Análisis y comparación de la interfaz de radio de las redes de comunicación móviles celulares de 4G y 5G.

Brayan Leonardo Ruiz Leal

Oscar Stivenson Gutierrez Gonzalez

Proyecto de grado

Director:
Ing. Juan Carlos Gómez Paredes.

Modalidad de Grado
Investigación-Innovación



UNIVERSIDAD DISTRITAL
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Facultad de Ingeniería
Proyecto Curricular de Ingeniería Electrónica
Colombia, Bogotá D.C.
2020

Dedicado a

Mis padres, a mi familia y amigos, por apoyarme y compartir conmigo este proceso de formación personal y académica.

Brayan Ruiz

Mi madre, mi familia y mis amigos, quienes estuvieron junto a mi en esta etapa, animándome y apoyándome para lograr este primer paso.

Stivenson Gutierrez

Agradecimientos

Los agradecimientos son para mis padres Ibrando Ruiz Moreno e Isabel Leal Guatibonza, porque gracias a su trabajo, perseverancia y esfuerzo, nunca me ha faltado nada para conseguir lo que anhelo, porque gracias a su ejemplo, confianza en mí y apoyo, he alcanzado la mayor parte de las metas que me he propuesto.

Brayan Leonardo Ruiz Leal

Agradezco a mi madre Gloria Yaneth Gonzalez Leon porque gracias a su dedicación, valores inculcados, y apoyo incondicional, es la inspiración para llevar a cabo cada una de mis aspiraciones; una de ellas aquí plasmada en este proyecto de grado que representa el paso final de mi base como profesional.

Oscar Stivenson Gutierrez Gonzalez

Agradecemos a nuestros familiares, amigos y compañeros que estuvieron presentes en todo este proceso de formación personal y académica.

Agradecemos muy encarecidamente a nuestro director, el ingeniero Juan Carlos Paredes por el apoyo y la guía que nos brindo durante todo el proceso de realización de este proyecto de grado.

Por último, agradecemos a nuestra universidad pública, el habernos permitido ingresar a la educación superior y de esta manera poder desarrollar muchas capacidades que esperamos poder utilizar para mejorar la calidad de vida de nuestra sociedad.

Índice

1. Introducción **12**
1.1. Planteamiento del problema . . . 13
1.2. Justificación . . . 14
1.2.1. Investigación . . . 14
1.2.2. Académica . . . 14
1.2.3. Económica . . . 14
1.2.4. Social . . . 14
1.2.5. Personal . . . 15
1.3. Objetivo General . . . 16
1.3.1. Objetivos específicos . . . 16
1.4. Resumen . . . 17
1.5. Abstract . . . 18

2. Marco Teórico **19**
2.1. Comunicaciones Móviles [5] [6] . . . 19
2.2. Composición de los Sistemas de Comunicaciones Móviles . . . 19
2.3. Red de Acceso [8] [9] . . . 20
2.3.1. Red de Acceso Radio o Red de Acceso Inalámbrico . . . 20
2.4. Espectro Electromagnético [11] . . . 21
2.4.1. Ondas Milimétricas (MMW) . . . 21
2.5. Acceso Múltiple . . . 21
2.6. Técnicas de Acceso Múltiple . . . 21
2.6.1. FDMA Acceso Múltiple por División de Frecuencia . . . 22
2.6.2. TDMA Acceso Múltiple por División de Tiempo . . . 22
2.6.3. CDMA Acceso Múltiple por División de Código . . . 24
2.6.4. WCDMA Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha [15] . . . 25
2.6.5. OFDMA Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales . . . 25
2.6.6. SC-FDMA Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única [16] . . . 25
2.7. Modo de Explotación . . . 26
2.7.1. TDD Duplexación por División de Tiempo . . . 26
2.7.2. FDD Duplexación por División de Frecuencia [17] . . . 26
2.8. Sistemas MIMO [19] . . . 27
2.8.1. MIMO Múltiple Entrada Múltiple Salida . . . 27
2.8.2. Clasificación de Técnicas MIMO . . . 28
2.8.3. Precoding y Beamforming [20] . . . 28
2.9. Técnicas de modulación . . . 28
2.9.1. QAM . . . 28
2.9.2. PSK . . . 29
2.10. Prefijo cíclico (CP) . . . 31
2.11. Corrección de error hacia adelante (FEC) . . . 32
2.11.1. Turbo código . . . 32
2.12. Comprobación de redundancia cíclica (CRC) . . . 32
2.13. Códigos de verificación de paridad de baja densidad (LDPC) . . . 32
2.14. División en Celdas . . . 33
2.14.1. División de Celdas . . . 33
2.15. Handover o Transferencia . . . 33
2.16. Reutilización de Frecuencias . . . 33

3. Estado del Arte **35**
3.1. Generaciones . . . 35
3.1.1. Segunda Generación (2G) . . . 35
3.1.2. Generación 2.5 (2.5G) [30] . . . 36
3.1.3. Generación 2.75 (2.75G) . . . 36
3.1.4. Tercera Generación (3G) . . . 37
3.1.5. Generación 3.5 (3.5G) . . . 38
3.1.6. Generación 3.75 (3.75G) . . . 39
3.1.7. Cuarta Generación (4G LTE) . . . 39
3.1.8. Generación 4G+ (LTE Advanced) . . . 40
3.2. Trabajos Similares . . . 41
3.2.1. Evolución de las telecomunicaciones móviles y posibilidades de migración a redes 4G . . . 41
3.2.2. Evaluación comparativa de redes móviles . . . 42
3.2.3. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles . . . 42
3.2.4. View on 5G architecture . . . 42

4. Comunicaciones móviles 4G LTE **44**
4.1. Arquitectura general de los sistemas de comunicación móvil 3GPP . . . 44
4.2. Arquitectura del sistema LTE . . . 45
4.2.1. Requisitos para la Interfaz Radio del sistema LTE . . . 46
4.3. Arquitectura de la red de acceso evolucionada: E-UTRAN . . . 47
4.3.1. Canales LTE . . . 47
4.3.2. Interfaz de radio . . . 48
4.3.3. Interfaz X2 (eNB-eNB) . . . 49
4.3.4. Protocolos en la interfaz de radio . . . 49
4.3.5. Canales físicos . . . 51
4.3.6. Canales de transporte . . . 51
4.3.7. Canales lógicos . . . 52
4.3.8. Evolved NodeB (eNB) . . . 53
4.3.9. Equipo de usuario . . . 53
4.3.10. Señales de referencia (RS) . . . 54
4.4. Tecnologías contempladas en LTE . . . 54
4.4.1. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex): . . . 54
4.4.2. Tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output): . . . 54
4.4.3. Scheduling de paquetes . . . 55
4.4.4. Inter-Cell Interference Coordination . . . 55
4.5. Bloque de recursos físicos (Physical Resource Block) . . . 55
4.6. Estructura de trama . . . 56

5. Diferencias entre las comunicaciones móviles 4G LTE y LTE-Advanced **58**
5.1. Requisitos establecidos . . . 58
5.2. Agregación de portadora (Carrier Agregation) . . . 58
5.3. Coordinación multipunto (CoMP) . . . 60
5.4. Técnicas de múltiples antenas para LTE-Advanced . . . 61
5.4.1. MIMO mejorado en LTE-Advanced . . . 61
5.5. Relaying (Red de nodos relay) . . . 63

6. Comunicaciones móviles 5G **66**
6.1. Escenarios de uso propuestos . . . 66
6.1.1. Banda ancha móvil mejorada (eMBB) . . . 66
6.1.2. Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC) . . . 66
6.1.3. Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) . . . 67
6.2. Modo de operación no independiente (non-standalone) . . . 67

6.3. Red de acceso radio . . . 68
6.4. Interfaz Xn . . . 68
6.5. Protocolos en la interfaz de radio . . . 69
6.6. Protocolos de retransmisión . . . 70
6.7. Maquina de estado RRC . . . 71
6.8. Canales lógicos y de transporte . . . 71
6.9. Capa física . . . 72
6.10. gNB / ng-eNB . . . 73
6.11. ARQ híbrido con combinación suave . . . 73
6.12. Esquema de transmisión . . . 73
6.13. Esquemas Dúplex . . . 75
6.13.1. Formato de Slot e indicación . . . 76
6.13.2. Estructura del dominio del tiempo . . . 79
6.13.3. Estructura del dominio de la frecuencia . . . 80
6.14. Técnica multiantena para NR . . . 80
6.14.1. Tipos de transmisiones . . . 83
6.15. Señales de referencia . . . 83
6.16. Administración de haz . . . 84
6.17. Enlace ascendente suplementario (SUL) . . . 85
6.18. Agregación de portadora (Carrier Agregation) . . . 86
6.19. Partes de ancho de banda . . . 86
6.20. Requisitos establecidos . . . 87
6.21. Interfuncionamiento y coexistencia LTE / NR . . . 87
6.21.1. LTE / NR conectividad dual . . . 88
6.21.2. Escenarios de despliegue . . . 88

7. Comparación de la interfaz de radio 90
7.1. Método de multiplexación . . . 90
7.2. Técnica de acceso . . . 90
7.3. Esquemas de modulación . . . 90
7.4. Ancho de banda de cada radiocanal . . . 90
7.5. Bandas de frecuencia (Colombia) . . . 90
7.6. Velocidad de transmisión pico . . . 91
7.7. Pico de eficiencia espectral . . . 91
7.8. Latencia . . . 91
7.9. Técnicas de corrección de errores . . . 91
7.10. Tabla comparativa de las generaciones de comunicaciones móviles . . . 92

8. Xirio Online: Generalidades, conceptos y configuración 93
8.1. Generalidades . . . 98
8.2. Conceptos . . . 99
8.3. Estudio Radioeléctrico de enlace . . . 105
8.4. Estudio . . . 106
8.4.1. Banda . . . 107
8.5. Extremos . . . 109
8.5.1. Propiedades del sector . . . 109
8.5.1.1. Antena del sector . . . 113
8.5.1.1.1. Diagramas de radiación de la antena del sector . . . 113
8.5.1.2. Propiedades del Feeder . . . 118
8.5.1.3. Planificador . . . 120
8.5.1.3.1. Curva de eficiencia espectral . . . 121
8.5.2. Propiedades del terminal . . . 128
8.5.2.1. Antena del terminal . . . 130

8.5.2.1.1. Diagramas del terminal . . . 130
8.6. Parámetros de cálculo . . . 132
8.6.1. Método de cálculo . . . 132
8.6.2. Capas de cartografía . . . 134
8.7. Estudio Radioeléctrico de cobertura . . . 134
8.7.1. Área del cálculo . . . 135
8.7.1.1. Ajuste automático de áreas . . . 136
8.7.2. Rangos . . . 137
8.8. Estudio Radioeléctrico de multicobertura . . . 138
8.8.1. Parámetros de capacidad . . . 141
8.8.1.1. Usuarios Móviles . . . 142
8.8.1.2. Usuarios Fijos . . . 147
8.8.2. Parámetros de cálculo de la señal . . . 151
8.8.3. Parámetros de interferencia . . . 151
8.8.4. Rangos . . . 154
8.9. Estudio radioeléctrico de enlace 5G . . . 158
8.9.1. Banda . . . 158
8.9.2. Propiedades del sector . . . 159
8.9.3. Propiedades del terminal . . . 161
8.10. Estudio radioeléctrico de cobertura 5G . . . 164
8.11. Estudio radioeléctrico de multicobertura 5G . . . 165

9. Xirio Online: Simulaciones, resultados y comparación 171
9.1. Resultados y comparación del estudio radioeléctrico enlace . . . 171
9.1.1. Enlace (LTE-A) . . . 172
9.1.2. Enlace (5G) . . . 173
9.1.3. Comparación enlace . . . 174
9.2. Resultados y comparación del estudio radioeléctrico cobertura . . . 175
9.2.1. Señal RSRP (LTE-A) . . . 176
9.2.2. Señal SS-RSRP (5G) . . . 177
9.2.3. Comparación cobertura . . . 178
9.3. Resultados y comparación del estudio radioeléctrico multicobertura . . . 179
9.3.1. Señal RSRP (LTE-A) . . . 181
9.3.2. Señal SS-RSRP (5G) . . . 182
9.3.3. Comparación RSRP . . . 182
9.3.4. Solapamiento (LTE-A) . . . 183
9.3.5. Solapamiento (5G) . . . 184
9.3.6. Comparación solapamiento . . . 184
9.3.7. Mejor servidor (LTE-A) . . . 185
9.3.8. Mejor servidor (5G) . . . 186
9.3.9. Comparación mejor servidor . . . 186
9.3.10. Señal RSSI (LTE-A) . . . 187
9.3.11. Señal SS-RSSI (5G) . . . 188
9.3.12. Comparación RSSI . . . 188
9.3.13. Señal RSRQ (LTE-A) . . . 189
9.3.14. Señal SS-RSRQ (5G) . . . 190
9.3.15. Comparación RSRQ . . . 190
9.3.16. Señal PDSCH SINR (LTE-A) . . . 191
9.3.17. Señal SS-SINR DL (5G) . . . 192
9.3.18. Comparación SINR en el canal DL . . . 192
9.3.19. Señal PUSCH SINR (LTE-A) . . . 193
9.3.20. Señal SINR UL (5G) . . . 194
9.3.21. Comparación SINR en el canal UL . . . 194

9.3.22. Throughput teórico DL (LTE-A) . . . 195
9.3.23. Throughput teórico DL (5G) . . . 196
9.3.24. Comparación Throughput teórico DL . . . 196
9.3.25. Throughput teórico UL (LTE-A) . . . 197
9.3.26. Throughput teórico UL (5G) . . . 198
9.3.27. Comparación Throughput teórico UL . . . 198
9.3.28. Throughput teórico DL por usuario (LTE-A) . . . 199
9.3.29. Throughput teórico UL por usuario (LTE-A) . . . 200
9.3.30. Señal RS SINR (LTE-A) . . . 201
9.3.31. Capacidad (LTE-A) . . . 202

10. Conclusiones **207**

11. Limitaciones **210**

12. Trabajos futuros **211**

13. Abreviaturas y Acrónimos **212**

Índice de figuras **219**

Índice de Tablas **220**

Referencias **221**

1. Introducción

En telecomunicaciones móviles se han visto grandes exigencias para los requerimientos técnicos en las últimas décadas, esto se debe a que cada vez es mayor el campo de acción de esta tecnología. En consecuencia se hizo necesario reemplazar 4G ya que no puede cumplir con las prestaciones solicitadas, por lo cual, 5G es definido para satisfacer las necesidades de comunicación masiva de los dispositivos conectados a esta red, garantizando prestaciones de alta velocidad, baja latencia y bajos costos.

Para personas interesadas en estas tecnologías es fundamental estar actualizadas y renovar cada día sus conocimientos, debido a esto es importante tener documentación que facilite la adquisición de estos conceptos. Por ello a través de este documento se pretende dar a conocer las características de las redes de acceso de 4G y 5G de las telecomunicaciones móviles de una manera clara y concisa, buscando transmitir la información recompilada de una manera sencilla para el lector, por lo cual el texto se encuentra dividido en dos partes.

En la primera se da a conocer teoría que ayudará al lector a comprender los diferentes elementos que componen la red de acceso propuesta e implementada en LTE y LTE-A, además también se explican algunos de los cambios realizados respecto a 4G y que se espera sean implementados para la tecnología 5G. En esta primera parte también se mencionan algunos de los requisitos técnicos propuestos por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU), organización que se encarga de regular los estándares emitidos por el sector de radiocomunicaciones.

Para la segunda parte se explica cómo realizar estudios en la herramienta de software “Xirio Online”, con el fin de posteriormente hacer una comparación entre los resultados que se puedan obtener para 4G y 5G, dicha explicación es bastante detallada, ya que se propone que este documento funcione como manual para personas interesadas en usar la herramienta o que en general deseen adquirir conocimientos al respecto.

1.1. Planteamiento del problema

Actualmente existen dos fuertes tendencias en las telecomunicaciones móviles que pueden ser reconocidas como constantes, en primer lugar, el continuo incremento en la velocidad de datos en las comunicaciones, y en segundo lugar, la creciente posibilidad de enviar y acceder a diferentes tipos de información desde cualquier localización y en todo momento, siendo esto parte fundamental de la visión que ofrecen las futuras redes móviles 5G (Quinta Generación) [1].

A pesar de que los sistemas móviles 4G (Cuarta Generación) aún no han terminado de desplegarse completamente (LTE y LTE-Advanced), la investigación de las redes de comunicación móvil 5G ya se está realizando, en este sentido se hace necesario conocer qué modificaciones se van a realizar a la red de acceso por radio para satisfacer los requisitos de una futura red de telefonía móvil 5G, que se desarrollará para soportar las necesidades de un gran ancho de banda en un tiempo de espera reducido [1].

Aunque se tienen grandes expectativas respecto a la red 5G, todavía se están efectuando ajustes y proponiendo algunos cambios en la normatividad de dicha red, esta tarea no es nada fácil ya que se desea generar una normativa global con el objetivo de poseer un estándar internacional y es por ello que en la actualidad se siguen realizando pruebas con las diferentes posibilidades que se tienen para el despliegue de la red móvil 5G. Esto se evidencio el 20 de diciembre de 2017 cuando la asociación de empresas que tienen por nombre 3rd Generation Partnership Program (3GPP) aprobó oficialmente las especificaciones de la Nueva Radio 5G No Autónoma (NSA 5G NR, o Non Standalone 5G New Radio), se trata del primer estándar de 5G de redes móviles, el cual hará uso de la infraestructura 4G ya desplegada para su empleo en el control y gestión del tráfico, debido a esto, se hace necesario que las estaciones base como los terminales tengan la capacidad de realizar la conexión tanto a las redes 4G como a las 5G al mismo tiempo [2].

Por lo mencionado anteriormente se hace necesario realizar una comparación de la interfaz de radio (red de acceso por radio) de la red 4G y las actuales opciones que se tienen para la red 5G, con el fin de conocer si será posible mediante la red de acceso por radio de 5G superar las prestaciones de la red de acceso de 4G, evaluar la viabilidad del uso de la infraestructura existente de 4G por parte de las redes 5G e identificar ventajas, desventajas, limitaciones y similitudes entre las redes de acceso de las comunicaciones móviles de 4G y 5G. Para ello se plantea realizar un análisis de las características principales de estas redes de acceso con base en la investigación teórica y su aplicación por medio de simulaciones de la interfaz de radio de las redes de comunicaciones móviles celular de 4G y 5G, y de esta manera recopilar información necesaria para dar respuesta a la pregunta de investigación, que el proyecto pretende responder, ¿Será posible identificar las ventajas, desventajas, similitudes y limitaciones de la red de acceso de 5G con respecto a la red de acceso de 4G, mediante simulaciones?

1.2. Justificación

1.2.1. Investigación

Como lo indican el 3GPP y la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) se espera que la red 5G se empiece a distribuir comercialmente en el año 2020, actualmente se siguen realizando pruebas de la red y por lo tanto, continua la investigación para obtener una red 5G lo más eficiente posible, con enfoque en la reutilización de la infraestructura 4G (NSA-Non Standalone), el uso únicamente de infraestructura 5G (SA-Stand Alone) con sus respectivos cambios dependiendo de la banda del espectro radioeléctrico que se propone utilizar y por último, la fabricación de teléfonos celulares que puedan recibir los servicios tanto de la red 4G como de la 5G [2]. Es debido a esta variedad de temáticas que se están trabajando y que aún no se han estandarizado completamente, que en este proyecto se pretende evaluar por medio de simulaciónes algunas de las características principales de la red de acceso de la red de comunicaciones móviles 5G y concluir acerca de los avances que se han logrado hasta el momento y las deficiencias con respecto a las prestaciones que las redes 5G prometen proveer.

1.2.2. Académica

Debido a que la tecnología se encuentra en un proceso de cambio y actualización bastante vertiginoso, es necesario contar con textos o investigaciones guía que permitan conocer los recientes hallazgos y aportes académicos. Por dicho motivo se pretende producir un documento guía el cual contenga documentación actual con una base teórica bastante amplia, entendible y además que cuente con simulaciones que complementen y verifiquen los resultados teóricos. De esta manera este proyecto permitirá profundizar el estudio y comprensión del funcionamiento, comportamiento y comparación de las redes de acceso de comunicaciones móviles celulares de la generación actual (4G) y la que esta por desplegarse (5G).

1.2.3. Económica

Debido a la serie de estudios y proyecciones de la red 5G, realizados por grandes compañías en el sector tecnológico [3] [4], se puede afirmar que el incremento en la inversión en esta tecnología permitirá un amplio uso de las comunicaciones móviles, lo cual puede generar un cambio en la forma actual de la prestación del servicio que ofrecen los ISP's (proveedor de servicios de Internet). El medio por el que actualmente se realiza la prestación del servicio de Internet en los hogares y empresas es por medio de una capa física en cobre y en algunos casos, más modernos, por medio de enlaces de fibra óptica. La necesidad de la conexión a Internet en cualquier parte del mundo, el alto costo de realizar el cambio y ampliación de la capa física de la red utilizando fibra óptica, la gran demanda que existe y se proyecta aumentará en los próximos años, son necesidades y problemáticas que permitirán que las redes 5G se implementen dando solución a estos y otros problemas de la red de comunicaciones móviles actual, como por ejemplo permitiendo la conexión de una mayor cantidad de personas, la posibilidad de recibir el servicio en cualquier lugar y la disminución de la latencia, entre otras mejoras. Es por esto que nuestro proyecto se hace importante, ya que es necesario conocer en que estado se encuentran tanto la red de acceso de 4G (la actual) como la de 5G y evidenciar cuales son las principales características que las diferencian para ver sus ventajas y desventajas, de esta manera comprender la potencialidad real que tiene al día de hoy la red 5G de comunicaciones móviles, en busca de incentivar la inversión, lo que llevaría a que se pueda realizar una implementación más rápida, con lo cual los clientes podrán hacer uso de sus mejores prestaciones y en muchos casos utilizarlos para mejorar o innovar en los servicios que prestan en sus respectivas industrias, lo que traería consigo nuevas opciones de negocio.

1.2.4. Social

La realización de la adecuada documentación y los resultados obtenidos de las simulaciones, permitirán proponer avances en la interfaz de radio de 5G, abriendo la posibilidad de causar un impacto positivo en la implementación de IoT (Internet de las cosas), en la comunicación M2M (Machine to Machine) y la comunicación D2D (Device to Device) a través de las redes de comunicaciones móviles. Se espera que la implementación de la red 5G cause una revolución en todos los mercados presentes en la actualidad. Además

se tienen fuertes expectativas respecto a la nueva oportunidad que traerá para todos, en el aspecto educativo, produciendo un incremento en el acceso y mejoramiento en la calidad; y el en aspecto económico, permitiendo la invención de nuevos productos y servicios, acompañados del aumento de la productividad que permitirá la creación de nuevas industrias con mayor competitividad global. Por ello es de vital importancia recopilar la información necesaria para el adecuado entendimiento de la red de acceso, permitiendo una mayor facilidad en el uso e implementación para las personas interesadas en la red 5G [3] [4].

1.2.5. Personal

Es de vital importancia adquirir información y conocimiento pertinente con respecto a los temas de actualidad y conocer lo que se proyecta en el ámbito de formación profesional, en este caso las telecomunicaciones móviles 4G y 5G respectivamente, las cuales proponen un futuro novedoso con el fin de mejorar la calidad de vida a través de su aporte a las tecnologías de IoT. Con este proyecto se busca culminar el proceso académico de pregrado y como resultado obtener el titulo de ingeniero electrónico, además aportar en el campo laboral y de investigación de las telecomunicaciones en el país, buscando incentivar el interés y la inversión en esta tecnología, para que el desarrollo de esta se de más rápido, permitiendo al país estar a la vanguardia del tema y generando de esta manera la posibilidad de que la industria colombiana pueda mejorar e innovar en los servicios que presta.

1.3. Objetivo General

Simular y comparar la interfaz de radio de las redes de comunicaciones móviles celulares 4G y 5G con el fin de, establecer si será posible mediante la red de acceso de 5G superar las prestaciones de la de 4G.

1.3.1. Objetivos específicos

1. Documentar el principio de funcionamiento y las características de la interfaz de radio de las redes de comunicaciones móviles celulares de 4G y 5G.
2. Seleccionar las características principales que diferencian las interfaces de radio de las redes de comunicaciones móviles celulares de 4G y 5G.
3. Escoger la herramienta de software mediante la cual se realizarán las simulaciones.
4. Analizar mediante simulaciones[1] las diferencias entre las interfaces de radio de las redes de comunicaciones móviles celulares de 4G y 5G.
5. Describir las similitudes, diferencias, ventajas y desventajas de las redes de acceso de comunicaciones móviles celulares de 4G y 5G.

[1] Las simulaciones a partir de las cuales se analizarán y compararán las redes de acceso 4G y 5G, estarán supeditadas a las facilidades y limitaciones que la herramienta de simulación seleccionada presente en el momento en el que se realizará el proyecto de grado.

1.4. Resumen

En este proyecto de grado se realizó la comparación teórica de la interfaz de radio de las tecnologías de comunicaciones móviles 4G ya implementada y la de 5G que está por implementarse, además la comparación de las simulaciones de estas interfaces de radio, describiendo ventajas, desventajas, similitudes, diferencias y limitaciones que existen entre estas tecnologías, para el desarrollo de este proyecto.

En el capítulo 2 "Marco teórico" se documentó un marco teórico amplio que parte desde la temática general de las telecomunicaciones y realiza una revisión de conceptos base acerca de parámetros, propiedades, técnicas y desarrollos tecnológicos que permiten el funcionamiento de las telecomunicaciones móviles.

El capítulo 3 "Estado del arte" se dividió en dos partes, en la primera se realiza un repaso de las generaciones de comunicaciones móviles desde la 2G, debido a que desde está generación el procesamiento es digital; este repaso tiene como finalidad observar los avances en técnicas, características, principios de funcionamiento y desarrollos tecnológicos que se dieron en cada generación y el porqué de estos cambios, o debido a qué necesidades, ejemplos tales como: envío de mensajes de texto SMS, conexión a Internet, envió de fotos y videos, aumento en la velocidad, disminución de la latencia, entre muchas otras necesidades que el consumidor y los operadores (el mercado) han ido generando a lo largo de estos años. En la segunda parte del estado del arte, se mencionan cuatro documentos que fueron fundamentales para poder comprender el funcionamiento y progreso de las tecnologías móviles, los cuales aportaron en gran medida a la base conceptual de este proyecto de grado.

En el capítulo 4 "Comunicaciones móviles 4G LTE" se efectúa la explicación de la arquitectura, principios de funcionamiento, parámetros, propiedades y prestaciones que tiene la tecnología LTE, para posteriormente indicar en el capítulo 5 "Diferencias entre las comunicaciones móviles 4G LTE y LTE-Advanced", qué diferencias o qué avances tuvo la tecnología LTE-A, la cual es la que se va a comparar en términos teóricos y con simulaciones por medio de la herramienta de simulación Xirio Online, con la tecnología 5G, de está también se indica su arquitectura, principios de funcionamiento, parámetros, propiedades y prestaciones en el capítulo 6 "Comunicaciones móviles 5G".

En el capítulo 7 "Comparación de la interfaz de radio" se seleccionaron las características principales que diferencian las interfaces de radio de las redes de comunicaciones móviles celulares de 4G y 5G, para realizar la comparación puntual entre las tecnologías LTE-A y 5G, se agrega una tabla de comparación general de las tecnologías móviles desde la 2G hasta la 5G.

Para el proceso de comparación de las tecnologías móviles por medio de la herramienta de software Xirio Online, en el capítulo 8 "Xirio Online: Generalidades, conceptos y configuración" se buscó ser lo más detallado posible en la explicación de los parámetros que posee el software, buscando que este proyecto de grado, tanto en el componente teórico como en el de utilización del software de simulación, sea una guía lo más útil y clara posible para personas que estén interesados en la temática o estén en procesos de aprendizaje o investigación. Seguidamente, en el capítulo 9 "Xirio Online: Simulaciones, resultados y comparación", luego de la explicación de la configuración de los estudios, se realiza la comparación de los resultados que son posibles de relacionar entre las tecnologías LTE-A y 5G, para luego finalizar el proyecto con las conclusiones, capítulo 10 "Conclusiones", acerca de la diferencias, similitudes, ventajas y desventajas, además concluir si fue posible por medio de simulaciones realizar esta comparación de la interfaz de radio de las tecnologías móviles de telecomunicaciones de 4G y 5G e indicar si 5G supera las prestaciones de 4G.

1.5. Abstract

In this degree project, it is made a theoretical comparison of the radio interface of the mobile communication technologies 4G already implemented and 5G that is about to be implemented, besides, the comparison between the simulations of these radio interfaces, describing advantages, disadvantages, similarities, differences and limitations that there are among these technologies for the development of this project.

In the chapter 2 “Theoretical framework”, was documented a broad theoretical framework that starts from the general subject of telecommunications and a review of basic concepts about parameters, properties, techniques and technological developments that allow the operation of mobile telecommunications.

The chapter 3 “State of the art” was divided into two parts, the first one is a review of the generations of mobile communications from 2G, due to from this generation the processing is digital; this review is intended to observe the advances in techniques, characteristics, operating principles and technological developments which occurred in each generation and the reason for these changes, or because of needs, examples such as: sending SMS text messages, Internet connection, sending photos and videos, increased speed, decreased latency, among many other needs that the consumer and operators (the market) have been generating throughout these years . In the second part of the state of the art, four documents are mentioned that were fundamental in order to understand the operation and progress of mobile technologies, which contributes greatly to the conceptual basis of this degree project.

In the chapter 4 “4G LTE mobile communications” you find an explanation of the architecture, operating principles, parameters, properties and benefits that LTE technology has, to later indicate in the chapter 5 “Differences between 4G LTE and LTE-Advanced mobile communications”, the differences or advances that the LTE-A technology had, which is going to be compared in theoretical terms and with simulations by means of the Xirio Online simulation tool, with 5G technology, also indicates its architecture, operating principles, parameters, properties and performance in the chapter 6 “5G Mobile Communications”.

In the chapter 7 “Radio interface comparison” were chosen the main characteristics that differentiate radio interfaces from 4G and 5G cellular mobile communication networks, to make the comparison between LTE-A and 5G technologies, it is added a general comparison table of mobile technologies from 2G to 5G.

For the process of comparison of mobile technologies using the Xirio Online software tool, the chapter 8 “Xirio Online: Generalities, concepts and configuration” was as detailed as possible in explaining the parameters that the software has, looking for this degree project, both for the theoretical component as the use of the simulation software, to be the most useful and clear guide possible for people who are interested in the subject, who are in learning or research processes. Then, in the chapter 9 “Xirio Online: Simulations, results and comparison”, after the explanation of the configuration of the studies, is made the comparison of the results that are possible to relate between LTE-A and 5G technologies, for later end the project with the conclusions, chapter 10 “Conclusions”, about the differences, similarities, advantages and disadvantages, also conclude if it was possible by means of simulations to make this comparison of the radio interface of mobile telecommunications technologies of 4G and 5G and indicate if 5G exceeds 4G performance.

2. Marco Teórico

La información presentada en este capítulo es obtenida en su gran mayoría de los libros “Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles” [7] y “Comunicaciones Móviles Sistemas GSM, UMTS y LTE" [13].

2.1. Comunicaciones Móviles [5] [6]

Según la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones), se habla de comunicaciones móviles cuando existe al menos un terminal cuya ubicación se desplaza, requiriéndose servicio durante ese desplazamiento.

El reglamento de radiocomunicaciones define el servicio móvil como un servicio de radiocomunicaciones entre estaciones móviles y estaciones terrestres (fijas) o entre estaciones móviles únicamente. Además, en función de dónde se sitúa habitualmente el terminal móvil, el reglamento diferencia tres tipos de servicio:

- Servicio móvil terrestre.
- Servicio móvil marítimo.
- Servicio móvil aeronáutico.

Es importante destacar que al hablar de comunicaciones móviles se está pensando, generalmente, en un sistema de comunicaciones punto a punto. Aunque también es posible en algunas circunstancias efectuar comunicaciones punto a multipunto, se trata de una configuración especial del servicio que sirve a aplicaciones particulares.

2.2. Composición de los Sistemas de Comunicaciones Móviles

La composición de los sistemas de comunicaciones móviles se da de la siguiente manera:

- **Estaciones fijas (FS):** Una estación fija es una estación radioeléctrica cuyo uso no está previsto que sea en movimiento. Existen varios tipos de estaciones fijas:
  - **Estaciones base (BS):** También llamada estación base transceptora (BTS), es una estación radioeléctrica fija que puede ser fuente o destino de tráfico, cuyo funcionamiento se controla desde una unidad de control situada en cierto emplazamiento. El control puede ser local o remoto, mediante líneas telefónicas o radioenlaces. Las estaciones base tienen como característica primordial el de ser fuentes y destinatarias de tráfico y de señalización. Están constituidas por equipos transceptores, sistemas radiantes y elementos de conexión entre estos.
  - **Estaciones repetidoras (RS):** Son estaciones que retransmiten señales electromagnéticas amplificadas, usadas para lograr un objetivo de cobertura determinado, sirven para comunicar estaciones base con estaciones móviles que están fuera de la zona de cobertura de estas. Se emplean para conseguir una gran cobertura radioeléctrica, por lo que se suelen ubicar en lugares altos. También se usan para el relleno de zonas de sombra en la cobertura de una estación base o para proporcionar cobertura en escenarios difíciles, tales como túneles, estacionamientos subterráneos, etc.
  - **Estaciones de control y conmutación (CCS):** Estaciones que gobiernan automáticamente el funcionamiento de una estación base o repetidora de un emplazamiento. Es el elemento central del sistema, sus funciones principales son:
    - Coordina y administra todas las BTS.
    - Coordina las llamadas entre la oficina de telefonía fija y los abonados, así como las llamadas entre los terminales celulares y los abonados, a través de las BTS.
    - Se encarga de la facturación (billing).
    - Dirige el Hand off entre cell site.
    - Utiliza un sotfware especializado para la gestión de la red, entre otras.

Puede ser de 2 tipos (de acuerdo al área geográfica y cantidad de tráfico) :

- **Centralizado:** Una única central para toda el área de concesión del operador.
- **Descentralizado:** Más de una central, distribuido en el área de concesión.

- **Estaciones móviles (MS):** Estaciones radioeléctricas o terminales previstas para su uso en movimiento. El término incluye a los equipos portátiles o de mano, que son aquellos que acompañan al usuario, y a los denominados equipos transportables, que pueden instalarse temporalmente en vehículos (coches, motocicletas, bicicletas, etc) y llevarse también en la mano. A las estaciones móviles de un sistema suele llamárseles genéricamente terminales o terminales moviles.

  Se denomina enlace descendente DL (downlink) al sentido de comunicación de estación fija a terminal móvil. El enlace ascendente UL (uplink) corresponde al sentido de comunicación de terminal móvil a estación fija. La distancia de cobertura en el DL se denomina alcance, en el UL retroalcance.

- **Equipos de control (CE):** Son Aquellos que añaden la inteligencia de red, y que por tanto dan carácter de sistema al conjunto de estaciones, en general son el conjunto de equipos de control necesarios para:

  - La administración adecuada de las estaciones base, móviles y repetidoras.
  - La generación y recepción de llamadas.
  - Localización e identificación de usuarios, de equipos y vehículos.
  - Transferencia de llamadas a red telefónica.
  - Señalización de canales, etc.

2.3. Red de Acceso [8] [9]

Es toda la infraestructura de comunicaciones existente entre el punto de conexión del terminal de usuario y el primer equipo que procesa la información en el nivel de red, es decir, en el nivel 3 del modelo OSI (Open System Interconection). Dicho de otra manera es la parte de la red de comunicaciones la cual permite la conexión entre los usuarios finales y algún proveedor de servicios.

Dependiendo el medio de comunicación la red de acceso se puede dividir en:

- Acceso Alámbrico o Acceso por Cable Físico.
- Acceso Inalámbrico o Acceso Radio.

Su función principal es recoger el tráfico proveniente de la red periférica (edge) e ingresarlo al núcleo de la red, en sentido contrario, extrae el tráfico del núcleo de la red que esta destinado a la porción de la red periférica a la que da servicio.

2.3.1. Red de Acceso Radio o Red de Acceso Inalámbrico

Es la parte del sistema responsable de sustentar la transmisión radio con los equipos de usuario, de cara a proporcionar la conectividad necesaria entre éstos y los equipos de la red troncal (backbone), haciendo uso de la propagación de las señales electromagnéticas a través del espacio libre y de los fenómenos físicos de reflexión, refracción, difracción y dispersión que las modifican. Los servicios de transmisión ofrecidos por la red de acceso para transportar la información de los equipos de usuario (tanto información de datos como señalización) hacia y desde la red troncal son servicios portadores, es decir, servicios cuya finalidad última es proveer de una cierta capacidad de transmisión. La red de acceso es la responsable de gestionar el uso de los recursos radio disponibles para la provisión de servicios portadores de forma eficiente. La activación de los recursos de transmisión en la red de acceso se controla generalmente desde la red troncal [10].

2.4. Espectro Electromagnético [11]

Se define la propagación como un mecanismo de transporte de energía en el espacio y en el tiempo. Una onda es una propagación de una perturbación de alguna propiedad en un medio determinado.

Una onda electromagnética es la propagación simultánea de los campos eléctrico y magnético producidos por una carga eléctrica en movimiento. Las principales características de las ondas electromagnéticas son las siguientes:

- No necesitan un medio para propagarse: Pueden propagarse en el vacío o en cualquier otro medio.
- Son tridimensionales: Se propagan en las tres direcciones del espacio.
- Son transversales: La perturbación se produce perpendicularmente a la dirección de propagación.

A las ondas electromagnéticas se le denomina radiación electromagnética. Esta radiación puede ser de origen natural o artificial. El espectro electromagnético es la distribución energética del conjunto de las ondas electromagnéticas. En otras palabras, el espectro electromagnético es el conjunto de todas las frecuencias (número de ciclos de la onda por unidad de tiempo) posibles a las que se produce radiación electromagnética. Así, el límite teórico inferior del espectro electromagnético es 0 (ya que no existen frecuencias negativas) y el teórico superior es ∞. Con los medios técnicos actuales, se han detectado frecuencias electromagnéticas inferiores a 30 Hz y superiores a $2,9 * 10^{27}$ Hz.

2.4.1. Ondas Milimétricas (MMW)

Las ondas electromagnéticas denominadas ondas milimétricas (MMW), son ondas de frecuencia comprendida entre 30 GHz y 300 GHz (banda de EHF, según la UIT). Éstas ondas son parte de las llamadas microondas (ondas en el rango de frecuencia comprendido entre 300 MHz y 300 GHz, este rango incluye las bandas de UHF, SHF y EHF), uno de los atractivos más importantes de las MMW es que a frecuencias tan elevadas los anchos de banda disponibles son mucho mayores, permitiendo la instalación de radioenlaces con capacidades de múltiples Gbps, la mayor desventaja es el alto nivel de desvanecimiento de la onda [12].

2.5. Acceso Múltiple

Las comunicaciones móviles presentan una característica diferencial con respecto a otros sistemas de comunicaciones que tienen una asignación exclusiva y dedicada de recursos. Muy al contrario, los sistemas móviles se caracterizan por la existencia de una serie de recursos compartidos entre los usuarios del sistema, y por cuya utilización contienden. Sin embargo, no debemos tampoco pensar que esta situación sea única en los sistemas móviles, sino que por el contrario se puede dar en otros sistemas a características más estables, como son por ejemplo las redes locales de ordenadores.

Centrados, por tanto, en los sistemas de comunicaciones móviles, apreciamos que éstos tienen el aire, el espacio conocido como libre, como medio en que se propagan y con una característica tal de movilidad que, en principio, no se debe establecer restricción de acceso a la red que les da soporte. Para proporcionar un adecuado soporte al sistema, deberemos coordinar el denominado acceso al medio, es decir, el uso de este medio compartido. La forma en que se suele abordar este problema es por medio de la división de la interfaz común aire en lo que llamaremos canales físicos, que no son ni más ni menos que aquellas facilidades concedidas a los usuarios para que accedan al recurso común y compartido, es decir, el aire. Sobre estos canales físicos se definen los canales lógicos, que son las utilizaciones concretas que se hacen de los canales físicos de acuerdo con un cierto protocolo o estándar de comunicaciones con el fin de conseguir la comunicación coordinada e inteligente de los elementos del sistema.

2.6. Técnicas de Acceso Múltiple

Refiriéndonos a los canales físicos, las técnicas de multiacceso son los procedimientos de acceso al medio, que se usarán de acuerdo con los criterios establecidos por un cierto canal lógico .

2.6.1. FDMA Acceso Múltiple por División de Frecuencia

FDMA es el método más convencional de acceso múltiple y fue la primera técnica que se empleó en las aplicaciones inalámbricas. En FDMA, el ancho de banda disponible se divide en una serie de sub bandas iguales, cada una de las cuales constituye un canal físico. El ancho de banda del canal es una función de los servicios que se prestarán y de la tecnología disponible, y se identifica por su frecuencia central, conocida como portadora (carrier). Hay un solo canal por portadora FDMA y los canales, una vez asignados, se utilizan sobre una base de tiempo no compartido. Por lo tanto, un canal asignado a un determinado usuario permanece asignado hasta el final de la tarea para la que se hizo esa asignación específica.

La configuración del FDMA es diferente dependiendo si nos referimos a los canales ascendentes o descendentes:

- **Enlace Ascendente:** En este enlace el usuario concentra su información en un canal concreto que el sistema en el caso más general le asigna, por medio de la selección en su transmisor de la frecuencia correcta.
- **Enlace Descendente:** En este enlace la red difunde el conjunto de todos los radiocanales, y cada receptor sintoniza mediante un filtro pasa banda la frecuencia que le corresponde.

Las características mas destacadas del FDMA son:

- Validez para modulaciones tanto analógicas como digitales.
- Limitaciones en la inclusión de señalización y otra información para la mejora de la calidad (por las propias limitaciones de las modulaciones digitales en este terreno).
- Facilidad conceptual en la operación de los sistemas y facilidad en la fabricación de los equipos.
- Inconvenientes en los límites establecidos entre canales para que la información no se interfiera, diferentes según la frecuencia de trabajo que se considere.
- Posibilidad de intermodulaciones en elementos no lineales de canales suficientemente próximos.

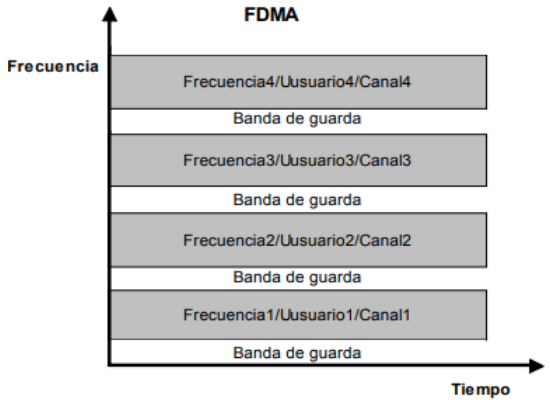


Figura 1: Acceso Múltiple por División de Frecuencia [14]

2.6.2. TDMA Acceso Múltiple por División de Tiempo

La técnica de acceso por división de tiempo se aplica únicamente a señales digitales, con esta técnica el ancho de banda completo se pone a disposición de todas las señales, pero en régimen de tiempo compartido. La comunicación se lleva a cabo en un esquema de almacenamiento y reenvío, de modo que la información

de la fuente primero se almacena, y después se transmite. Antes de la transmisión, la información permanece almacenada durante un período de tiempo conocido como una trama (frame). La transmisión se produce a continuación, dentro de un intervalo de tiempo conocido como un espacio de tiempo (time slot). Por ello lo que tenemos es un sistema en que aunque para el usuario presenta una apariencia de tener un recurso siempre a él asignado en exclusiva, la realidad es que el recurso se va alternando entre varios usuarios a una velocidad lo suficientemente alta como para que el efecto no pueda apreciarse. Aparecen de este modo las necesidades adicionales de memorias en el sistema capaces de almacenar la comunicación del usuario hasta que ésta sea requerida para su transmisión.

Al mismo tiempo, el sistema debe poseer un mecanismo de direccionamiento capaz de distinguir a los usuarios, así como de sincronización para que cada terminal pueda determinar cuál es el momento en que le toca acceder al recurso compartido.

Las características básicas del acceso TDMA son:

- Estricta necesidad de sincronización en el acceso, en tanto que se requiere una rigurosa sincronización temporal de los usuarios móviles con el sistema para evitar colisiones entre ráfagas en la transmisión en el enlace ascendente, y conseguir que en el enlace descendente cada terminal escoja la información que le corresponde.
- Facilidad de transmisión de señalización, por canal común o asociado.
- Ocupación del espectro de banda ancha por la naturaleza de la modulación digital, en la que si no se limita la emisión de frecuencias mas allá de ciertos limites de canal éstas ocupan más espectro del inicialmente asignado.
- Necesidad de establecer limitación de la duración de las tramas, por la necesidad del acceso al medio sin retrasos excesivos.
- Retardo en la comunicaciones por el almacenamiento de información en los sistemas que manejan este tipo de información.
- Posibilidad de ahorro espectral con la realización de comunicaciones full dúplex a una única frecuencia.
- Posibilidad de aumento de la velocidad de transmisión, por medio de la asignación de varios intervalos temporales a un mismo usuario en la misma trama.

