks Over Wavelength - Division Multiplexing: A Plug and Play Implementation,» *IEEE Communications Magazine*, 2013.

- [83] E. López, «FTTH Course,» Barcelona, 2015.
- [84] Nokia, «GlobenewsWire,» 20 06 2017. [En línea]. Available: <https://www.globenewswire.com/news-release/2017/06/20/1026067/0/en/Nokia-Bell-Labs-first-to-show-use-of-ultra-low-latency-10G-PON-for-mobile-fronthaul.html>. [Último acceso: 27 04 2020].
- [85] L. Yufeng, «Research on 25G WDM-PON Bearer for 5G Fronthaul,» *ZTE Technologies*, vol. 20, nº 5, 2018.
- [86] «Europe FTTH Council, <<Fixed-Mobile Network Convergence The Key Role of Fibre>>,» 2019.
- [87] «TeleSemana.com,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.telesemana.com/blog/2016/02/23/china-unicom-y-huawei-despliegan-c-ran-con-fronthaul-wdm-para-evitar-congestion-en-la-fibra/>.
- [88] A. Checko, H. Holm y H. Christiansen, «Optimizing small cell deployment by the use of C-RANs,» de *20th European Wireless Conference*, Barcelona, 2014.
- [89] A. Checko, A. P. Avramova, M. S. Berger y H. L. Christiansen, «Evaluating C-RAN fronthaul functional splits in terms of network level energy and cost savings,» *Journal of Communications and Networks*, vol. 18, nº 2, pp. 162-172, 1 4 2016.
- [90] SNS, «SNS Telecom & IT,» 2017. [En línea]. Available: <https://www.snstelecom.com/c-ran>.
- [91] DPL, «Digital Policy News,» 28 04 2020. [En línea]. Available: <https://digitalpolicylaw.com/colombia-774-municipios-ya-adoptaron-una-normativa-para-facilitar-el-despliegue-de-infraestructura-telecom/>. [Último acceso: 28 04 2020].
- [92] A. Holmes, "The New York Times," Who Decides Where It Goes?, 2 3 2018. [Online]. Available: <https://www.nytimes.com/2018/03/02/technology/5g-cellular-service.html>.

- [93] «A Tale of Many Cities,» MiT senseable city Lab and Ericsson, Enero 2016. [En línea]. Available: <http://www.manycities.org/>.
- [94] J. I. Kani, J. Terada, K. I. Suzuki y A. Otaka, «Solutions for Future Mobile Fronthaul and Access-Network Convergence,» *Journal of Lightwave Technology*, vol. 35, nº 3, pp. 527-534, 1 2 2017.
- [95] Ericsson, «Facebook,» 27 04 2020. [En línea]. Available: <https://www.facebook.com/EricssonLatinAmerica/posts/2911199128974922/>. [Último acceso: 06 05 2020].