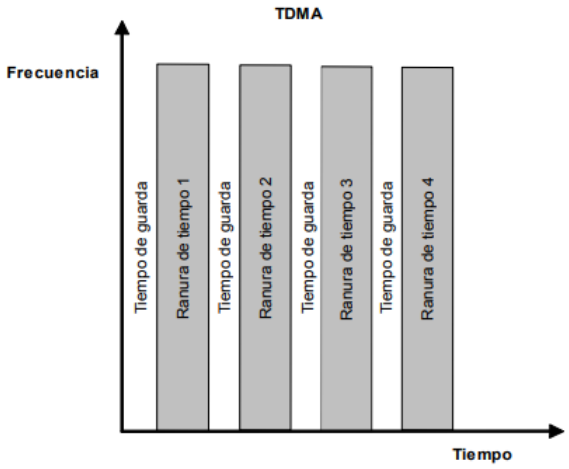


Figura 2: Acceso Múltiple por División de Tiempo [14]

2.6.3. CDMA Acceso Múltiple por División de Código

CDMA es una técnica no convencional de acceso múltiple que se aplica a señales digitales y se utiliza de gran manera en los sistemas inalámbricos. En CDMA el ancho de banda está disponible simultáneamente para todos los usuarios todo el tiempo disponible, y se distinguen unas comunicaciones de otras por el código asignado. El espectro de la señal es ensanchado para ocupar toda la banda de frecuencias (no hay división en canales).

La técnica CDMA hace uso de las técnicas de espectro ensanchado o spread spectrum, donde a cada señal se le asigna un código digital (de forma diferente según cuál sea la variante spread spectrum utilizada: Direct Sequence, Frequency Hopping) que es el que sirve para diferenciar unas comunicaciones de otras.

Tipos de CDMA:

- CDMA de secuencia directa (Direct Sequence).
- CDMA de salto de frecuencia (Frequency Hopping).

Las características principales de las técnicas de CDMA son:

- Se precisa una sincronización muy estricta (para conseguir el enganche de receptores).
- Ofrecen gran capacidad de tráfico, pero a costa de un gran ancho de banda utilizado.
- Debido a este ancho de banda elevado, los receptores tienen una gran resolución temporal y son capaces de aprovechar las distintas señales que por efecto del multitrayecto llegan al receptor como réplicas de la señal original, para sumar de forma constructiva sus potencias recibidas (receptores RAKE o rastrillo).
- Se puede reutilizar una frecuencia en celdas contiguas, con la utilización de códigos diferentes en las celdas, facilitando de hecho la planificación frecuencial.
- Esta técnica puede ser utilizada para una mayor facilidad en la realización de los traspasos (handovers) en tanto que las frecuencias en todas las estaciones base de los sistemas celulares serían las mismas, aprovechando esta circunstancia incluso para técnicas de diversidad que mejoren la señal recibida.
- Con esta técnica se puede transmitir a niveles de potencia mas bajos, lo cual permite más tiempo de conversación y generará la posibilidad de uso de baterías más pequeñas y livianas.

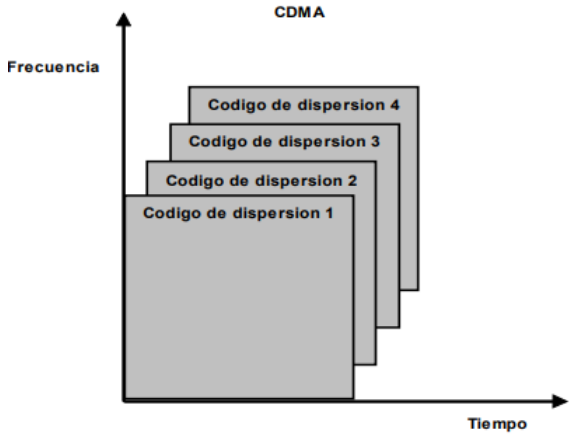


Figura 3: Acceso Múltiple por División de Código [14]

2.6.4. WCDMA Acceso Múltiple por División de Código de Banda Ancha [15]

WCDMA es una tecnología móvil inalámbrica de tercera generación que aumenta las tasas de transmisión de datos de los sistemas GSM utilizando la interfaz áerea CDMA en lugar de TDMA. WCDMA forma parte del conjunto de técnicas de acceso múltiple por separación de código (CDMA), que tienen en común que todos los usuarios transmiten simultáneamente, por lo que no existe separación en el tiempo y con el mismo ancho de banda al no existir separación en frecuencia, pudiendo ser discriminados porque a los usuarios se les asigna un código que los identifica de forma unívoca, WCDMA utiliza el método de acceso al canal denominado Acceso Múltiple por División de Código de Secuencia Directa (Direct Sequence Code División Múltiple Access, DS-CDMA) de banda ancha, es decir, que los bits de información de usuario se extienden dentro de una amplia banda ancha, multiplicando los datos de los usuarios con los bits cuasi aleatorios (llamados chips) derivados de códigos de expansión o ensanchamiento de CDMA. Con el fin de apoyar a muy altas tasas de bits (hasta 2 Mbps), se admite el uso de un factor de ensanchamiento variable y conexiones de núcleo múltiple.

WCDMA soporta dos modos de operación básicos: Duplexación por División de Frecuencia (Frequency División Dúplex, FDD) y Duplexación por División de Tiempo (Time División Dúplex, TDD).

2.6.5. OFDMA Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales

La técnica de transmisión OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) constituye un mecanismo de transmisión multi-portadora consistente en multiplexar un conjunto de símbolos sobre un conjunto de subportadoras. Gracias a las propiedades de ortogonalidad de dichas subportadoras, es posible efectuar la transmisión simultánea de todos los símbolos manteniendo la capacidad de separación de los mismos en recepción.

La técnica de acceso múltiple OFDMA surge de forma natural a partir de la modulación OFDM (explicada anteriormente) al considerar la posibilidad de que los diferentes símbolos modulados sobre las subportadoras pertenezcan a usuarios distintos. De esta forma, es posible acomodar varias transmisiones simultáneas correspondientes a diferentes flujos de información al viajar en subportadoras diferentes. OFDMA tiene un elevado número de puntos a favor entre los que destacan la fácil implementación del proceso de demodulación/modulación mediante la transformada rápida de Fourier (FFT) y su inversa (IFFT), su robustez al multitrayecto, su sencilla adaptación a las condiciones del canal, una menor sensibilidad a la necesidad de sincronización temporal y una mayor eficiencia espectral con respecto a esquemas mono-portadora. Sin embargo, también tiene algunos inconvenientes, entre los que destacan una alta sensibilidad a errores de sincronización en frecuencia debida al pequeño espaciamiento entre subportadoras, una cierta ineficiencia energética y reducción de la tasa binaria debida a la inclusión del prefijo cíclico y un elevado factor PAPR (relación de potencia pico a promedio) que la hace muy sensible a las no linealidades introducidas por el amplificador de potencia.

2.6.6. SC-FDMA Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única [16]

El acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (SC-FDMA) es una variante tecnológica de OFDMA que se adapta a la transmisión de enlace ascendente. Utiliza el estándar OFDMA de bloques de transceptor con diferente ordenamiento. SC-FDMA (también conocido como DFT-precoded / spread OFDMA) es la versión multiusuario de la modulación de portadora única con ecualización en el dominio de la frecuencia (SC / FDE) (única portadora / ecualización en el dominio de la frecuencia). El principal objetivo de SC-FDMA es introducir la transmisión con un PAPR más bajo que OFDMA. Desde OFDMA muestra fluctuaciones envolventes, y señales con alta PAPR requieren amplificadores de potencia altamente lineales para reducir la distorsión, el diseño de los terminales móviles es complejo y se vuelven pertinente tener cuidado con el manejo de la potencia que se utilizará. Otro objetivo es abordar el inconveniente del desplazamiento de frecuencia de OFDMA. En el enlace ascendente, hay múltiples transmisiones simultáneas desde diferentes estaciones móviles, si hay un ligero desplazamiento de frecuencia, la ortogonalidad de las subportadoras en OFDMA puede ser destruida fácilmente.

Los problemas mencionados anteriormente se tratan en SC-FDMA de la siguiente manera: a diferencia de OFDMA, que usa transmisión en paralelo, SC-FDMA transmite símbolos de manera secuencial para que el PAPR se reduzca al extender un poder de símbolo sobre subportadoras. Además, SC-FDMA en un modo introduce la programación localizada en la que se asignan subportadoras contiguas a un usuario. Esto hace que la estación móvil sea más robusta al desplazamiento de frecuencia que OFDMA, pero, por supuesto, el orden de diversidad se vuelve más baja que en OFDMA.

2.7. Modo de Explotación

Para que un sistema de comunicaciones nos permita trasmitir y recibir información, hemos de utilizar alguna de las técnicas de multiplexación. Básicamente, existen dos: multiplexación por división en frecuencia (FDD, Frecuency División Duplexing) en la que el envío y recepción se realiza en diferentes frecuencias, y multiplexación por división en el tiempo (TDD, Time División Duplexing) en la que el envío y recepción se realizan en la misma frecuencia pero en intervalos de tiempo diferentes.

Puesto que diversas regiones tienen diversos esquemas de asignación de la frecuencia, la capacidad de funcionar en modo de FDD o TDD permite la utilización eficiente del espectro disponible.

2.7.1. TDD Duplexación por División de Tiempo

La duplexación por división de tiempo también llamado modo Half-Duplex es un método que permite disponer de una comunicación bidireccional utilizando toda la capacidad de la línea, las transmisiones del enlace ascendente (UL/uplink) y del descendente (DL/downlink) se transportan en la misma banda de frecuencia usando intervalos de tiempo (slots de trama) de forma síncrona. Así las ranuras de tiempo en un canal físico se asignan para los flujos de datos de transmisión y de recepción. Esto quiere decir que el móvil o estación base pueden recibir o transmitir datos, pero no se pueden realizar de forma simultanea.

La duplexación por división de tiempo tiene una gran ventaja en los casos en los que hay asimetría entre la velocidad del uplink y el downlink, ya que cuando en alguno de estos enlaces la cantidad de datos aumente, es posible incrementar la capacidad de comunicación, o por el contrario cuando disminuye el tráfico de datos se puede reducir, esto se puede resolver aumentado o disminuyendo el time slot aunque también se podrían agregar o reducir los time slot's según la necesidad.

Una de las desventajas de esta técnica es que se deben utilizar tiempos de guardia entre las estaciones base contiguas, lo que implica que la eficiencia del uso del espectro decrementa, o para evitar esto se necesita sincronizar estaciones base, para que puedan transmitir y recibir al mismo tiempo, lo que incrementa la complejidad y el costo. Otra desventaja es que esta técnica desperdicia ancho de banda durante el cambio de transmisión a recepción, por lo tanto, se genera una mayor latencia.

2.7.2. FDD Duplexación por División de Frecuencia [17]

La duplexación por división de frecuencia también llamado modo Full-Duplex o modo completo, en general requiere la asignación a cada usuario de dos sub-bandas de frecuencias distintas: una destinada a las comunicaciones en enlace descendente (de la estación base a los móviles) y otra para el enlace ascendente (desde los móviles hacia la estación base), esto también significa que la frecuencia de la señal portadora depende del sentido de la transmisión. Como resultado, esta técnica permite la transmisión y recepción simultanea de datos, logrando así un rendimiento alto y una latencia muy baja.

Una de las ventajas de la duplexación por división de frecuencia es que permite que el planeamiento de radio sea más fácil y más eficiente, debido a que las estaciones base no se "escuchan" entre estas (transmiten y reciben en diferentes sub-bandas) y por lo tanto, normalmente no se interfieren entre ellas, pero poseen la desventaja de que deben utilizar una mayor cantidad de frecuencias diferentes, por lo tanto, utilizan mayor espectro electromagnético, el cual es bastante limitado en las bandas disponibles para las telecomunicaciones.

2.8. Sistemas MIMO [19]

Hay un número de diferentes configuraciones MIMO o formatos que se pueden utilizar, los cuales se denominan SISO, SIMO, MISO y MIMO. Estos diferentes formatos MIMO ofrecen diferentes ventajas y desventajas estos pueden ser equilibrados para proporcionar la solución óptima para cualquier aplicación. Los diferentes formatos requieren diferentes cantidades de antenas, así como diferentes niveles de complejidad; también dependiendo del formato, el procesamiento puede ser necesario en un extremo del enlace o en el otro, lo cual puede tener un impacto en las decisiones tomadas. Las diferentes formas de tecnología de antena se refieren a las entradas y salidas individuales o múltiples. Estos están relacionados con el enlace de radio. De esta manera la entrada es el transmisor que transmite en la trayectoria de enlace o trayectoria de la señal, y la salida es el receptor. Por lo tanto, las diferentes formas de múltiples enlaces individuales se definen a continuación:

- **Sistemas SISO:** Una antena transmisora y una antena receptora (1 x 1).
- **Sistemas SIMO:** Una antena transmisora y múltiples antenas receptoras (1 x R_x).
- **Sistemas MISO:** Múltiples antenas transmisoras y una antena receptora (T_x x 1).
- **Sistemas MIMO:** Múltiples antenas transmisoras y múltiples antenas receptoras (T_x x R_x).

2.8.1. MIMO Múltiple Entrada Múltiple Salida

Los sistemas MIMO (Multiple Input Multiple Output) son aquellos que basan sus modelos en múltiples entradas (extremo transmisor) y múltiples salidas (extremo receptor), en sistemas inalámbricos la tecnología MIMO usa más de una antena tanto en el receptor como en el transmisor, estos sistemas usan por lo menos los T_x x R_x canales físicos de propagación creados por las antenas introducidas al sistema, donde T_x y R_x son el número de antenas transmisoras y receptoras respectivamente. Esta tecnología hace uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia,y que aprovecha la propagación multicamino para incrementar la eficiencia espectral del sistema de comunicaciones inalámbrico. Esto lo consigue a través del uso de diversidad de antenas, distintas técnicas y complejos algoritmos de tratamiento digital de señales en ambos extremos del enlace [19] [20].

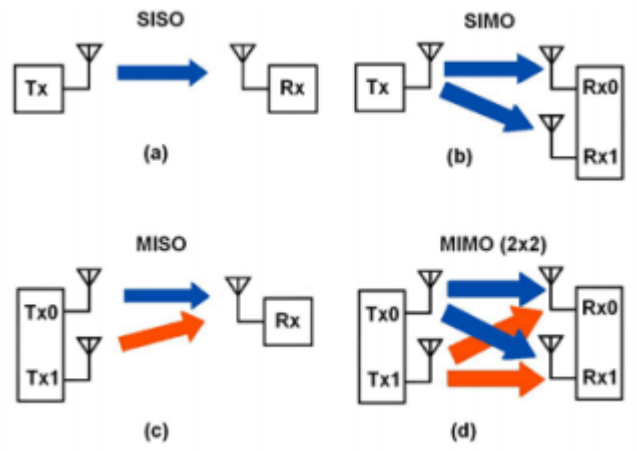


Figura 4: Sistemas MIMO [19]

2.8.2. Clasificación de Técnicas MIMO

Las técnicas de múltiples antenas en sistemas inalámbricos pueden ser clasificadas en dos categorías:

- **Multiplexación Espacial:** Consiste en crear múltiples canales en paralelo para procesar diferentes tramas de datos al mismo tiempo. La técnica de multiplexación espacial (SM) se basa en utilizar al máximo la capacidad del arreglo de antenas en el transmisor de tal manera que no se envíe la misma información en todas las antenas sino que los datos sean separados para su envío. La multiplexación espacial con el mismo ancho de banda permite transmitir y recibir más información dado que las diferentes antenas proporcionan canales de propagación distintos usados en paralelo por ende esta técnica se concentra en mejorar la tasa de transmisión del sistema en términos de la eficiencia espectral [19].
- **Diversidad Espacial:** Consiste en crear canales independientes en el espacio y enviar la misma información en esos caminos, sin usar ancho de banda adicional. En comunicaciones inalámbricas esto se consigue mediante diversidad de antenas, es decir, usando varias antenas transmisoras (diversidad en transmisión) y/o varias antenas receptoras (diversidad en recepción), una consecuencia de ello es que al combinar estas distintas réplicas, se puede conseguir a la salida de un combinador apropiado una nueva señal con un mayor nivel de potencia instantánea, y de este modo recuperar finalmente la señal de información modulada en mejores condiciones de relación de potencia de señal a ruido [20].

2.8.3. Precoding y Beamforming [20]

Precoding (traducido al castellano, precodificación), en el sentido amplio de la palabra, se refiere a todas las técnicas de procesado espacial que se realizan en el transmisor MIMO. Pero en un sentido más específico, hace referencia a un caso especial de beamforming para transmisiones multidimensionales, como las que realizan los sistemas MIMO.

El beamforming convencional es una técnica de procesado de señales usada para controlar el patrón de radiación en una antena. Funciona enviando múltiples señales y analizando el feedback (señales de vuelta) de los dispositivos móviles. Así, la infraestructura de la red inalámbrica puede ajustar estas señales enviadas y determinar cuál es el mejor camino que deberían tomar para alcanzar un dispositivo móvil. Aporta la funcionalidad de un filtro espacial y es aplicada tanto en transmisión como en recepción:

- **En recepción:** El beamforming se utiliza para incrementar o disminuir la sensibilidad del receptor en una determinada dirección. Por ejemplo, se puede aumentar la sensibilidad en la dirección de la señal deseada, y reducirla en las restantes direcciones, reduciendo así interferencias y ruidos.
- **En transmisión:** El beamforming se emplea para configurar el patrón de radiación de dicha antena. Cambiando la forma del haz, podremos aumentar la directividad de la antena en una determinada dirección, y minimizar la ganancia de la antena para el resto de direcciones.

2.9. Técnicas de modulación

La información presentada en este capítulo es obtenida en su gran mayoría de los apuntes de asignatura "Modulación QAM"[21] y "Modulación PSK"[22], adicionalmente se utiliza con información adquirida del curso "La señal de radiodifusión. Primera parte: TV terrestre."[23].

2.9.1. QAM

La Modulación de Amplitud en Cuadratura o QAM es una modulación digital multinivel en la que el mensaje está contenido tanto en la amplitud como en la fase de la señal transmitida, por lo cual tiene variedad de combinaciones de amplitud y fase. Se basa en la transmisión de dos mensajes independientes por un único camino. Esto se consigue modulando una misma portadora, desfasada 90º entre uno y otro mensaje. Esto supone la formación de dos canales ortogonales en el mismo ancho de banda, con lo cual se mejora en eficiencia de ancho de banda que se consigue con esta modulación [21].

Esta técnica se puede utilizar en comunicaciones digitales, recibiendo el nombre de **QAM Cuantizada**, debido a que recibe como entrada un flujo de datos binarios cuenta con 4 x n puntos de modulación.

Una de las formas comunes de esta modulación es **16-QAM**, la cual cuenta con 16 puntos de modulación, existiendo 12 ángulos de desfase, en intervalos de 22,5º y 45º, y 3 valores de amplitud, tal y como se especifica en su constelación (figura 5).

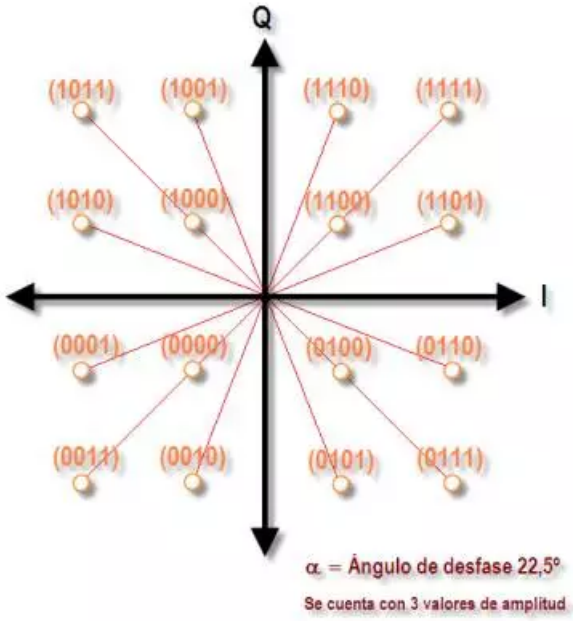


Figura 5: Modulación 16-QAM [23].

2.9.2. PSK

La modulación por desplazamiento de fase PSK consiste en variar la fase de una señal alterna portadora, manteniendo la amplitud y frecuencia constantes, puede tomar dos valores de fase o más, determinados directamente por la señal de datos binaria (modulación de 2 fases) o la combinación de un determinado número de bits de la señal de datos misma (modulación e N fases).

En función del número de estados codificables tendremos distinto número de ángulos de desfase, siempre idénticos, repartidos entre los 360º de un ciclo alterno.

La **modulación BPSK**, (By Phase Shift Keying), utiliza dos puntos de modulación, figura 6.

Cada uno de ellos con la misma amplitud y un desfase de 180º:

- 0º o 360º para codificar un "cero" binario de la señal digital modulante.
- 180º para codificar un "uno" binario de la señal digital modulante.

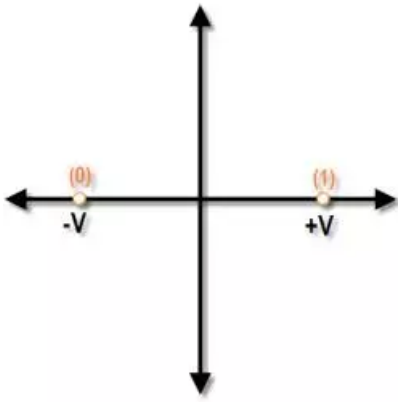


Figura 6: Modulación BPSK [23].

La **modulación QPSK** se basa en cuatro puntos de modulación, figura 7.

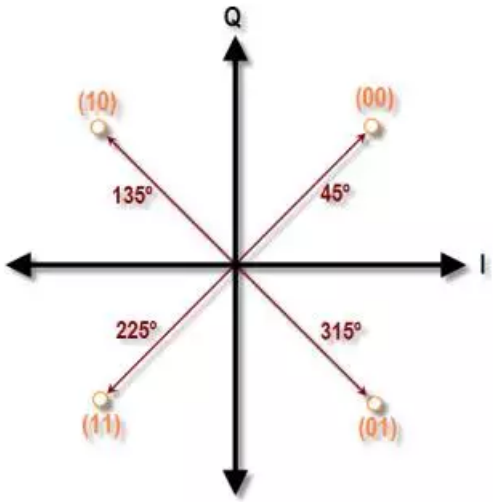


Figura 7: Modulación QPSK [23].

Estos puntos definen un ángulo de desfase determinado:

- Desfase de 45°: Codifica la secuencia digital “00”.
- Desfase de 135°: Codifica la secuencia digital “10”.
- Desfase de 225°: Codifica la secuencia digital “11”.
- Desfase de 315°: Codifica la secuencia digital “01”.

En la figura 8 se puede observar un ejemplo de cómo se vería una señal modulante y la señal modulada resultante al utilizar QPSK.

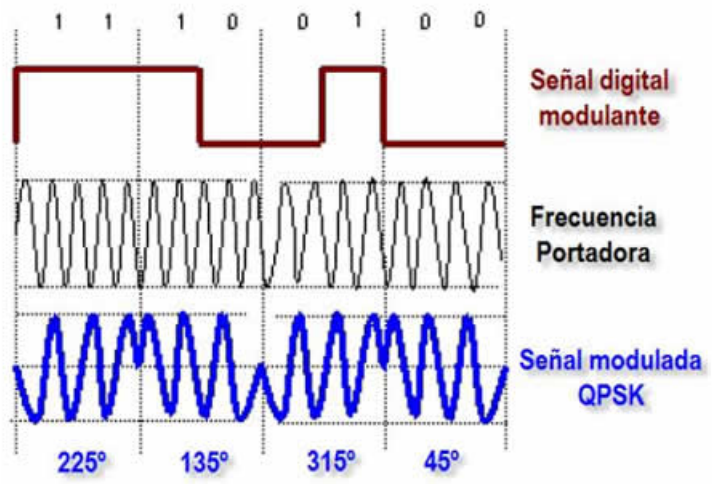


Figura 8: Señal modulada con QPSK [23].

2.10. Prefijo cíclico (CP)

La información presentada en esta sección es obtenida del artículo "¿Qué es CP (Prefijo Cíclico) en LTE?" [24].

El Prefijo Cíclico (CP) es un intervalo de tiempo que se inserta entre los símbolos de transmisión y que cumple una determinada función que se explica más adelante.

Cuando se transfieren símbolos de un receptor a un transmisor se esta sujeto a la aparición de dicha interferencia entre símbolos (ISI). Con el fin de reducir la aparición de ISI se utiliza el CP ya que sirve como una banda de guarda entre símbolos LTE.

Para eliminar permanentemente dicho problema, la solución es encontrar un camino donde la parte "perdida" del símbolo podría ser "recuperada". La única manera de hacer esto es mediante la copia o duplicación de una parte inicial del símbolo, para después insertarla en el final del mismo.

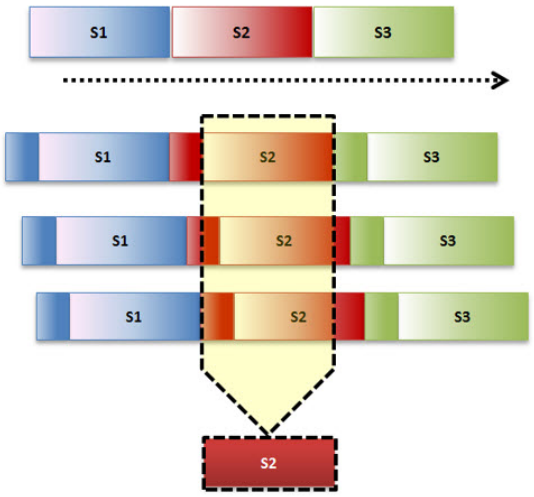


Figura 9: Transmisión de señales con CP [24]

Lo que el CP hace es copiar una pequeña parte de la información inicial (de ahí el nombre "prefijo") hasta el final de cada símbolo (de ahí el nombre "cíclico"). Por lo tanto, el receptor puede identificar los puntos finales de cada símbolo y correlacionar correctamente la información, eliminando así el problema de interferencia, como se muestra en la figura 9. Aunque por supuesto, esto significa aumentar el "tamaño" total de ese símbolo, sin embargo, las ganancias son mayores.

2.11. Corrección de error hacia adelante (FEC)

FEC es un tipo de mecanismo de corrección de errores que permite su corrección en el receptor sin retransmisión de la información original. Se utiliza en sistemas sin retorno o sistemas en tiempo real donde no se puede esperar a la retransmisión para mostrar los datos. La posibilidad de corregir errores se consigue añadiendo al mensaje original unos bits de redundancia. La fuente digital envía la secuencia de datos al codificador, encargado de añadir dichos bits de redundancia. A la salida del codificador se obtiene la denominada palabra código. Esta palabra código es enviada al receptor y éste, mediante el decodificador adecuado y aplicando los algoritmos de corrección de errores, obtendrá la secuencia de datos original [25].

2.11.1. Turbo código

La información presentada en esta subsección es obtenida del documento "Estudio Teórico de la Arquitectura de Turbo-códigos para aplicaciones de Telefonía Celular de 3G" [26].

Los turbo códigos han sido ampliamente estudiados y adoptados por varios sistemas de comunicación, permitiendo que éste se lleve a cabo a tasas de transmisión cercanas a la capacidad del canal y con probabilidades de error muy bajas debido a que este esquema de codificación es capaz de operar a 0.1 dB del límite teórico descubierto por C. Shannon.

La ganancia de codificación extra ofrecida por los turbo códigos también puede utilizarse en los dispositivos inalámbricos para reducir la fuerza de sus señales, lo que conlleva a que más dispositivos puedan compartir el mismo espectro de frecuencia al reducirse la interferencia inter-dispositivo. Así mismo, decrementar la fuerza de las señales también se ve reflejado en un decremento de los requerimientos de potencia, lo cual es una consideración importante para los dispositivos inalámbricos alimentados por batería.

Las tres áreas clave en que los turbo códigos proveen un mejoramiento en el desempeño con respecto a los otros tipos de corrección de errores son:

- **Capacidad:** los turbo códigos logran un desempeño cercano a los límites teóricos de la capacidad de un canal.
- **Eficiencia en el costo del sistema:** un usuario es capaz de enviar la misma cantidad de información empleando únicamente la mitad del ancho de banda.
- **Número de usuarios:** un proveedor de servicios de telecomunicaciones es capaz de duplicar el número de usuarios sin incrementar la capacidad de la antena.

2.12. Comprobación de redundancia cíclica (CRC)

El CRC (también llamado códigos de redundancia cíclica o polynomial code checksum) se caracteriza por la detección de errores ante algún cambio accidental de datos, es comúnmente utilizado en redes digitales, sistemas de comunicaciones y dispositivos de almacenamiento. Los bloques de datos que entran en el sistema reciben un valor de comprobación, el cual se basa en el resto de una división polinómica; y en el proceso inverso se realiza el mismo cálculo, y se comprueba que los valores de comprobación estén correctos, caso contrario se corrigen los errores obtenidos [27].

2.13. Códigos de verificación de paridad de baja densidad (LDPC)

Los códigos LDPC son una clase de códigos de corrección de error lineal de bloque, los mensajes están divididos en bloques para ser codificados en el transmisor y de la misma forma decodificados como bloques separados en el receptor. Los códigos LDPC son usualmente largos y frecuentemente construidos pseudo aleatoriamente con solo una noción probabilística de su rendimiento de corrección de error esperado. Este tipo de códigos de bloque presentan excelente rendimiento, siendo útil para transmitir un mensaje por un canal de comunicaciones ruidoso (con errores), y su uso en diferentes aplicaciones ha aumentado notablemente, siendo utilizado también para la 4G de las telecomunicaciones móviles [28].

2.14. División en Celdas

Un sistema celular se forma al dividir el territorio al que se pretende dar servicio en células, o celdas, normalmente hexagonales, de mayor o menor tamaño, cada una de las cuales es atendida por una estación de radio que restringe su zona de cobertura a la misma, aprovechando el alcance limitado de la propagación de las ondas de radio a frecuencias elevadas; así, el espectro de frecuencias puede volver a ser reutilizado en cada nueva celda, siempre teniendo cuidado de evitar las interferencias entre celdas próximas. De esta manera se puede aumentar considerablemente el número de usuarios al no requerirse una frecuencia exclusiva para cada uno de ellos, como sucede, por ejemplo, en los sistemas de radio privada convencional trunking. Cuanto más pequeñas sean las celdas, mayor será el número de canales que soporte el sistema, al poder asignar conjuntos de frecuencias diferentes para áreas o celdas distintas, este factor es muy importante para un servicio público .

2.14.1. División de Celdas

La división de celdas se realiza luego de una planificación celular original, ya que la planificación inicialmente se comienza con celdas de gran tamaño y, conforme aumenta el número de usuarios, se produce una división celular para aumentar su capacidad. Si en una celda con "n" radiocanales hay más tráfico del que se puede administrar, por ejemplo, porque aumenta el número de usuarios, se puede dividir la celda añadiendo más estaciones base y disminuyendo la potencia de transmisión, esto es lo que se conoce como splitting. De manera que en realidad el tamaño de las celdas variará según la densidad de tráfico, teniendo celdas más grandes, macroceldas en zonas rurales (de hasta decenas de km) y celdas más pequeñas, pico y microceldas (unos 500 m) en grandes núcleos urbanos y por último femtoceldas con cobertura en un entorno doméstico .

2.15. Handover o Transferencia

Cuando los usuarios se encuentran conectados al sistema a través de una determinada estación base, se requiere que el sistema sea capaz de mantener las conexiones activas aún cuando el terminal se encuentre en movimiento y resulte necesario realizar en el transcurso de una conexión activa, un cambio de la estación base que le proporciona el acceso a la red, a esto se le llama transferencia de llamada que es el proceso en el cual una estación móvil se encuentra entre dos celdas o dos sectores adyacentes, estando en los límites de cobertura, entonces la estación móvil elige la estación base que le proporcione los mejores recursos para continuar la conexión [10] [14].

2.16. Reutilización de Frecuencias

El principio que rige en los sistemas celulares es el de reutilización (reúso) de frecuencias, que consiste en el uso de canales radio de la misma frecuencia (portadora) para cubrir distintas áreas geográficas, que deben estar separadas entre ellas lo suficiente para que no afecte la interferencia entre canales, que puede ser cocanal (interferencia entre enlaces usando los mismos canales de radio) o adyacente (interferencia usando uno de los dos canales próximos -f +/- 200 kHz, en GSM-), afectando si la relación C/I <9 dB o >-9 dB, respectivamente. La interferencia es el término empleado para designar una señal no deseada en el receptor. La reutilización de una misma frecuencia portadora en células diferentes viene limitada por la relación C/I entre la señal deseada C y la señal no deseada I, ambas en la misma frecuencia portadora. También, se producen interferencias entre canales con frecuencias próximas (adyacentes) si el nivel es suficientemente alto.

Un conjunto de células o celdas que utilizan todos los canales de frecuencia disponibles del sistema, pero que no los reutiliza, se denomina "cluster", existiendo distintos patrones de reúso (reuse pattern), siendo los comunes los tipos 7/21 (7 emplazamientos y 21 células o grupos de frecuencias), 4/12 (4 emplazamientos y 12 grupos de frecuencias) y 3/9 (3 emplazamientos y 9 grupos de frecuencias), como se puede comprobar, para unas agrupaciones trisectorizadas. Por ejemplo, con el patrón 4/12 todas las frecuencias disponibles se dividen en 12 grupos (factor de reutilización), y cada uno de estos se asigna a un sector, que se suelen denominar con una combinación de letra mayúscula A, B, C,... (Ubicación o emplazamiento) y número 1, 2, 3,... (sector), y con el patrón 3/9 en 9 grupos, como se puede ver en la figura 10.

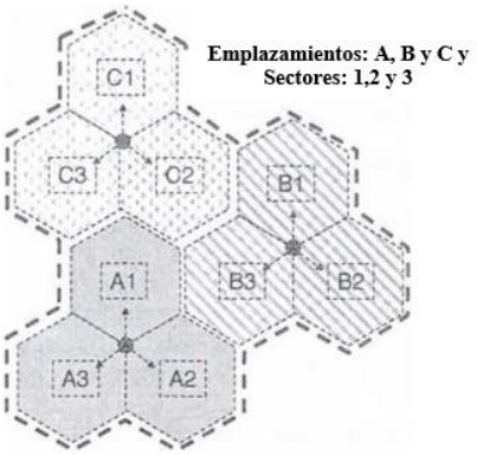


Figura 10: Patrón de reúso 3/9 todas las frecuencias disponibles, en 9 grupos, se reparten en los 3 emplazamientos (A, B y C), que cubren 9 células (sectores) [13]

Se conoce como distancia de reutilización a la mínima distancia entre dos células que compartan el mismo radiocanal para que la interferencia cocanal no afecte a las comunicaciones. Mediante la reutilización de frecuencias, en un sistema móvil celular que presente servicio en una zona geográfica dada, podrá llevarse a cabo un número de llamadas mayor que el número de frecuencias utilizadas. El factor por el cual el número de llamadas simultáneas excede el número de canales (frecuencias) depende de varios factores y, en particular, del número de células en que se haya dividido el territorio y la manera en cómo se agrupen, lo que se conoce como cluster o racimo, que va a fijar, en definitiva, el patrón de reutilización del conjunto de frecuencias disponibles.

El proceso de subdivisión celular tiene un límite, que está fijado por las tolerancias de los emplazamientos y la carga de procesamiento del sistema, que en la práctica resulta en un tamaño mínimo comprendido entre 500 y 1.000 metros (microcélulas). En este caso, la potencia de emisión se reduce considerablemente, dada la cercanía entre la estación base y la estación móvil.

3. Estado del Arte

3.1. Generaciones

La información presentada en este sub capítulo es obtenida en su gran mayoría de las tesis de grado "Creación de una plataforma de desarrollo de componentes web orientados al acceso desde dispositivos móviles con adaptación dinámica de contenidos"[29] y "Evolución de las telecomunicaciones móviles y posibilidades de migración a redes 4G"[17], adicionalmente se complementa con información adquirida de la tesis de especialización "Diseño de un Red 4g LTE en el Municipio de Bucaramanga y Floridablanca" [31].

3.1.1. Segunda Generación (2G)

A principios de los años ochenta el desarrollo de tecnologías móviles en Europa había llevado a que muchos países adoptaran un estándar propio y diferente de comunicaciones móviles análogas, hecho que impedía que existiera interoperabilidad entre países, es principalmente debido a esto que aparecen los sistemas de segunda generación (2G) con el objetivo de resolver las principales carencias de las redes de primera generación (1G); mejorar la velocidad de transmisión y recepción de datos, crear un estándar único para permitir la intercomunicación entre redes y posibilitar que un mismo terminal funcionara correctamente en las distintas redes existentes.

Para el año 1982 la CEPT (Conferencia Europea de administraciones de correos y telecomunicaciones) creo un grupo de trabajo para desarrollar un sistema que permitiera la interoperabilidad entre los países de la región llamado Grupo Especial para móviles (GSM, por sus siglas en francés) compuesto por 26 compañías europeas de telecomunicaciones. Este grupo propuso crear un nuevo sistema de comunicaciones inalámbricas con los siguientes objetivos; itinerancia (roaming) internacional, eficiencia espectral, soporte para nuevos servicios y compatibilidad con RDSI (red digital de servicios integrados). En 1989 se delegó la responsabilidad de continuar con el desarrollo del estándar al ETSI (Instituto europeo de Normas de Telecomunicaciones) el cual modifico el nombre del proyecto a GSM (Sistema Global para las comunicaciones móviles) La evolución del estándar está marcada por tres fases principales:

1. En esta fase se desarrollaron las especificaciones.
2. En esta fase se propuso incluir servicio de datos y fax.
3. Esta fase llamada "Fase 2+" se implementaron mejorar para la codificación de la voz y se desarrollaron servicios para la transmisión de datos avanzados (GPRS Y EDGE)

A pesar de los esfuerzos para conseguir un estándar único mundial se desarrollaron varias tecnologías las dos más importantes fueron:

- **GSM (Global System Mobile):** Este sistema fue desarrollado en Europa y Asia. Usaba las bandas de frecuencias de los 900/1800 Mhz.
- **CDMA ONE:** Este sistema surgió en EEUU, pero era carácter propietario. Este estándar fue el verdadero competidor de GSM y sentó las bases de la telefonía de tercera generación.

Con el desarrollo de estas tecnologías, nos alejamos del objetivo de unificación de normas y estándares. No obstante, se consiguió que GSM fuera un estándar a nivel europeo y la posibilidad de roaming entre distintos operadores y países. Aunque las frecuencias en las que trabajaban estas tecnologías eran prácticamente las mismas, era necesario el uso de gateways (pasarelas) para la interconexión entre las distintas redes.

Debido a la gran cantidad de países que hicieron uso de GSM este se convirtió en estándar referente para 2G. GSM está basado en un sistema de conmutación de circuitos, diseñado inicialmente para servicios de voz, al que posteriormente se le implementaron servicios de datos, tales como: mensajes de texto que soportaban él envió y recepción de 160 caracteres SMS (Short Message Service), un servicio de transferencia de datos que soportaba una tasa de 9.6 Kbps, el cambio dinámico de celdas, el roaming y empezó a popularizarse el

uso de Internet y de las comunicaciones multimedia.

Una de las características especiales de GSM es usar una combinación de dos tipos de acceso al medio TDMA y FDMA. El acceso funciona de la siguiente manera; se tienen dos bandas de 25 MHz usadas en modo FDD. El enlace de subida (uplink) entre el MS (Mobile Station) y la BTS (Base Transceiver Station) está implementado entre 890 y 915 MHz, mientras el enlace de bajada (downlink) entre la BTS y el MS se implementa entre 935 y 960 MHz, cada banda se encuentra dividida en canales de 200 kHz. El uso de TDMA en GSM estableció canales de subida y bajada cada uno compuesto de 8 ranuras (slots) y cada uno de ellos transmite una unidad de información. La modulación en cada una de estas ranuras es GMSK (Gaussian Minimun Shift Keying) el cual permite alcanzar tasas de bits de 270 Kbps, los datos que contiene cada ranura son llamados ráfagas (burst) y alcanzan longitudes de 148 bits, dejando los 8,25 bits restantes como guardas en el tiempo, el número de bits que componen la cabecera y la cola son de tamaño constante. Cuando un usuario es propietario de una ranura puede alcanzar tasas de 24,7 Kbps sin que exista ningún tipo de esquema de conexión de errores.

3.1.2. Generación 2.5 (2.5G) [30]

General Packet Radio Service o GPRS es una tecnología digital de telefonía móvil. Es considerada la generación 2.5, y por lo tanto, se desarrolló entre la segunda generación (GSM) y la tercera (UMTS). Proporciona altas velocidades de transferencia de datos (especialmente útil para conectar a Internet) y se utiliza en las redes GSM. GPRS es sólo una modificación de la forma de transmitir datos en una red GSM, pasando de la conmutación de circuitos en GSM (donde el circuito está permanentemente reservado mientras dure la comunicación aunque no se envíe información en un momento dado) a la conmutación de paquetes. Desde el punto de vista del operador de telefonía móvil es una forma sencilla de migrar la red desde GSM a una red UMTS puesto que las antenas (la parte más cara de una red de Telecomunicaciones móviles) sufren sólo ligeros cambios y los elementos nuevos de red necesarios para GPRS serán compartidos en el futuro con la red UMTS. GPRS es básicamente una comunicación basada en paquetes de datos. Los timeslots (intervalos de tiempo) se asignan en GSM generalmente mediante una conexión conmutada, pero en GPRS los intervalos de tiempo se asignan a la conexión de paquetes, mediante un sistema basado en la demanda. Esto significa que si no se envía ningún dato por el usuario, las frecuencias quedan libres para ser utilizadas por otros usuarios.

La conmutación por paquetes permite fundamentalmente compartir los recursos radio. Un usuario GPRS sólo usará la red cuando envíe o reciba un paquete de información, todo el tiempo que esté inactivo podrá ser utilizado por otros usuarios para enviar y recibir información. Esto permite a los operadores dotar de más de un canal de comunicación sin miedo a saturar la red, de forma que mientras que en GSM sólo se ocupa un canal de recepción de datos del terminal a la red y otro canal de transmisión de datos desde la red al terminal, en GPRS es posible tener terminales que gestionen cuatro canales simultáneos de recepción y dos de transmisión, pasando de velocidades de 9,6 Kbps en GSM a 40 Kbps en recepción en GPRS y 20 Kbps de transmisión. Otra ventaja de la conmutación de paquetes es que, al ocuparse los recursos sólo cuando se transmite o recibe información, la tarificación por parte del operador de telefonía móvil sólo se produce por la información transitada, no por el tiempo de conexión.

En esta generación también se desarrolló la tecnología HSCSD (High Speed Circuit Switched Data) Datos en conmutación de circuitos en alta velocidad, esta tecnología se basa en el uso simultáneo de 3 interfaces GSM, por lo que permite el triple de capacidad. Al tratarse de conmutación de circuitos implica la reserva de 3 canales de voz, por lo que la tarificación es por tiempo de conexión, no por cantidad de datos.

3.1.3. Generación 2.75 (2.75G)

Posteriormente al sistema GPRS, aparece una mejora del mismo que se puede considerar como la generación 2.75 (EDGE), ya que al igual que el estándar GPRS, el EDGE está pensado para ser una transición

entre la generación 2.5 y la tercera generación de la telefonía móvil (3G).

La tecnología EDGE (Enhanced data rates for GSM evolution) datos avanzados para la evolución de GSM, es una mejora del sistema GSM la cual modifica el tipo de modulación, el EDGE emplea la modulación 8-PSK, aunque se uso prácticamente la misma infraestructura de red, el cambio no fue inmediato y se necesitaron una serie de actualizaciones por parte del operador, este cambio de modulación implicó que las estaciones base y las terminales móviles tuvieron que ser modificadas para poder admitirlo.

El EDGE triplica la velocidad de datos, pero ofrece un área de cobertura menor. En teoría, el EDGE posee un rendimiento de hasta 384 Kbits/s en el caso de estaciones fijas (peatones y vehículos lentos) y hasta 144 Kbits/s para estaciones móviles (vehículos veloces).

3.1.4. Tercera Generación (3G)

Para finales de 2001 dentro de la Unión Internacional de Telecomunicaciones se creo un grupo llamado IMT-2000 (Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000) cuyo objetivo era desarrollar las interfaces entre las redes de tercera generación y las redes que habían evolucionado desde las redes GSM y desde ANSI 41 (contraparte americana de GSM) también estaban desarrollando dichas interfaces. Entre tanto el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) y un grupo de organismos en asociación determinaron crear un proyecto llamado 3GPP. Cuyo objetivo era crear un estándar para un sistema móvil de tercera generación en el cual su núcleo estuviera basado en la evolución de GSM y que su red estuviera basada en todas las tecnologías de radio acceso existentes (FDD y TDD). Desde el momento del inicio del desarrollo de estos estándares 3GPP comenzó a denominar estos estándares como Servicio Internacional de Telecomunicaciones Móviles (UMTS). UMTS fue definido como el final de la convergencia entre los sistemas de comunicaciones móviles e Internet, permitiendo a los usuarios de esta tecnología acceder a contenidos multimedia de banda ancha sin importar el lugar donde se encuentre ubicado.

El desarrollo de UMTS se definió en varias fases cuyo objetivo final era crear una red de servicios multimedia sin importar la posición del usuario.

- La primera fase que se desarrollo fue denominada versión 1999 (reléase 1999) en esta fase se propuso un desarrollo lógico de evolución de las arquitecturas de segunda generación.
- La segunda fase denominada versión 2000 (Release 2000-R00) que fue modificada a (Release 4), en esta fase se propuso un cambio total de la conmutación de circuitos que era usada hasta Release 1999 por una conmutación netamente de paquetes denominada UMTS todo-IP (ALL-IP UMTS network architecture) Esta propuesta logro que el protocolo IP tomara gran importancia hasta llegar a ser propuesto como el protocolo que se encargaría del transporte de la información de usuario (contenido multimedia) como también para ser el encargado de la información de control y señalización.

El concepto de UMTS y su universalidad fueron claves para el desarrollo de los servicios de tercera generación, para entender su funcionamiento es necesario tener en cuenta sus premisas base: “La primera, la posibilidad de que cualquier entidad u organización pueda desarrollar aplicaciones y servicios gracias a la separación arquitectónica de los planos de transporte y de servicios. La segunda, que el usuario tenga la misma percepción de los servicios recibidos con independencia del terminal que utilice y del lugar en donde se encuentre”.

Uno de los grandes cambios que supuso esta tecnología era la pérdida del concepto de reserva del canal de voz. En UMTS toda la información, ya sea voz o datos, es empaquetada y transportada por una red IP, lo que permite un mejor aprovechamiento de la capacidad.

La tecnología de acceso múltiple de radio designada a UMTS es CDMA, con expansión DS-CDMA (acceso múltiple por división de código en secuencia directa), para este esquema el ancho de banda es de 5Mhz por lo que se habla de WCDMA. El esquema de modulación elegido es QPSK (Quadrature Phase Shift Keying), se

han definido dos modos de funcionamiento para UMTS-WCDMA: el modo FDD en el cual existen dos portadoras de radio utilizadas para enlaces descendente y ascendente, lo que conlleva a que se usen dos bandas de frecuencia diferentes. Por lo tanto, es necesario asignar un par de frecuencias que permitan su operación, denominadas frecuencias emparejadas. El modo FDD es el indicado para enlaces simétricos con una amplia gama de velocidades. El modo TDD en el cual la transmisión de enlaces descendentes y ascendentes se hacen sobre una única portadora que usa intervalos sincronizados, debido a que se utiliza un único canal de radio se dice que este funciona sobre bandas de frecuencia no emparejadas. Adecuado para servicios asimétricos de interiores y micro celulares. Para este modo los requisitos de sincronización son más estrictos y se hace necesario un mayor margen (más conocido como overhead) para tiempos de guarda y variación de potencias.

El acceso múltiple reconoce bandas emparejadas y no emparejadas.

- Para bandas emparejadas el enlace ascendente esta entre el rango de 1920 y 1980 MHz, el enlace descendente está entre los 2110 y 2170 MHz.
- Para bandas no emparejadas los rangos de frecuencia están entre 2010 a 2025 MHz y 1900 a 1920 MHz.

Para las bandas emparejadas los 60 MHz de espectro del enlace ascendente o del enlace descendente alojan 12 portadoras para cada uno, mientras que para las bandas no emparejadas los 35 MHz de espectro alojan 7 portadoras.

3.1.5. Generación 3.5 (3.5G)

A pesar del incremento de la capacidad de transferencia de información obtenida con la 3G, se desarrollaron tecnologías que permitieron aumentarla aún más, en este caso la tecnología que se desarrollo fue el HSDPA (High Speed Downlink Packet Access o Acceso descendente de paquetes a alta velocidad) cambia únicamente la interfaz radio, pero permite velocidades de hasta 7 Mbps de descarga, introducida en la versión 5 (Release 5) en el 2002.

Principalmente HSPA se desarrolló como una actualización de software para los sistemas existentes en UMTS, todo debido a los patrones de uso de la red en los años 90's los cuales mostraban que las aplicaciones exigían un mayor rendimiento en la descarga. La evolución de UMTS se centró inicialmente en la optimización y mejora del canal de bajada. HSDPA define un nuevo canal de transporte de bajada capaz de suministrar un enlace de 14,4 Mbps máximo teórico. Este nuevo canal de transporte descendente es llamado canal compartido de descarga de alta velocidad HS-DSCH (High-Speed Downlink Shared Channel), a diferencia de los canales W-CDMA, HSPA utiliza multiplexación por división de tiempo como principal técnica de multi acceso con multiplexación por división de código limitada. HSDPA cuenta con 16 códigos Walsh, 15 de los cuales se utilizan para el tráfico de los usuarios, un mismo usuario puede usar 5, 10, 15 o los códigos que necesite para obtener el mayor rendimiento, aunque a menudo se limita a 5 o 10 por implementación del equipo de usuario (UE, user equipment). Para lograr una mayor velocidad utiliza un marco de longitud de 2 ms, comparado a los marcos de longitud de 10, 20, 40 u 80 ms utilizados por los canales W-CDMA. En la práctica HSDPA proporciona a los usuarios rendimientos típicos en un rango de 500 Kbps a 2 Mbps. HSPA ha incluido nuevas técnicas que permiten incrementar el rendimiento y la capacidad, entre los cuales se destacan los siguientes:

- **Modulación y codificación adaptativa (AMC, adaptative modulation and coding):** HSDPA soporta modulación QPSK y 16QAM en un rango de 1/4 hasta 1 de codificación. La adaptación de AMC implica la variación de la modulación y el sistema de codificación para cada usuario y cada trama dependiendo de la calidad instantánea del canal descendente. La idea de maximizar la capacidad y rendimiento del sistema se logra asignando a cada usuario el máximo índice de modulación y la técnica de codificación más fiable bajo la señal dada las condiciones de interferencia. HSDPA presenta un indicador de la calidad del canal (CQI) medida que permite a las estaciones base elegir la mejor modulación posible y el esquema de codificación más apropiado.

- **Programación dinámica rápida:** En lugar de asignarle a los usuarios periodos fijos de tiempo, los sistemas HSDPA utilizan un planificador dinámico que permite aprovechar la diversidad de las condiciones del canal experimentadas por cada usuario en momentos específicos. Mediante la programación de la entrega de paquetes, para coincidir con los picos de desvanecimiento de cada usuario y evitando la programación durante sus canales, un programador dinámico puede asegurar que el sistema siempre está operando en las velocidades más altas. Un programador dinámico podría, si así lo decidiera, asignar toda la capacidad de una celda a un solo usuario por un periodo muy corto de tiempo cuando las condiciones sean favorables. Esta estrategia lleva a mejorar la utilización de los recursos disponibles y por lo tanto, aumenta la capacidad general del sistema, aunque puede que esto no parezca justo desde el punto de vista del cliente. En HSDPA, para habilitar la programación más rápida, el programador está localizado en el Nodo-B en comparación al RNC como en W-CDMA.
- **Solicitud automática de repetición híbrida (H-ARQ):** Retrasos e imprecisiones en la realimentación de la calidad del canal podrían conducir a la adaptación incorrecta del enlace causando errores. Los errores en la capa de enlace pueden ser corregidos usando una solicitud automática de repetición (ARQ), donde las tramas erróneas son retransmitidas a solicitud, pero múltiples retransmisiones pueden conducir a retrasos intolerables. Hybrid-ARQ es una técnica mejorada de retransmisión, donde múltiples retransmisiones erróneas pueden ser combinadas para recuperar efectivamente errores más rápidamente. Esto se conoce como Chase Combining. HSDPA también soporta redundancia incremental donde cada retransmisión subsecuente suministra correcciones adicionales de errores de codificación con el fin de mejorar las posibilidades de errores de recepción. También cabe anotar que en HSDPA, las retransmisiones de la capa de enlace ocurren entre el Nodo-B y el equipo de usuario (UE) en comparación a W-CDMA donde se realiza entre el controlador de radio de la red (RNC) y el equipo del usuario.

3.1.6. Generación 3.75 (3.75G)

La tecnología HSUPA (High-Speed Uplink Packet Access o Acceso ascendente de paquetes a alta velocidad) introducido en la versión 6 (Release 6) en el 2004, también conocido como enlace ascendente mejorado, es una mejora del sistema anterior, ya que incrementa en gran medida la capacidad de subida del mismo, factor que generalmente ha estado en segundo plano. HSUPA también conocido como enlace ascendente mejorado, introduce un nuevo canal de enlace ascendente llamado canal dedicado mejorado (E-DCH), además en este canal ascendente se desarrollaron las mismas especificaciones técnicas avanzadas que HSDPA tales como: múltiples códigos de transmisión, H-ARQ, intervalos cortos de tiempo en la transmisión y programación rápida que trajo el canal descendente. HSUPA es capaz de soportar hasta 5.8 Mbps pico de subida, en la práctica con las mejoras realizadas se le ofrece al usuario un rango de 500 Kbps a 1 Mbps. Este incremento en las tasas de subida y la baja latencia permite aplicaciones como VoIP (servicios de voz por IP), subir fotos y videos y enviar correos electrónicos de mayor tamaño, con HSUPA es posible obtener hasta 2 Mbps en el enlace ascendente.

3.1.7. Cuarta Generación (4G LTE)

Cuarta generación en telefonía móvil permite a los usuarios, entre otras cosas, acceder a servicios de voz por IP (Internet Protocol), recibir y compartir datos multimedia de alta definición. Es decir, los usuarios contarán con acceso a Internet móvil de alta velocidad y con una red inalámbrica más eficiente.

LTE es parte del camino evolutivo GSM para banda ancha móvil, posterior a EDGE, UMTS, HSPA (HSDPA y HSUPA combinadas) y HSPA Evolution (HSPA+). LTE presupone una arquitectura de red totalmente basada en Protocolo de Internet (IP) y está diseñada para dar soporte a voz en el dominio de los paquetes. Además incorpora técnicas de radio de primera línea para alcanzar niveles de performance superiores a los que resultarán prácticos con enfoques CDMA. Algo relevante es que coexiste con sistemas 3G y 2G lo que permite una escalabilidad mayor.

Las capacidades de LTE incluyen:

- Tasas de datos máximas en el enlace descendente de hasta 326 Mbps con ancho de banda de 20 MHz.
- LTE propone la técnica de conmutación por paquetes IP (PS).
- Proporciona un alto rendimiento para velocidades de 0 a 15 km/h y la conexión es mantenida en velocidades de 300 a 500 km/h.
- Tasas de datos máximas en el enlace ascendente de hasta 86.4 Mbps con ancho de banda de 20 MHz.
- Operación tanto en modo TDD como FDD.
- Ancho de banda escalable hasta 20 MHz, cubriendo 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, y 20 MHz en la fase de estudio.
- Entre dos y cuatro veces más eficiencia espectral respecto del Release 6 de HSPA.
- Latencia reducida, hasta un tiempo de ida y vuelta de 10 milisegundos (ms) entre el equipo del usuario y la estación base, y a menos de 100 ms de transición de inactivo a activo.

También es importante tener en cuenta que para el acceso al medio se utiliza OFDMA para bajada y SC-FDMA para subida, y que todo se soporta en sistemas MIMO.

3.1.8. Generación 4G+ (LTE Advanced)

LTE-Advanced es un término utilizado para nombrar a la tecnología que atiende a los requisitos de IMT-Advanced. La UIT ratificó a LTE-Advanced como IMT-Advanced en noviembre de 2010. Es significativo que LTE-Advanced es compatible tanto hacia atrás como hacia adelante con LTE, lo que significa que los dispositivos LTE operan en las redes LTE-Advanced más nuevas, y que los dispositivos LTE-Advanced operarán en las redes LTE más antiguas. LTE-Advanced es una evolución posterior a LTE convirtiéndose en una tecnología basada en OFDMA soportada por un ecosistema impresionante de fabricantes y operadores de todo el mundo, y ya ha probado ser la tecnología de próxima generación global.

Algunas de las ventajas de LTE-Advanced se indican a continuación:

- Mayor soporte de ancho de banda para hasta 100 MHz a través del agregado de bloques de 20 MHz (Agregación de Portadoras).
- MIMO en el enlace ascendente (dos antenas de transmisión en el dispositivo).
- MIMO de mayor orden en el enlace descendente de hasta 8 por 8 en el Release 10.
- Transmisión Multipunto Coordinada (CoMP) con dos enfoques propuestos: programación coordinada y/o formación de haz, y procesamiento/transmisión conjuntos en el Release.
- Soporte para redes heterogéneas (Het-net) que incluye coordinación de interferencia inter-celda optimizada (eICIC).

Actualmente algunos de los principales objetivos para LTE Advanced son:

- Velocidades de datos pico: enlace descendente - 1 Gbps; de enlace ascendente - 500 Mbps.
- La eficiencia del espectro: 3 veces mayor que LTE.
- Pico de la eficiencia del espectro: enlace descendente - 30 bps / Hz; enlace ascendente - 15 bps / Hz.
- Uso del espectro: la capacidad para apoyar el uso de ancho de banda escalable y agregación de espectro donde necesita espectro no contigua a utilizar.
- Rendimiento para el usuario borde de la célula para ser el doble que el de LTE.

- Rendimiento promedio usuario sea 3 veces la de LTE.
- Movilidad: Igual que en LTE.
- Compatibilidad: LTE Advanced será capaz de interfuncionamiento con sistemas LTE y legados 3GPP.

Hay una serie de tecnologías clave que permitirán a LTE Advanced convertirse en lo que que todo el mundo tecnológico espera. Para alcanzar las altas tasas de transferencia de datos que se requieren. MIMO y OFDM son dos de las tecnologías de base que serán facilitadores. Junto con éstos hay una serie de otras técnicas y tecnologías que se emplearán.

OFDM forma la base de la portadora de radio. Junto a ella hay OFDMA (Orthogonal Frequency División Múltiple Access), junto con SC-FDMA (Single Channel por división ortogonal de frecuencia Múltiple Access). Estos serán utilizados en un formato híbrido. Sin embargo, la base de todos estos esquemas de acceso es OFDM.

Uno de los otros potenciadores clave de LTE Advanced que es común a LTE es MIMO. Este esquema también es utilizado por muchas otras tecnologías, incluyendo WiMAX y Wi-Fi - 802.11n. MIMO - Múltiple Input Múltiple Output permite las velocidades de datos obtenidos a aumentar más allá de lo que el portador de radio básico normalmente permitiría.

Para LTE Advanced, es probable que implique más y más avances técnicos con antenas adicionales en la matriz para permitir rutas adicionales a ser demandado, aunque, como el número de antenas aumenta, los aumentos generales y el regreso por ruta adicional es menor el uso de MIMO. En adicional a los números de antenas cada vez mayor, es probable que las técnicas tales como la formación de haz se pueden usar para permitir que la cobertura de la antena a concentrarse allí donde se necesita.

Con el aumento de las velocidades de datos muy por encima de lo que estaba disponible anteriormente, será necesario garantizar que la red central se actualiza para satisfacer las necesidades cada vez mayores. Por tanto, es necesario mejorar aún más la arquitectura del sistema.

3.2. Trabajos Similares

3.2.1. Evolución de las telecomunicaciones móviles y posibilidades de migración a redes 4G

En la monografía titulada “Evolución de las telecomunicaciones móviles y posibilidades de migración a redes 4G” [17], realizada por el ingeniero Sergio Andres Sepulveda Leiva de la Universidad Santo Tomas Bogotá, se realizó un análisis de los diferentes escenarios de migración de redes móviles de 3G a redes de 4G con la finalidad de identificar las mejores opciones en el mercado colombiano. Para realizar esta identificación se realizó un análisis de los diferentes aspectos que componen a las redes de comunicaciones móviles desde la 2G hasta la 4G, en cuanto a la RAN nos menciona su proceso evolutivo y el desarrollo de las diferentes tecnologías que se han estandarizado para cada una de las generaciones, esto se realizó con la finalidad de comparar las prestaciones, características, tecnología que usan estas generaciones para poder posteriormente elegir la mejor opción de migración de 3G a 4G, luego de esto se identificaron las ventajas y desventajas de los escenarios de migración y por último se analizaron los diferentes impactos de estas posibilidades de migración para finalmente decidir cuál era la mejor opción para los operadores de comunicaciones móviles.

Como conclusión se afirma que los operadores con mayor número de usuarios que tienen implementadas redes GSM y UMTS/HSPA les será más fácil desplegar la tecnología LTE, ya que la interconexión con E-UTRAN no es muy compleja, además se indica que los operadores deben implementar redes LTE en su totalidad e interconectarlas con la UTRAN y GERAN para poder ofrecer servicio a los usuarios que no dispongan de terminales LTE. Por último, se asegura que debido a las características geográficas del país la banda que más beneficiaria a los usuarios a nivel nacional seria la banda 700 MHz por sus características de propagación y la menor inversión requerida por los operadores de telecomunicaciones móviles.

3.2.2. Evaluación comparativa de redes móviles

En el trabajo de grado "Evaluación comparativa de redes móviles" [32], realizado por los ingenieros Jesús Jiménez Motilla y Jaime Ochovo Pavón de la Universidad Politécnica de Madrid, se realizó una explicación de qué es una evaluación comparativa y cómo se aplica en el sector de las telecomunicaciones móviles. Con el fin de permitir el correcto entendimiento de las pruebas que se realizan para obtener dicha evaluación, se aprecia una división del trabajo de grado en dos partes.

En la primera parte del documento se realiza una descripción de las redes móviles desplegadas hasta la actualidad profundizando en las diferentes generaciones móviles utilizadas en España (2G, 3G y 4G), dentro de dicha descripción se dan las características y diferencias presentadas en la red de acceso (RAN), dicha sección comprende los cuatro primeros capítulos de este documento.

En la segunda parte del documento se profundiza en el proceso de evaluación comparativa de redes móviles, haciendo una explicación de cómo se define y se aplica dicho concepto de benchmarking en el sector de los operadores móviles, esta sección incluye los últimos cinco capítulos del trabajo de grado.

Como conclusión se indicó que los operadores de redes de telefonía móvil están continuamente evolucionando e intentando modernizar su red, con el fin de proveer soporte a las diferentes generaciones móviles que se han creado hasta el momento, sin embargo, se apreció que no todos han logrado cumplir con sus objetivos en los tiempos previstos, esto debido a la dificultad para desplegar las redes de cobertura a medida que se van implementando las generaciones y por ello no es posible realizar una comparación homogénea.También se menciona en las conclusiones que actualmente ya se están realizando pruebas con el fin de implementar 5G, lo cual supondrá una evolución más allá del Internet móvil y alcanzará el "Internet de las cosas" de forma masiva, permitiendo obtener los diferentes beneficios que esta generación brindara y que prometen revolucionar el mundo.

3.2.3. LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles

El libro "LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles" [10], realizado por la Fundación Vodafone España a cargo de los ingenieros Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall, Ramon Ferrús, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent se utilizó por su excelente pedagogía como base teórica para el entendimiento del funcionamiento de la red de acceso y de los sistemas de comunicaciones de 4G y 4G LTE, ya que principalmente en tres de sus capítulos (1, 5, 6) trabaja todo lo relacionado a la red de acceso radio. En el capítulo 1 (Acceso Radio Móvil: visión perspectiva y prospectiva) nos brinda una introducción de la RAN, algunas de sus características, su evolución y expansión, además nos muestra el contexto tecnológico al cual la tecnología LTE paso a formar parte, y por último da un bosquejo de la estandarización de LTE y LTE Advance. Partiendo de los conceptos básicos que ya se mencionaron en el capítulo 1 el capítulo 5 (Interfaz Radio del sistema LTE) se enfoca específicamente en las características y elementos principales que forman parte de la RAN de 4G LTE, también nos indica sus funciones, servicios portadores, los canales lógicos, de transporte y físicos que utiliza además de las señales de sincronización que usa, al final de este capítulo se describen los principales procedimientos propios de la interfaz de radio de 4G LTE. Por último, en el capítulo 6 (Gestión de Recursos Radio y del Espectro Radioeléctrico) se explica detalladamente los mecanismos y funciones que permiten un máximo aprovechamiento de los recursos espectrales y de potencia con los cuales cuenta LTE, que garanticen un valor adecuado de los parámetros de calidad (QoS) establecidos.

3.2.4. View on 5G architecture

En el white paper "View on 5G architecture" [33], que por cierto es el último publicado a la fecha de realización de este documento, el grupo 5G PPP (5G Infrastructure Public Private Partnership) menciona lo que hasta el momento tiene que ver con el consenso previo a la estandarización de la 5G, en áreas que van desde la capa física hasta la arquitectura en general, la gestión de redes, las redes de software y por supuesto el acceso a la red radio, esto con el objetivo de consolidar y unificar el resultado de los proyectos de la red de 5G y generar una visión general de la arquitectura y responder a los diversos requisitos de los casos de

uso y servicios implementables con la red de 5G. Este documento nos permite estar al tanto de los avances y consensos que se tienen del desarrollo e implementación de las tecnologías que se van implementar en la puesta en marcha de la red de acceso de radio para 5G, esta información nos es bastante útil al momento de realizar la comparación con las características que maneja la actual red de acceso de 4G.

4. Comunicaciones móviles 4G LTE

La información presentada en este capítulo es obtenida en su gran mayoría del libro “LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles"[10], adicionalmente se complementa con información adquirida del libro “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology” [36].

4.1. Arquitectura general de los sistemas de comunicación móvil 3GPP

Los sistemas de comunicaciones móviles 3GPP abarcan las especificaciones del equipo de usuario (User Equipment, UE) y la infraestructura de la red que se dividen en una infraestructura de red troncal (Core Network, CN) y una de red de acceso (Access Network, AN), como se puede observar en la figura 11.

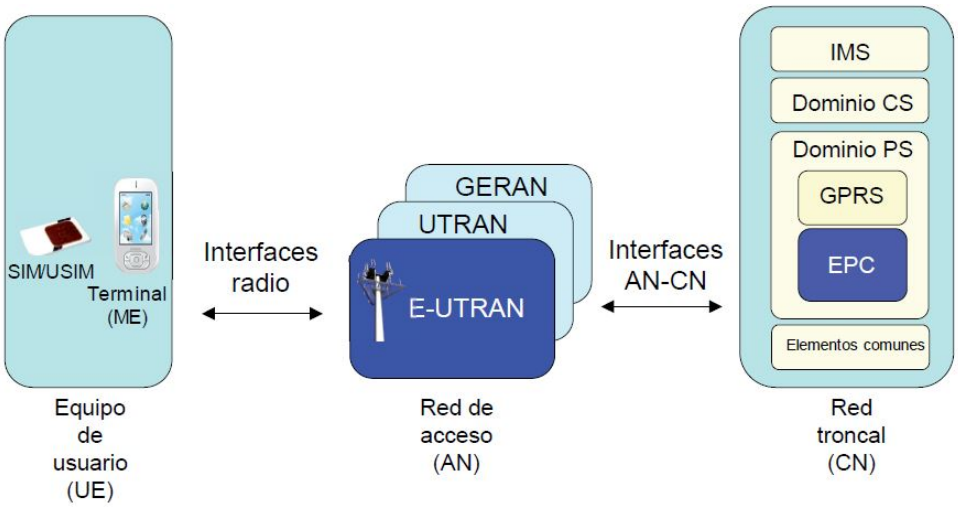


Figura 11: Arquitectura de alto nivel de los sistemas (GSM, UMTS y LTE) [10].

El dominio de circuitos de la red troncal es accesible a través de las redes de acceso UTRAN y GERAN. En cambio, el diseño de E-UTRAN (Evolved UTRAN) no contempla el acceso al dominio CS (Circuit Switching) ya que todos los servicios se proporcionan a través del dominio PS (Packet Switching).

El dominio PS incluye a las entidades de la red troncal que proporcionan servicios de telecomunicación basados en conmutación de paquetes: la información de usuario se estructura en paquetes de datos que se encaminan y transmiten por los diferentes elementos y enlaces de la red. En particular, el dominio PS proporciona un servicio de conectividad a redes de paquetes (redes IP y X.25).

EPC (Evolved Packet Core) es la nueva especificación del dominio PS desarrollada en el contexto del sistema LTE. EPC es una implementación evolucionada de GPRS que ha sido optimizada para proporcionar un servicio de conectividad IP a los equipos de usuario a través de E-UTRAN. El dominio EPC también ha sido concebido para soportar el acceso al servicio de conectividad IP desde las otras redes de acceso 3GPP (UTRAN y GERAN) así como desde redes no 3GPP (redes CDMA2000, Mobile WiMAX, etc.).

En la red troncal existen también elementos que soportan funciones asociadas a los diferentes dominios. Un ejemplo claro es la base de datos que contiene la información de los usuarios del sistema (HSS, Home Subscriber Server) y sobre la que se sustenta la operación de los dominios CS y PS, así como del subsistema IMS comentado a continuación.

También como parte de la red troncal, el subsistema IMS comprende los elementos relacionados con la provisión de servicios IP multimedia basados en el protocolo SIP (Session Initiation Protocol) de IETF (Internet Engineering Task Force). El subsistema IMS es responsable de la señalización asociada a los servicios

multimedia y utiliza como mecanismo de transporte los servicios de transferencia de datos proporcionados por el dominio PS (el equipo de usuario y los equipos del susbsistema IMS o redes externas se comunican entre sí a través del servicio de conectividad IP ofrecido por el dominio PS). En este sentido, el subsistema IMS constituye el plano de control de dichos servicios quedando claramente separadas las funciones asociadas al transporte de la información (funciones asociadas al dominio PS) y las funciones propias de la capa de control de los servicios (señalización a nivel de aplicación).

4.2. Arquitectura del sistema LTE

La arquitectura completa del sistema LTE se ilustra de forma simplificada en la figura 12, denominado formalmente en las especificaciones como EPS (Evolved Packet System). Los componentes fundamentales del sistema LTE son, por un lado, la nueva red de acceso E-UTRAN y el nuevo dominio de paquetes EPC de la red troncal, y por otro, la evolución del subsistema IMS concebido inicialmente en el contexto de los sistemas UMTS. Los diferentes componentes han sido diseñados para soportar todo tipo de servicios de telecomunicación mediante mecanismos de conmutación de paquetes, por lo que no resulta necesario disponer de un componente adicional para la provisión de servicios en modo circuito (en el sistema LTE los servicios con restricciones de tiempo real se soportan también mediante conmutación de paquetes). En este sentido, EPC constituye una versión evolucionada del sistema GPRS.

La red de acceso E-UTRAN y la red troncal EPC proporcionan de forma conjunta servicios de transferencia de paquetes IP entre los equipos de usuario y redes de paquetes externas tales como plataformas IMS y/o otras redes de telecomunicaciones como Internet. Las prestaciones de calidad de servicio (tasa de datos en bits/s, comportamientos en términos de retardos y pérdidas) de un servicio de transferencia de paquetes IP puede configurarse con base a las necesidades de los servicios finales que lo utilicen, cuyo establecimiento (señalización) se lleva a cabo a través de plataformas de servicios externas (IMS) y de forma transparente a la red troncal EPC. Formalmente, el servicio de transferencia de paquetes IP ofrecido por la red LTE entre el equipo de usuario y una red externa se denomina servicio portador EPS (EPS Bearer Service), un servicio portador básicamente se concibe como un servicio de transporte de información entre dos puntos de red. Asimismo, la parte del servicio de transferencia de paquetes que proporciona la red de acceso E-UTRAN se denomina E-UTRAN Radio Access Bearer (ERAB).

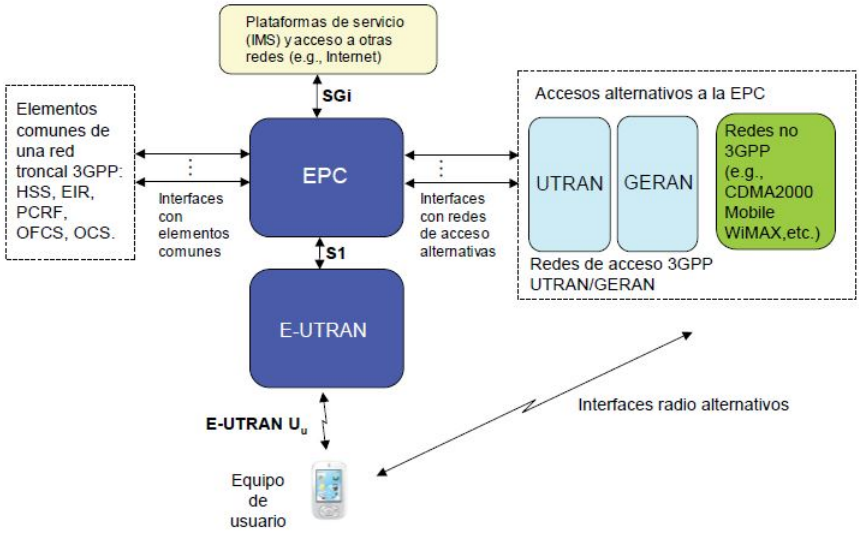


Figura 12: Arquitectura del sistema de comunicaciones móviles LTE [10].

En la figura 12 se muestran las principales interfaces de E-UTRAN y EPC. La interfaz entre E-UTRAN

y EPC se denomina S1 y proporciona a la EPC los mecanismos necesarios para gestionar el acceso de los terminales móviles a través de E-UTRAN. La interfaz radio entre los equipos de usuario y E-UTRAN se denomina E-UTRAN Uu. Por otro lado, las plataformas de servicios como IMS y la conexión a redes de paquetes externas IP se lleva a cabo mediante la interfaz SGi de la EPC. La interfaz SGi es análoga a la interfaz Gi definida en las redes GPRS/UMTS y constituye el punto de entrada/salida al servicio de conectividad IP proporcionado por la red LTE (los terminales conectados a la red LTE son "visibles" a las redes externas a través de esta interfaz mediante su dirección IP). Los mecanismos de control de los servicios de transporte ofrecidos por EPC se sustentan en información proporcionada por otros elementos de la red troncal que no son exclusivos del sistema LTE sino que pueden dar soporte también a otros dominios de los sistemas 3GPP. En la figura 12 se mencionan algunos de estos elementos comunes entre los que, a modo de ejemplo, se encuentra la base de datos del sistema con la información de subscripción de sus usuarios (HSS).

Otra característica fundamental del sistema LTE es que contempla también el acceso a sus servicios a través de UTRAN y GERAN así como mediante la utilización de otras redes de acceso que no pertenecen a la familia 3GPP (e.g., CDMA2000, Mobile WiMAX, redes 802.11, etc.). La interconexión de las redes de acceso alternativas, tanto 3GPP como no, se soporta a través de un conjunto de interfaces de la EPC.

Finalmente, aunque no quede reflejado en la figura 12, es importante destacar que la interconexión de los diferentes equipos físicos donde se ubicarían las funciones tanto de la red troncal EPC como de la red de acceso E-UTRAN, se realiza mediante tecnologías de red basadas en IP. De esta forma, la red física que se utiliza para interconectar los diferentes equipos de una red LTE, y que se denomina comúnmente como red de transporte, es una red IP convencional. Por tanto, la infraestructura de una red LTE, además de los equipos propios que implementan las funciones del estándar 3GPP, también integra otros elementos de red propios de las redes IP tales como routers, servidores DHCP (Dynamic Host Configuration Protocol) para la configuración automática de las direcciones IP de los equipos de la red LTE y servidores DNS (Domain Name Server) para asociar los nombres de los equipos con sus direcciones IP.

4.2.1. Requisitos para la Interfaz Radio del sistema LTE

Los objetivos marcados por el organismo de estandarización 3GPP para el diseño de la interfaz aire del LTE son:

- Altas velocidades de transmisión de pico: mayores de 100 Mb/s en el enlace descendente y 50 Mb/s en el ascendente. Para ello se utilizarán modulaciones de elevada eficiencia espectral (por ejemplo 64 QAM en el enlace descendente).
- Mejora de la eficiencia espectral entre 2 y 4 veces comparada con la eficiencia espectral del sistema UMTS versión (release) 6. En particular se espera una eficiencia espectral mayor que 5bits/s/Hz utilizando modulaciones de alta eficiencia espectral y un método de acceso basado en la técnica OFDM. Mejora de la latencia (retardo) del sistema:
  - La latencia de la red de acceso radio en el plano de usuario debe ser menor de 10 ms.
  - Reducción significativa de la latencia del plano de señalización. Ello se consigue dotando de inteligencia al eNB, es decir ubicando en él la mayor parte de las funcionalidades relacionadas con la gestión del acceso radio.
- Ancho de banda escalable: Valores estandarizados de 1.4, 3, 5,10, 15 y 20 MHz.
- El sistema debe operar tanto en bandas pareadas (FDD) como en no pareadas (TDD).
- El sistema debe permitir/facilitar la interconexión con sistemas de comunicaciones móviles previos (UMTS, GPRS, etc.).

4.3. Arquitectura de la red de acceso evolucionada: E-UTRAN

La arquitectura de la red de acceso se compone de una única entidad de red denominada evolved NodeB (eNB) que constituye la estación base de E-UTRAN. Así pues, la estación base E-UTRAN integra toda la funcionalidad de la red de acceso, a diferencia de las redes de acceso de GSM y UMTS compuestas por estaciones base (BTS, NodoB) y equipos controladores (BSC y RNC).

Tal y como se ilustra en la figura 13, una red de acceso E-UTRAN está formada por eNBs que proporcionan la conectividad entre los equipos de usuario (UE) y la red troncal EPC. Un eNB se comunica con el resto de elementos del sistema mediante tres interfaces: E-UTRAN Uu, S1 y X2.

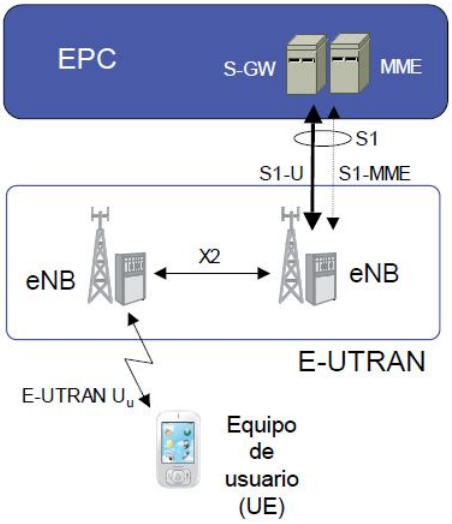


Figura 13: Red de acceso E-UTRAN [10].

La interfaz E-UTRAN Uu, también denominada LTE Uu o simplemente interfaz radio LTE, permite la transferencia de información por el canal radio entre el eNB y los equipos de usuario. Todas las funciones y protocolos necesarios para realizar el envío de datos y controlar la operativa de la interfaz E-UTRAN Uu se implementan en el eNB.

El eNB se conecta a la red troncal EPC a través de la interfaz S1. Dicha interfaz está desdoblada en realidad en dos interfaces diferentes: S1-MME para sustentar el plano de control y S1-U como soporte del plano de usuario. El plano de usuario de una interfaz se refiere a la torre de protocolos empleada para el envío de tráfico de usuario a través de dicha interfaz (paquetes IP del usuario que se envían entre E-UTRAN y EPC a través de S1-U). Por otro lado, el plano de control se refiere a la torre de protocolos necesaria para sustentar las funciones y procedimientos necesarios para gestionar la operación de dicha interfaz o de la entidad correspondiente (configuración de la operativa del eNB desde la red EPC a través de S1-MME). Esta separación entre entidades de red dedicadas a sustentar el plano de control o bien el plano de usuario es una característica importante de la red LTE que permite dimensionar de forma independiente los recursos de transmisión necesarios para el soporte de la señalización del sistema y para el envío del tráfico de los usuarios.

4.3.1. Canales LTE

Como sucede en UMTS, en LTE también hay tres categorías:

- **Físicos:** Son los canales de transmisión que llevan los datos del usuario y los mensajes de control.

- **Transporte:** Ofrecen servicios de transferencia de información a la subcapa MAC y a las capas inferiores.
- **Lógicos:** proporcionan servicios para la subcapa MAC dentro de la estructura del protocolo LTE.

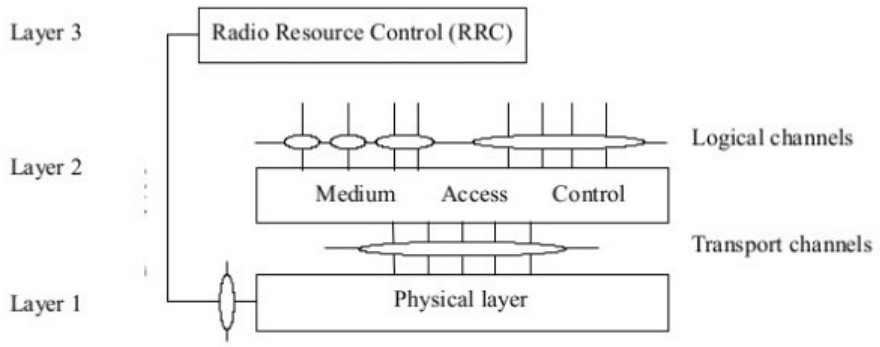


Figura 14: Estructura de canales en LTE en las diferentes capas [32].

4.3.2. Interfaz de radio

La interfaz radio soporta básicamente tres tipos de mecanismos de transferencia de la información en el canal radio: difusión de señalización de control, envío de paquetes IP y transferencia de señalización de control dedicada entre un equipo de usuario y el eNB. Los tres mecanismos citados se ilustran en la figura 15 y se describen a continuación:

- Difusión (broadcast) de señalización de control en la zona de cobertura de la celda. La información enviada permite a los equipos de usuario detectar la presencia del eNB y conocer sus parámetros básicos de operación (potencia máxima que pueden utilizar los equipos de usuario en la celda) así como la identidad de los operadores de red a los que puede accederse a través del eNB. La información difundida corresponde tanto a información específica de la red de acceso (denominada información del access stratum, AS) como de la red troncal (denominada información del non access stratum, NAS). La difusión de señalización de control también sirve para forzar que un equipo de usuario que no tenga una conexión de control establecida con el eNB, inicie un acceso a la red (función de aviso o paging).
- Transferencia de paquetes IP de los usuarios a través del canal radio. Tal como se ha comentado anteriormente, los servicios de transferencia entre un eNB y un equipo de usuario se denominan servicios portadores radio (Radio Bearers, RB).
- Transferencia de señalización de control dedicada entre el eNB y un equipo de usuario. El establecimiento de una conexión de control dedicada resulta imprescindible de cara a poder gestionar el uso de los servicios portadores radio así como para realizar cualquier gestión de señalización con la red troncal (registro del terminal en la red). La conexión de control se soporta mediante el protocolo Radio Resource Control (RRC). A través de dicho protocolo se gestionan, además del establecimiento, modificación y liberación de los servicios portadores radio entre el eNB y el equipo de usuario, otros mecanismos claves para la gestión eficiente de los recursos radio. Entre dichos mecanismos cabe citar el control y envío de medidas radio desde los terminales hacía el eNB y el mecanismo de handover, que permite que un equipo de usuario cambie de celda manteniendo activos tanto la conexión de control como los posibles servicios portadores radio que esté utilizando. Los terminales que mantienen una conexión de control con E-UTRAN se dice que se encuentran en modo conectado o activo, en contraposición al denominado modo idle en que el terminal no tiene una conexión RRC y básicamente se encuentra monitorizando la información de control difundida por la red.

Respecto al envío de paquetes de usuario, cada servicio portador tiene asociado un perfil de QoS que debe satisfacerse mediante la correcta configuración de los protocolos radio así como la adecuada operación de los mecanismos de gestión de recursos radio (scheduling).

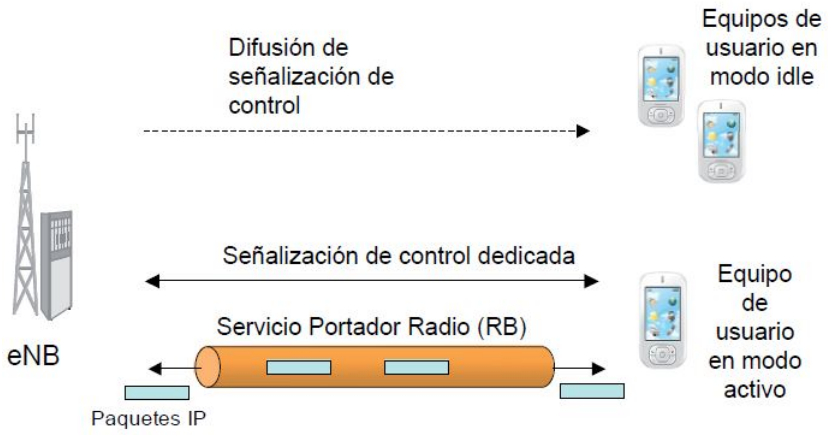


Figura 15: Mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio [10].

4.3.3. Interfaz X2 (eNB-eNB)

Al igual que el plano de usuario de S1, el plano de usuario de la interfaz X2 proporciona un servicio de transferencia de datos de usuario entre eNBs sin garantías de entrega y sin soporte de mecanismos de control de errores y de control de flujo. La transferencia de datos de usuario entre eNBs se realiza únicamente durante los procedimientos de handover en los que los paquetes de usuario almacenados en el eNB antiguo se transfieren al eNB nuevo. De esta forma, el cambio de eNB asociado a un procedimiento de handover puede resultar más transparente al usuario ya que se reduce la posible pérdida de paquetes durante el proceso.

4.3.4. Protocolos en la interfaz de radio

El envío de paquetes IP entre el eNB y un equipo de usuario a través de la interfaz radio se sustenta en una torre de protocolos formada por una capa de enlace (o capa de nivel 2) y una capa física. La torre de protocolos utilizada se muestra en la figura 16 La capa de enlace se desglosa a su vez en tres subcapas: Protocolo de convergencia de datos de paquetes (PDCP), Control Radio Enlace (RLC) y Control de acceso medio (MAC). Cada capa/subcapa de la torre de protocolos se ocupa de un conjunto de funciones concreto y define el formato de los paquetes de datos (cabeceras y colas) que se intercambian entre entidades remotas.

A continuación, se describen las principales características de las diferentes capas/subcapas:

- **Protocolo de convergencia de datos de paquetes (PDCP):** Constituye la capa superior de la torre de protocolos encargada de proporcionar el punto de acceso al servicio portador radio (Radio Bearer, RB). Es decir, los paquetes IP del tráfico de usuario se entregan y se reciben a través del servicio de transferencia proporcionado por la capa PDCP. Las funciones principales de esta capa son la compresión de cabeceras de los paquetes IP, el cifrado de la información para garantizar su confidencialidad e integridad y también puede realizar el manejo retransmisiones. La cabecera añadida por la capa PDCP básicamente contiene un número de secuencia que identifica al paquete IP enviado y permite realizar una entrega ordenada de los paquetes IP en el extremo receptor así como detectar posibles duplicados de los paquetes IP (ocasionados por ejemplo en un proceso de handover). Cada servicio portador radio tiene una entidad PDCP asociada.
- **Control Radio Enlace (RLC):** La capa RLC permite enviar de forma fiable los paquetes PDCP entre el eNB y equipo de usuario. Para ello, la capa RLC soporta funciones de corrección de errores mediante

mecanismos Automatic Repeat ReQuest (ARQ), concatenación, segmentación y re-ensamblado, entrega ordenada de paquetes PDCP a capas superiores (excepto durante el mecanismo de handover), detección de duplicados y detección/recuperación de errores en el protocolo. Cada servicio portador radio tiene una entidad RLC asociada.

- **Control de acceso medio (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 (un canal de transporte puede ser compartido por varios servicios portadores de uno o varios equipos de usuario), realiza retransmisiones y un control de errores mediante Hybrid ARQ (HARQ). Los servicios de transferencia que la capa MAC ofrece a la capa RLC se denominan canales lógicos. Existe una única entidad MAC por celda.
- **Capa física (PHY):** Es la capa encargada de realizar la transmisión propiamente dicha a través del canal radio. Alberga funciones de codificación/decodificación de canal, modulación/demodulación, procesado asociado a las técnicas de múltiples antenas de transmisión/recepción, y mapeo de la señal a los recursos físicos frecuencia-tiempo apropiados. En el enlace ascendente, la capa física se basa en un esquema single-carrier FDMA. En el enlace descendente, el esquema de transmisión es OFDMA. Los servicios de transferencia que la capa física ofrece a la capa MAC se denominan canales de transporte. Existe una única entidad de capa física por celda.

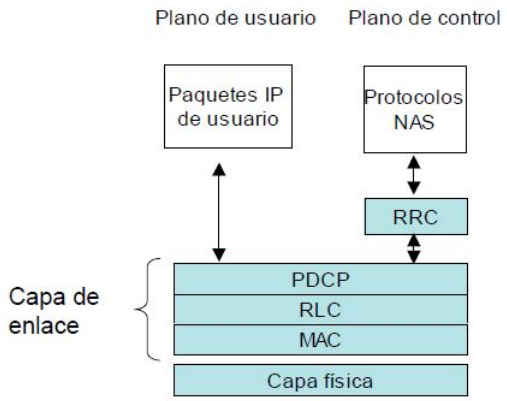


Figura 16: Protocolos de la interfaz de radio de E-UTRAN [10].

Respecto al plano de control entre el equipo de usuario y la red, éste se soporta sobre la misma capa de enlace (protocolos PDCP, RLC, MAC) y la misma capa física utilizadas en el plano de usuario. Los protocolos de nivel de red específicos de este plano son:

- **Radio Resource Control (RRC):** Esta capa permite establecer una conexión de control entre el eNB y un equipo de usuario a través de la cual se llevan a cabo un número importante de funciones relacionadas con la gestión de la operativa de la interfaz radio. Entre dichas funciones de la capa RRC destacan los mecanismos de gestión de los servicios portadores radio (señalización para el establecimiento/liberación/modificación de los portadores radio), el soporte de funciones de movilidad (señalización de handover), la difusión (broadcast) de parámetros de sistema y funciones de aviso de los terminales que no disponen de una conexión RRC establecida (envío de avisos a través del canal de paging). También permite informar respecto a las capacidades del dispositivo una vez es establecida la conexión, debido a que no todos los dispositivos son capaces de soportar toda la funcionalidad descrita en las especificaciones. El servicio de transferencia que ofrece la capa PDCP para el envío de los mensajes de señalización del protocolo RRC se denomina servicio portador de señalización (Signalling Radio Bearer, SRB).

- **Señalización de los protocolos NAS:** Los protocolos NAS se extienden entre la entidad de red MME en la red troncal y el equipo de usuario. Los mensajes de estos protocolos se transportan de forma transparente en la interfaz radio encapsulados dentro de la parte de datos de los mensajes RRC. Las principales funciones de los protocolos NAS son: autenticación, autorización, gestión de movilidad de los terminales que no tienen una conexión RRC establecida y gestión de los servicios portadores de la red EPS.

4.3.5. Canales físicos

Son los canales de transmisión que llevan los datos del usuario y los mensajes de control.

Enlace descendente (downlink):

- **Canal físico de difusión (PBCH, Physical Broadcast Channel):** Transporta la información del sistema que los equipos de usuario (UE) requieren para acceder a la red.
- **Canal físico de control del enlace descendente (PDCCH, Physical Downlink Control Channel):** Se utiliza para la obtener información de control de enlace descendente, principalmente decisiones de programación, requeridas para la recepción de PDSCH, y para la programación de permisos que permiten la transmisión en el PUSCH.
- **Canal físico de indicador híbrido ARQ (PHICH, Physical Hybrid ARQ Indicator Channel):** Se utiliza para informar del estado ARQ híbrido.
- **Canal físico compartido del enlace descendente (PDSCH, Physical Downlink Shared Channel):** Es el canal físico principal utilizado para la transmisión de datos de unidifusión, pero también para la transmisión de, por ejemplo, información de notificación, mensajes de respuesta de acceso aleatorio y entrega de partes de la información del sistema.
- **Canal físico multicast (PMCH, Physical Multicast Channel):** Lleva la información del sistema para fines de multidifusión.
- **Canal físico de indicador del formato de control (PCFICH, Physical Control Format Indicator Channel):** Proporciona información para que el equipo de usuario (UE) pueda decodificar el PDSCH.

Enlace ascendente (uplink):

- **Canal físico de control en enlace ascendente (PUCCH, Physical Uplink Control Channel):** Se utiliza para enviar confirmaciones de ARQ híbrido, indicando al eNB si los bloques de transporte de enlace descendente se recibieron con éxito o no, siendo útil para enviar informes de estado de canal que ayudan a la programación dependiente de canal de enlace descendente, y para solicitar recursos para transmitir datos de enlace ascendente.
- **Canal físico compartido en el enlace ascendente (PUSCH, Physical Uplink Shared Channel):** Es el equivalente de enlace ascendente al PDSCH. Hay como máximo un PUSCH por portador de componente de enlace ascendente para cada dispositivo.
- **Canal físico de acceso aleatorio (PRACH, Physical Random Access Channel):** Se utiliza para funciones de acceso aleatorio.

4.3.6. Canales de transporte

Ofrecen servicios de transferencia de información a la subcapa MAC y a las capas inferiores.

Enlace descendente (downlink):

- **Canal compartido en el enlace descendente (DL-SCH, Downlink Shared Channel):** Es el principal para la transferencia de datos en el downlink. Es utilizado por diversidad de canales lógicos. El DL-SCH también se utiliza para la transmisión de las partes de la información del sistema BCCH no asignadas al BCH. Cada dispositivo tiene un DL-SCH por celda al que está conectado. En las ranuras donde se recibe información del sistema, hay un DL-SCH adicional desde la perspectiva del dispositivo.
- **Canal de difusión (BCH, Broadcast Channel):** Tiene un formato de transporte fijo, proporcionado por las especificaciones. Se utiliza para la transmisión de partes de la información del sistema BCCH, más específicamente el llamado Bloque de información maestro (MIB).
- **Canal de notificación (PCH, Paging Channel):** Se utiliza para la transmisión de información de búsqueda desde el canal lógico PCCH. El PCH admite la recepción discontinua (DRX) para permitir que el dispositivo ahorre energía de la batería al despertarse para recibir el PCH solo en instantes de tiempo predefinidos.
- **Canal multicast (MCH, Multicast Channel):** Se utiliza para transmitir información MCCH para crear transmisiones de multidifusión.

Enlace ascendente (uplink)

- **Canal compartido en el enlace ascendente (UL-SCH, Downlink Shared Channel):** Es el principal canal para la transferencia de datos en el uplink. Es utilizado por muchos canales lógicos, es el equivalente de enlace ascendente al DL-SCH.
- **Canal de acceso aleatorio (RACH, Random Access Channel):** Se utiliza para los requisitos de acceso aleatorio.

4.3.7. Canales lógicos

Proporcionan servicios para la subcapa MAC dentro de la estructura del protocolo LTE.

Canales de control:

- **Canal de control de difusión (BCCH, Broadcast Control Channel):** Utilizado para la transmisión de información sistemática de la red a todos los dispositivos en una celda (eNodo B). Antes de acceder al sistema, un dispositivo necesita adquirir la información del sistema para averiguar cómo está configurado el sistema y, en general, cómo comportarse correctamente dentro de una célula. Tenga en cuenta que, en el caso de una operación no independiente, la información del sistema es proporcionada por el Sistema LTE y no hay BCCH.
- **Canal de control notificación (PCCH, Paging Control Channel):** Se utiliza para enviar información de aviso en la búsqueda de una unidad en una red. Por lo tanto, el mensaje de notificación debe transmitirse en varias celdas. Se debe tener en cuenta que, en el caso de una operación no independiente, el sistema LTE proporciona la notificación y no hay PCCH.
- **Canal de control común (CCCH, Common Control Channel):** Utilizado para la transmisión de información de control junto con el acceso aleatorio.
- **Canal de control de transporte multicast (MCCH, Multicast Control Channel):** Se utiliza para la información necesaria para la recepción de multicast.
- **Canal dedicado de control (DCCH, Dedicated Control Channel):** Utilizado para la transmisión de información de control a / desde un dispositivo. Este canal se utiliza para la configuración individual de dispositivos, como la configuración de varios parámetros en los dispositivos.

Canales de tráfico:

- **Canal de tráfico dedicado (DTCH, Dedicated Traffic Channel):** Utilizado para la transmisión de datos de usuario a / desde un dispositivo. Este es el tipo de canal utilizado para la transmisión de todos los datos de usuario de enlace ascendente y enlace descendente de unidifusión.
- **Canal de tráfico multicast (MTCH, Multicast Traffic Channel):** Es utilizado para la transmisión de datos multidifusión.

4.3.8. Evolved NodeB (eNB)

El eNB integra todas las funciones de la red de acceso. Por ello, en el eNB terminan todos los protocolos específicos de la interfaz radio. Mediante dichos protocolos, el eNB realiza la transmisión de los paquetes IP hacia/desde los equipos de usuario junto con los mensajes de señalización necesarios para controlar la operación de la interfaz radio. El servicio de transferencia de paquetes IP entre un eNB y un equipo de usuario se denomina formalmente como servicio portador radio (Radio Bearer, RB). El eNB mantiene un contexto de cada uno de los equipos de usuario que tiene conectados. En dicho contexto se almacena la información necesaria para mantener los servicios de E-UTRAN activos (información sobre el estado del equipo de usuario, servicios portadores activos, información de seguridad, capacidades del terminal, etc.).

Sin duda, la funcionalidad clave de un eNB consiste en la gestión de los recursos radio. Así, el eNB alberga funciones de control de admisión de los servicios portadores radio, control de movilidad (decisión de realizar un handover), asignación dinámica de los recursos radio tanto en el enlace ascendente como descendente (denominadas funciones de scheduling), control de interferencias entre estaciones base, control de la realización y del envío de medidas desde los equipos de usuario que puedan ser útiles en la gestión de recursos, etc.

Otra función importante introducida en la funcionalidad de un eNB es la selección dinámica de la entidad MME de la red troncal EPC cuando un terminal se registra en la red LTE. Esta función otorga un grado de flexibilidad muy importante en la operativa de la red. En E-UTRAN, a diferencia de arquitecturas más jerarquizadas como GERAN o las primeras versiones de UTRAN, un eNB puede estar conectado simultáneamente a múltiples MMEs de la red troncal. El conjunto de MMEs a los que tiene acceso un NB se denomina su pool area. Así, mediante la selección de qué entidad MME va a controlar el acceso de cada usuario, es posible balancear la carga de señalización entre diferentes MMEs así como aumentar la robustez del sistema frente a puntos de fallo críticos. Esta opción se soporta mediante lo que se denomina la interfaz S1 flexible (S1-flex).

Al igual que la posibilidad de interactuar con múltiples MMEs, un eNB puede enviar/recibir paquetes IP de los usuarios a los que sirve a través de diferentes pasarelas S-GW de la red troncal EPC. Ello conlleva que el eNB albergue funciones de encaminamiento del tráfico de los usuarios hacia la pasarela de red S-GW correspondiente. La elección de S-GW en este caso compete a la entidad MME y no al eNB.

Un eNB puede gestionar una o varias celdas. Un caso típico es el uso de sectorización de forma que, el eNB ubicado en un emplazamiento soporta tantas celdas como sectores.

4.3.9. Equipo de usuario

El equipo móvil (ME) integra las funciones propias de comunicación con la red celular así como las funciones adicionales que permiten la interacción del usuario con los servicios de la red. En este sentido, de cara a introducir un cierto grado de flexibilidad en el diseño del equipo móvil, se ha definido una interfaz que permite que exista una separación física entre el equipo que alberga las funciones propias de la comunicación (MT) y el equipo que se ocupa de la interacción con el usuario (TE), y que puede contener multitud de aplicaciones adicionales no directamente relacionadas con el sistema de comunicaciones móviles. Dicha interfaz consiste en la especificación del conjunto de comandos AT que permiten acceder a los servicios de la red (establecimiento de una conexión en la red LTE) soportados en el MT desde el TE.

En cualquier caso, la separación entre TE y MT es opcional y simplemente pretende flexibilizar el desarrollo de equipos de usuario más complejos. Tal como se ilustra en la figura 17, un ejemplo claro de equipo

de usuario que explota la interfaz basada en comandos AT es la utilización de un portátil (TE) y un módem GSM/UMTS/LTE (MT).

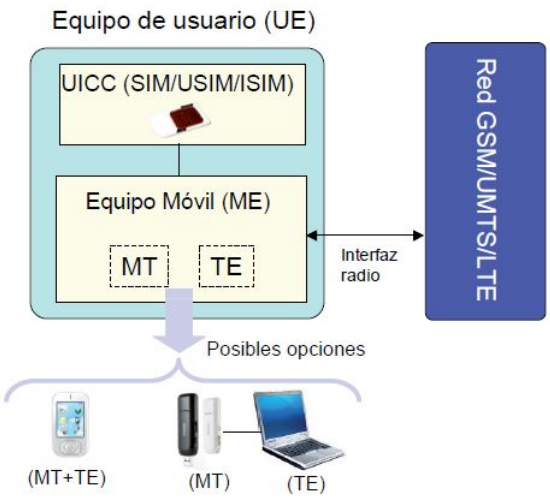


Figura 17: Equipo de usuario [10].

4.3.10. Señales de referencia (RS)

- **SRS:** Es la señal de referencia de sondeo de calidad del canal de transmisión y puede ser transmitida por cada usuario de enlace ascendente. SRS es utilizado por la estación base para obtener un cálculo más preciso del canal de enlace ascendente de un usuario en particular.
- **CSI:** La información del estado del canal es un tipo de indicador de rendimiento en un momento específico. El CSI esta compuesto por diferentes indicadores, sin embargo, estos no se miden en su totalidad para cada informe. Dependiendo de la situación y la configuración de la red, el UE realiza diferentes combinaciones de medidas.
- **DM-RS:** Es una señal utilizada en la estimación de la respuesta del canal necesaria para permitir demodulación. Este tipo de señal esta asociada a la transmisión de datos de usuario o información de control, es decir a la transmisión de paquetes PUSCH o PUCCH.

4.4. Tecnologías contempladas en LTE

4.4.1. OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex):

La tecnología OFDM se ha incorporado a LTE porque permite un gran ancho de banda para los datos y que estos se transmitan de manera eficiente, sin dejar de ofrecer un alto grado de protección frente a las reflexiones e interferencias. Los regímenes de acceso difieren entre el enlace ascendente y descendente: OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) se utiliza en el enlace descendente, mientras que SC- FDMA (Single Carrier-Frequency Division Multiple Access) se utiliza para el enlace ascendente porque la relación potencia de pico/potencia media (PAPR) es pequeña y un valor más alto permite una alta eficiencia del amplificador de potencia RF de los teléfonos móviles, un factor importante para equipos alimentados por baterías.

4.4.2. Tecnología MIMO (Multiple Input Multiple Output):

La tecnología MIMO se basa en la utilización de múltiples antenas en transmisión y recepción para conseguir multiplexación espacial aprovechando la variabilidad espacial del canal radio. De esta forma, el

inconveniente que los sistemas de telecomunicaciones anteriores encontraban debido a las señales múltiples que seguían diferentes trayectorias, derivando en reflexiones, se convierte en ventaja, y estas señalas adicionales pueden ser utilizadas para aumentar el rendimiento. El uso de múltiples antenas introduce cierta complejidad al sistema para permitir diferenciar las señales recibidas. Para ello se pueden utilizar matrices de antenas 2x2, 4x2, ó 4x4. Añadir nuevas antenas a una estación base es relativamente fácil, pero en el caso de los teléfonos móviles es más complicado. Las dimensiones de los equipos limitan el número de antenas, que deberían estar separadas al menos media longitud de onda ($\lambda/2$), lo que resulta un grave inconveniente. Se requiere que el multitrayecto sea lo suficientemente potente para que las antenas de recepción puedan separar las señales procedentes de las diferentes antenas de transmisión. La separación de los flujos de datos que comparten banda se basa en la correlación de las múltiples señales recibidas en presencia de multritrayecto. La capacidad aumenta linealmente con el número de antenas. MIMO proporciona alta capacidad con anchura de banda limitada, es decir, elevada eficiencia espectral.

4.4.3. Scheduling de paquetes

La funcionalidad del scheduling de paquetes de LTE se encarga, celda a celda, de asignar de forma dinámica recursos radio a los usuarios para que éstos puedan realizar sus transmisiones ordenadamente a través de la interfaz radio. Es una funcionalidad muy importante, ya que LTE está orientada a transmisión de datos y todas las transmisiones del plano de usuario se realizan a través de canales compartidos. Por lo tanto, el desempeño de estas estrategias puede afectar en gran medida a la consecución de la QoS de usuario. El scheduling conlleva varias subtareas como decidir, qué usuarios van a transmitir, en qué recursos de la interfaz radio, y con qué formato de modulación y codificación, a este proceso de decisión se le denomina "adaptación dinámica del enlace". El Scheduling también tiene una funcionalidad de programación semiestática la cuál implica que los parámetros de transmisión se proporcionan a los dispositivos por adelantado y no de forma dinámica.

4.4.4. Inter-Cell Interference Coordination

Teniendo en cuenta que la funcionalidad del Scheduling de paquetes asegura la ortogonalidad entre las transmisiones de usuarios en una misma celda (es decir, éstas no se interfieren mutuamente), pero no gestiona la interferencia entre transmisiones de usuarios conectados a distintas celdas. Esta interferencia intercelular podría llegar a ser especialmente notable en LTE, provocando una degradación sustancial de las prestaciones. La función Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) se encarga de mitigar la interferencia intercelular mediante la coordinación de los schedulers en celdas adyacentes. Es decir, ICIC permite que las decisiones de los schedulers en cada celda se hagan teniendo en cuenta las transmisiones planificadas en celdas contiguas, tanto evitando hacer transmisiones simultáneas en el mismo recurso radio, como controlando la potencia de transmisión. Esta coordinación es posible gracias a la existencia de la interfaz X2 de señalización entre eNBs. La interferencia en los sistemas celulares se puede clasificar entre intracelular cuando se produce entre transmisiones de/para usuarios servidos por una misma celda e intercelular cuando la interferencia afecta a transmisiones de/para usuarios servidos por distintas celdas.

Debido a que estas funciones están localizadas en el eNB, permite que otras entidades del Evolved Packet Core (EPC) como la Serving Gateway (S-GW) y la Mobility Management Entity (MME) sean independientes de la tecnología de acceso radio.

4.5. Bloque de recursos físicos (Physical Resource Block)

Se denomina PRB (Physical Resource Block), al mínimo elemento de información que puede ser asignado por el eNB a un terminal móvil. Un PRB ocupa 180 kHz de banda equivalente a doce sub-portadoras equi-espaciadas 15kHz entre ellas, y en él se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDMA, dependiendo de la longitud de prefijo cíclico utilizada. La duración de un PRB es igual a 0,5 ms, es decir la duración de un slot o ranura temporal.

El número de bloques de recursos físicos disponible en el sistema depende de la canalización tal como se indica en la tabla 1:

Canalización	1,4 MHz	3 MHz	5Mhz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Número de subportadoras disponibles	73	181	301	601	901	1201

Tabla 1: Número de PRBs y subportadoras disponibles en función de la canalización.

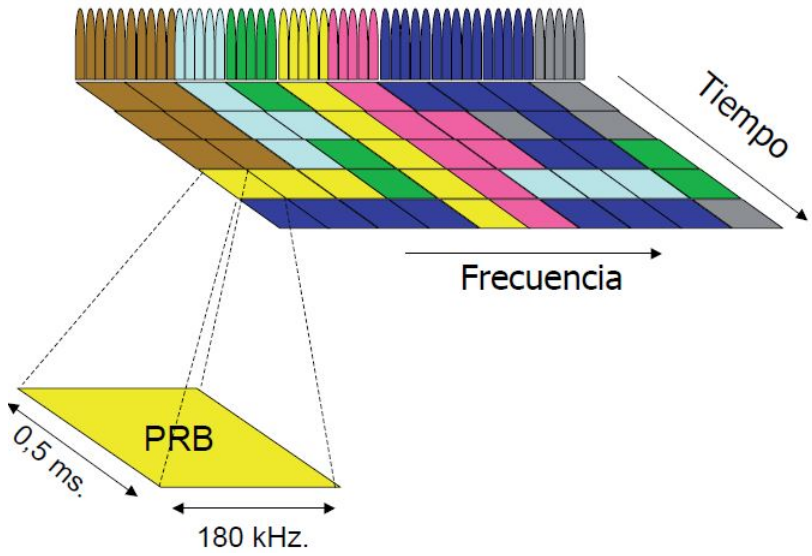


Figura 18: Bloque de recursos físicos (PRB) [10].

Hay que subrayar que el número de subportadoras disponibles y el número de PRB (indicado en la Tabla 1) están relacionados. En efecto el número de subportadoras es 12 veces el número de PRBs más una, ya que hay que considerar que la subportadora central (ó subportadora DC) de la banda disponible no se utiliza para transmitir información. La subportadora DC se utiliza para facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor.

Ya que en un bloque de recursos físicos (PRB) disponemos de 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada una de ellas, tenemos en total 84 recursos disponibles en donde ubicar los símbolos QPSK, 16QAM o 64 QAM. Suponiendo que utilizamos la modulación de mayor eficiencia espectral, es decir 64 QAM que transmite 6 bits/símbolo, resulta que en un PRB podemos llegar a transmitir hasta 504 bits, incluyendo datos codificados de usuario, canales de control y señalización propia de la capa física del sistema, cada 0,5 ms, lo que proporciona una velocidad bruta de transmisión de pico de aproximadamente $R_{b,PRB} = 504\ bits/0,5\ ms \cong$ 1 Mb/s. por lo tanto, para la máxima canalización disponible se tiene una velocidad pico de 100 MHz, sin embargo, cabe mencionar que aproximadamente un 15 % de los recursos son destinados a control y señalización, por lo cual la velocidad pico bruta de usuario es 85 MHz.

4.6. Estructura de trama

En LTE se define una estructura válida para sistemas que utilizan duplexado por división de frecuencia (FDD) y aplica tanto al enlace descendente como al ascendente. Además, la estructura soporta tanto half como full duplex.

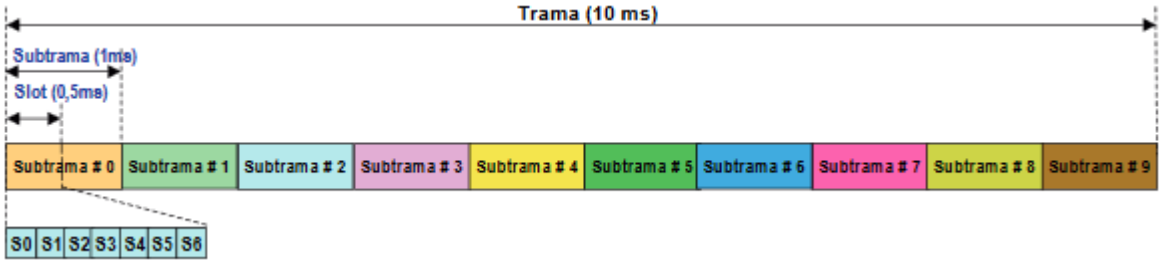


Figura 19: Estructura de trama FDD [10].

En esta estructura el eje temporal se divide en tramas de 10 ms. Cada trama a su vez está compuesta por 20 ranuras temporales (Slots o TS) de duración 0,5 ms. Se define una unidad básica de recursos, formada por dos ranuras temporales (TS) denominada subtrama de duración 1 ms. Esta estructura está optimizada para coexistir con el sistema UMTS. En cada ranura temporal (TS) se transmiten 6 ó 7 símbolos OFDM cada uno de ellos de duración Ts= 66,7 μs. En el caso de utilizar 7 símbolos, el Prefijo Cíclico (CP), tiene una duración de 4,7 μs (prefijo cíclico normal), salvo para el primer símbolo que tiene un prefijo cíclico de 5,2 μs. Si se utilizan 6 símbolos por ranura temporal entonces el prefijo cíclico, tiene una duración de 16,67 μs (prefijo cíclico largo). Normalmente en celdas muy grandes se utiliza una estructura de 6 símbolos por ranura temporal ya que los retardos de propagación pueden llegar a ser de algunos μs, lo que requiere un mayor prefijo cíclico para compensar la propagación multicamino.

Los usuarios se ubican en determinadas subportadoras, siguiendo la estructura de un PRB, por un intervalo de tiempo preestablecido, que se determina de forma dinámica por el gestor de recursos radio (scheduler). La mínima granularidad temporal en la asignación de recursos es de 1 ms, es decir una subtrama.

5. Diferencias entre las comunicaciones móviles 4G LTE y LTE-Advanced

La información presentada en este capítulo es obtenida en su gran mayoría del proyecto de grado “Estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías 4G Long Term Evolution (LTE) y LTE Advanced"[34].

Las principales características que diferencian la tecnología LTE-Advanced de la LTE son:

- Agregación de portadora.
- Transmisión desde múltiples antenas para el downlink y uplink mejorado.
- CoMP (Transmisión y recepción multipunto coordinada).
- Relaying.

LTE Advanced se corresponde con las mejoras realizadas en la tecnología LTE para poder alcanzar velocidades superiores a los 150 Mbps, también se denomina 4.5G o 4G+.

5.1. Requisitos establecidos

Parámetro	Requisito mínimo de rendimiento técnico
Velocidad pico de datos	Downlink: 1000 Mbit/s Uplink: 500 Mbit/s
Pico de eficiencia espectral	Downlink: 30 bit/s/Hz Uplink: 15 bit/s/Hz
Eficiencia espectral media	Downlink: 2.6 bit/s/Hz/celda Uplink: 2 bit/s/Hz/celda
Latencia del plano de usuario	10 ms
Latencia del plano de control	50 ms
Ancho de banda (Banda ancha)	Hasta 100 MHz

Tabla 2: Propuesta del 3GPP para que LTE-A se considere 4G [34]

5.2. Agregación de portadora (Carrier Agregation)

Agregación de portadora se caracteriza por permitir un sistema escalable de ancho de banda excediendo los 20 MHz del LTE potencialmente hasta los 100 MHz.

LTE Advanced necesita de un ancho de banda de 100 MHz para su operación como tecnología 4G, el problema es que hoy en día ningún operador tiene esta cantidad de espectro asignada, lo que sí tienen es bloques de frecuencia en bandas diferentes. Una motivación para usar agregación de portadora es usar eficazmente el espectro fragmentado independientemente de la velocidad de transmisión pico.

En la versión 8 de LTE se usa un único CC (Component Carrier) ocupando un ancho de banda máximo de 20 Mhz. LTE Advanced usa agregación de portadora de hasta cinco componentes de portadoras (Component Carriers, CCs) para lograr un gran ancho de banda de transmisión.

La figura 20 muestra un escenario en el que el R10 UE puede tener asignado recursos DL y UL de 5 componentes de portadoras CCs, lo que significa que el ancho de banda máximo es de 100 MHz con CCs de 20 MHz cada una, en tanto que los R8/R9 UEs pueden tener asignado solamente una única CC. Las CCs pueden ser de diferentes anchos de banda tal y como lo muestra esta figura.

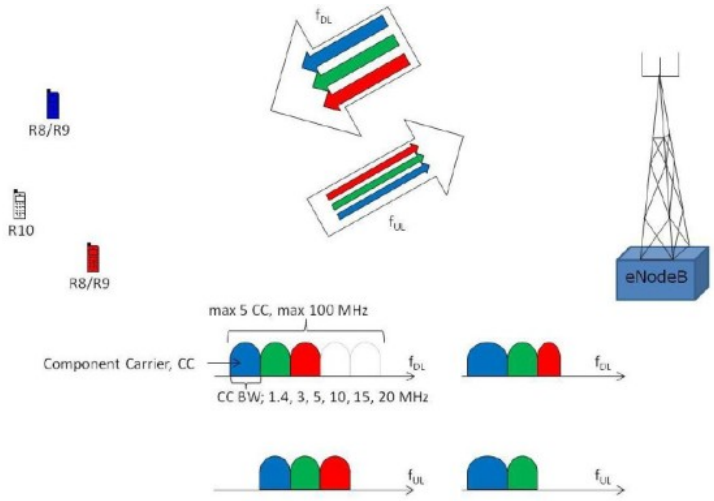


Figura 20: Agregación de portadora [34].

La agregación de portadora en LTE Advanced está diseñada para soportar agregación de una variedad de arreglos de distintos CCs, esto incluye CCs del mismo o de diferentes anchos de banda, CCs adyacentes o no adyacentes en la misma banda de frecuencia y CCs en diferentes bandas de frecuencia, dando como resultado tres escenarios diferentes:

- Agregación intrabanda con portadores de componentes contiguos en frecuencia.
- Agregación intrabanda con portadores de componentes no contiguos.
- Agregación entre bandas con portadores de componentes no contiguos.

Cada CC puede tomar un ancho de banda de transmisión diferente correspondiente a anchos de banda de canal de 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 Mhz.

En la figura 21 se ilustra a modo de ejemplo las alternativas brindadas por LTE Advanced en cuanto a agregación de portadoras.

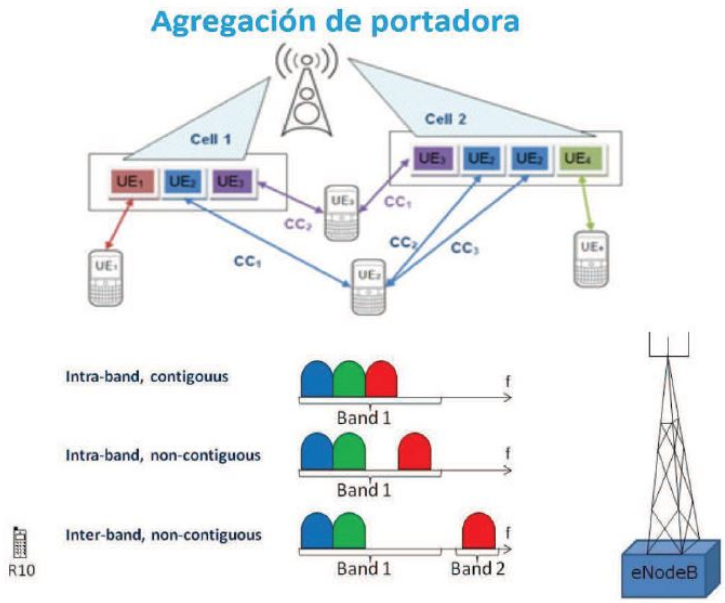


Figura 21: Alternativas intra-band e inter-band para agregación de portadoras [34].

Comenzando desde arriba, la primera opción representa el uso de CCs contiguas en la misma banda de frecuencia de operación, esto se conoce como intra-banda contigua, la segunda opción hace referencia a una intra-banda no contigua ya que operando en la misma banda de frecuencia las CCs no son contiguas; y, finalmente se tiene la tercera opción en la que se puede operar en distintas bandas de frecuencia con CCs no contiguas, la opción tres también se conoce como banda-inter no contigua. LTE-Advanced hace uso de las tres opciones.

Otra motivación para el uso de agregación de portadora es el soporte de redes heterogéneas. Una red heterogénea consiste de una capa de macro-celdas de alta potencia y una capa de celdas pequeñas de baja potencia (picoceldas y femto celdas) con al menos una componente de portadora siendo usada por ambas capas. En esta situación las transmisiones de una celda pueden interferir fuertemente con los canales de control de otra, impidiendo la programación y la señalización. La agregación de portadora hace posible el uso de varias CCs en ambas capas lo que ocasiona reducción en la interferencia. El llevar a cabo este procedimiento se conoce como cross-carrier scheduling. Este procedimiento permite que el CC del canal PDCCH de una celda programe los recursos de transmisión de otro CC de otra celda.

Un ejemplo claro es cuando un terminal identifica que tiene cobertura de dos antenas 4G a la vez, cada una de una banda de frecuencias diferente, en lugar de tener que elegir entre una de las dos, usa las dos antenas, para que esto sea posible, el dispositivo debe ser capaz de trabajar con dos bandas de frecuencia 4G a la vez, y siempre que la red también sea capaz de gestionarlo. Al usar las dos antenas simultáneamente la velocidad máxima teórica de bajada será la suma de las velocidades de cada antena individual.

5.3. Coordinación multipunto (CoMP)

La transmisión y recepción basada en la técnica coordinated multipoint es una tecnología donde múltiples antenas de varias celdas son utilizadas, de tal manera que tanto las antenas de la celda de servicio, así como las antenas de las celdas vecinas contribuyen en mejorar la calidad de la señal recibida en el UE y en el eNodeB, tanto como la reducción de la interferencia co-canal producida de las celdas adyacentes.

Coordinación multipunto es un conjunto de diferentes técnicas que posibilitan la coordinación dinámica entre diferentes estaciones base tanto para transmisión como para recepción, donde el objetivo es incrementar el rendimiento en los bordes de una celda.

La idea principal de CoMP es que un UE pueda recibir señales de varios eNB y cuando éste quiera hacer una transmisión varios eNB reciban las señales enviadas por éste independientemente de la carga del sistema.

Uno de los problemas que se ha estudiado por años es el que tiene que ver con los efectos producidos por la interferencia ocasionada por las celdas vecinas, por tal motivo LTE-Advanced CoMP convierte la interferencia inter-celda (Inter-Cell Interference, ICI) en una señal útil. Este tipo de problemas se pueden resolver mediante una planificación y transmisión conjunta entre varias celdas.

Gracias a la coordinación y combinación de las señales de múltiples antenas, CoMP brinda a los usuarios móviles la posibilidad de que ellos disfruten de un gran rendimiento y calidad, aún si ellos se encuentran ubicados en el centro de la celda o en los extremos de ésta, mejora la utilización de la red proveyendo de conexiones simultáneas de varias estaciones base, la recepción mejora, lo que permite que el número de conexiones caídas se reduzca.

En resumen, CoMP es considerado por el 3GPP como una herramienta usada para mejorar la cobertura, el throughput en los bordes de las celdas y por lo tanto, la eficiencia del sistema.

La figura 22 muestra a varios eNBs que se coordinan dinámicamente permitiendo que exista planificación, transmisión y procesamiento conjunto. De esta forma en el borde de una celda el UE puede ser atendido por dos o más eNBs mejorando la transmisión/recepción y troughput.

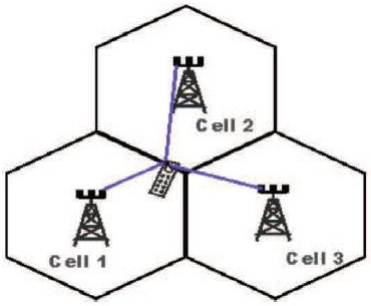


Figura 22: LTE-Advanced técnica CoMP [34].

5.4. Técnicas de múltiples antenas para LTE-Advanced

Dependiendo de las condiciones radio a las que está sometido un UE se han asignado diferentes modos o esquemas de transmisión (TM – Transmission Modes) basadas en técnicas mencionadas. Para el caso de la versión 10 se ha introducido el modo TM9 para el DL, en tanto que para el UL se ha introducido el TM2. Gracias a la introducción de estos modos en LTE-Advanced se soporta MIMO 8x8 en el DL y 4x4 en el UL.

Con respecto al downlink se mejora SU-MIMO y consecuentemente se incrementan las velocidades de transmisión; y, de la misma manera mejorando las técnicas MU-MIMO se consigue un aumento en la eficiencia espectral. Para llevar a cabo estas mejoras y avances se introducen nuevas señales de referencia y mejores UEs. En el uplink en cambio se introduce por primera vez SU-MIMO y se mejora la técnica de acceso.

5.4.1. MIMO mejorado en LTE-Advanced

Para soportar una eficiencia espectral pico en el DL de 30 bps/Hz y de 15 bps/Hz en el UL, LTE-Advanced plantea la introducción de esquemas de múltiples antenas basadas en MIMO 8x8 y MIMO 4x4, DL y UL respectivamente, para lo cual en LTE-A se distinguen principalmente dos opciones: la primera se denomina single-site MIMO en donde solamente una estación base es utilizada para la transmisión y la segunda se denomina multi-site MIMO donde varias estaciones base pueden colaborar en la transmisión de un único flujo de información.

- **Single-Site MIMO:** Esta opción se basa en la conformación de haces de radiación para un usuario en específico. Los patrones de radiación que se forman van a depender de las antenas que se usan, de la movilidad del UE y del tamaño de la celda. En definitiva Single-Site MIMO es una combinación entre multiplexación espacial y conformación de haces tanto para SU-MIMO y MU-MIMO en el DL.

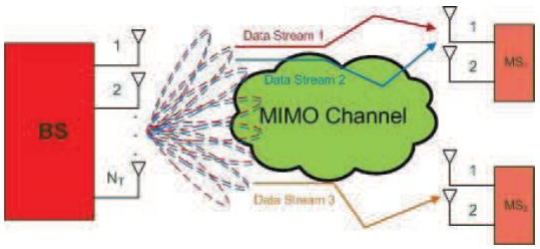


Figura 23: Escenario de Single-Site MIMO [34].

- **Multi-Site MIMO:** Esta opción busca mejorar el rendimiento en el borde de una celda por medio de la multiplexación espacial de diferentes estaciones base que comparten los mismos recursos espectrales para lo cual se introduce la técnica Co-operative MIMO, también conocida como Network MIMO y

como Coordinated multipoint (CoMP). En este caso las distancias entre los elementos de transmisión pueden ser de varios kilómetros por lo que es necesario disponer del suficiente ancho de banda de transmisión en el backhaul y hacer que las latencias sean cercanas a 1ms.

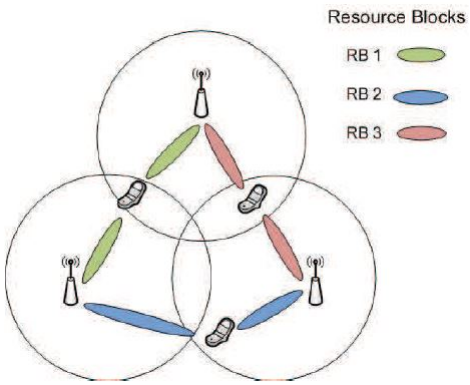


Figura 24: Escenario de Multiple-Site MIMO [34].

- **Transmisión desde múltiples antenas en el downlink:** En LTE-Advanced la transmisión de la información se puede realizar mediante dos técnicas: SU-MIMO y MU-MIMO. En SU-MIMO versión 10 la tendencia es usar 8 capas espaciales y un máximo de 2 codewords con 8 puertos de antena porque ello permite mejorar la velocidad de transmisión.

  Con respecto a MU-MIMO para el DL, LTE-Advanced, versión 10, presenta una nueva propuesta basada en el intercambio dinámico entre SU-MIMO Y MU-MIMO y mejoras en la transmisión del canal PDSCH. La provisión de nuevos modelos de señales de referencia (DM-RS y CSI-RS) permiten la programación de más de una secuencia espacial en los UEs que participan en MU-MIMO. La multiplexación ortogonal de las señales de referencia asignadas a los UEs posibilita tener una estimación más precisa del canal y mejorar los procedimientos de cancelación de interferencia en el UE. A pesar de que el Release 10 soporta multiplexación ortogonal de 8 layers, el máximo destinado para multiplexación multiusuario es 4.

- **DM-RS:** Las señales de referencia para demodulación en LTE-A se diferencian en la implementación de una variedad de técnicas de múltiples antenas basadas en conformación de haces de radiación para la precodificación.

- **CSI-RS:** Las señales de referencias de la información del estado del canal ahora soporta transmisión para 1, 2, 4 y 8 puertos de antena. También se posibilita la estimación de CSI de múltiples celdas en vez de estimar únicamente la de la misma celda de servicio.

- **Transmisión desde múltiples antenas en el uplink:** En la versión 10 de LTE se introduce por primera vez la transmisión SU-MIMO. Ésta se realiza en 4 capas espaciales para incrementar la velocidad de transmisión del canal PUSCH. Entonces se introducen dos modos de transmisión:

  - **Modo de transmisión 1 PUSCH:** Transmisión desde una única antena.
  - **Modo de transmisión 2 PUSCH:** Transmisión desde múltiples antenas, dentro de este modo, el UE puede ser configurado para transmitir usando 2 o cuatro antenas.

- **Esquema de acceso mejorado en el UL:** La técnica de acceso en el UL especificada en la versión 8 de LTE, SC-FDMA, es una técnica poderosa que combina muchos de los aspectos de OFDM con una baja relación de potencia pico a potencia promedio (peak to average power ratio, PAPR) en un sistema de portadora única. sin embargo, hay que tener claro que bajo estos argumentos SC-FDMA requiere

de asignación de portadora a través de un bloque continuo de espectro, pero en LTE-A ya no se hace uso de portadora única ni se trabaja con bloques de espectro continuo, es por ello que se implementa la tecnología basada en agregación de portadora explicada anteriormente, para así obtener el ancho de banda deseado. Por lo tanto, LTE-A mejora el esquema de acceso en el uplink adoptando una característica nueva en SC-FDMA conocida como ***Clustered SC-FDMA*** o Discrete Fourier Transform Spread OFDM (DFT-S-OFDM).

Este nuevo esquema es similar a SC-FDMA, pero tiene la ventaja de permitir que grupos de subportadoras no contiguas puedan ser asignadas a un UE para la transmisión, lo que posibilita una planificación selectiva en frecuencia en el uplink y un mejor rendimiento del enlace.

Se escogió la técnica Clustered SC-FDMA por la preferencia de OFDM y para evitar incrementos significativos en el PAPR. Esto permitirá satisfacer los requisitos de una incrementada eficiencia espectral en el uplink manteniendo la compatibilidad con versiones previas de LTE.

5.5. Relaying (Red de nodos relay)

El Relaying es una nueva característica en LTE-Advanced que se basa en el uso de una red de Relay Nodes (RNs) que permitirán complementar las macro-celdas incrementando así la cobertura y la capacidad de la red.

Los RNs pueden ser considerados desde cierto punto de vista como repetidores. Pero la verdad es que se diferencian el uno del otro.

Los repetidores son considerados nodos encargados de amplificar la señal de radiofrecuencia recibida de una estación base, tienen un costo muy bajo y eso se debe a que no realizan tareas de procesamiento de señal en banda base. Son típicamente usados en lugares donde el tráfico es bastante ligero o cuando el acceso a la red se dificulta como en las áreas rurales, son también usados para proveer cobertura en ambientes indoor. A pesar de lo útiles que son tienen dos inconvenientes: el primero es que solo amplifican la señal recibida y por lo tanto, cualquier interferencia también es amplificada, debido a ello la señal se degrada y por ende no es la misma en comparación con una señal transmitida desde la estación base. El segundo inconveniente tiene que ver con operación y mantenimiento (OM) ya que los repetidores son operados independientemente de la red de acceso, lo que involucra un costo adicional para los operadores de red.

Los RNs pueden ser vistos como una evolución de los repetidores para resolver los inconvenientes presentados por éstos. Un RN es un nodo de red que está conectado inalámbricamente a un eNB fuente, llamado donor eNB. Una característica importante de los RNs es que comparten funcionalidades propias de un eNB tales como el monitoreo y control remoto.

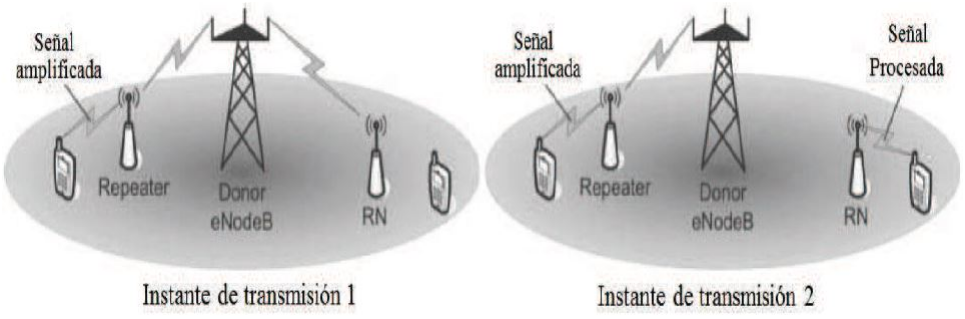


Figura 25: Fases de transmisión y recepción de un repetidor y un relay node [34].

En contraste con un repetidor, un RN procesa la señal recibida antes de renviarla. Este procedimiento involucra operaciones de Capa 1, 2 o 3. Hay que tomar en cuenta también que el retardo mínimo producido por

un repetidor es bajo comparado con un RN. Un RN tiene dos fases de transmisión para poder entregar la señal recibida del donor eNB al UE. En la figura 25 se muestran las fases de transmisión y recepción que se producen en un repetidor y en un RN.

En la figura 26 se pueden apreciar los nombres de los enlaces y elementos que integran una arquitectura de relaying, a continuación, se explican de izquierda a derecha cada uno de ellos.

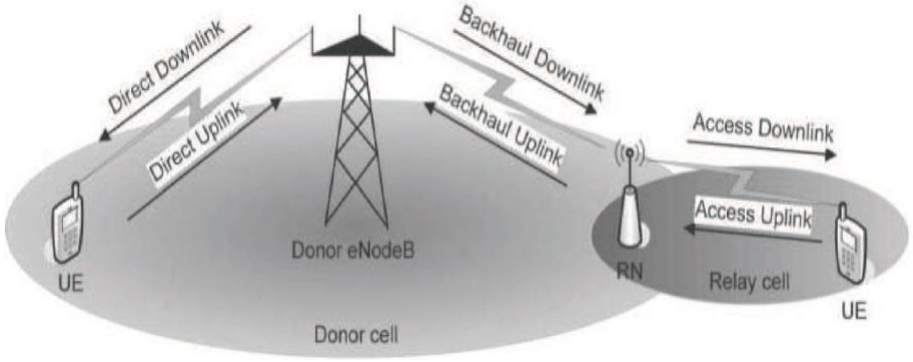


Figura 26: Terminología para la red de nodos relay. [34].

- **Direct link (Uplink/Downlink):** Se conoce como Direct downlink, al enlace entre el donor eNB y el UE, y, direct uplink, al enlace entre el UE y el Donor eNB.
- **Donor eNB:** Es un eNB fuente el cual se comunica con los RNs a través del backhaul link, y, con los UEs a través del direct link.
- **Donor cell:** Es el área de cobertura que proporciona un Donor eNB.
- **Backhaul link (Uplink/Downlink):** Se denomina backhaul downlink, al enlace entre el donor eNB y el RN, y backhaul uplink, al enlace entre el RN y el Donor eNB.
- **Relay Node (RN):** Es el elemento de red que permite interconectar los elementos de la Donor cell con los elementos de la Relay Cell.
- **Relay cell:** Área de cobertura brindada por un RN.
- **Access link (Uplink/Downlink):** Se conoce como Access downlink al enlace entre el RN y el UE, y, Access uplink, al enlace entre el UE y el RN.

Una vez que se han explicado los elementos y enlaces que intervienen en la figura 26, a continuación, se presentan dos términos que se utilizan cuando se habla de relay nodes (RNs).

- **RN Inband/outband:** Un RN inband usa la misma frecuencia de portadora en el backhaul link y en el access link. Si se utilizan diferentes frecuencias de portadora entonces el RN se conoce como RN outband.
- **RN Half/full duplex:** Se conoce como RN half dúplex al RN que no puede estar recibiendo información en el backhaul link y al mismo tiempo estar transmitiendo en el access link, y viceversa. Un RN full dúplex puede operar sin esta restricción. Finalmente, un RN que sea considerado como half dúplex también se lo considera como inband y si es full dúplex entonces también es outband.

Escenarios donde se utilizan los RNs:

- Ampliación de la cobertura de la celda en zonas rurales.

- Proveer del servicio y cobertura en ambientes outdoor urbanos y suburbanos.
- Mejora de la cobertura en ambientes indoor.
- Proveer de cobertura en puntos donde no llega la señal por motivos de grandes obstáculos (puntos muertos).
- Despliegues de corto tiempo.
- Proveer de cobertura vehículos en movimiento.

6. Comunicaciones móviles 5G

La información presentada en este capítulo es obtenida en su gran mayoría del libro “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology” [36], adicionalmente se complementa con información adquirida del artículo “Designing for the future: the 5G NR physical layer" [35].

6.1. Escenarios de uso propuestos

A continuación, se explican los tres principales casos de uso propuestos para el servicio 5G, en la figura 27 se mencionan algunas aplicaciones y en la figura 28 se observan las capacidades según el caso de uso.

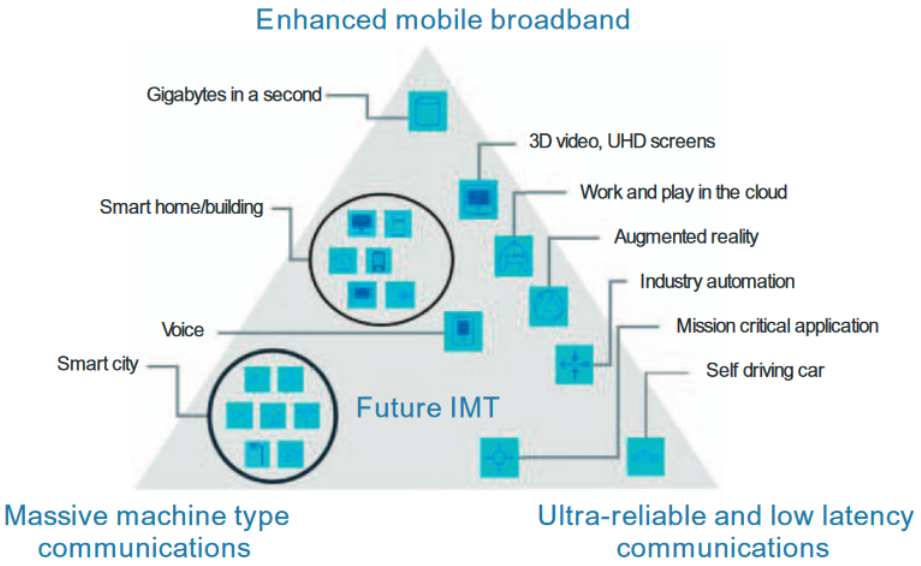


Figura 27: Casos de uso de IMT-2020 y ma peo a escenarios de uso [36].

6.1.1. Banda ancha móvil mejorada (eMBB)

Siendo la banda ancha móvil hoy en día el principal impulsor para el uso de sistemas móviles 3G y 4G, este servicio apunta a un papel continuo como el escenario de uso más importante a nivel global. La demanda aumenta continuamente y están surgiendo nuevas áreas de aplicación que establecen nuevos requisitos para lo que la ITU-R llama “Banda ancha móvil mejorada”. Debido a su uso amplio y omnipresente, cubre una variedad de casos de uso con diferentes desafíos, incluidos puntos de acceso y cobertura de área amplia, el primero permite altas velocidades de datos, alta densidad de usuarios y la necesidad de una capacidad de datos muy alta, mientras que el segundo enfatiza la movilidad y una experiencia de usuario sin interrupciones, con menores requisitos de velocidad de datos y densidad de usuarios. En general, el escenario de banda ancha móvil mejorada se considera como una comunicación centrada en las personas que usen el servicio de manera cotidiana.

6.1.2. Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC)

Este escenario está propuesto para cubrir tanto la comunicación centrada en humanos como en máquinas, donde esta última a menudo se denomina comunicación crítica de tipo máquina (C-MTC). Se caracteriza por casos de uso con requisitos estrictos de latencia, confiabilidad y alta disponibilidad. Los ejemplos incluyen la comunicación de vehículo a vehículo que involucra seguridad, control inalámbrico de equipos industriales, cirugía médica remota y automatización de distribución en una red inteligente. Un ejemplo de un caso de uso centrado en el ser humano son los juegos en 3D y la “Internet táctil", donde el requisito de baja latencia también se combina con velocidades de datos muy altas.

6.1.3. Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC)

Este caso de uso es totalmente centrado en la máquina, donde la característica principal es una gran cantidad de dispositivos conectados que generalmente tienen transmisiones muy escasas de pequeños volúmenes de datos que no son sensibles al retraso. El gran número de dispositivos puede proporcionar una densidad de conexión local muy alta, pero es el número total de dispositivos en un sistema lo que puede ser el verdadero desafío y enfatiza en la necesidad de un bajo costo. Debido a la posibilidad de implementación remota de dispositivos mMTC, también se requiere que tengan una vida útil de la batería muy larga.

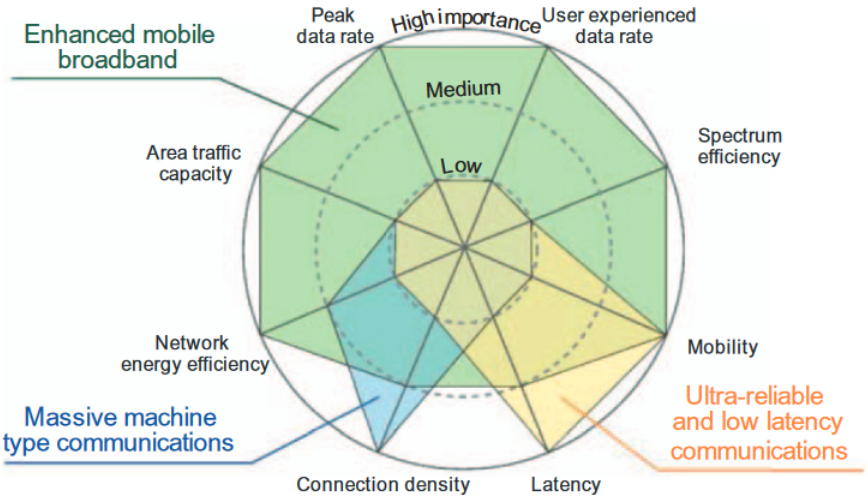


Figura 28: Relación entre las capacidades clave y los tres escenarios de uso del ITU-R [36].

6.2. Modo de operación no independiente (non-standalone)

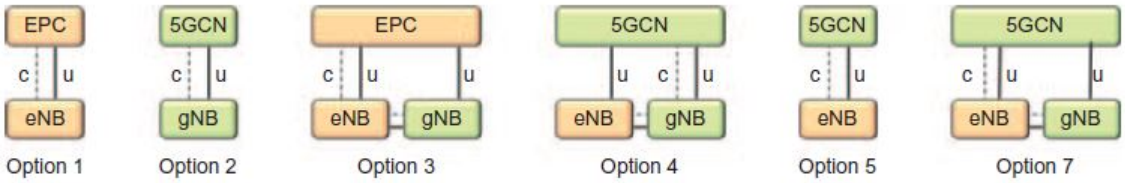


Figura 29: Diferentes combinaciones de redes core y tecnologías de acceso por radio, para redes 4G y 5G. [36]

Se conoce como modo no independiente, al modo de operación en el que LTE se utiliza para la funcionalidad del plano de control, como el acceso inicial, la búsqueda y la movilidad.

En la opción 3 de la figura 29, la red central EPC está conectada al eNB. LTE maneja todas las funciones del plano de control, y NR se usa solo para los datos del plano de usuario. El gNB está conectado al eNB y los datos del plano de usuario del EPC se pueden reenviar desde el eNB al gNB.

Para la operación independiente, el gNB está conectado directamente al núcleo 5G como se muestra en la opción 2 de la figura 29. El gNB maneja las funciones del plano de usuario y del plano de control. Las opciones 4, 5 y 7 muestran varias posibilidades para conectar un LTE eNB al 5GCN.

6.3. Red de acceso radio

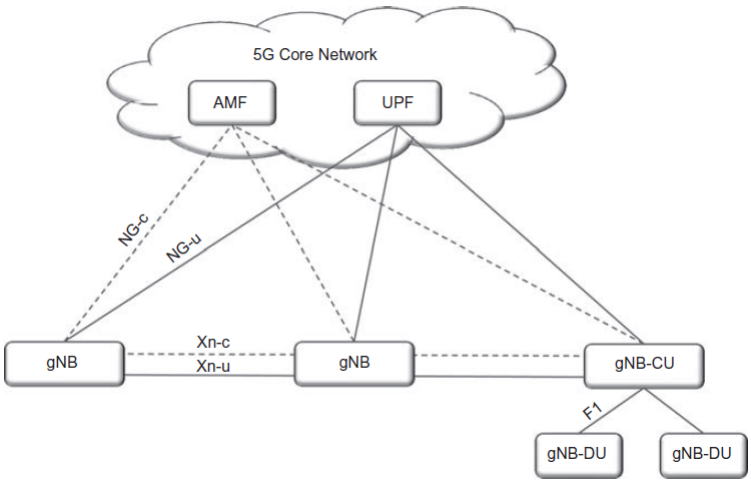


Figura 30: Interfaces de red de acceso por radio. [36]

La red de acceso por radio puede tener dos tipos de nodos conectados a la red central 5G:

- Un gNB que sirve a dispositivos NR que utilizan los protocolos NR de plano de usuario y plano de control.
- Un ng-eNB, que sirve a dispositivos LTE utilizando los protocolos de plano de usuario y plano de control LTE.

6.4. Interfaz Xn

La interfaz Xn, que conecta gNB entre sí, se utiliza principalmente para admitir la movilidad en modo activo y la conectividad dual. Esta interfaz también se puede usar para funciones de gestión de recursos de radio multicelda (RRM). La interfaz Xn también se utiliza para soportar movilidad sin pérdidas entre celdas vecinas mediante el reenvío de paquetes.

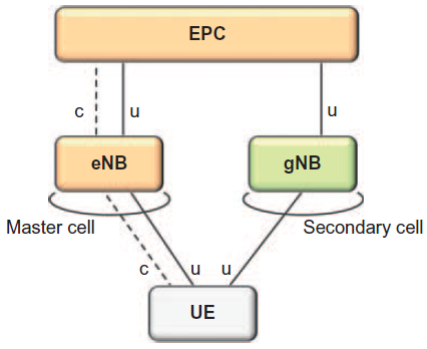


Figura 31: Conexión dual LTE-NR utilizando la opción 3 [36].

El escenario de un dispositivo conectado a dos celdas se conoce como conectividad dual. La conectividad dual entre LTE y NR es de particular importancia ya que es la base para una operación no autónoma utilizando la opción 3 como se ilustra en la figura 31. La celda maestra basada en LTE maneja la señalización del plano de control y (potencialmente) del plano de usuario, y la celda secundaria basada en NR maneja

solo el plano de usuario, esencialmente aumentando las velocidades de datos.

También hay una forma estandarizada de dividir el gNB en dos partes (apreciable en figura 30), una unidad central (gNB-CU) y una o más unidades distribuidas (gNB-DU) utilizando la interfaz F1. En el caso de un gNB dividido, los protocolos RRC, PDCP y SDAP residen en el gNB-CU y las entidades de protocolo restantes (RLC, MAC, PHY) en el gNB-DU. Dichos protocolos se explicaran más adelante.

La interfaz entre el gNB (o el gNB-DU) y el dispositivo se conoce como la interfaz Uu.

6.5. Protocolos en la interfaz de radio

En la figura 32 se ilustra una visión general de la arquitectura de protocolo NR del plano de usuario para el enlace descendente. Muchas de las capas de protocolo son similares a las de LTE, aunque también hay algunas diferencias. Una de las diferencias es la calidad del servicio de manejo en NR cuando está conectado a una red central 5G, donde la capa de protocolo SDAP acepta uno o más flujos de QoS que transportan paquetes IP de acuerdo con a sus requisitos de calidad de servicio. En el caso del plano de usuario NR conectado al EPC, no se utiliza el SDAP.

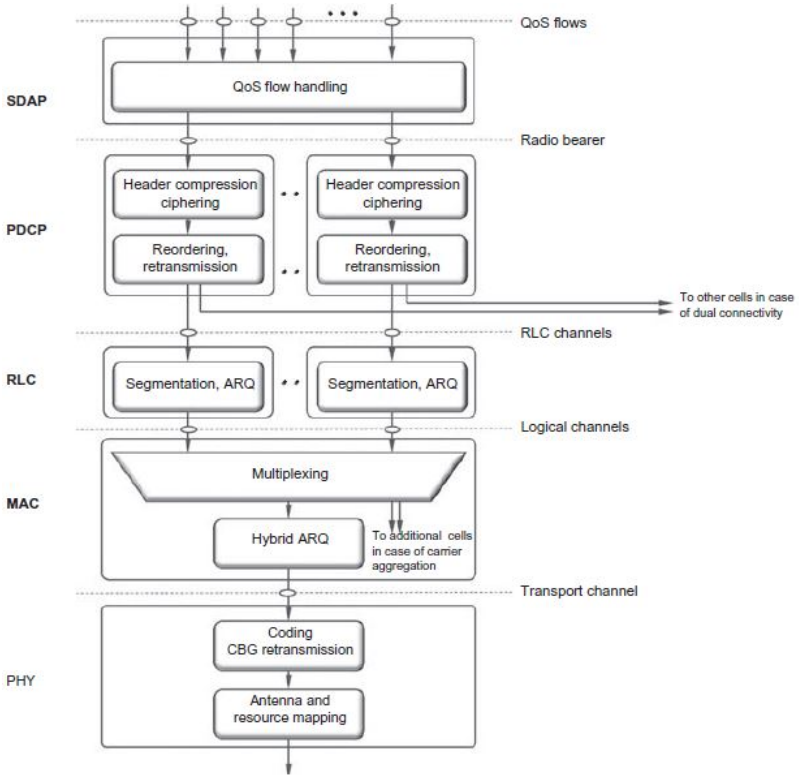


Figura 32: Protocolo NR de plano de usuario enlace descendente [36].

- **Protocolo de aplicación de datos de servicio (SDAP):** Realiza el mapeo entre un flujo de calidad de servicio de la red central 5G y una radio de datos portador, es responsable de asignar los portadores de QoS a los portadores de radio de acuerdo con sus requisitos de calidad de servicio y marca el identificador de flujo de calidad de servicio (QFI) en los paquetes de enlace ascendente y enlace descendente. Si el gNB está conectado al EPC, como es el caso del modo no autónomo, no se usa el SDAP.

Esta capa de protocolo no está presente en LTE pero se introdujo en NR cuando se conecta a la red central 5G, la razón de la introducción de SDAP en NR es la nueva gestión de calidad de servicio.

- **Protocolo de convergencia de datos de paquetes (PDCP):** El funcionamiento general de PDCP es el ya mencionado en la tecnología 4G, en 5G la conectividad dual es otra área donde PDCP juega un papel importante. En la conectividad dual, un dispositivo está conectado a dos células, o en general, a dos grupos de células, el grupo de células maestro (MCG) y el grupo de células secundario (SCG). Los dos grupos de células pueden ser manejados por diferentes gNB. Un portador de radio es típicamente manejado por uno de los grupos celulares, pero también existe la posibilidad de portadores divididos, en cuyo caso un portador de radio es manejado por ambos grupos celulares. En este caso, el PDCP puede proporcionar enrutamiento y duplicación, para distribuir los datos entre el MCG y el SCG.
- **Control Radio Enlace (RLC):** Es responsable del manejo de retransmisión, además de las funciones indicadas en 4G. El RLC proporciona servicios al PDCP en forma de canales RLC. Hay una entidad RLC por canal RLC (y, por lo tanto, por portador de radio) configurado para un dispositivo. En comparación con LTE, el NR RLC no admite la entrega en secuencia de datos a capas de protocolo superiores, un cambio motivado por los retrasos reducidos.

  Dependiendo del tipo de servicio, el RLC se puede configurar en uno de tres modos: modo transparente, modo no reconocido y modo reconocido, para realizar algunas o todas estas funciones. El modo transparente es, como su nombre lo indica, transparente, y no se agregan encabezados. El modo no reconocido admite la segmentación y la detección de duplicados, mientras que el modo reconocido también admite la retransmisión de paquetes erróneos.

  Una diferencia importante en comparación con LTE es que el RLC no garantiza la entrega de la secuencia de SDU a las capas superiores. La eliminación de la entrega en secuencia del RLC reduce la latencia general ya que los paquetes posteriores no tienen que esperar la retransmisión de un paquete faltante anterior antes de entregarse a las capas superiores, pueden enviarse de inmediato. Otra diferencia es la eliminación de la concatenación del protocolo RLC para permitir que las PDU RLC se ensamblen por adelantado, antes de recibir la concesión de programación del enlace ascendente. Esto también ayuda a reducir la latencia general.
- **Control de acceso medio (MAC):** Agregando a las propiedades mencionadas en 4G, se debe tener en cuenta que la funcionalidad de programación se encuentra en el gNB tanto para enlace ascendente como para enlace descendente. La estructura del encabezado en la capa MAC se ha cambiado en NR para permitir un soporte más eficiente del procesamiento de baja latencia que en LTE.
- **Capa física (PHY):** En términos generales las propiedades y funciones son las mismas descritas en 4G.

6.6. Protocolos de retransmisión

En NR, tres capas de protocolo diferentes ofrecen funcionalidad de retransmisión MAC, RLC y PDCP. Las razones para tener una estructura de retransmisión multinivel se pueden encontrar en la compensación entre la retroalimentación rápida y confiable de los informes de estado.

El mecanismo híbrido-ARQ en la capa MAC apunta a retransmisiones muy rápidas y, en consecuencia, se proporciona retroalimentación sobre el éxito o el fracaso de la transmisión de enlace descendente al gNB después de cada bloque de transporte recibido (para la transmisión de enlace ascendente no es necesario transmitir retroalimentación explícita como receptor y el planificador están en el mismo nodo). Aunque en principio es posible lograr una probabilidad de error muy baja de la retroalimentación híbrida-ARQ, tiene un costo en recursos de transmisión como la potencia. En muchos casos, una tasa de error de retroalimentación de 0.1-1 % es razonable, lo que resulta en una tasa de error residual ARQ híbrido de un orden similar. En muchos casos, esta tasa de error residual es suficientemente baja, pero hay ocasiones en las que no es así.

Una situación obvia son los servicios que requieren una entrega de datos ultra confiable combinada con baja latencia. En tales casos, es necesario disminuir la tasa de error de retroalimentación y se debe aceptar el aumento del costo en la señalización de retroalimentación, o se pueden realizar retransmisiones adicionales sin depender de la señalización de retroalimentación, que tiene una eficiencia espectral disminuida.

En comparación con los acuses de recibo de ARQ híbrido, los informes de estado de RLC se transmiten con poca frecuencia y, por lo tanto, el costo de obtener una confiabilidad de 10^{-5} o menor es relativamente pequeño. Por lo tanto, la combinación de ARQ híbrido y RLC logra una buena combinación de tiempo de ida y vuelta pequeño y una modesta sobrecarga de retroalimentación donde los dos componentes se complementan entre sí: retransmisiones rápidas debido al mecanismo de ARQ híbrido y entrega de paquetes confiable debido al RLC.

El protocolo PDCP también es capaz de manejar retransmisiones, así como garantizar la entrega en secuencia. Las retransmisiones de nivel PDCP se utilizan principalmente en el caso de traspaso entre gNB, ya que los protocolos inferiores en este caso se eliminan. Las PDU PDCP no reconocidas pueden enviarse al nuevo gNB y transmitirse al dispositivo. En el caso de que el dispositivo ya haya recibido algunos de estos, el mecanismo de detección de duplicados PDCP descartará los duplicados. El protocolo PDCP también se puede usar para obtener diversidad de selección transmitiendo las mismas PDU en múltiples portadoras. El PDCP en el extremo receptor eliminará en este caso cualquier duplicado en caso de que la misma información se reciba con éxito en múltiples operadores.

6.7. Maquina de estado RRC

En la mayoría de los sistemas de comunicación inalámbrica, el dispositivo puede estar en diferentes estados dependiendo de la actividad del tráfico. Esto también es cierto para NR y un dispositivo NR puede estar en uno de los tres estados RRC definidos a continuación, RRC-IDLE, RRC-ACTIVE y RRC-INACTIVE (ver figura 33).

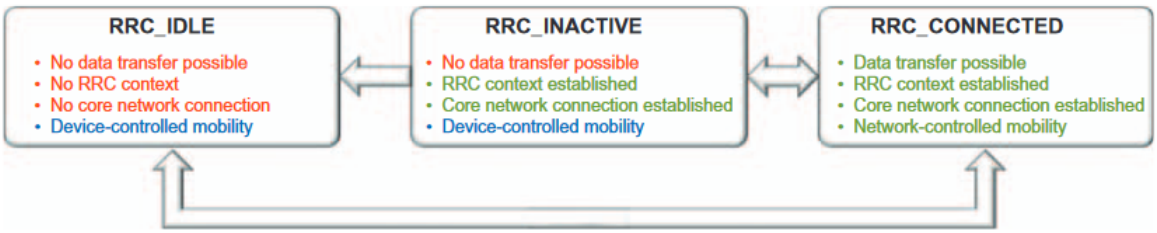


Figura 33: Estados RRC [36]

Los primeros dos estados RRC, RRC-IDLE y RRC-CONNECTED, son similares a los de LTE, mientras que RRC-INACTIVE es un nuevo estado introducido en NR y no está presente en el diseño original de LTE. En LTE, solo se admiten los estados inactivo y conectado. Un caso común en la práctica es usar el estado inactivo como el estado de reposo primario para reducir el consumo de energía del dispositivo. Sin embargo, como la transmisión frecuente de paquetes pequeños es común para muchas aplicaciones de teléfonos inteligentes, el resultado es una cantidad significativa de transiciones inactivas a activas en la red central. Estas transiciones tienen un costo en términos de carga de señalización y demoras asociadas. Por lo tanto, para reducir la carga de señalización y, en general, reducir la latencia, se define un tercer estado en NR, el estado RRC-INACTIVE.

6.8. Canales lógicos y de transporte

El MAC proporciona servicios al RLC en forma de canales lógicos. Un canal lógico se define por el tipo de información que transporta y generalmente se clasifica como un canal de control, utilizado para la transmisión de información de control y configuración necesaria para operar un sistema NR, o como un canal de

tráfico, utilizado para los datos del usuario.

El conjunto de tipos de canales lógicos especificados para NR son:

- **Canal de control broadcast (BCCH)**.
- **Canal de control notificación(PCCH)**.
- **Canal de control común (CCCH)**.
- **Canal de control dedicado (DCCH)**.
- **Canal de tráfico dedicado (DTCH)**.

Los canales lógicos anteriores están en general presentes también en un sistema LTE y se utilizan para una funcionalidad similar. Sin embargo, LTE proporciona canales lógicos adicionales para funciones que aún no son compatibles con NR (pero que probablemente se introducirán en próximos lanzamientos).

Los siguientes tipos de canales de transporte se definen para NR:

- **Broadcast channel (BCH)**.
- **Canal de búsqueda (PCH)**.
- **Canal de acceso aleatorio (RACH)**.
- **Canal compartido de enlace ascendente (UL-SCH)**.
- **Canal compartido de enlace descendente (DL-SCH):** Es el principal canal de transporte utilizado para la transmisión de datos de enlace descendente en NR. Admite características clave de NR, como la adaptación de velocidad dinámica y la programación dependiente del canal en los dominios de tiempo y frecuencia, ARQ híbrido con combinación suave y multiplexación espacial. También es compatible con DRX para reducir el consumo de energía del dispositivo mientras proporciona una experiencia siempre activa.

6.9. Capa física

La capa física es responsable de la codificación, el procesamiento ARQ híbrido de capa física, la modulación, el procesamiento de múltiples antenas y el mapeo de la señal a los recursos de frecuencia de tiempo físico apropiados. También maneja la asignación de canales de transporte a canales físicos.
Los siguientes tipos de canales físicos están definidos para NR:

- **Canal compartido de enlace descendente físico (PDSCH)**.
- **Canal de transmisión física (PBCH)**.
- **Canal de control de enlace descendente físico (PDCCH)**.
- **Canal de acceso aleatorio físico (PRACH)**.
- **Canal compartido de enlace ascendente físico (PUSCH)**.
- **Canal de control de enlace ascendente físico (PUCCH)**: Cumple la misma función que en LTE, sin embargo, la comunicación se establece con el gNB o el eNB según el tipo de implementación.

Se debe tener en cuenta que algunos de los canales físicos, más específicamente los canales utilizados para la información de control de enlace descendente y ascendente (PDCCH y PUCCH) no tienen un canal de transporte correspondiente asignado a ellos.

6.10. gNB / ng-eNB

El gNB y el ng-eNB son responsables de todas las funciones relacionadas con la radio en una o varias celdas, por ejemplo, gestión de recursos de radio, control de admisión, establecimiento de conexión, enrutamiento de datos del plano de usuario a la UPF e información del plano de control a la gestión de flujo AMF y QoS. Es importante observar que un gNB es un nodo lógico y no una implementación física.

6.11. ARQ híbrido con combinación suave

El ARQ híbrido con combinación suave proporciona robustez contra errores de transmisión. Como las retransmisiones de ARQ híbrido son rápidas, muchos servicios permiten una o varias retransmisiones y, por lo tanto, el mecanismo de ARQ híbrido forma un mecanismo de control de velocidad implícito (bucle cerrado). El protocolo híbrido-ARQ es parte de la capa MAC, mientras que la capa física maneja la combinación suave real.

Hybrid ARQ no es aplicable para todos los tipos de tráfico. Por ejemplo, las transmisiones de difusión, donde la misma información está destinada a múltiples dispositivos, generalmente no se basan en ARQ híbrido. Por lo tanto, ARQ híbrido solo es compatible con DL-SCH y UL-SCH, aunque su uso depende de la implementación de gNB.

Una característica adicional del mecanismo híbrido-ARQ en NR en comparación con LTE es la posibilidad de retransmisión de grupos de bloque de código, una característica que puede ser beneficiosa para bloques de transporte muy grandes o cuando un bloque de transporte es parcialmente interferido por otra transmisión preventiva.

6.12. Esquema de transmisión

OFDM es el esquema seleccionado para 5G, debido a su solidez a la dispersión del tiempo y la facilidad de explotar tanto en el tiempo como en dominios de frecuencia al definir la estructura para diferentes canales y señales, gracias a esto, es una forma de onda adecuada para NR. Es el esquema básico de transmisión para las direcciones de transmisión de enlace descendente y ascendente en NR. Sin embargo, a diferencia de LTE donde OFDM precodificado con DFT es el único esquema de transmisión en el enlace ascendente, NR utiliza OFDM como el esquema de transmisión de enlace ascendente de línea de base, con la posibilidad de utilizar OFDM precodificado con DFT como esquema complementario. Los motivos de OFDM precodificado con DFT en el enlace ascendente son los mismos que en LTE, a saber, para reducir la métrica cúbica y obtener una mayor eficiencia del amplificador de potencia, pero el uso de la precodificación DFT también tiene varios inconvenientes, que incluyen:

- Los receptores de multiplexación espacial ("MIMO") se vuelven más complejos. Esto no fue un problema cuando se acordó la precodificación DFT en la primera versión LTE ya que no admitía la multiplexación espacial de enlace ascendente, pero se vuelve importante cuando se admite la multiplexación espacial de enlace ascendente.
- Mantener la simetría entre los esquemas de transmisión de enlace ascendente y enlace descendente es en muchos casos beneficioso, algo que se pierde con un enlace ascendente precodificado con DFT. Un ejemplo de los beneficios con los esquemas simétricos es la transmisión de enlace lateral, es decir, las transmisiones directas entre dispositivos. Cuando se introdujeron los enlaces laterales en LTE, se acordó mantener el esquema de transmisión de enlace ascendente que requiere que los dispositivos implementen un receptor para OFDM precodificado por DFT además del receptor OFDM que ya está equipado para transmisiones de enlace descendente. Introducir soporte de enlace lateral en NR en el futuro es, por lo tanto, más simple ya que el dispositivo ya tiene soporte para transmisión y recepción OFDM.
- OFDM precodificado por DFT implica restricciones de programación ya que solo son posibles asignaciones contiguas en el dominio de la frecuencia. En muchos casos, esta es una restricción aceptable,

pero también hay situaciones en las que es deseable utilizar una asignación no contigua, por ejemplo, para obtener diversidad de frecuencia, esto se soluciono en LTE-A con Clustered SC-FDMA, pero no soluciona los dos inconvenientes mencionados en los items anteriores.

Por lo tanto, NR ha adoptado OFDM en el enlace ascendente con soporte complementario para la precodificación DFT para la transmisión de datos. Cuando se usa la precodificación DFT, las transmisiones de enlace ascendente están restringidas a una sola capa, mientras que las transmisiones de enlace ascendente de hasta cuatro capas son posibles con OFDM. La compatibilidad con la precodificación DFT es obligatoria en el dispositivo y, por lo tanto, la red puede configurar la precodificación DFT si es necesario.

Un aspecto importante de OFDM es la selección de la numerología, en particular el espaciado de la subportadora y la longitud del prefijo cíclico. Una gran separación entre subportadoras es beneficiosa desde una perspectiva de error de frecuencia, ya que reduce el impacto de los errores de frecuencia y el ruido de fase. Sin embargo, para una cierta longitud de prefijo cíclico en microsegundos, la sobrecarga relativa aumenta cuanto mayor sea el espacio de la subportadora y desde esta perspectiva sería preferible un prefijo cíclico más pequeño. La selección por lo tanto, el espacio de la subportadora necesita equilibrar cuidadosamente la sobrecarga del prefijo cíclico con la sensibilidad a la dispersión / desplazamiento Doppler y al ruido de fase.

Para LTE, se encontró que una opción de espacio de subportadora de 15 kHz y un prefijo cíclico de aproximadamente 4.7 μs ofrecen un buen equilibrio entre estas diferentes restricciones para escenarios para los que se diseñó originalmente LTE: despliegues celulares al aire libre de hasta aproximadamente 3 GHz de frecuencia portadora.

NR, por otro lado, está diseñado para soportar una amplia gama de escenarios de despliegue, desde celdas grandes con frecuencia de portadora menor a 1 GHz hasta despliegues de onda mm con asignaciones de espectro muy amplio. Tener una única numerología para todos estos escenarios no es eficiente ni posible. Para el rango más bajo de frecuencias portadoras, desde menos de 1 GHz hasta unos pocos GHz, los tamaños de celda pueden ser relativamente grandes y es necesario un prefijo cíclico capaz de manejar la propagación de retardo esperada en este tipo de despliegues, un par de microsegundos. En consecuencia, se necesita un espacio de subportadora en el rango LTE o algo más alto, en el rango de 15 - 30 kHz. Para frecuencias portadoras más altas que se aproximan al rango de onda mm, las limitaciones de implementación como el ruido de fase se vuelven más críticas, llamando para espacios de subportadora más altos. Al mismo tiempo, los tamaños de celda esperados son más pequeños a frecuencias más altas como consecuencia de las condiciones de propagación más desafiantes. El uso extensivo de la formación de haces a altas frecuencias también ayuda a reducir la propagación del retraso esperado. Por lo tanto, para este tipo de implementaciones un mayor espacio entre subportadoras y un prefijo cíclico más corto son adecuados.

Debido a lo mencionado anteriormente se ve que se necesita una numerología escalable. Por lo tanto, NR admite una numerología flexible con un rango de espaciamiento de subportadora, basado en la escala de un espaciado de subportadora de línea base de 15 kHz. La razón para la elección de 15 kHz es la coexistencia con LTE. LTE-M y el NB-IoT basado en LTE en la misma portadora.

El espaciado de la subportadora es escalable de acuerdo con $15 * 2^n$ kHz, donde n es un entero y 15kHz es el espaciado de la subportadora utilizado en LTE. El factor de escala 2^n asegura que las ranuras y los símbolos de diferentes numerologías estén alineados en el dominio del tiempo, lo cual es importante para habilitar eficientemente las redes TDD. A partir del espaciado de subportadora de referencia, se derivan los espaciamientos de subportadora que van desde 15 kHz hasta 240 kHz con un cambio proporcional en la duración del prefijo cíclico como se muestra en la Tabla 3. Aunque la especificación de la capa física NR es independiente de la banda, no todas las numerologías compatibles son relevantes para todas las bandas de frecuencia. Por lo tanto, para cada banda de frecuencia, los requisitos de radio se definen para un subconjunto de numerologías compatibles.

La elección del valor n depende de varios factores, incluidos el tipo de implementación, la frecuencia de la portadora, los requisitos de servicio (latencia, confiabilidad y rendimiento), las deficiencias de hardware (ruido de fase del oscilador), la movilidad y complejidad de implementación. Por ejemplo, un espaciado de subportadora más amplio puede ser prometedor para los servicios críticos de latencia (URLLC), Pequeñas áreas de cobertura y frecuencias portadoras más altas. El espaciado de subportadora más estrecho se puede utilizar para frecuencias de portadora más bajas, grandes áreas de cobertura, dispositivos de banda estrecha y servicios multidifusión de transmisión multimedia evolucionados (eMBMS). También es posible admitir múltiples servicios simultáneamente con diferentes requisitos en el mismo operador multiplexando dos numerologías diferentes (espacio de subportadora más amplio para URLLC y espacio de subportadora más bajo para eMBB / mMTC / eMBMS, por ejemplo)

Espaciado de subportadora $[kHz]$	Tiempo útil de símbolo (T_u) $[\mu s]$	Prefijo Cíclico (T_{cp}) $[\mu s]$	Tiempo de símbolo OFDM (T_{cp}) $[\mu s]$
15	66.7	4.7	71.4
30	33.3	2.3	35.6
60	16.7	1.2	17.9
120	8.33	0.59	8.92
240	4.17	0.29	4.46

Tabla 3: Espacios de subportadora admitidos por NR [36].

La coexistencia eficiente también requiere alineación en el dominio del tiempo y, por esta razón, la estructura de ranura NR para 15 kHz es idéntica a la estructura de subtrama LTE. Esto significa que el prefijo cíclico para los símbolos primero y octavo es algo más grande que para los otros símbolos. La estructura de ranuras para espacios de subportadora más altos en NR se deriva al escalar esta estructura de línea base por potencias de dos. En esencia, un símbolo OFDM se divide en dos símbolos OFDM de la próxima numerología superior. El escalado por potencias de dos es beneficioso, ya que mantiene los límites de los símbolos en las numerologías, lo que simplifica la mezcla de diferentes numerologías en la misma portadora.

El tiempo de símbolo útil T_u depende del espaciado de la subportadora como se muestra en la Tabla 3, siendo el tiempo de símbolo OFDM general la suma del tiempo de símbolo útil y la longitud del prefijo cíclico TCP. En LTE, se definen dos prefijos cíclicos diferentes, el prefijo cíclico normal y el prefijo cíclico extendido. El prefijo cíclico extendido, aunque menos eficiente desde el punto de vista del prefijo cíclico, estaba destinado a entornos específicos con una propagación de retardo excesiva donde el rendimiento estaba limitado por la dispersión del tiempo. Sin embargo, el prefijo cíclico extendido no se usó en implementaciones prácticas, lo que lo convierte en una característica innecesaria en LTE para la transmisión de unidifusión, debido a esto NR define solo un prefijo cíclico normal.

El espectro de la señal OFDM decae bastante lento fuera del ancho de banda de transmisión. Para limitar la emisión fuera de banda, la utilización del espectro para LTE es del 90 por ciento. Es decir, 100 de los 111 posibles bloques de recursos físicos (PRB) se utilizan en una asignación de ancho de banda de 20 MHz. Para NR, se ha acordado que la utilización del espectro será superior al 90 por ciento. Las operaciones de ventanas y filtrado son formas viables de confinar la señal OFDM en el dominio de la frecuencia. Es importante tener en cuenta que la relación entre la eficiencia del espectro y el confinamiento del espectro no es lineal, ya que las técnicas de confinamiento del espectro pueden inducir autointerferencia.

6.13. Esquemas Dúplex

La flexibilidad del espectro es una de las características clave de NR. Además de la flexibilidad en el ancho de banda de transmisión, la estructura básica NR también admite la separación del enlace ascendente y el enlace descendente en el tiempo y/o frecuencia sujeto a la operación semidúplex o full dúplex, todo utilizando la misma estructura de trama única. Esto proporciona un alto grado de flexibilidad (figura 34):

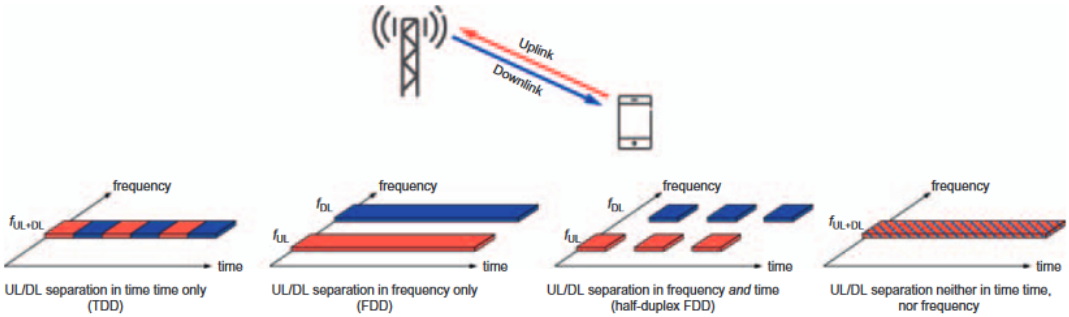


Figura 34: Esquemas Dúplex [36].

- **TDD full dúplex:** Las transmisiones de enlace ascendente y descendente utilizan la misma frecuencia de portadora y están separadas solo en el tiempo.
- **FDD full dúplex:** Las transmisiones de enlace ascendente y enlace descendente utilizan diferentes frecuencias pero pueden ocurrir simultáneamente.
- **FDD semidúplex:** Las transmisiones de enlace ascendente y enlace descendente están separadas en frecuencia y tiempo, adecuadas para dispositivos más simples que funcionan en espectros emparejados.

En principio, la misma estructura básica NR también permitiría la operación dúplex completa con el enlace ascendente y el enlace descendente separados ni en el tiempo ni en la frecuencia, aunque esto resultaría en un problema significativo de interferencia de transmisor a receptor cuya solución aún está en la etapa de investigación y dejado para el futuro.

LTE también era compatible con TDD y FDD, pero a diferencia de la estructura de trama única utilizada en NR, LTE utilizó dos tipos de estructura de trama diferentes. Además, a diferencia de LTE, donde la asignación del enlace ascendente del enlace descendente no cambia con el tiempo, la operación TDD para NR está diseñada con TDD dinámico como un componente tecnológico clave.

6.13.1. Formato de Slot e indicación

La estructura de trama NR admite transmisiones y operaciones TDD y FDD tanto en espectro con licencia como sin licencia. Permite latencia muy baja, reconocimientos HARQ rápidos, TDD dinámico, coexistencia con LTE y transmisiones de longitud variable. La estructura del marco sigue tres principios de diseño clave para mejorar la compatibilidad hacia adelante y reducir las interacciones entre las diferentes características.

El primer principio es que las transmisiones son autónomas. Los datos en una ranura y en un beam (haz) se pueden decodificar por sí mismos sin depender de otras ranuras y beams. Esto implica que las señales de referencia requeridas para la demodulación de datos se incluyen en una ranura dada y un haz dado.

El segundo principio es que las transmisiones están bien confinadas en tiempo y frecuencia. Mantener las transmisiones juntas facilita la introducción de nuevos tipos de transmisiones en paralelo con las transmisiones heredadas en el futuro. La estructura de trama NR evita la asignación de canales de control en todo el ancho de banda del sistema.

El tercer principio es evitar relaciones de temporización estáticas y/o estrictas en las ranuras y en diferentes direcciones de transmisión. Por ejemplo, se utiliza HARQ asíncrono en lugar del tiempo de retransmisión predefinido.

Dependiendo de si el dispositivo es capaz de soportar servicio dúplex completo, como es el caso de FDD,

o solo de semidúplex, como es el caso de TDD, es posible que una ranura no se use por completo para la transmisión de enlace ascendente o descendente. Dado que el tiempo necesario entre el enlace descendente y el enlace ascendente depende de varios factores, NR define una amplia gama de formatos de ranura que definen qué partes de una ranura se utilizan para el enlace ascendente o el enlace descendente.

Cada formato de ranura representa una combinación de símbolos OFDM denominados enlace descendente, flexible y enlace ascendente, respectivamente. La razón para tener un tercer estado, flexible, es manejar el período de protección necesario en esquemas semidúplex. En la figura 35 se ilustra un subconjunto de los formatos de ranura admitidos por NR.



Figura 35: Un subconjunto de los posibles formatos de ranura en NR ("D" es enlace descendente, "U" es enlace ascendente y "-" es flexible) [36].

Como se ve en la figura 35, existen formatos de ranura solo de enlace descendente y solo de enlace ascendente que son útiles para la operación full-duplex (FDD), así como ranuras de enlace ascendente y downlink parcialmente llenas para manejar el caso de la operación half-duplex (TDD).

En NR, tres mecanismos de señalización diferentes proporcionan información al dispositivo sobre los recursos que se utilizan para la transmisión de enlace ascendente o descendente:

- Señalización dinámica para el dispositivo programado.
- Señalización semiestática utilizando RRC.
- Indicación dinámica de formato de ranura compartida por un grupo de dispositivos.

Algunos o todos estos mecanismos se usan en combinación para determinar la dirección de transmisión instantánea.

Para un dispositivo semidúplex, un símbolo clasificado como "enlace descendente" solo se puede utilizar para la transmisión de enlace descendente sin transmisión de enlace ascendente en el mismo período de tiempo. Del mismo modo, un símbolo clasificado como "enlace ascendente" significa que el dispositivo no debe esperar ninguna transmisión de enlace descendente superpuesta. "Flexible" significa que el dispositivo no puede hacer suposiciones sobre la dirección de transmisión. La señalización de control de enlace descendente debe ser monitoreada y si se encuentra un mensaje de programación, el dispositivo debe transmitir / recibir en consecuencia.

Una ranura puede complementarse con mini-ranuras para admitir transmisiones con una posición de inicio flexible y una duración más corta que una duración de ranura normal. Una mini ranura puede ser tan corta como un símbolo OFDM y puede comenzar en cualquier momento. Las mini ranuras pueden ser útiles en varios escenarios, incluidas las transmisiones de baja latencia, las transmisiones en espectro sin licencia y las transmisiones en el espectro de onda milimétrica (banda mmWave).

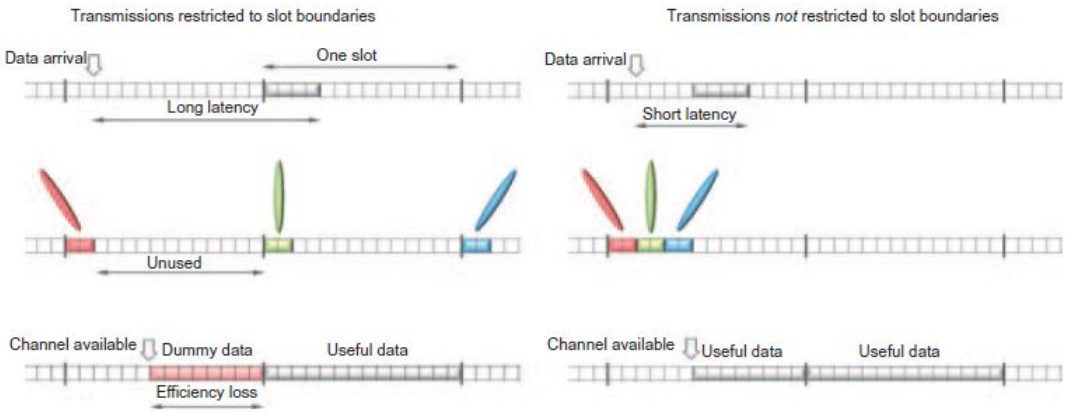


Figura 36: Mini-slots en NR [36].

En escenarios de baja latencia, la transmisión debe comenzar inmediatamente sin esperar el inicio de un límite de ranura (URLLC, por ejemplo). Cuando se transmite en un espectro sin licencia, es beneficioso comenzar la transmisión inmediatamente después de LBT. Cuando se transmite en la banda mmWave, la gran cantidad de ancho de banda disponible implica que la carga útil soportada por algunos símbolos OFDM es lo suficientemente grande para muchos de los paquetes. La figura 37 proporciona ejemplos de transmisión basada en URLLC y LBT en espectro sin licencia a través de mini-slots e ilustra que se pueden agregar múltiples slots para servicios que no requieren una latencia extremadamente baja (eMBB, por ejemplo). Tener una mayor duración de transmisión ayuda a aumentar la cobertura o reducir la sobrecarga debido a la conmutación (en TDD), la transmisión de señales de referencia y la información de control.

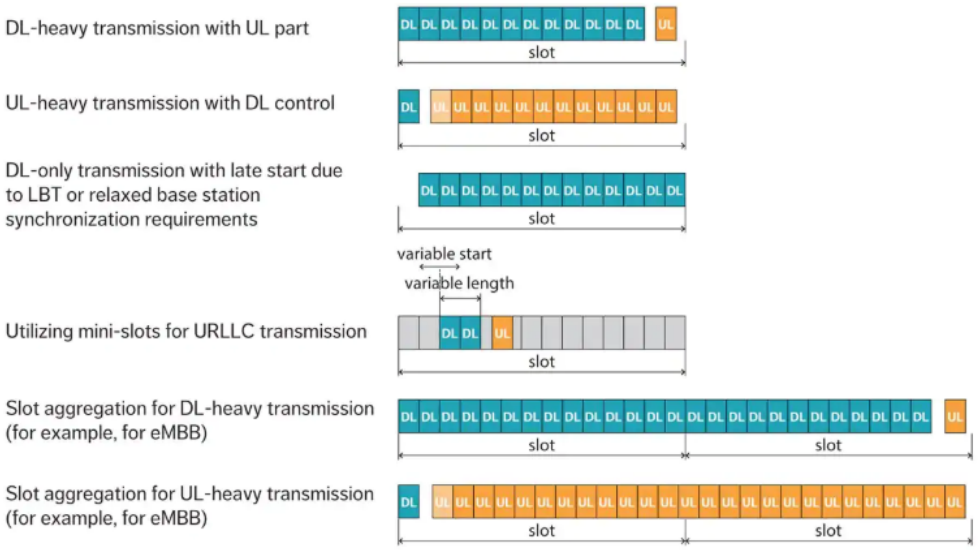


Figura 37: Ejemplos de estructura de trama basada en TDD para eMBB, URLLC y operación en espectro sin licencia [36].

Se puede utilizar la misma estructura de trama para FDD, al permitir la recepción y transmisión simultáneas (es decir, DL y UL pueden superponerse en el tiempo). Esta estructura de trama también es aplicable a las comunicaciones D2D. En ese caso, la estructura de ranura DL puede ser utilizada por el dispositivo que está iniciando (o programando) la transmisión, y la estructura de ranura UL puede ser utilizada por el dispositivo que responde a la transmisión.

La estructura de trama NR también permite el reconocimiento rápido de HARQ, en el que la decodificación se realiza durante la recepción de datos DL y el UE prepara el reconocimiento HARQ durante el período de guarda, al cambiar de la recepción DL a la transmisión UL.

Para obtener una baja latencia, una ranura (o un conjunto de ranuras en caso de agregación de ranuras) se carga por adelantado con señales de control y señales de referencia al comienzo de la ranura (o conjunto de ranuras).

6.13.2. Estructura del dominio del tiempo

En el dominio del tiempo, las transmisiones NR se organizan en cuadros de 10 ms de longitud, cada uno de los cuales se divide en 10 subtramas de igual tamaño de 1 ms. Una subtrama se divide a su vez en ranuras que consisten en 14 símbolos OFDM cada una, es decir, la duración de una ranura en milisegundos depende de la numerología como se ilustra en la figura 38. Una forma alternativa y más eficiente de soportar baja latencia es desacoplar la duración de la transmisión de la duración de la ranura. En lugar de cambiar el espaciado de la subportadora y/o la duración de la ranura, la transmisión de latencia crítica utiliza cualquier número de símbolos OFDM necesarios para entregar la carga útil. Por lo tanto, NR admite ocupar solo una parte de una ranura para la transmisión, mencionado anteriormente como "transmisión de mini ranura".

Existen múltiples razones por las cuales es beneficioso permitir que la transmisión ocupe solo una parte de una ranura como se ilustra en la figura 38. Una razón es evitar una transmisión redundante y más larga a otro dispositivo, lo que permite la transmisión inmediata de datos que requieren una latencia muy baja.

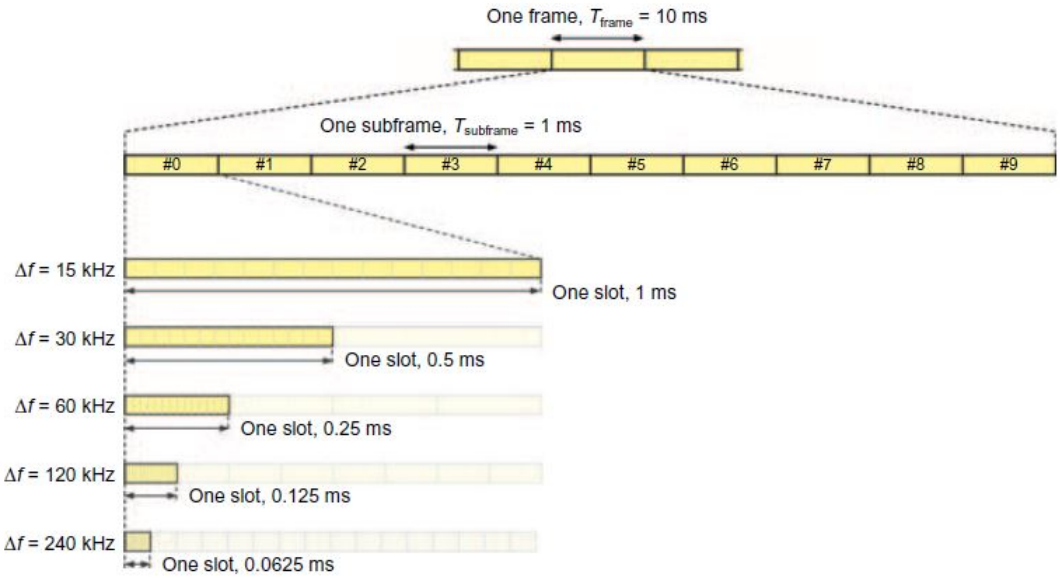


Figura 38: Tramas, subtramas y slots en NR [36].

Otra razón es la operación en espectros sin licencia. En los espectros sin licencia, escuchar antes de hablar se usa generalmente para garantizar que el canal de radio esté disponible para la transmisión. Una vez que la operación de escuchar antes de hablar ha declarado que el canal está disponible, es beneficioso comenzar la transmisión de inmediato para evitar que otro dispositivo ocupe el canal. Si la transmisión de datos tuviera que esperar hasta el inicio de un límite de ranura, se debe transmitir alguna forma de datos ficticios o señal de reserva desde la operación exitosa de escuchar antes de hablar hasta el comienzo de la ranura, lo que degradaría la eficiencia del sistema.

6.13.3. Estructura del dominio de la frecuencia

En LTE, la subportadora de DC no se utiliza para transmitir información, ya que puede estar sujeta a una interferencia desproporcionadamente alta debido, por ejemplo, a una fuga del oscilador local. Dado que todos los dispositivos LTE pueden recibir el ancho de banda completo de la portadora y están centrados alrededor de la frecuencia de la portadora, esto fue sencillo. Los dispositivos NR, por otro lado, pueden no estar centrados alrededor de la frecuencia de la portadora y cada dispositivo NR puede tener su DC ubicada en diferentes posiciones en la portadora, a diferencia de LTE donde todos los dispositivos tienen típicamente la DC que coincide con el centro de la portadora. Por lo tanto, tener un manejo especial de la subportadora DC sería engorroso en NR y en su lugar se decidió explotar también la subportadora DC para datos, aceptando que la calidad de esta subportadora puede degradarse en algunas situaciones.

6.14. Técnica multiantena para NR

Se pueden usar múltiples antenas en el lado del transmisor y/o receptor para proporcionar diversidad contra el desvanecimiento al utilizar el hecho de que los canales experimentados por diferentes antenas pueden estar al menos parcialmente no correlacionados, ya sea debido a la suficiente distancia entre antenas o debido a la diferente polarización entre las antenas.

Además, ajustando cuidadosamente la fase, y posiblemente también la amplitud, de cada elemento de antena, se pueden utilizar múltiples antenas en el lado del transmisor para proporcionar directividad, es decir, enfocar la potencia total transmitida en una determinada dirección (formación de haz) o, en el caso más general, a ubicaciones específicas en el espacio. Dicha directividad puede aumentar las velocidades y el rango de datos alcanzables debido a una mayor potencia que llega al receptor objetivo. La directividad también reducirá la interferencia a otros enlaces, mejorando así la eficiencia general del espectro.

De manera similar, se pueden usar múltiples antenas de recepción para proporcionar directividad del lado del receptor, enfocando la recepción en la dirección de una señal objetivo, mientras se suprime la interferencia que llega desde otras direcciones.

Finalmente, la presencia de múltiples antenas en los lados del transmisor y del receptor puede usarse para permitir la multiplexación espacial, es decir, la transmisión desde múltiples capas en paralelo utilizando los mismos recursos de tiempo/frecuencia.

En LTE, la transmisión/recepción de múltiples antenas para diversidad, directividad y multiplexación espacial es una herramienta clave para permitir altas velocidades de datos y alta eficiencia del sistema. Sin embargo, la transmisión/recepción de múltiples antenas es un componente aún más crítico para NR debido a la posibilidad de despliegue a frecuencias mucho más altas en comparación con LTE.

Aún así, la ganancia de una mayor directividad de la antena a frecuencias más altas se utiliza ampliamente en enlaces de radio punto a punto donde el uso de antenas altamente direccionales tanto en el lado del transmisor como del receptor, en combinación con enlaces de línea de visión, permite una comunicación de largo alcance a pesar del funcionamiento a frecuencias muy altas.

En un sistema de comunicación móvil con dispositivos ubicados en muchas direcciones diferentes con respecto a la estación base y los dispositivos mismos tienen una dirección de rotación esencialmente aleatoria, el uso de antenas fijas altamente direccionales obviamente no es aplicable. Sin embargo, un efecto similar, es decir, una extensión del área general de la antena receptora que permite una transmisión de mayor directividad, también puede ser logrado por medio de un panel de antena que consiste en muchos elementos de antena pequeños. En este caso, la dimensión de cada elemento de antena, así como la distancia entre elementos de antena, es proporcional a la longitud de onda. A medida que aumenta la frecuencia, se reduce el tamaño de cada elemento de antena, así como sus distancias mutuas. Sin embargo, suponiendo un tamaño constante

de la configuración general de la antena, esto se puede compensar aumentando el número de elementos de antena. figura 39 muestra un ejemplo de un panel de antena de este tipo que consta de 64 elementos de antena dual polarizada y que apunta a la banda de 28 GHz.

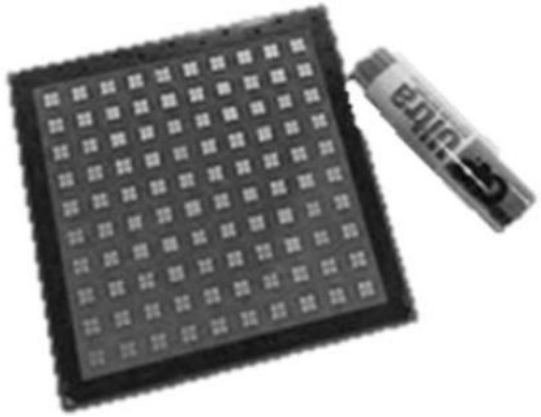


Figura 39: Panel de antena rectangular con 64 elementos de antena de doble polarización, comparada en tamaño con una batería AAA [36].

El beneficio de dicho panel de antena con una gran cantidad de elementos de antena pequeños, en comparación con una sola antena grande, es que la dirección del haz del transmisor se puede acoplar ajustando por separado la fase de las señales aplicadas a cada elemento de antena, además la reducción de las dimensiones físicas de la antena del receptor en un factor de 100, permite disminuir en 20 dB aproximadamente la energía capturada por la antena.

Se puede lograr el mismo efecto cuando se usa un panel de múltiples antenas, como el que se ilustra en figura 39, en el lado del receptor, es decir, la dirección del haz del receptor se puede ajustar ajustando por separado las fases de las señales recibidas en cada elemento de antena

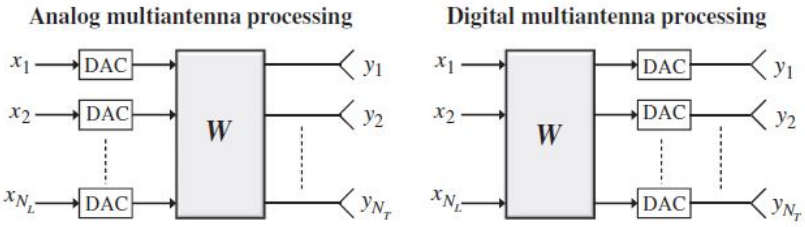


Figura 40: Procesamiento analógico vs digital de múltiples antenas [36].

El procesamiento de múltiples antenas se puede aplicar dentro de la parte analógica de la cadena del transmisor, es decir, después de la conversión de digital a analógico (parte izquierda de figura 40); o dentro de la parte digital de la cadena del transmisor, es decir, antes de la conversión de digital a analógico (parte derecha de figura 40).

El principal inconveniente del procesamiento digital de acuerdo con la parte derecha de la figura 40 es la complejidad de la implementación, especialmente la necesidad de un convertidor digital a analógico por elemento de antena. En el caso de operación a frecuencias más altas con una gran cantidad de elementos de antena muy espaciados, el procesamiento analógico de múltiples antenas de acuerdo con la parte izquierda

de figura 40 será el caso más común, al menos en las perspectivas a corto y mediano plazo. En este caso, la transmisión desde múltiples antenas se limitará típicamente a cambios de fase por antena que proporcionan la formación de haz (ver figura 41).

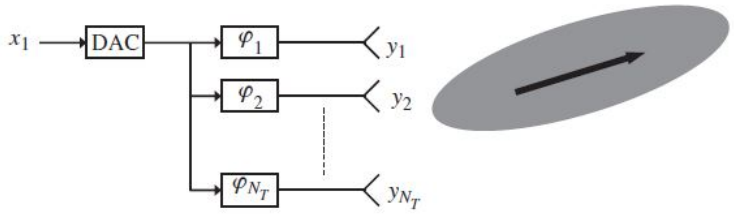


Figura 41: Procesamiento analógico de múltiples antenas que proporciona formación de haz [36].

El procesamiento analógico generalmente también implica que cualquier formación de haz se lleva a cabo por portador. Para la dirección de transmisión del enlace descendente, esto implica que no es posible la frecuencia de transmisiones multiplexadas en forma de haz a dispositivos ubicados en diferentes direcciones con respecto a la estación base. En otras palabras, las transmisiones con forma de haz a diferentes dispositivos ubicados en diferentes direcciones deben estar separadas en el tiempo como se ilustra en la figura 42.

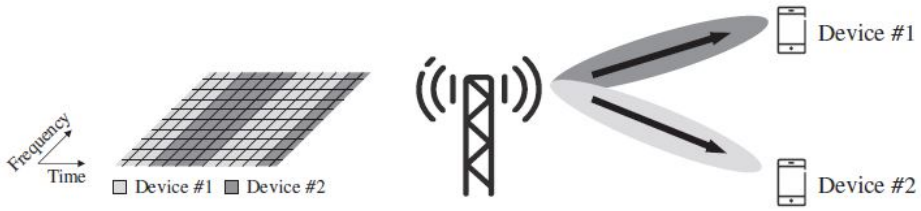


Figura 42: Haz del dominio del tiempo (no simultáneo) que se forma en múltiples direcciones [36].

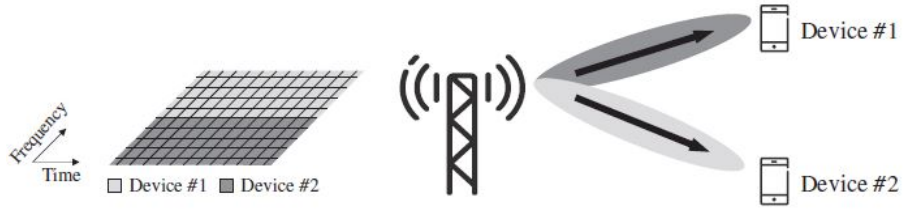


Figura 43: Forma de haz simultáneo (multiplexado en frecuencia) en múltiples direcciones [36].

En otros casos, especialmente en el caso de un número menor de elementos de antena a frecuencias más bajas, el procesamiento de múltiples antenas se puede aplicar en el dominio digital de acuerdo con la parte derecha de la figura 40. Esto permite una flexibilidad mucho mayor en el procesamiento de múltiples antenas con la posibilidad de multiplexación espacial de alto orden donde cada elemento puede incluir un cambio de fase y un factor de escala. El procesamiento digital también permite el procesamiento independiente de múltiples antenas para diferentes señales dentro de la misma portadora, permitiendo la transmisión simultánea en forma de haz a múltiples dispositivos ubicados en diferentes direcciones en relación con la estación base también mediante multiplexación de frecuencia como se ilustra en la figura 43.

La implementación digital, por otro lado, proporciona total flexibilidad, apoyando la recepción de múltiples capas en paralelo y permitiendo la recepción simultánea en forma de haz de múltiples señales que llegan desde diferentes direcciones.

Similar al lado del transmisor, el inconveniente del procesamiento digital de múltiples antenas en el lado del receptor es en términos de complejidad, especialmente la necesidad de un convertidor analógico a digital por elemento de antena.

6.14.1. Tipos de transmisiones

NR empleará diferentes soluciones y técnicas de antena dependiendo de qué parte del espectro se utilice para su funcionamiento. Para frecuencias más bajas, se supone un número bajo a moderado de antenas activas (hasta alrededor de 32 cadenas de transmisor) y la operación de FDD es común. En este caso, la adquisición de CSI requiere la transmisión de CSI-RS en el informe DL y CSI en el UL. Los anchos de banda limitados disponibles en esta región de frecuencia requieren una alta eficiencia espectral habilitada por MIMO multiusuario (MU-MIMO) y multiplexación espacial de orden superior, que se logra a través de informes CSI de mayor resolución en comparación con LTE.

Para frecuencias más altas, se puede emplear un mayor número de antenas en una apertura dada, lo que aumenta la capacidad de formación de haces y MU-MIMO. Aquí, las asignaciones de espectro son de tipo TDD y se supone una operación basada en reciprocidad. En este caso, el sonido de canal UL adquiere CSI de alta resolución en forma de estimaciones de canal explícitas. Tal CSI de alta resolución permite emplear algoritmos de precodificación sofisticados en la BS. Esto hace posible aumentar la supresión de interferencia multiusuario, por ejemplo, pero puede requerir retroalimentación adicional del UE de la interferencia entre células o información de calibración si no se puede suponer una reciprocidad perfecta.

Para frecuencias aún más altas (en el rango de mmWave), generalmente se requiere una implementación de formación de haz analógico, que limita la transmisión a una sola dirección de haz por unidad de tiempo y cadena de radio. Dado que un elemento de antena isotrópica es muy pequeño en esta región de frecuencia debido a la longitud de onda de portadora corta, se requiere una gran cantidad de elementos de antena para mantener la cobertura. La formación de haces debe aplicarse tanto en el extremo del transmisor como en el del receptor para combatir la mayor pérdida de ruta, incluso para la transmisión del canal de control. Se requiere un nuevo tipo de proceso de gestión de haz para la adquisición de CSI, en el que la BS necesita barrer candidatos de haz de transmisor de radio secuencialmente en el tiempo, y el UE necesita mantener un haz de receptor de radio adecuado para permitir la recepción del haz de transmisor seleccionado.

Para admitir estos diversos casos de uso, NR presenta un marco CSI altamente flexible pero unificado, en el que hay un acoplamiento reducido entre la medición CSI, el informe CSI y la transmisión DL real en NR en comparación con LTE. El marco CSI puede verse como una caja de herramientas, donde diferentes configuraciones de informes CSI y configuraciones de recursos CSI-RS para mediciones de canal e interferencia pueden combinarse y coincidir para que correspondan al esquema de despliegue y transmisión de antena en uso, y donde CSI informa sobre diferentes haces que se pueden activar dinámicamente. El marco también admite esquemas más avanzados, como la transmisión multipunto y la coordinación. El control y las transmisiones de datos, a su vez, siguen el principio autónomo, donde toda la información requerida para decodificar la transmisión (como el DMRS adjunto) está contenida dentro de la transmisión misma. Como resultado, la red puede cambiar sin problemas el punto o haz de transmisión a medida que el UE se mueve en la red.

6.15. Señales de referencia

NR tiene un diseño ultra delgado (ultra-lean) que minimiza las transmisiones siempre activas para mejorar la eficiencia energética de la red y garantizar la compatibilidad directa. A diferencia de la configuración en

LTE, las señales de referencia en NR se transmiten solo cuando es necesario. Las cuatro señales de referencia principales son la señal de referencia de demodulación (DMRS), la señal de referencia de seguimiento de fase (PTRS), la señal de referencia de sondeo (SRS) y la señal de referencia de información del estado del canal (CSI-RS).

DMRS se utiliza para estimar el canal de radio para la demodulación. DMRS es específico de UE, puede formarse en haz, confinarse en un recurso programado y transmitirse solo cuando sea necesario, tanto en DL como en UL. Para admitir la transmisión MIMO de múltiples capas, se pueden programar múltiples puertos DMRS ortogonales, uno para cada capa. La ortogonalidad se logra mediante FDM (estructura de peine) y TDM y CDM (con desplazamiento cíclico de la secuencia de bases o códigos de cobertura ortogonales). El patrón DMRS básico se carga frontalmente, ya que el diseño DMRS tiene en cuenta los requisitos de decodificación temprana para admitir aplicaciones de baja latencia. Para escenarios de baja velocidad, DMRS utiliza baja densidad en el dominio del tiempo. Sin embargo, para escenarios de alta velocidad, la densidad de tiempo de DMRS se incrementa para rastrear cambios rápidos en el canal de radio.

PTRS se introduce en NR para permitir la compensación del ruido de fase del oscilador. Típicamente, el ruido de fase aumenta en función de la frecuencia portadora del oscilador. Por lo tanto, PTRS se puede utilizar a altas frecuencias portadoras (como mmWave) para mitigar el ruido de fase. Una de las principales degradaciones causadas por el ruido de fase en una señal OFDM es una rotación de fase idéntica de todas las subportadoras, conocida como error de fase común (CPE). PTRS está diseñado para que tenga baja densidad en el dominio de la frecuencia y alta densidad en el dominio del tiempo, ya que la rotación de fase producida por CPE es idéntica para todas las subportadoras dentro de un símbolo OFDM, pero existe una baja correlación del ruido de fase entre los símbolos OFDM. PTRS es específico de UE, confinado en un recurso programado y puede formarse en haz. El número de puertos PTRS puede ser inferior al número total de puertos, y la ortogonalidad entre puertos PTRS se logra mediante FDM. PTRS es configurable dependiendo de la calidad de los osciladores, la frecuencia de la portadora, el espaciado de la subportadora OFDM y los esquemas de modulación y codificación utilizados para la transmisión.

El SRS se transmite en UL para realizar mediciones CSI principalmente para scheduling (programación) y adaptación de enlaces. Para NR, se espera que el SRS también se utilice para el diseño de un precodificador basado en reciprocidad para la gestión masiva de haces MIMO y UL. Es probable que el SRS tenga un diseño modular y flexible para admitir diferentes procedimientos y capacidades de UE. El enfoque para CSI-RS es similar pero se aplica para DL.

6.16. Administración de haz

La tarea final de la gestión del haz es, en estas condiciones, establecer y retener un par de haces adecuado, es decir, una dirección del haz del lado del transmisor y una dirección del haz del lado del receptor correspondiente que conjuntamente proporcionan una buena conectividad.

Como se ilustra en la figura 44, el mejor par de haces puede no corresponder necesariamente a los haces del transmisor y el receptor que apuntan físicamente directamente uno hacia el otro. Debido a los obstáculos en el entorno, tal camino "directo" entre el transmisor y el receptor puede bloquearse y un camino reflejado puede proporcionar una mejor conectividad, como se ilustra en la parte derecha de la figura 44. Esto es especialmente cierto para la operación en bandas de frecuencia más alta con menos dispersión "alrededor de la esquina". La funcionalidad de gestión de haces debe ser capaz de manejar tal situación y establecer y retener un par de haces adecuado también en este caso.

En muchos casos, un par de haces transmisor/receptor adecuado para la dirección de transmisión del enlace descendente también será un par de haces adecuado para la dirección de transmisión del enlace ascendente y viceversa. En 3GPP esto se conoce como correspondencia de haz (enlace descendente/enlace ascendente). En el caso de la correspondencia del haz, es suficiente determinar explícitamente un par de haces adecuado en una de las direcciones de transmisión.

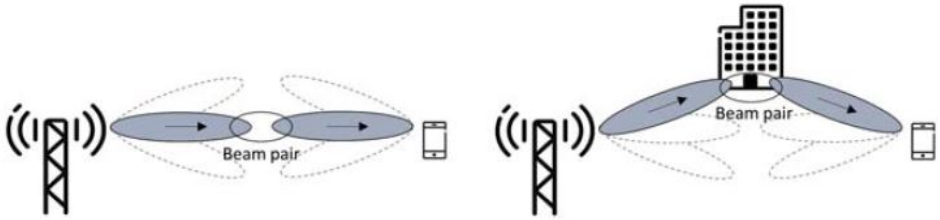


Figura 44: Par de haces en la dirección del enlace descendente. Directo (izquierda) y mediante reflexión (derecha) [36].

En general, la gestión del haz se puede dividir en diferentes partes:

- Establecimiento inicial del haz.
- Ajuste del haz, principalmente para compensar los movimientos y las rotaciones del dispositivo móvil, pero también para los cambios graduales en el entorno.
- Recuperación del haz para manejar la situación cuando los cambios rápidos en el entorno interrumpen el par de haces actual.

6.17. Enlace ascendente suplementario (SUL)

Además de la agregación de portadores, NR también admite el denominado "enlace ascendente suplementario" (SUL). Como se ilustra en la figura. 45, SUL implica que un par de portadora convencional de enlace descendente/enlace ascendente (DL/UL) tiene una portadora asociada o complementaria de enlace ascendente con la portadora SUL que normalmente opera en bandas de frecuencias más bajas. Como ejemplo, un par de portadoras de enlace descendente/ascendente que opera en la banda de 3.5 GHz podría complementarse con una portadora de enlace ascendente suplementaria en la banda de 800 MHz. Aunque la figura 45 parece indicar que el par de portadores DL/UL convencionales opera en espectros emparejados con separación de frecuencia entre los portadores de enlace descendente y ascendente, debe entenderse que el par de portadores convencionales podría funcionar igualmente bien en espectros no emparejados con separación de enlace descendente/enlace ascendente por medio de TDD. Este sería, por ejemplo, el caso en un escenario SUL donde el par de portadora convencional opera en la banda de 3,5 GHz no emparejada.

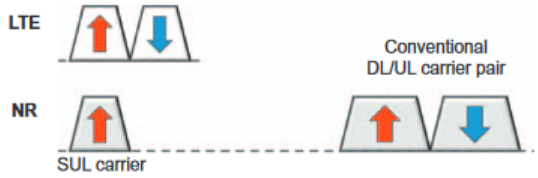


Figura 45: Portadora SUL coexistiendo con portadora de enlace ascendente LTE [36].

Es importante mencionar que para la agregación de portadoras la situación es diferente:

- Las dos (o más) portadoras en un escenario de agregación de portadora a menudo tienen un ancho de banda similar y funcionan a frecuencias de portadora similares, lo que hace que la agregación del rendimiento de las dos portadoras sea más beneficiosa.
- Cada operador de enlace ascendente en un escenario de agregación de operador está operando con su propio operador de enlace descendente, lo que simplifica el soporte para la programación simultánea de múltiples transmisiones de enlace ascendente en paralelo.



Figura 46: Agregación de portadora versus enlace ascendente suplementario [36].

Por lo tanto, solo uno de SUL y no SUL está transmitiendo y la transmisión simultánea de SUL y no SUL desde un dispositivo no es posible. Como consecuencia, en muchas implementaciones, la parte de enlace ascendente de los espectros emparejados no se utiliza por completo. La implementación de un operador de enlace ascendente complementario NR en la parte superior del operador de enlace ascendente LTE en dicho espectro es una forma de mejorar la experiencia del usuario NR con un impacto limitado en la red LTE.

Finalmente, un enlace ascendente suplementario también se puede utilizar para reducir la latencia. En el caso de TDD, la separación de enlace ascendente y enlace descendente en el dominio del tiempo puede imponer restricciones sobre cuándo se pueden transmitir los datos del enlace ascendente. Al combinar la portadora TDD con una portadora suplementaria en espectros emparejados, los datos críticos de latencia pueden transmitirse en el enlace ascendente suplementario inmediatamente sin estar restringidos por la división del enlace descendente en la portadora normal.

6.18. Agregación de portadora (Carrier Agregation)

La posibilidad de agregación de portadores es parte de NR desde la primera versión. De manera similar a LTE, se pueden agregar y transmitir múltiples portadoras NR en paralelo desde/hacia el mismo dispositivo, lo que permite un ancho de banda más amplio y velocidades de datos por enlace correspondientemente más altas. Las portadoras no tienen que ser contiguas en el dominio de la frecuencia, sino que se pueden dispersar, tanto en la misma banda de frecuencia como en diferentes bandas. La diferencia de 5G con respecto a 4G radica en que se pueden agregar hasta 16 portadoras, posiblemente de diferentes anchos de banda y diferentes esquemas dúplex, lo que permite anchos de banda de transmisión generales de hasta 16 * 400 MHz = 6.4 GHz, que está mucho más allá de las asignaciones de espectro típicas conseguidas en la anterior generación.

6.19. Partes de ancho de banda

La suposición de todos los dispositivos pueden recibir el ancho de banda completo de la portadora no es razonable para NR, debido a que el ancho de banda de la portadora admitido es muy amplio. En consecuencia, se deben incluir en el diseño medios para manejar diferentes capacidades del dispositivo en términos de soporte de ancho de banda. Un mejor enfoque es, como se hace en NR, utilizar la adaptación del ancho de banda del receptor como el que el dispositivo puede usar, es decir un ancho de banda más estrecho, para monitorear canales de control y recibir transmisiones de datos de tamaño pequeño a mediano y para abrir el ancho de banda completo cuando se programa una gran cantidad de datos.

Para manejar estos dos aspectos (soporte para dispositivos que no son capaces de recibir el ancho de banda completo de la portadora y la adaptación del ancho de banda del lado del receptor) NR define partes de ancho de banda (BWP) (ver figura 47). Una parte de ancho de banda se caracteriza por una numerología (espaciado de subportadora y prefijo cíclico) y un conjunto de bloques de recursos consecutivos en la numerología del BWP, comenzando en un cierto bloque de recursos común.

Una vez conectado, un dispositivo se puede configurar con hasta cuatro partes de ancho de banda de enlace descendente y hasta cuatro partes de ancho de banda de enlace ascendente para cada celda de servicio. En el caso de la operación SUL, puede haber hasta cuatro enlaces ascendentes adicionales de partes de ancho de banda en la portadora de enlace ascendente suplementaria.

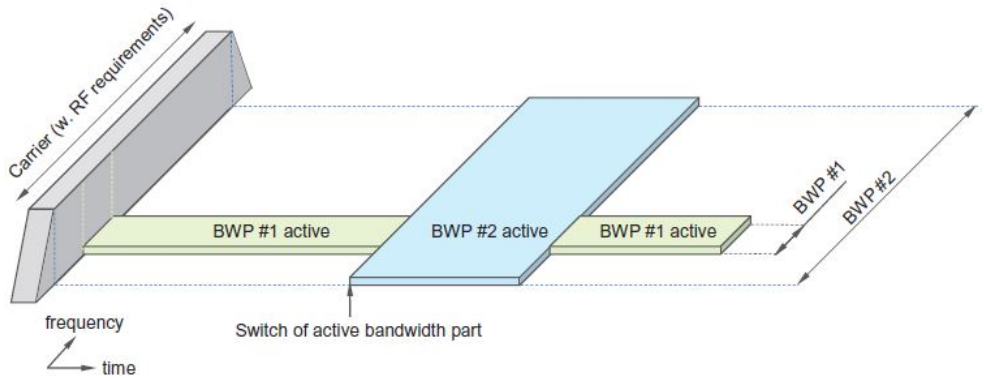


Figura 47: Adaptación de ancho de banda utilizando partes de ancho de banda [36].

6.20. Requisitos establecidos

Parámetro	Requisito mínimo de rendimiento técnico
Velocidad pico de datos	Downlink: 20 Gbit/s Uplink: 10 Gbit/s
Pico de eficiencia espectral	Downlink: 30 bit/s/Hz Uplink: 15 bit/s/Hz
Velocidad de datos experimentada por el usuario	Downlink: 100 Mbit/s Uplink: 50 Mbit/s
Quinto percentil de eficiencia espectral del usuario	3x IMT-Advanced
Eficiencia espectral media	3x IMT-Advanced
Área de capacidad de tráfico	10 Mbit/s/m2 (punto de acceso interior para eMBB)
Latencia del plano de usuario	4 ms para eMBB 1 ms para URLLC
Latencia del plano de control	20 ms
Densidad de conexión	1,000,000 dispositivos por km2
Tiempo de interrupción de movilidad	0 ms
Ancho de banda (Banda ancha)	Al menos 100 MHz y hasta 1 GHz en bandas de frecuencias más altas. Se admitirá ancho de banda escalable

Tabla 4: Descripción general de los requisitos mínimos de rendimiento técnico para IMT-2020 [36]

6.21. Interfuncionamiento y coexistencia LTE / NR

En las áreas donde se ha implementado una nueva tecnología, las generaciones anteriores generalmente se deben retener y operar en paralelo durante un tiempo relativamente largo para garantizar un servicio continuo para los dispositivos heredados que no admiten la nueva tecnología.

Sin embargo, el interfuncionamiento entre NR y LTE va más allá de permitir la transferencia sin problemas entre las dos tecnologías y permitir su implementación paralela.

- NR permite la conectividad dual con LTE, lo que implica que los dispositivos pueden tener conectividad simultánea tanto con LTE como con NR. La primera versión de NR en realidad se basa en dicha conectividad dual, con LTE proporcionando el plano de usuario y control, y NR solo proporcionando capacidad de plano de usuario adicional (figura 31).

- NR puede implementarse en el mismo espectro que LTE de tal manera que la capacidad general del espectro se pueda compartir dinámicamente entre las dos tecnologías. Tal coexistencia de espectro permite una introducción más suave de NR en espectros ya ocupados por LTE, también permite retener el ancho de banda completo y las tasas de datos pico correspondientes para cada tecnología. Además, la capacidad general del espectro podría asignarse dinámicamente para que coincida con las condiciones del tráfico en cada tecnología.

6.21.1. LTE / NR conectividad dual

El principio básico de la conectividad dual LTE / NR (ver figura 48):

- Un dispositivo tiene conectividad simultánea a múltiples nodos dentro de la red de radioacceso (eNB en el caso de LTE, gNB en el caso de NR).
- Hay un nodo maestro (en el caso general, un eNB o un gNB) responsable del plano de control de acceso por radio. En otras palabras, en el lado de la red, el portador de radio de señalización termina en el nodo maestro que luego también maneja toda la configuración del dispositivo basada en RRC.
- Hay uno o, en el caso general, múltiples nodos secundarios (eNB o gNB) que proporcionan enlaces adicionales en el plano de usuario para el dispositivo.

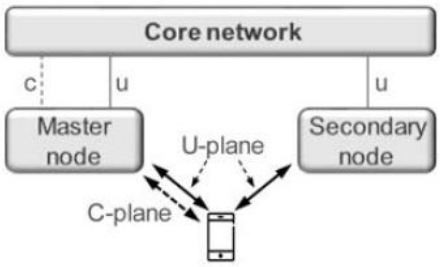


Figura 48: Principio básico de doble conectividad [36].

6.21.2. Escenarios de despliegue

En el caso de la conectividad dual LTE, los múltiples nodos a los que un dispositivo tiene conectividad simultánea generalmente están separados geográficamente. El dispositivo puede, por ejemplo, tener conectividad simultánea a una capa de celda pequeña y una capa macro superpuesta.

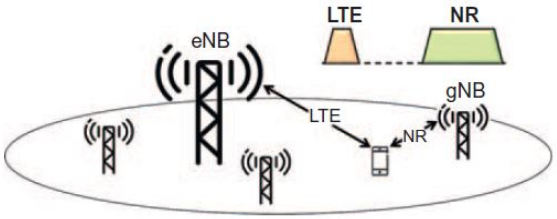


Figura 49: LTE / NR de doble conectividad en un escenario de múltiples capas [36].

El mismo escenario, es decir, la conectividad simultánea a una capa de celda pequeña y una macrocapa superpuesta, es un escenario muy relevante también para la conectividad dual LTE / NR. Especialmente, NR en bandas de frecuencias más altas puede desplegarse como una capa de células pequeñas bajo una

macrocapa existente basada en LTE (ver figura 49). La capa macro LTE proporcionaría los nodos maestros, asegurando que el plano de control se mantenga incluso si la conectividad a la capa de células pequeñas de alta frecuencia se pierde temporalmente. En este caso, la capa NR proporciona una capacidad muy alta y velocidades de datos muy altas, mientras que la conectividad dual a la capa macro basada en LTE de baja frecuencia proporciona robustez adicional a la capa de celdas pequeñas de alta frecuencia inherentemente menos robusta.

Sin embargo, la conectividad dual LTE / NR también es relevante en el caso de nodos de red LTE y NR compartidos (figura 50). Como ejemplo, para el despliegue inicial de NR, un operador puede querer reutilizar una red de sitio LTE ya implementada también para NR para evitar el costo de implementar sitios adicionales. En este escenario, la conectividad dual permite velocidades de datos de usuario final más altas al permitir la agregación del rendimiento de los operadores NR y LTE. En el caso de una sola tecnología de acceso por radio, dicha agregación entre portadoras transmitidas desde el mismo nodo se realizaría más eficientemente mediante la agregación de portadora. Sin embargo, NR no admite la agregación de operadores con LTE y, por lo tanto, se necesita conectividad dual para admitir la agregación del rendimiento de LTE y NR.

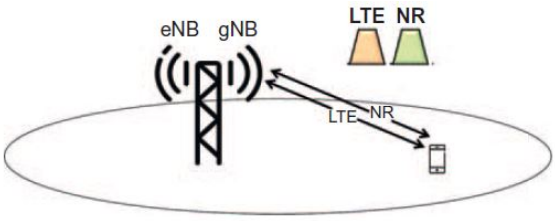


Figura 50: Doble conectividad LTE / NR, despliegue compartido [36].

Las implementaciones compartidas son especialmente relevantes cuando NR está operando en un espectro de frecuencia más baja, es decir, en el mismo espectro o en un espectro similar al LTE. Sin embargo, las implementaciones compartidas también se pueden usar cuando las dos tecnologías están operando en espectros muy diferentes, incluido el caso en que NR está operando en bandas de ondas mm (figura 51), donde la portadora NR normalmente tendría un ancho de banda mucho más amplio en comparación a LTE. En este caso, es posible que NR no pueda proporcionar cobertura en toda el área celular. Sin embargo, la parte NR de la red aún podría capturar una gran parte del tráfico general, lo que permitiría que la parte LTE se concentre en proporcionar servicio a dispositivos en ubicaciones con poca cobertura.

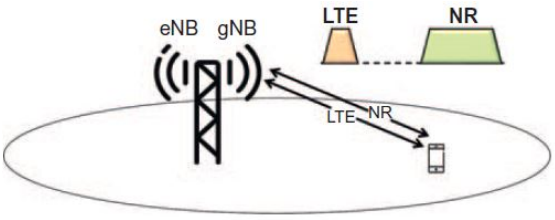


Figura 51: Doble conectividad LTE / NR, despliegue compartido en diferentes espectros [36].

7. Comparación de la interfaz de radio

7.1. Método de multiplexación

- **LTE-Advanced:** TDD o FDD
- **5G:** TDD o FDD

7.2. Técnica de acceso

- **LTE-Advanced:**
  - **Uplink:** Clustered SC-FDMA
  - **Downlink:** OFDMA
- **5G:**
  - **Uplink:** OFDMA, SC-FDMA (complementario)
  - **Downlink:** OFDMA

7.3. Esquemas de modulación

- **LTE-Advanced:** QPSK, 16QAM y 64QAM
- **5G:** 2-BPSK, $\pi/2$-BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM,

7.4. Ancho de banda de cada radiocanal

- **LTE-Advanced:** 1.4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz, con agregación de portadora máximo 100 MHz, 5 portadoras de 20 MHz.
- **5G:** 20 MHz, 50 MHz, 100 MHz, 200 MHz y 400 MHz, con agregación de portadora máximo 6.4 GHz, 16 portadoras de 400 MHz.

7.5. Bandas de frecuencia (Colombia)

- **LTE-Advanced [45]:**
  - 700 MHz
  - 900 MHz
  - 1700 MHz
  - 1800 MHz
  - 2100 MHz
  - 2500 MHz
- **5G:**
  - **Bandas Bajas (frecuencias inferiores a 1 GHZ)**
    - Banda 600 MHz
    - Banda 700 MHz
  - **Bandas Medias (frecuencias en el rango de 1 GHz a 6 GHz)**
    - Banda 3.4 GHz
    - Banda 3.5 GHz
    - Banda 3.6 GHz

- **Bandas Altas (frecuencias mayores a 6 GHz)**
  - 24.25 GHz – 27.5 GHz
  - 26.5 GHz – 29.5 GHz
  - 31.8 GHz – 33.4 GHz
  - 37 GHz – 43.5 GHz
  - 45.5 GHz – 50.2 GHz
  - 50.4 GHz – 52.6 GHz
  - 66 GHz – 76 GHz
  - 81 GHz – 86 GHz

7.6. Velocidad de transmisión pico

- **LTE-Advanced:**
  - **Uplink:** 500 Mbps
  - **Downlink:** 1000 Mbps
- **5G:**
  - **Uplink:** 10 Gbps
  - **Downlink:** 20 Gbps

7.7. Pico de eficiencia espectral

- **LTE-Advanced:**
  - **Uplink:** 15 bit/s/Hz
  - **Downlink:** 30 bit/s/Hz
- **5G:**
  - **Uplink:** 15 bit/s/Hz
  - **Downlink:** 30 bit/s/Hz

7.8. Latencia

- **LTE-Advanced:**
  - **Plano de usuario:** 10 ms
  - **Plano de control:** 50 ms
- **5G:**
  - **Plano de usuario:** 4 ms para eMBB / 1 ms para URLLC
  - **Plano de control:** 20 ms

7.9. Técnicas de corrección de errores

- **LTE-Advanced:** HARQ, prefijo cíclico, CRC, códigos LDPC, FEC (códigos turbo).
- **5G:** HARQ, HARQ con combinación suave, prefijo cíclico, CRC, códigos LDPC, FEC (códigos turbo)

7.10. Tabla comparativa de las generaciones de comunicaciones móviles

<table>
<tr><th>Acrónimo</th><th>Tecnología</th><th>Descripción</th><th>Frecuencias de uso</th><th>Ancho de banda (BW)</th><th>Tasa de transmisión</th><th>Técnica de acceso al medio</th><th>Modulación</th></tr>
<tr><td>2G</td><td>GSM</td><td>Cambio de tecnología analógica a digital.</td><td rowspan="3">900 MHz

1800 MHz</td><td rowspan="2">200 KHz</td><td>9.6 - 14 Kbps</td><td rowspan="3">FDMA
TDMA</td><td rowspan="2">GMSK</td></tr>
<tr><td>2.5G</td><td>GPRS</td><td>Mayor capacidad, paquetes de datos.</td><td>30 - 60 Kbps</td></tr>
<tr><td>2.75G</td><td>EDGE - EGPRS</td><td>Técnica de modulación mejorada (8PSK).</td><td>400 KHZ</td><td>144 - 384 Kbps</td><td>8-PSK</td></tr>
<tr><td>3G</td><td>UMTS</td><td>Interacción de alta calidad de audio, video y datos.</td><td rowspan="2">2100 MHz</td><td rowspan="2">5 MHZ</td><td>384 kbps - 5.2 Mbps</td><td>DS - WCDMA</td><td>QAM, QPSK o BPSK</td></tr>
<tr><td rowspan="2">3.5G</td><td>HSPA</td><td rowspan="2">Mayores velocidades de descarga y de carga.</td><td>14.4 Mbps</td><td rowspan="3">OFDMA
SC - OFDMA</td><td>QPSK,
16 QAM</td></tr>
<tr><td>HSPA +</td><td>28 Mbps</td><td rowspan="3">QPSK,
16 QAM,
64 QAM</td></tr>
<tr><td rowspan="2">4G</td><td>LTE</td><td rowspan="2">Mayores velocidades de descarga.</td><td rowspan="2">1800 MHz
2600 MHz</td><td>1.4 - 20 MHz</td><td>100 - 300 Mbps</td></tr>
<tr><td>LTE ADVANCE</td><td>100 MHz</td><td>1000 Mbps</td><td>OFDMA

Clustered
SC-FDMA</td></tr>
<tr><td>5G</td><td>5G</td><td>Mayores velocidades de carga, descarga y menor latencia.</td><td>> 1 GHz</td><td>6.4 GHz</td><td>20 Gbps</td><td>OFDMA

SC – OFDMA
(Complementario)</td><td>2-BPSK,
π/2-BPSK,
QPSK,
16 QAM,
64 QAM o
256 QAM</td></tr>
</table>

Figura 52: Comparación de las generaciones móviles.

8. Xirio Online: Generalidades, conceptos y configuración

La simulación de los estudios radioeléctricos enlace, cobertura y multicobertura se realizaron para la localidad de Chapinero (localidad 2) de la ciudad de Bogotá (Colombia). La localidad de Chapinero tiene una población aproximada de 160.000 habitantes, se seleccionó esta localidad debido a su importancia en los sectores de salud, educación, economía y recreación, para la ciudad de Bogotá, los lugares más importantes son; 5 Parques, 30 clínicas y hospitales, 35 universidades e institutos, 6 centros comerciales, 30 hoteles, entre otros. El sector educación fue el principal criterio para la selección de esta localidad, debido al uso frecuente y masivo de las redes móviles realizado por los estudiantes, ya que la localidad cuenta con una alta densidad poblacional estudiantil, dada la existencia de apartamentos estudiantiles, institutos, academias y universidades, entre las que se encuentra nuestra alma mater, la Universidad Distrital Francisco José De Caldas (Facultad de Ingeniería), la cual se puede ubicar en el mapa obtenido del servicio Google Maps de la figura 53, en la zona sur de la localidad.

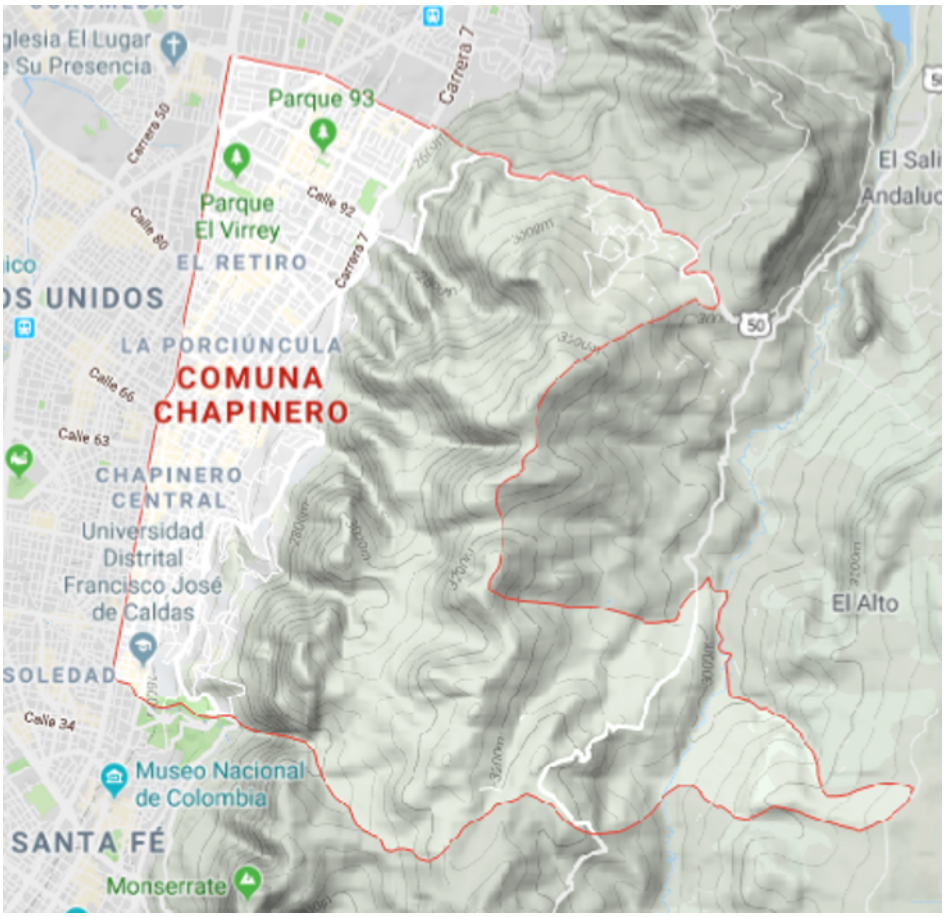


Figura 53: Bogotá-Localidad de Chapinero (Google Maps-Mapa).

Como se puede observar en la figura 54 esta zona de la ciudad está bastante "edificada", es una zona urbana, información que es necesaria y útil para realizar el adecuado estudio y configuración de los parámetros de la red, como la adecuada selección del método de propagación. Para la realización de los estudios de cobertura y multicobertura no fueron tenidas en cuenta las zonas suburbana y rural (Cerros orientales) de la localidad de Chapinero, esto se debe a que hay muy baja población en estas zonas, por lo tanto, en estas zonas no fue obligatorio brindarles cobertura.

Aún cuando se sabe que la mejor ubicación de una antena es en la zona más alta, en este caso (Cerros Orientales), la finalidad de estas simulaciones es conocer las prestaciones que pueden ofrecer las antenas que se encuentran ubicadas dentro de una ciudad, en este caso Bogotá, ya que cada vez se hace más necesario implementar antenas dentro de la ciudad para mejorar las prestaciones y calidad del servicio que ofrecen los operadores móviles, y en el caso de la tecnología 5G va a ser mucho más común, porque las antenas serán de menor tamaño debido a las altas frecuencias que maneja esta tecnología, lo que permite que sea más fácil la ubicación e implementación de estas antenas en zonas urbanas.

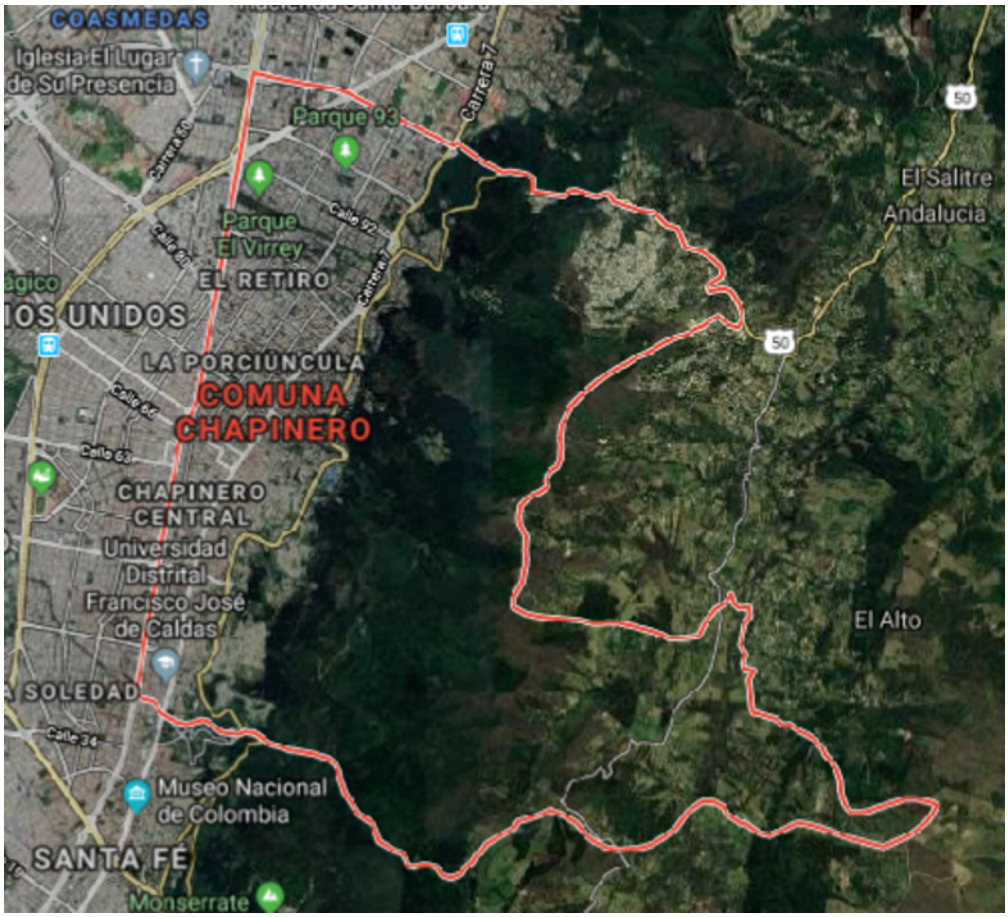


Figura 54: Bogotá-Localidad de Chapinero (Google Maps-Sátelite).

Conociendo la zona a la cual se le va a dar cobertura, se utilizó la aplicación móvil OpenSignal para conocer cuál de los operadores móviles del país ofrecen mejores prestaciones del servicio en esta zona de la ciudad, como resultado se obtuvieron las figuras 55 y 56, en donde se pueden apreciar 3 de los indicadores más importantes de la calidad del servicio prestado por los operadores móviles, además en el mapa se indica por medio de color verde los sectores donde existe buena cobertura, en contraposición el color rojo indica los sectores donde no existe buena cobertura del operador móvil.

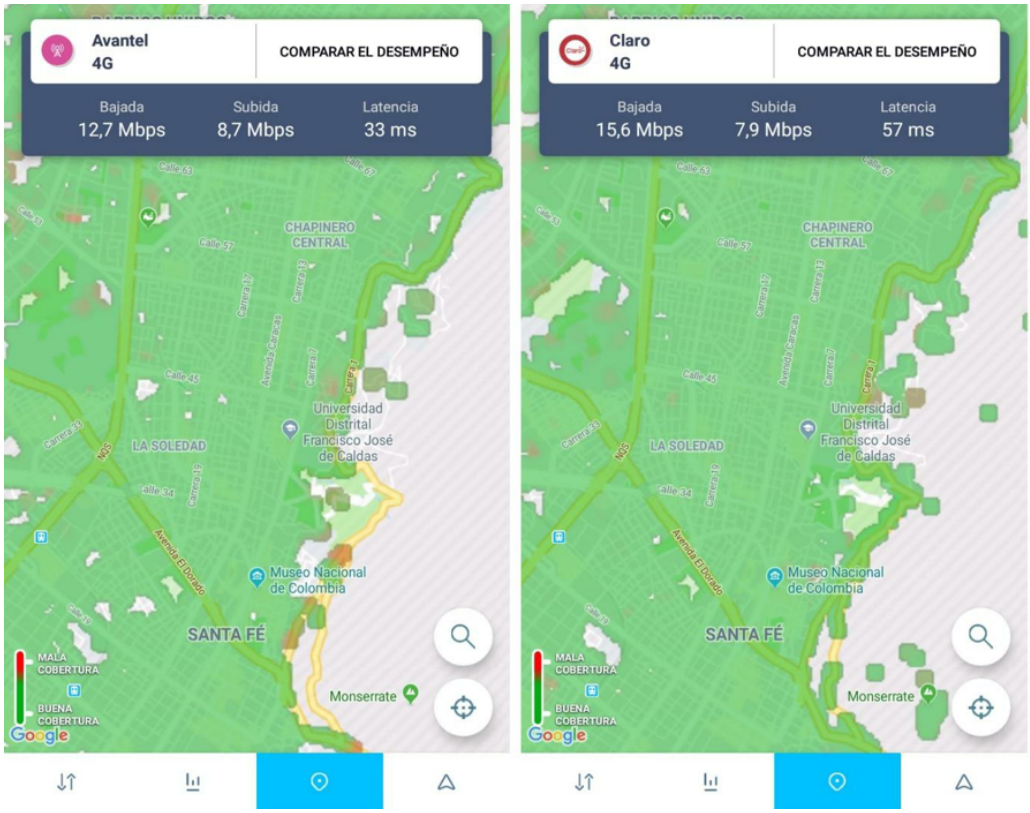


Figura 55: Desempeño operadores móviles Avantel y Claro (Opensignal).

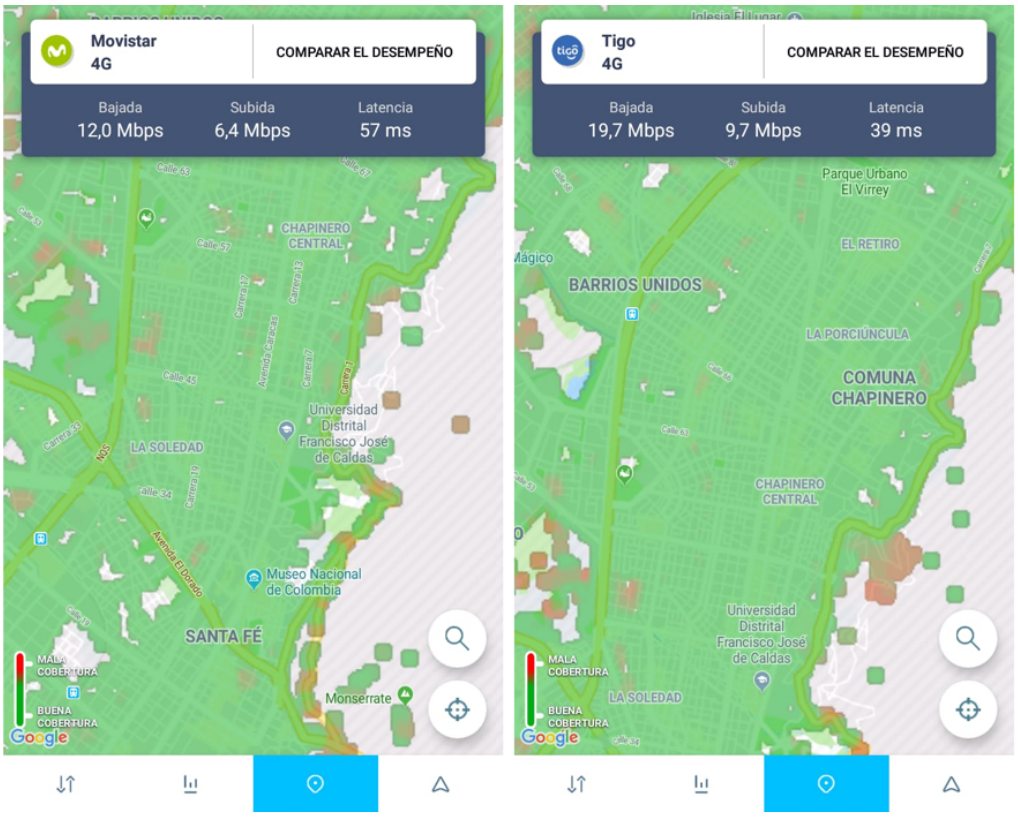


Figura 56: Desempeño operadores móviles Movistar y Tigo (Opensignal).

Comparando los indicadores de cada operador móvil que se muestran en las figuras 55 y 56, se identificó que el operador móvil que ofrece las mejores prestaciones en esta zona de la ciudad es Tigo, por lo tanto, con otra funcionalidad en este caso "BETA", que ofrece la misma aplicación móvil Opensignal, se puede observar que antenas móviles se encuentran en este sector, como se visualiza en la figura 57. Con base en ese resultado se seleccionó la ubicación de 2 estaciones base las cuales van a dar cobertura a esta zona de la ciudad (Chapinero), la estación base sur (figura 57 a)) y la estación base norte (figura 57 b)). Este proceso se realizó solo para conocer la ubicación de estaciones base reales y con esta información ubicar las estaciones base a utilizar en los estudios radioeléctricos a simular en la herramienta de software Xirio online.

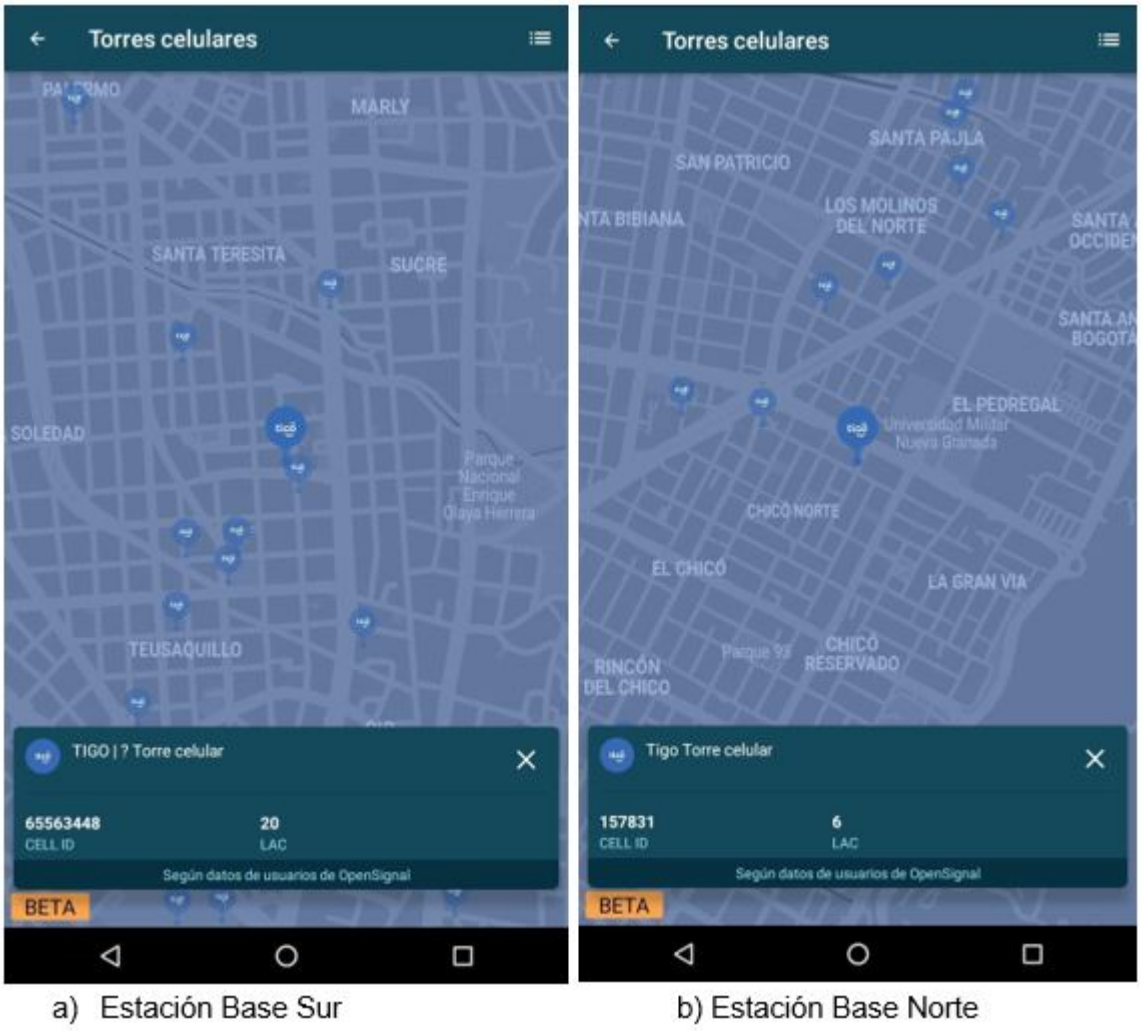


Figura 57: Ubicación de las estaciones base norte y sur (Opensignal).

Seleccionada la localización inicial de las estaciones base, se inicia la configuración y simulación de la red en la herramienta de software en línea Xirio Online, con dirección web http://www.xirio-online.com/ [37], software desarrollado por Aptica. Aptica es una empresa dedicada a la provisión de servicios de consultoría e ingeniería y al desarrollo de productos destinados al análisis, diseño, implantación, operación y supervisión de redes de telecomunicaciones. El uso de este software es gratuito para ciertas características y simulaciones básicas, para las demás funcionalidades se utiliza el modelo "pago por uso", para poder utilizar esta herramienta se debe crear una cuenta.

La página de inicio de Xirio Online (figura 58), muestra dos funciones que ofrece el software:

- Planing tool (Herramienta de planificación radioeléctrica).
- Share place (Herramienta para consulta de resultados publicados o compartidos).



Figura 58: Página inicial de Xirio Online.

En este caso la funcionalidad a utilizar es la de planificación radioeléctrica (figura 59), digitamos nuestro usuario y contraseña e iniciamos sesión.



Figura 59: Inicio de sesión Planning Tool.

Al iniciar sesión se despliega el entorno gráfico de la herramienta de planificación radioeléctrica como se puede observar en la figura 60, por defecto el visor cartográfico o mapa se encuentra ubicado en España, debido a que la empresa desarrolladora del software es de dicho país, en este caso cambiamos nuestra ubicación a

Bogotá (Colombia) en el recuadro de la opción buscar dirección, debajo de este recuadro hay 5 opciones para la visualización del terreno en este caso se eligió la opción “Mapa”.

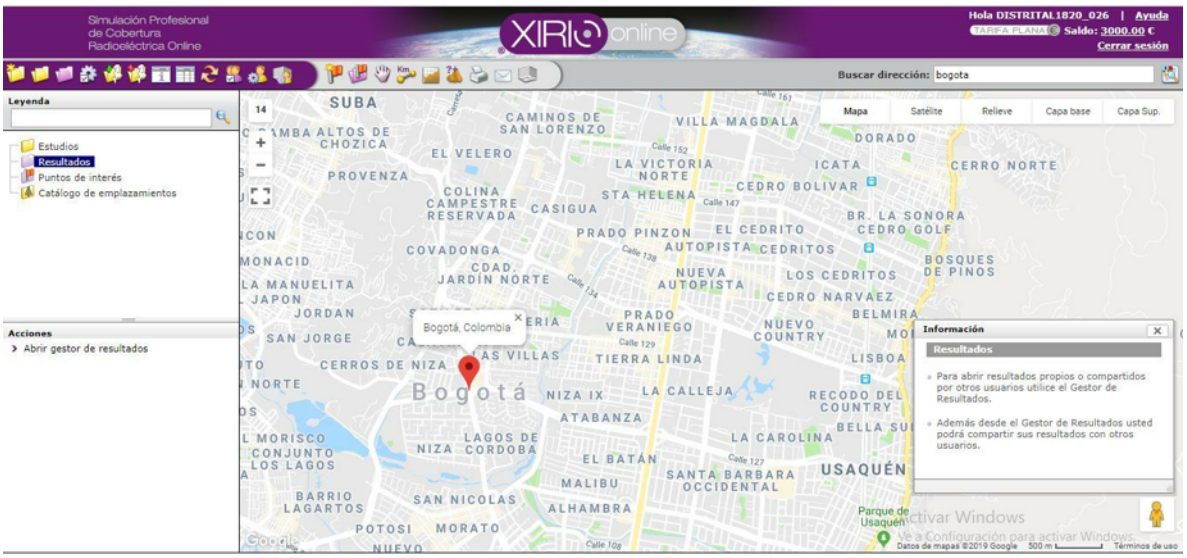


Figura 60: Entorno gráfico de la herramienta de planificación radioeléctrica (Planning Tool).

Luego de conocer las funcionalidades y características principales de la herramienta de software Xirio Online, se inicia con el proceso de planeación, configuración y simulación de las redes de comunicaciones móviles de 4G y 5G, para las cuales vamos a realizar una comparación de tres tipos de estudios:

- Enlace
- Cobertura
- Cobertura Multitransmisor

El orden planteado para realizar los estudios radioeléctricos será desde el de menor complejidad al de mayor complejidad, en términos de elementos necesarios para realizarlo y cantidad de parámetros a modificar.

8.1. Generalidades

Durante la realización y explicación de la configuración y simulación de los diferentes estudios radioeléctricos, algunos parámetros y/o términos no serán definidos ya que su nombre es bastante explícito o claro, y se hace innecesario explicarlos, por el contrario, en varios parámetros y/o términos de la simulación de los estudios radioeléctricos se hizo uso de los conceptos, definiciones y datos que brinda el manual de Xirio [38].

Se debe tener en cuenta que las definiciones de parámetros y explicaciones acerca de las ventanas que se despliegan para la configuración de los estudios radioeléctricos que se vayan mencionando, se evitarán explicar de nuevo en los siguientes estudios, con el fin de no hacer extenso y redundante el documento, por lo tanto, solo se mencionarán parámetros y ventanas que no hayan sido explicadas con anterioridad.

Al ubicar el puntero del mouse sobre los iconos dentro del programa nos mostrará su función específica para cada parámetro, a continuación, se muestran algunos iconos o botones comunes propios del programa;

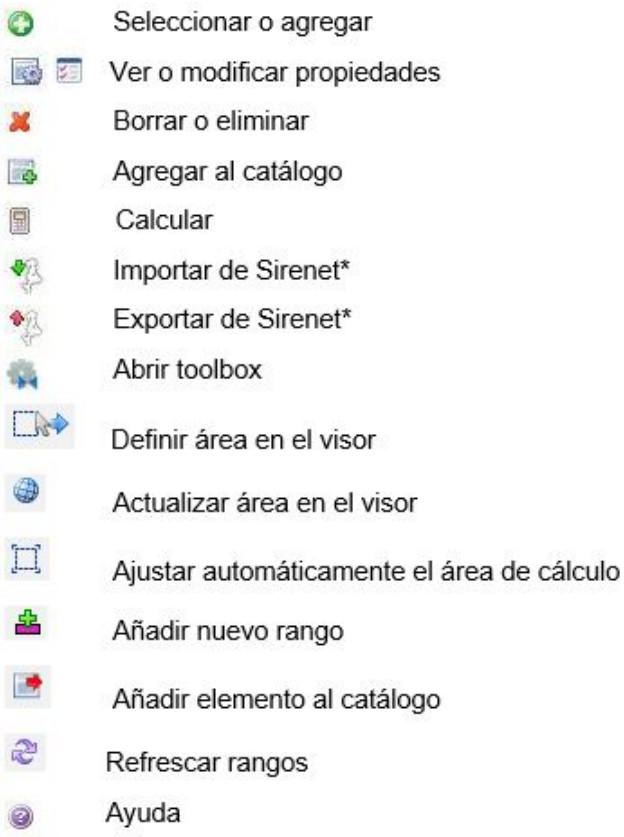


Figura 61: Botones comunes de Xirio Online.

*(Sirenet es un software de escritorio desarrollado por Aptica)

Algunas convenciones utilizadas en la explicación del software son:

- Los parámetros de configuración y los botones del software se mencionarán utilizando comillas dobles “ ”.
- Las ventanas principales y auxiliares se identifican con negrilla, cursiva y además utilizando comillas dobles “ ”, como también las respectivas secciones y subsecciones de estas ventanas.

8.2. Conceptos

En este capítulo se mencionan conceptos importantes que van a ser necesarios para entender algunos parámetros de configuración del software.

Tipos de polarización para una antena

Cuando hablamos de polarización **simple** contamos con diferentes tipos, los cuales se muestran a continuación:

- **Horizontal:** Esta polarización se da cuando el componente vectorial de campo eléctrico de la onda es horizontal a la superficie terrestre.
- **Vertical:** Esta polarización se da cuando el componente vectorial de campo eléctrico de la onda es vertical a la superficie terrestre.

- **Circular:** Esta polarización se da cuando el componente vectorial de campo eléctrico de la onda avanza girando sobre el eje de propagación, este giro se puede dar a izquierda o a derecha.
- **Cruzada:** También llamada XPIC, las antenas con polarización cruzada, a veces denominadas antenas X-Pol, presentan dos elementos en un paquete, un elemento está polarizado a $+45°$ y el otro está polarizado a $-45°$. Los dos ángulos opuestos de $45°$ de los elementos producen una orientación cruzada o en X. El uso de una antena polarizada cruzada con antenas polarizadas vertical y horizontalmente reduce aún más la interferencia.

También se tiene la posibilidad de utilizar polarización doble, la cual consta de la emisión en patrones RF horizontales y verticales, de manera simultánea.

Debido a que las polarizaciones que se consiguen en la práctica nunca son perfectamente circulares o perfectamente lineales, sino que son siempre elípticas, se tiene como consecuencia que cualquier antena radia con una polarización nominal (deseada), a la que se acompaña una polarización ortogonal indeseada.

Definiendo dichas polarizaciones como:

- **Componente copolar:** Es la polarización deseada del campo eléctrico.
- **Componente contrapolar:** También llamada polarización Xpolar, es la polarización del campo ortogonal de la polarización deseada del campo (polarización no deseada).

Perspectiva de la antena

- **Orientación [°]:** Apuntamiento horizontal en grados de la antena transmisora (rango posible de $0°$ a $359°$).
- **Inclinación mecánica [°]:** Apuntamiento vertical en grados de la antena transmisora (rango posible de $-90°$ a $90°$). Valores positivos suponen una inclinación de la antena, valores negativos suponen una elevación.
- **Inclinación eléctrica [°]:** Es la inclinación que se consigue modificando las características de fase de la señal de alimentación de la antena, como resultado, el diagrama de radiación de la antena cambia.
- **Feeder:** El feeder es el cable de radiofrecuencia o guía-onda situado entre el elemento transmisor/receptor y la antena, sin considerar elementos combinadores, divisores o conectores. Dado que puede utilizarse a varias frecuencias puede estar formado por una o varias atenuaciones. Cada una de estas atenuaciones tiene asociado un rango de frecuencias de trabajo, de tal manera que de la unión de todos estos rangos viene determinado en el rango de frecuencias de trabajo del feeder.
- **Duplexor:** Es un dispositivo electrónico que permite comunicación bidireccional sobre una misma línea de transmisión, hablando específicamente de radio permite transmitir y recibir señales con una sola antena. Esto se hace dividiendo las funciones de transmisión y recepción para que no se interfieran durante sus funciones, es decir que no se hace de manera simultánea si no que se realiza una conmutación muy rápida. Los duplexores pueden basarse en el uso de: frecuencias distintas, polarizaciones distintas (como en el caso de un transductor ortomodal) o tiempos distintos [40].
- **Transductor OrtoModal (OMT):** Los transductores ortomodales son elementos pasivos de microondas, de 3 puertos generalmente, su principal finalidad consiste en separar o combinar señales contenidas en la misma banda de frecuencias que emplean polarizaciones ortogonales (perpendiculares), también son conocidos como duplexores de polarización debido a su funcionamiento.

Tipos de distribución de recursos

A continuación, se encuentran los algoritmos más comunes de distribución de recursos de RF utilizados por los sistemas LTE y LTE-A:

- **Proportional Fair (PF):** Esta estrategia trata de combinar un uso del canal radio cercano a la máxima capacidad con un reparto justo de los recursos entre los usuarios. Para ello, se hace la selección del usuario a transmitir en base al siguiente criterio:

$$m_n^*(t) = argmax \left\{ \frac{R_{m,n}(t)}{W_{m,n}(t)} \right\} \tag{1}$$

  Donde $argmax = m$, $W_{m,n}(t)$ es la tasa binaria media que ha obtenido el usuario m en un determinado periodo de tiempo. Nótese que $W_{m,n}(t)$ no es el promedio de $R_{m,n}(t)$, ya que $R_{m,n}(t)$ refleja la tasa binaria que obtendría un usuario en caso de obtener el canal, mientras que $W_{m,n}(t)$ se obtiene con la tasa finalmente asignada [10].

- **Maximum Rate (MR):** Esta estrategia selecciona al usuario que experimenta, en cada subtrama, las mejores condiciones del canal radio en un PRB dado. Matemáticamente, el criterio MR se puede expresar como:

$$m_n^*(t) = argmax \{R_{m,n}(t)\} \tag{2}$$

  Donde $R_{m,n}(t)$ es la tasa binaria de datos (data rate) instantánea que puede alcanzar el usuario m en el PRB n de la subtrama t. Esta tasa se obtiene mediante los procesos de adaptación del enlace, donde dada una determinada calidad del canal se puede establecer el esquema de modulación y codificación más adecuado, lo que determina una eficiencia espectral en bits/s/Hz. Por lo tanto, conocido el ancho de banda de un PRB, se puede extraer $R_{m,n}(t)$. MR permite maximizar la capacidad del canal gracias a la diversidad multiusuario, en el dominio temporal, es posible explotar la llamada diversidad multiusuario, donde, debido a la existencia de varios usuarios, es más probable que alguno de ellos experimente una buena calidad del canal en una determinada subtrama, en otras palabras, si el número de usuarios es suficientemente grande, es posible encontrar a uno de ellos que pueda transmitir en tasas cercanas a la máxima capacidad. Sin embargo, MR no es justo ("fair" en términos anglosajones) en algunos escenarios, donde un usuario que experimentase una calidad del canal muy superior al resto (por estar muy cerca de la estación base) obtendría casi siempre el canal, impidiendo las transmisiones del resto de usuarios, lo que es inaceptable desde el punto de vista de la calidad del servicio [10].

- **Round Robin (RR):** Esta estrategia asigna cíclicamente el canal a los usuarios sin considerar las condiciones del canal radio (es decir no es channel aware). Por lo tanto, es una estrategia justa en el sentido de que cada usuario tiene asignado el canal durante el mismo tiempo. Sin embargo, al no considerar las condiciones del canal, no está adaptado a las necesidades de los usuarios, donde, presumiblemente, aquellos con peor condición del canal radio requerirán más tiempo el canal para igualar su calidad de servicio a la de los usuarios con las mejores condiciones radio [10].

Relaciones de señales

- **SNR [dB]:** La relación señal a ruido (Signal to Noise Ratio) se define como el cociente existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la corrompe [41].

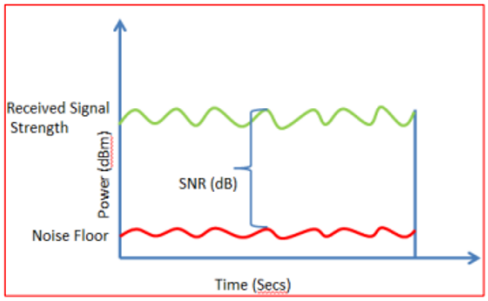


Figura 62: Relación señal a ruido (SNR) [41]

- **SIR [dB]:** La relación señal a interferencia (Signal to Interference Ratio) se define como el cociente existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia de la interferencia cocanal que se recibe [42].
- **SINR/SNIR [dB]:** La relación señal a interferencia más ruido (Signal to Interference plus Noise Ratio) se define como el cociente existente entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia de la interferencia cocanal más la potencia del ruido que la corrompe.
- **RSRP [dBm]:** Es la potencia recibida de las señales de referencia (Reference Signals Received Power) esta medida proporciona una estimación de la fuerza de la señal recibida a nivel de celda, y es útil para la toma de decisiones acerca de la reselección de celda o de handover. El RSRP se mide como el promedio lineal sobre las potencias recibidas (en vatios) de los resource elements que transportan la señal de referencia de una celda determinada en un ancho de banda especificado, excluye las medidas de ruido e interferencia de otros sectores.
- **Resource element:** Es una subportadora OFDM en un determinado símbolo OFDM dentro de un time-slot, en otras palabras, un elemento de recurso es una subportadora de 15 kHz por un símbolo como se puede observar en la figura 63.

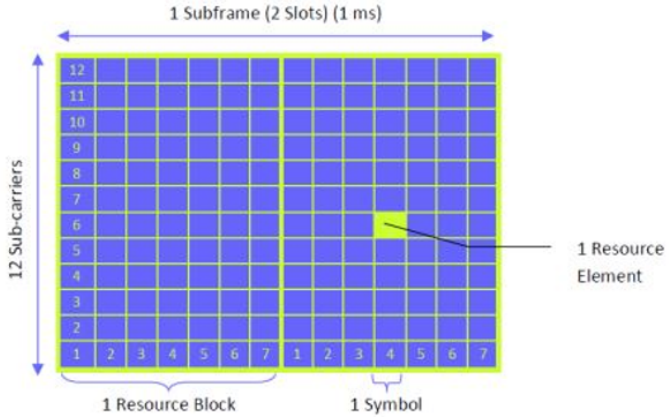


Figura 63: Elemento de recurso (resource element) [44].

Indicadores de la prestación del servicio

- **Data rate:** También llamado tasa de bits, es la capacidad absoluta de un enlace para transmitir bits por unidad de tiempo, y es función directa de la manera en que modula y codifica la portadora sobre dicho enlace. Habitualmente suele medirse en bits/segundo (Mbps, Gbps, etc.). El data rate establece un límite absoluto para nuestra transmisión: no podemos transmitir mayor cantidad de datos que la definida en el data rate.
- **Throughput:** Es la capacidad efectiva de transferencia de datos sobre un enlace. Esta capacidad siempre es menor al data rate ya que en los enlaces, junto con los datos, hay tráfico de negociación, mantenimiento y control del enlace [43].

ICIC de red

El principal objetivo de la coordinación de interferencia intercelular (inter-cell interference coordination, ICIC) es evitar altas interferencias entre celdas, debidas a usuarios ubicados en los bordes de las celdas adyacentes, los posibles tipos se muestran a continuación:

- **Reutilización de factor 1 (Frequency Reuse of 1, FR1):** Como se puede observar en la figura 64 en este tipo de reutilización de frecuencias todos los sectores manejan el mismo ancho de banda, el mismo espectro de frecuencias y la misma potencia para todo el sector.

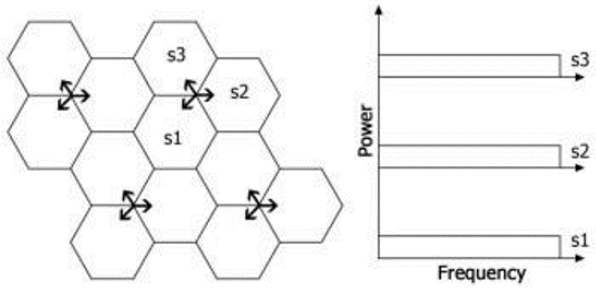


Figura 64: Reutilización de factor 1 (FR1) [38].

- **Reutilización de factor 3 (Frequency Reuse of 3, FR3):** Como se puede observar en la figura 65 en esta reutilización de frecuencias los sectores manejan el mismo ancho de banda, la misma potencia para todo el sector, pero manejan espectros de frecuencias diferentes.

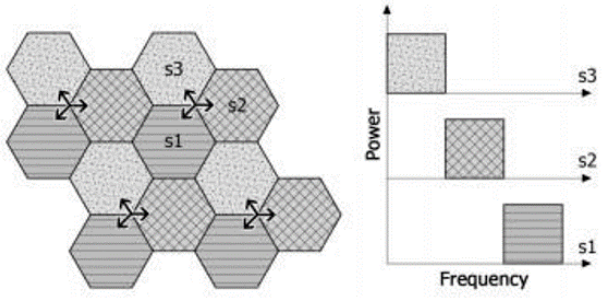


Figura 65: Reutilización de factor 3 (FR3) [38].

- **Reutilización parcial de frecuencias (Partial Frequency Reuse, PFR):** Como se puede observar en la figura 66 en este tipo de reutilización de frecuencias los sectores manejan el mismo ancho de banda, en el centro de la celda los sectores manejan el mismo espectro de frecuencias y la misma potencia, para el borde de la celda utilizan la misma potencia siendo esta mayor que la que se utiliza en el centro de la celda, pero manejan espectros de frecuencias diferentes.

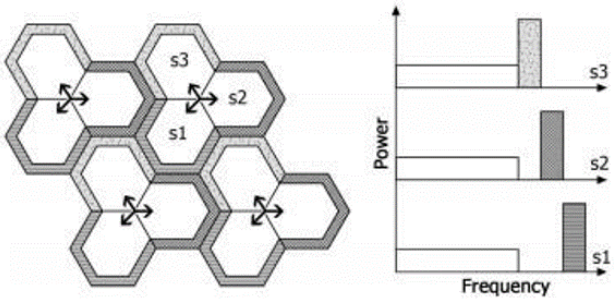


Figura 66: Reutilización parcial de frecuencias (PFR) [38].

- **Reutilización suave de frecuencias (Soft Frequency Reuse, SFR):** Como se puede observar en la figura 67 en este tipo de reutilización de frecuencias los sectores manejan el mismo ancho de banda, pero manejan espectros de frecuencias diferentes, los sectores manejan una potencia en el centro menor a la que se emplea en el borde de la celda, el borde de la celda del SFR utiliza mayor banda que en la

reutilización PFR, y la totalidad de la fracción de frecuencias utilizadas en el centro no es igual entre sectores.

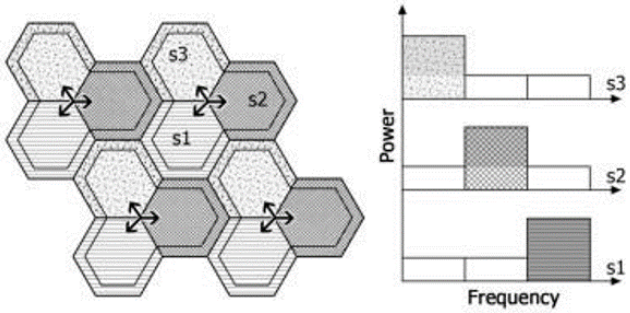


Figura 67: Reutilización suave de frecuencias (SFR) [38].

Tipos de Cartografía Xirio

La herramienta de simulación Xirio cuenta con cinco tipos de cartografía las cuales son:

- **Capa MDT o de altimetría:** El MDT (Modelo Digital de Terreno) es una capa de elevación en la cual elementos como edificios, carreteras y vegetación han sido eliminados digitalmente. Este modelo asigna a cada píxel una cota altimétrica sobre el nivel del mar. Este tipo de cartografía está indicada para planificación de redes de radiodifusión, móviles o acceso a banda ancha en las que los entornos urbanos se suelen modelar mediante la adición de pérdidas adicionales de clutter o mediante distintos umbrales en función del tipo del entorno.
- **Capa MDE o de elevación:** El Modelo Digital de Edificios (MDE) proporciona información de la elevación en cada punto en entornos urbanos y con alta resolución. Este modelo asigna a cada píxel un valor de elevación combinando la cota altimétrica con la altura de edificios. El MDE incluye por tanto un MDT más la altura de los edificios y es apropiado para cálculos en ciudades.
- **Capa MDS:** El Modelo Digital del Suelo (MDS) incluye un MDT más la altura de diversos elementos de elevación como edificios, vegetación, torres de alta tensión, infraestructuras, etc. Este tipo de cartografía abarca una mayor extensión que el MDE ya que incluye entornos urbanos y rurales, por lo que resulta adecuado para el diseño de redes de acceso y transporte. Proporciona unas inmejorables condiciones para analizar la obstrucción en radio enlaces del servicio fijo en bandas de microondas, así como de otras tecnologías de alta frecuencia.
- **Capa morfográfica:** Se trata de una capa ráster, en que cada píxel pertenece a una categoría de uso del suelo. Esta categoría tiene una serie de atributos que pueden modificar la señal de radio presente en un punto, ya sea por el incremento de cotas (ej: presencia de un bosque), pérdidas adicionales (de carácter determinístico que provienen de una campaña de medidas cotejadas con los resultados de predicción), tipo de suelo (según Rec. UIT-R P.1546) y tipo de suelo según una categorización más amplia y caracterizable por sus valores de permisividad y conductividad.
- **Capa administrativa:** Se trata de una capa vectorial, la cual contienen un conjunto de polígonos que representan regiones geográficas caracterizadas por un nombre y un número de habitantes. Cada capa administrativa dispone de una granularidad diferente, pudiéndose encontrar capas administrativas provinciales, municipales o a nivel de núcleo de población. Estas capas son utilizadas para obtener estadísticas de cobertura, interferencia, etc.

8.3. Estudio Radioeléctrico de enlace

El estudio radioeléctrico enlace nos permite analizar la viabilidad de un enlace radioeléctrico, conociendo el nivel de señal recibida, verificando si existe línea de vista (LOS), verificando si la 1ra Zona de Fresnel se encuentra despejada, etc.

Para este estudio, a partir de las estaciones base seleccionadas con la ayuda de la aplicación móvil Opensignal, se seleccionó la estación base sur para realizar un enlace con un dispositivo móvil que se encuentra ubicado en la Universidad Distrital Francisco José de Caldas (facultad de ingeniería).

El proceso de configuración y selección de parámetros del estudio se realizó de la siguiente manera, primero en la herramienta Xirio en la sección ***"Seleccione un tipo de estudio"*** se escogió el estudio a configurar y simular (Enlace), luego en la sección ***"Seleccione un servicio o tecnología"*** se eligió primeramente la categoría, en este caso servicio móvil, en la subcategoría se eligió LTE-A - FDD, que implica que se va implementar un servicio LTE-Advance con multiplexación por división de frecuencia, debido a que en muchas ocasiones la multiplexación por división de tiempo tiene problemas con la sincronización, en servicio además de lo indicado en subcategoría se añade el parámetro de canalización (ancho de banda), en este caso se seleccionó el mayor posible, que es de 20 MHz para un servicio LTE-Adavance, para así de esta manera conocer las mejores prestaciones que puede tener este servicio de telefonía móvil para luego ser comparado con las prestaciones del servicio de 5G Non Stand Alone, esta configuración se puede observar en la figura 68.



Figura 68: Crear nuevo estudio.

Luego de oprimir "aceptar" en la ventana ***"Crear nuevo estudio"***, se despliega la ventana ***"Propiedades del estudio de Enlace"*** (figuras 69 y 70), en esta ventana se deben establecer los diferentes parámetros solicitados, esto con el fin de obtener resultados adecuados en las simulaciones. Para explicar la configuración de los estudios, se establecen tres secciones principales las cuales son; ***"Estudio"***, ***"Extremos"*** y ***"Parámetros de cálculo"***, cada una de ellas se subdivide según sus respectivos parámetros y las ventanas emergentes que posea.



Figura 69: Propiedades del estudio de enlace (Estudio y Extremos).

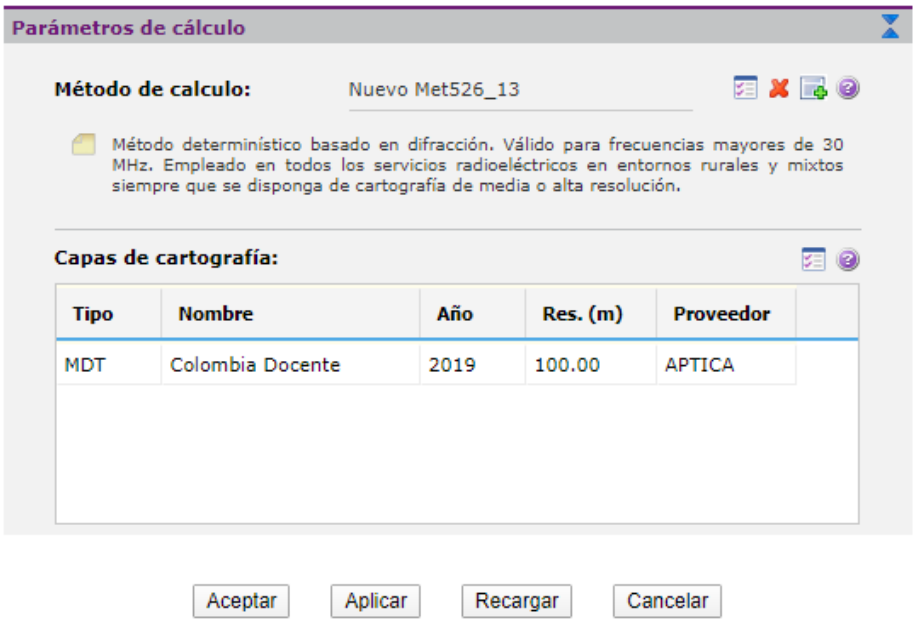


Figura 70: Propiedades del estudio de enlace (Parámetros de cálculo).

8.4. Estudio

Para esta primera sección es necesario configurar los parámetros nombre, grupo, servicio, banda, descripción del estudio, fecha de última puesta en servicio/apagado y estado, para configurar de manera correcta esta sección se deben tener en cuenta estas definiciones:

- **Grupo:** Este campo permite agrupar estudios para tenerlos más organizados y facilita su búsqueda dentro del gestor de estudios, también nos indica si el estudio que se está realizando pertenece a un

conjunto de estudios, que tienen un propósito en común. Para crear un grupo lo único que se debe hacer es ingresar un nombre de grupo en este campo en un estudio, a partir de ese momento cuando se realicen otros estudios este nombre aparecerá en la lista como opción de grupo.

- **Fecha de última puesta en servicio/apagado:** Parámetro informativo que indica cuando fue la última fecha de funcionamiento del servicio o hasta que fecha se va a mantener el servicio en funcionamiento.
- **Estado:** Este parámetro informativo indica si el servicio de radioenlace se encuentra activo o inactivo.

Conociendo estás definiciones, el "Nombre" que se le asignó a este estudio es "Estación Base – Universidad Distrital (LTE-A)", este estudio fue agregado al conjunto de simulaciones del servicio LTE-A, "Grupo" Servicio LTE-A, el parámetro "Servicio" ya está preestablecido y fue el seleccionado en la ventana ***"Crear nuevo estudio"*** como se puede ver en la figura 68, para el parámetro "Banda" es necesario explicar más a detalle, su configuración se mostrará en la subsección 8.4.1, debido a que despliega una ventana emergente, para la "Fecha de última puesta en servicio/apagado" se decide asignar la fecha 31/12/2019, debido a que para el año 2020 en diferentes países entrará a operar la tecnología 5G Non Stand Alone, la cual en varios casos va a utilizar la banda (2.5 MHz – 2.8 MHz) como complemento para su despliegue, esta banda va a ser compartida con la tecnología 4G LTE-Advance, por lo tanto, se debe realizar una reestructuración o reconfiguración del uso de esta banda, al parámetro "Estado" se le asignó el valor activo, ya que este enlace se encontrará en funcionamiento hasta la fecha 31/12/2019, vale la pena mencionar que este parámetro es solamente informativo y no afecta los resultados obtenidos al calcular los diferentes estudios.

8.4.1. Banda

La ventana emergente para la configuración de banda ***"Propiedades de la banda de frecuencias"*** se puede ver en la figura 71.

En este caso debido a que la banda que se escogió para el servicio 4G LTE-A es la de 2500 MHz - 2800 MHz (2,5 GHz - 2,8 GHz), correspondiente a una de las bandas asignadas a Tigo para prestar el servicio de 4G [45], se llenan los campos de "Nombre" y "Descripción", para la sección ***"Parámetros de la banda"***, se asigna un valor de 20 MHz como "Separación entre portadoras" para este servicio 4G LTE-A, que tiene acceso al medio utilizando OFDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal) para el enlace de bajada, e igualmente para el acceso al medio utilizando SC-FDMA (Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única) en el enlace de subida.

El "Ordinal del primer canal" es el número o identificador del canal, que por defecto es 1, a partir del cual se da inicio a la numeración de los canales que se van a utilizar, es decir que en este caso la numeración de los canales comenzó desde el canal uno.

Se configuró en Xirio el ***"Tramo inferior"*** de 2500 MHz a 2600 MHz, pareado con el ***"Tramo superior"*** de 2700 MHz a 2800 MHz. La "Frecuencia primera portadora" del tramo inferior es 2520 MHz, debido a que el servicio que se configuró tienen un ancho de banda de 20 MHz, por lo tanto, la "Frecuencia primera portadora" del tramo superior es 2720 MHz.

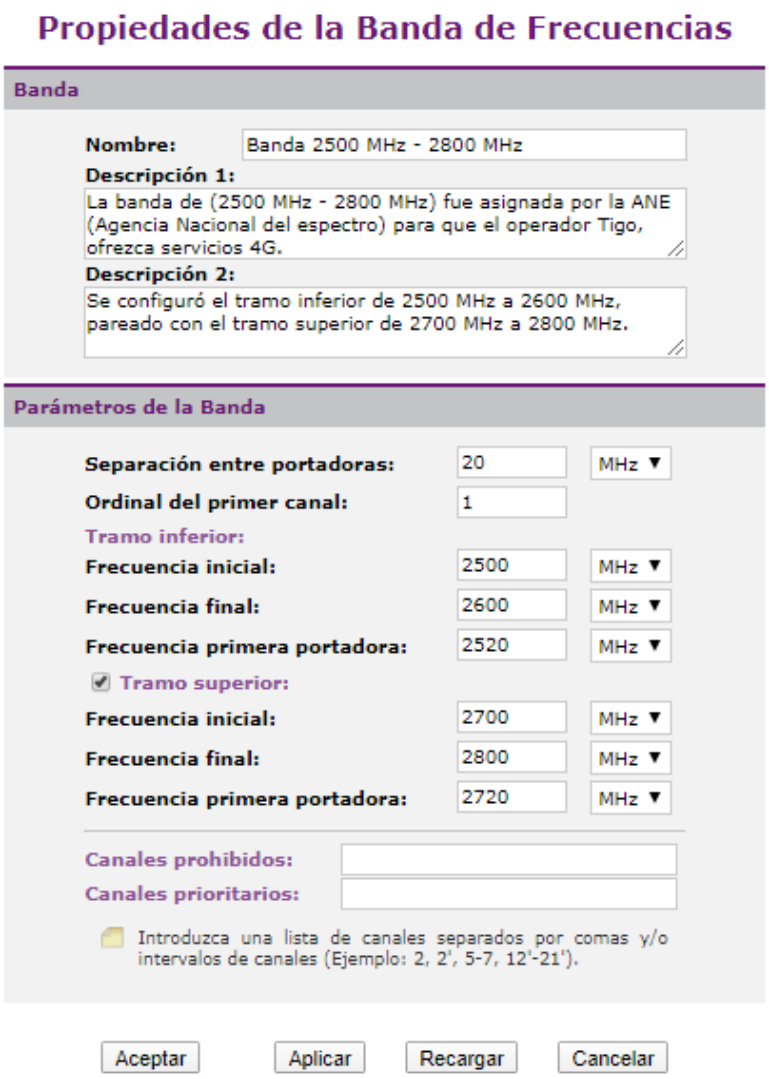


Figura 71: Propiedades de la banda de frecuencias.

En este estudio no se agregaron “Canales prohibidos”, ni “Canales prioritarios”, esto con el fin de hacer uso de todos los recursos que brinda el servicio 4G LTE-Advance, sin embargo, es importante mencionar su funcionalidad.

- **Canales prohibidos:** Canales que el usuario puede configurar para que no se puedan utilizar o no se tengan en cuenta en el estudio de cobertura.
- **Canales prioritarios:** También llamados canales reservados. A la hora de seleccionar un radiocanal dentro de una banda en el transmisor, en el receptor o en los extremos los canales prioritarios se indicarán en la interfaz mediante una “P” y el número del canal tendrá una comilla. A continuación, se observa la imagen de ejemplo (figura 72) que se encuentra en el manual de Xirio.



Figura 72: Indicador de canales prioritarios [38].

8.5. Extremos

En la sección extremos hay dos ventanas auxiliares, una para configurar el sector, llamada ***"Propiedades del sector"*** (configuraciones de la estación base – eNB) y otra para configurar el terminal, llamada ***"Propiedades del terminal"*** (configuraciones del equipo de usuario).

8.5.1. Propiedades del sector

La ventana emergente que se despliega del parámetro sector ***"Propiedades del sector"*** se puede ver en las figuras 73, 77 y 84.



Figura 73: Propiedades del sector (Sector y Emplazamiento).

En la figura 73 se observan las dos primeras secciones de la ventana ***"Propiedades del sector"***, inicialmente se asigna un "Nombre" para el sector, el cual fue Estación Base-Sur (eNB), opcionalmente se puede agregar un "Emplazamiento" oprimiendo el botón "Seleccionar emplazamiento", si se guardó con anterioridad en el catálogo, para este caso no se hizo uso de un emplazamiento, por consiguiente se deben agregar las ***"Coordenadas*** de la localización de la estación base, para esto se tiene varias formas; introducir manualmente la "Latitud" y la "Longitud", agregar mediante el botón "seleccionar un punto del visor" o agregar mediante el botón "calculadora de coordenadas", además Xirio tiene una funcionalidad que permite optimizar la ubicación, buscando un punto más alto en las proximidades de las coordenadas ingresadas, esto se realiza mediante el botón "optimizar la ubicación del transmisor", en este caso se utilizó el botón "seleccionar un punto del visor" para ubicar la estación base (estación base sur) que se muestra seleccionada en la figura 57 a).

Creación de un emplazamiento (Opcional)

Los emplazamientos de Xirio representan las coordenadas geográficas en las cuales se ubican diferentes elementos transmisores o receptores.

Para la creación de un emplazamiento se debe oprimir el botón "Abrir gestor de catálogo" de la barra de herramientas de Xirio, luego se desplegará la ventana ***"Gestor de catálogo"*** (figura 74), en tipo de elemento se selecciona la opción "Emplazamientos", si no se ha creado un grupo de emplazamientos se oprime el botón "Gestionar grupos de emplazamientos", después de esto se visualizará la ventana auxiliar ***"Grupos***

de emplazamientos" (figura 75), a continuación, se debe oprimir el botón "Crear un nuevo grupo de emplazamientos", se le asigna el nombre y se oprime el botón "Guardar", por último, se crea el emplazamiento oprimiendo el botón "Crear nuevo elemento de catálogo", como resultado, se muestra la ventana complementaria ***"Propiedades del Emplazamiento"*** (figura 76), se agregan los parámetros exigidos y se oprime el botón "Guardar", de esta manera se crea un emplazamiento.

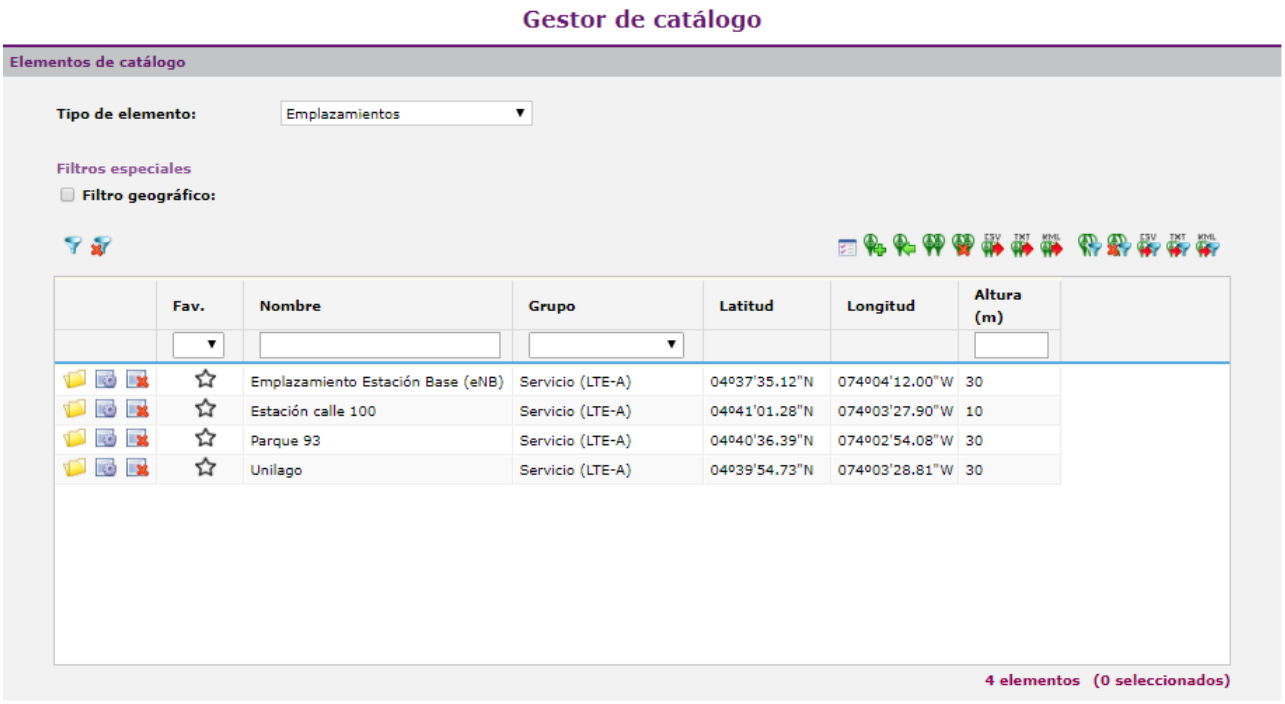


Figura 74: Gestor de catálogo (Emplazamientos).



Figura 75: Grupos de emplazamientos.

NOTA: Los cálculos realizados por Xirio utilizan la altura de la antena definida en la sección ***"Parámetros de radio"***, cuando se asocia un emplazamiento a un transmisor se hace generalmente para tomar sus

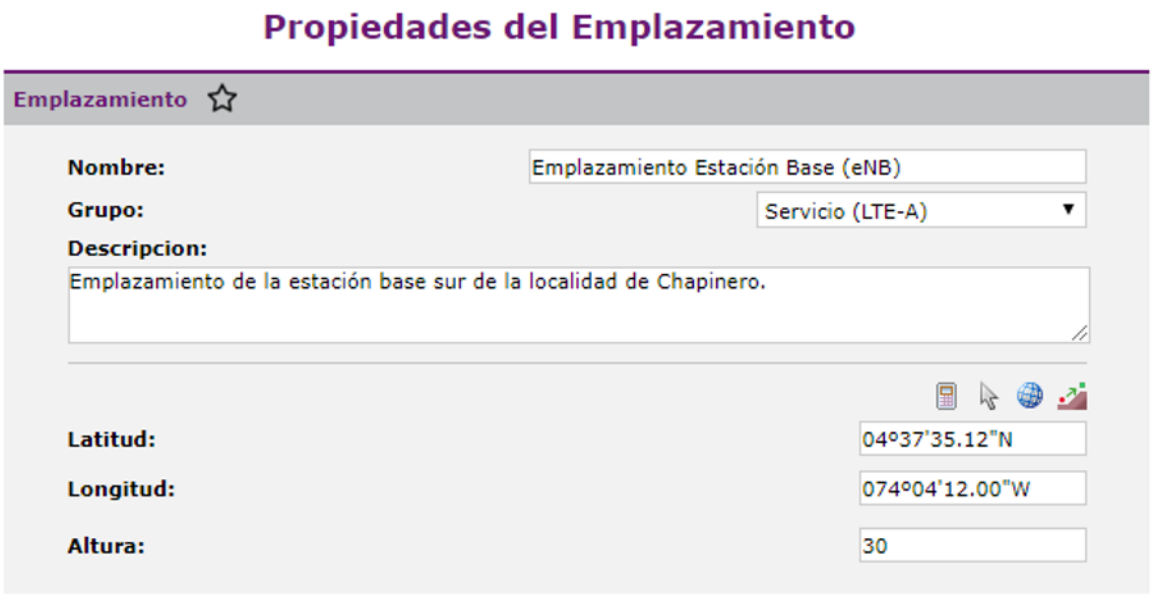


Figura 76: Propiedades del emplazamiento.

coordenadas,la altura del emplazamiento no se usa.

La tercera sección ***"Parámetros de radio"*** se puede ver en la figura 77, todos los parámetros radioeléctricos del transmisor o sector (servicios móviles), así como el diagrama de radiación específico, quedan configurados por defecto al seleccionar el servicio (tecnología) del estudio, con valores adecuados o típicos del tipo de simulación a realizar. Evidentemente, valores como son la potencia de transmisión o las pérdidas en cables y elementos pasivos deberán ser precisados por parte del usuario, particularizando para los casos específicos que se deseen simular.

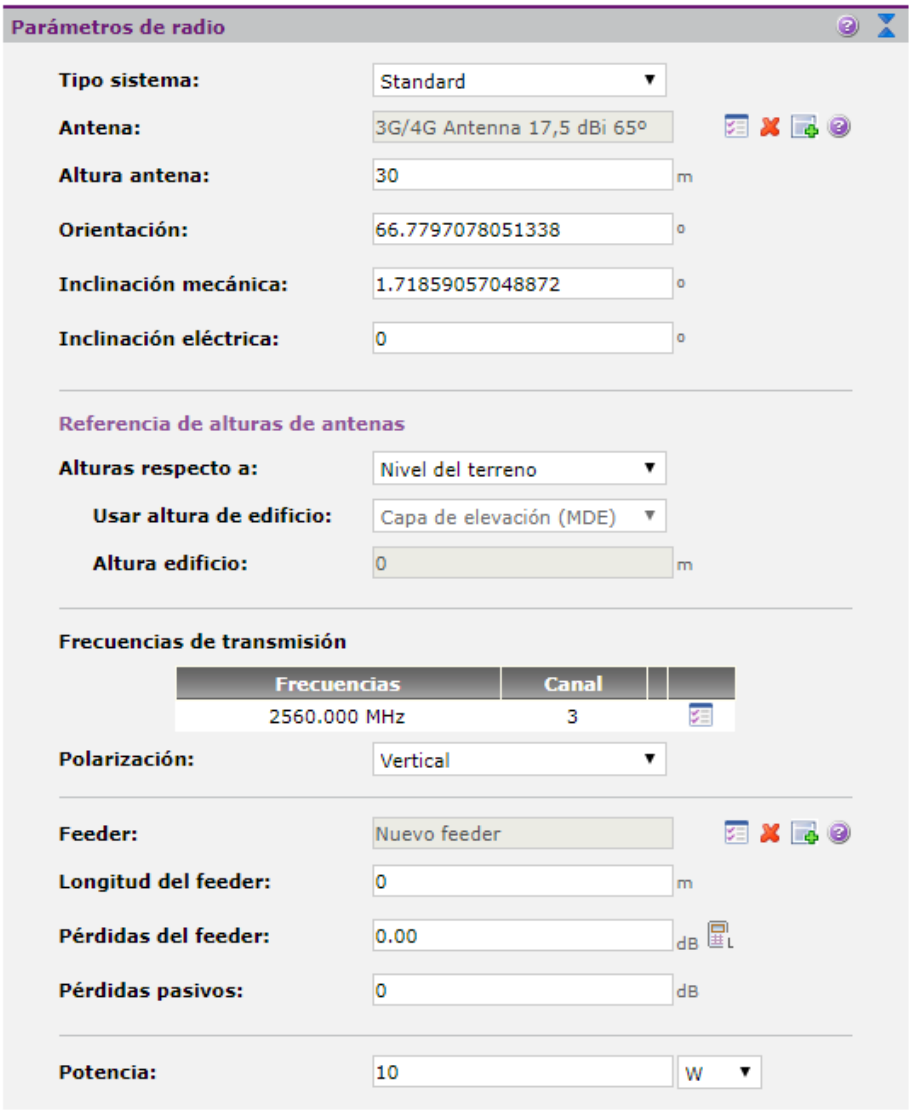


Figura 77: Propiedades del sector (Parámetros de radio).

En el parámetro “Tipo sistema”, se seleccionó standard, este parámetro indica que el sistema cuenta con una antena o varias antenas conectadas sobre la estación base, diferente a lo que ocurre con un sistema tipo DAS (Sistemas de Antenas Distribuidos), esta tecnología es utilizada por los proveedores de servicios inalámbricos para aplicaciones de interior, tales como, estadios, hoteles, centros de convenciones, entre otros. El sistema DAS consiste en una estación base central conectada por fibra óptica a pequeñas antenas distribuidas en un área geográfica (nodos), gracias a esto distribuye la señal por diferentes zonas donde no llegaría teniendo una sola antena. En lugar de las antenas de montaje encima de una torre, las antenas se montan dentro de los edificios o al aire libre a una altura mucho más corta, a menudo lejos de la estación base. DAS es una solución en lugares con restricciones de zonificación estrictas, además las antenas del DAS son más agradables estéticamente que las torres macro [46].

La “Antena” seleccionada es una antena preestablecida (3G/4G Antenna 17,5 dBi 65°) por Xirio, que maneja todos los parámetros estándar y más comunes para las antenas de estaciones base que prestan los servicios móviles LTE-A, en la sección 8.5.1.1 se explica cuáles son los parámetros que componen dicha configuración.

8.5.1.1. Antena del sector

En el parámetro "Antena", Xirio asigna una antena por defecto dependiendo del tipo de servicio que se seleccionó, para observar y/o modificar en el caso de ser necesario los parámetros de la antena tales como su "Nombre", "Polaridad", "Peso, "Dimensión mayor" y "Diagrama de radiación" se debe desplegar la ventana emergente que se puede ver en la figura 78, en donde el usuario puede modificar las características de la antena o crear otra nueva introduciendo manualmente los datos propios de la antena, se debe tener en cuenta que también es posible introducir los datos de los diagramas de radiación de una antena mediante un fichero de texto plano con formato Sirenet.

En este caso como se utilizó la antena por defecto recomendada por Xirio para este servicio, la cual cumple los estándares internacionales y es la más común para este tipo de tecnología, no se modificaron las propiedades de la antena (figura 78), sin embargo, se dará una breve descripción de los parámetros relevantes que no han sido mencionados antes.

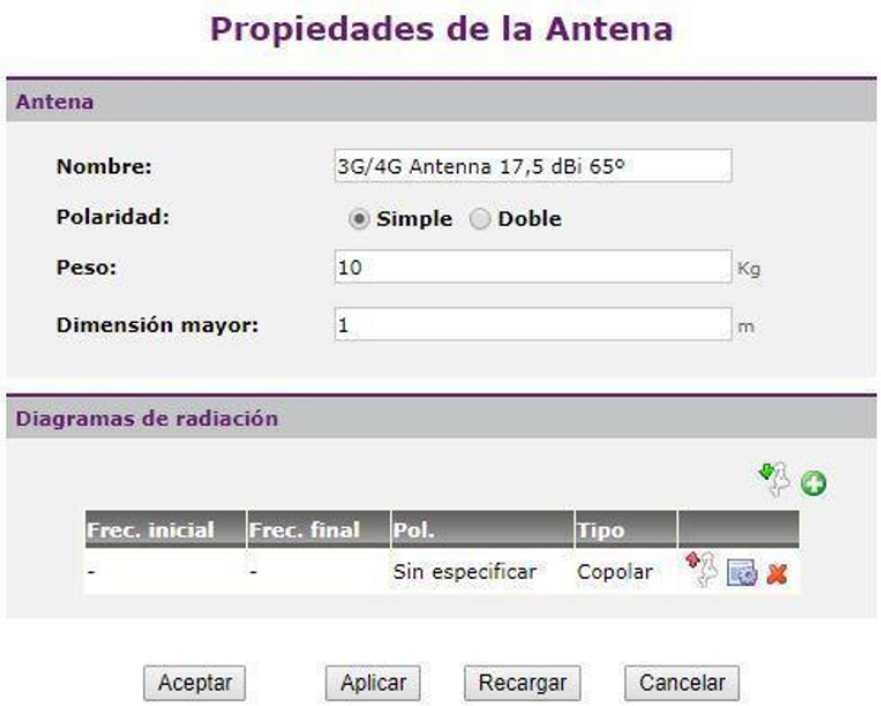


Figura 78: Propiedades de la antena del sector.

- **Dimensión mayor:** Indica el lado o la superficie más larga de la antena.

Los valores de "Peso" y "Dimensión mayor" son simplemente descriptivos, no se usan a efectos de cálculo. Al crear una antena en Xirio, estos valores deben ser introducidos por el usuario a partir de los datos de la antena que figuran en las hojas de características.

8.5.1.1.1. Diagramas de radiación de la antena del sector

En la subsección ***"Diagrama de radiación"*** al presionar el botón de "configuración" se despliega la ventana ***"Propiedades del Diagrama de Radiación"*** (figura 79), se deben tener en cuenta los siguientes conceptos, para configurar los parámetros de esta ventana de forma adecuada:

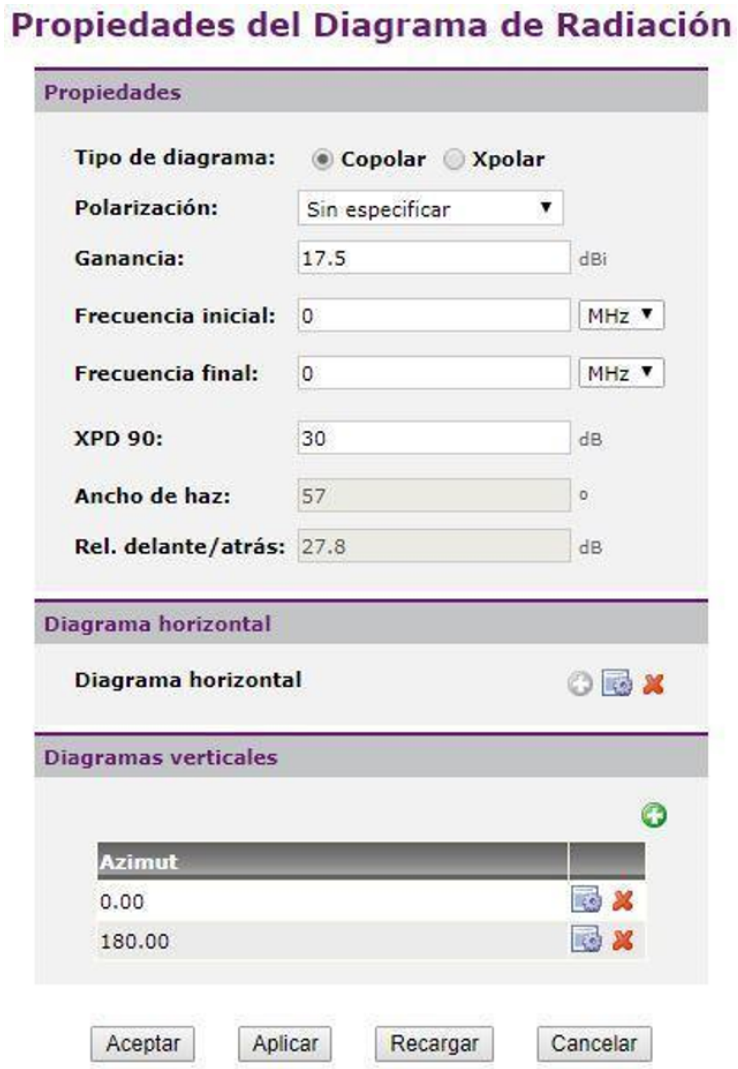


Figura 79: Propiedades del diagrama de radiación del sector.

- **XPD 90 [dB]:** También llamado factor de discriminación a 90º o discriminación de polarización cruzada, es la atenuación de 90 dB sufrida en la antena receptora, por recibir la señal con una polarización que difiere 90º de la emitida por el transmisor (polarización contrapolar), en otras palabras, es un rechazo total de la señal que llega ortogonal a la señal deseada.
- **Ancho de haz a 3 dB [°]:** También llamado ángulo de media potencia, este parámetro es informativo y no es editable, se obtiene a partir de los valores asignados para el diagrama horizontal, es el intervalo angular en el que la densidad de potencia radiada es igual a la mitad de la potencia máxima en la dirección principal de radiación (lóbulo principal), con este valor se calcula la directividad de la antena.
- **Relación delante/atrás [dB]:** Relación delante/atrás del diagrama de radiación. Este parámetro es informativo y no es editable, se obtiene a partir de los valores del diagrama horizontal. Es la relación que existe entre el valor de máxima potencia del lóbulo principal y el lóbulo posterior, indica cuanto radia más la antena hacía adelante que hacía atrás.
- **Polarización:** La polarización es usada en los cálculos realizados en Xirio, el software busca el diagrama de radiación en la polarización seleccionada por el usuario, devuelve un error si no hay un

diagrama de radiación en la polarización indicada, la opción ***sin especificar*** indica que cualquier tipo de polarización es válido.

- **Frecuencias:** Las frecuencias inicial y final permiten definir el rango de frecuencias en el cuál es válido un diagrama de radiación. Si ambas frecuencias tienen valor 0 indica que el diagrama se considera válido para cualquier frecuencia.

  Estás frecuencias también son usadas cuando se buscan antenas en el catálogo y se filtra por banda: cuando se selecciona una banda, se comparan las frecuencias de la banda con estos valores para determinar si una antena se muestra o no en el catálogo.

- **Diagrama horizontal:** Para ver y/o modificar el diagrama horizontal que por defecto Xirio implementa con respecto al servicio elegido, se oprime el botón "Modificar", luego se despliega la ventana emergente llamada ***"Propiedades del Diagrama de Radiación"*** (figura 80).

- **Diagrama vertical:** Para ver y/o modificar los diagramas verticales que por defecto Xirio implementa con respecto al servicio elegido, se oprime el botón "Modificar", luego se despliega la ventana emergente llamada ***"Propiedades del Diagrama de Radiación"*** (figura 81).

1. **Diagrama Horizontal**

   Una vez se despliega la ventana emergente y luego de presionar el botón "abrir toolbox" (icono pequeño de engranaje con dos flechas azules) se puede observar la interfaz de la figura 80, en esta ventana se pueden añadir o modificar los valores de azimut y su correspondiente atenuación, dependiendo de lo que necesite el usuario en el diagrama de radiación, este diagrama se puede ver en coordenadas polares o cartesianas, en escala natural o logarítmica, adicional se puede observar una parte específica del gráfico "hacer zoom", esto se realiza agregando un rango de azimut y/o atenuación, por último se puede configurar el intervalo (salto) del azimut y/o de la atenuación. A medida que se modifican o añaden valores Xirio ofrece la posibilidad de refrescar el diagrama de radiación con el fin de apreciar visualmente los cambios.

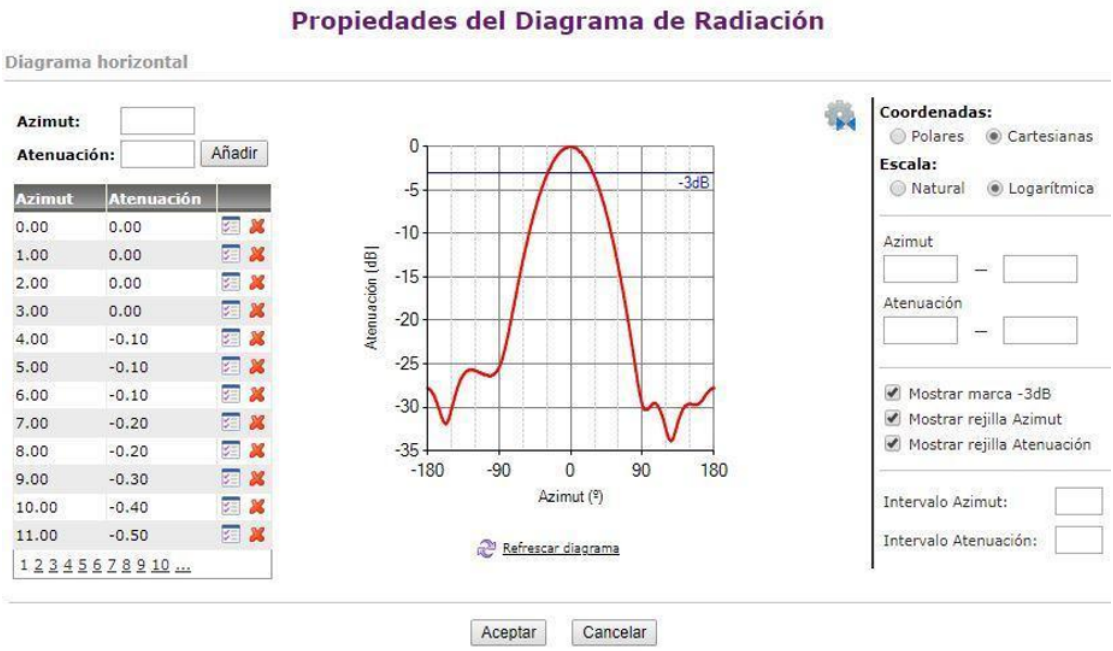


Figura 80: Propiedades del diagrama de radiación del sector (Horizontal).

2. **Diagrama Vertical**

Una vez se despliega la ventana emergente y luego de presionar el botón "abrir toolbox" (icono pequeño de engranaje con dos flechas azules) se puede observar la interfaz de la figura 81, en esta ventana se pueden añadir o modificar los valores de inclinación y su correspondiente atenuación, dependiendo de lo que necesite el usuario en el diagrama de radiación, al igual que en el diagrama horizontal, se ofrecen varias posibilidades para la visualización del diagrama, el único cambio es que el valor de azimut será fijo, mientras que el valor de inclinación será el responsable de hacer el barrido por los diferentes ángulos hasta completar el diagrama.

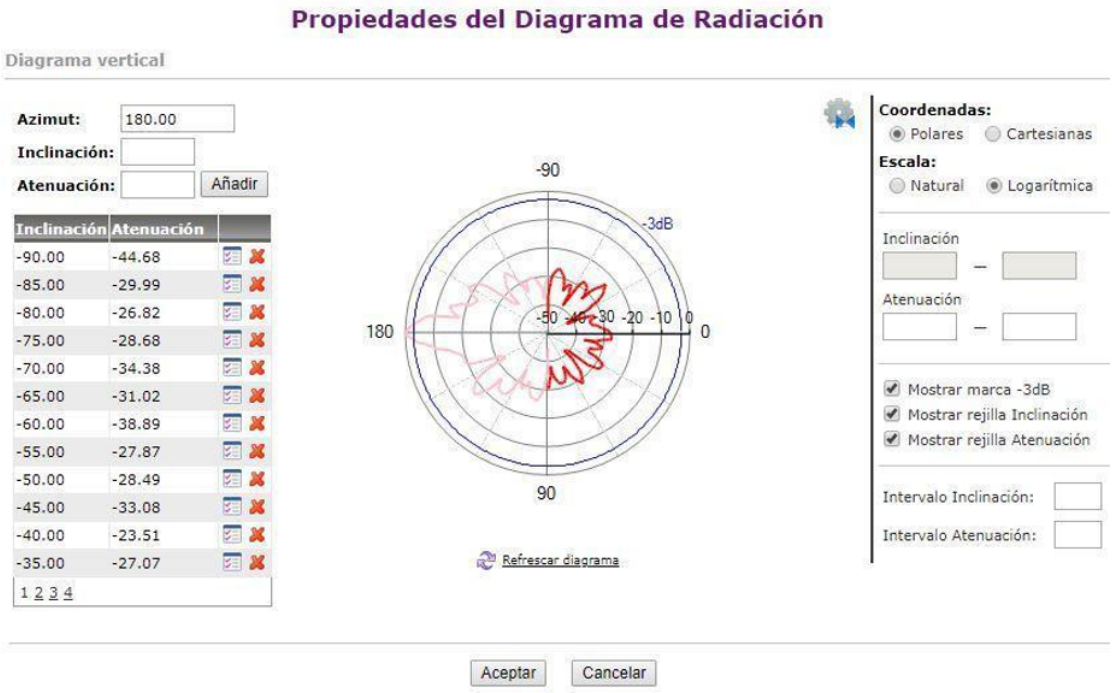


Figura 81: Propiedades del diagrama de radiación del sector (Vertical).

Volviendo a la ventana ***"Propiedades del sector"***, sección ***"Parámetros de radio"*** (figura 77), el valor preestablecido de la "Altura antena" es de 30 m, valor adecuado para el estudio a realizar, en la subsección ***"Referencia de alturas de antenas"*** se indicará porque este valor es adecuado.

Los valores de "Orientación", "Inclinación mecánica" e "Inclinación eléctrica" se manejaron con los parámetros preestablecidos por Xirio, debido a que estos valores se ajustarán antes de realizar el cálculo del estudio, con la funcionalidad "Orientar antenas de forma automática" que ofrece Xirio, la utilidad que tiene es garantizar una adecuada configuración según la ubicación y altura de nuestro terminal receptor, buscando que los resultados de la simulación sean óptimos, esta función se menciona en ***"Obtención de resultados de la simulación"***.

En la subsección ***"Referencia de alturas de antenas"*** se modifican los siguientes parámetros, teniendo en cuenta sus respectivas definiciones:

- **Alturas respecto a:** Esta propiedad indica cual es la referencia de las alturas de las antenas, teniendo dos posibilidades:

1. **Nivel del terreno:** Indica que la altura de la antena tendrá como referencia la superficie del terreno, por lo tanto, no se tiene en cuenta la altura de los edificios.
2. **Nivel azotea:** Indica que la altura de la antena tendrá como referencia base, la azotea, terraza o parte superior del edificio donde se coloque, esto significa que, dependiendo de la altura del edificio, la antena quedará en un punto más alto respecto a las azoteas de los edificios que se encuentren en su línea de vista. En una zona urbana lo más conveniente es instalar la antena en el techo de un edificio, buscando mejorar la línea de vista directa, con el fin de brindar mejor cobertura a la zona.
    - **Usar altura de edificio:** Existen dos maneras de indicar la altura del edificio:
        - **Capa de elevación (MDE):** Es la capa cartográfica que Xirio brinda en la cual se tiene en cuenta la altura de los edificios. Al elegir esta opción debería inhabilitarse la opción de altura de edificio ya que esta capa contiene los valores de las alturas de los edificios, pero al momento de la realización de este documento, la herramienta Xirio no realiza esta acción, lo que ocurre es que, si el usuario asigna una altura de edificio con capa de elevación (MDE), el parámetro siguiente no va a ser tenido en cuenta en la simulación.
        - **Definida por el usuario:** Este parámetro permite al usuario que no cuenta con una capa de elevación MDE o MDS, pero que conoce la altura del edificio donde se va a instalar la antena, asignar manualmente este valor.
            - **Altura edificio [m]:** Indica la altura en metros del edificio donde se va a instalar la antena.

Para esta simulación se manejó la "Altura con respecto" al nivel del terreno, debido a que no se contaba con una cartografía MDE de la zona, ni se conocía la altura específica del edificio donde se implemento la antena, por lo tanto, se hizo uso de la cartografía MDT y se le asigno a la antena una "Altura antena" de 30 m, lo que implica que con pisos de aproximadamente 2.5 m de altura esta antena se asemeja a un edificio de 12 pisos, pero se debe tener en cuenta que debido a que no se dispone de una cartografía tipo MDE, en esta altura de la antena también se está contando la altura del edificio en el cual se implementa, ya que con la cartografía MDT disponible, solo se conoce la altimetría o relieve de la zona, aun así esta altura permitió tener una excelente línea de vista, lo que mejoró la cobertura ofrecida por la estación base.

NOTA: Se debe tener en cuenta que, si se realiza una simulación y se elige la opción nivel azotea y capa de elevación MDE, pero no se cuenta con dicha capa, el resultado será el mismo que se menciona en el párrafo anterior.

Para el parámetro "Frecuencia de transmisión" se debe seleccionar una frecuencia dentro del tramo de frecuencias configurado en la banda (figura 71), es posible hacerlo indicando la frecuencia exacta o indicando el canal que se desea utilizar, en el caso que la frecuencia indicada no sea la frecuencia central de la subportadora, Xirio ajusta la frecuencia automáticamente y aparece un mensaje informativo (figura 82 a)), por otro lado si se intenta asignar una frecuencia que se encuentra por fuera de la banda, se mostrará un mensaje de error (figura 82 b)) y por último si se ingresa un canal que esta por fuera de la banda se mostrará el mensaje de error que se puede observar en la figura 82 c).

En esta simulación se seleccionó el canal 3 para realizar la transmisión, dicho canal corresponde al tercero habilitado para seleccionar, según el valor ingresado en el parámetro "ordinal del primer canal" (figura 71), aunque es posible seleccionar hasta el canal 5. El valor de la cantidad de canales disponibles se obtiene dividiendo el ancho de banda del servicio, en este caso 100 MHz y la separación entre subportadoras, correspondiente a 20 MHz. Para el último canal (canal 5) la frecuencia es de 2600 MHz.

$$Canales\ disponibles = \frac{Ancho\ de\ banda}{Separacion\ entre\ portadoras} = \frac{100MHz}{20MHz} = 5 \tag{3}$$



Figura 82: Frecuencia y canal de transmisión.

La "Polarización" seleccionada fue vertical debido a que es la polarización más común en el ámbito de las comunicaciones móviles.

8.5.1.2. Propiedades del Feeder

En Xirio se puede agregar un feeder a cada antena creada o seleccionada, esto pulsando la opción "Seleccionar feeder" lo cual abre una ventana emergente (figura 83), en esta ventana el usuario podrá configurar los siguientes parámetros; "Nombre", indicar si es o no un "Transductor OrtoModal (OMT)" y la ***"Lista de atenuaciones"***.



Figura 83: Propiedades del feeder.

La herramienta Xirio nos permite indicar por medio de un cuadro de chequeo, si el feeder que se va a agregar es un OMT, si se indica que es un OMT la opción "Longitud del feeder" (figura 77) se deshabilita, debido a que no se está hablando de las pérdidas y longitud de un cable sino de un elemento.

- **Lista de atenuaciones:** Debido a que el feeder se puede utilizar a diferentes frecuencias y que depen-

diendo de los rangos de frecuencia puede tener un nivel de atenuación diferente, Xirio permite agregar diferentes rangos de frecuencias con su respectivo valor de atenuación, para agregar un nuevo ítem a la lista nos solicita los siguientes parámetros; Frecuencia Inicial [Hz], Frecuencia Final [Hz], Atenuación [dB/m].

Regresando a la ventana ***"Propiedades del sector"***, sección ***"Parámetros de radio"*** (figura 77), y continuando con la definición de los parámetros de configuración del feeder se tienen las siguientes definiciones:

- **Pérdidas del feeder [dB]:** Son las pérdidas generadas por el feeder en dB, Xirio le brinda al usuario la opción de realizar el cálculo de estas pérdidas oprimiendo el botón "Calcular". Xirio para realizar este cálculo primero valida en que rango de frecuencias de la ***"Lista de atenuaciones"*** (figura 83) se encuentra la frecuencia de transmisión (figura 77), conociendo en que rango se encuentra, Xirio multiplica la longitud del feeder (figura 77) por la atenuación [dB/m] indicada en la lista de atenuaciones (figura 83), si la frecuencia de transmisión no se encuentra en la lista de atenuaciones, el cálculo no se puede realizar. Xirio también permite que el usuario ingrese el valor de las pérdidas manualmente.
- **Pérdidas pasivos [dB]:** Son las pérdidas en dB generadas por otros elementos pasivos como conectores, duplexores, empalmes, entre otros, exceptuando las pérdidas de feeder contempladas con anterioridad.

Para este conjunto de simulaciones de los estudios radioeléctricos enlace, cobertura y cobertura multitransmisor para los servicios 4G LTE-A y 5G Non Stand Alone que se realizaron a lo largo del documento, no serán tenidas en cuenta las pérdidas por elementos pasivos tales como; combinadores, divisores, conectores y el feeder, ya que la finalidad de este documento es comparar la interfaz de radio de los servicios mencionados anteriormente y estos elementos pasivos no pertenecen a esta interfaz, pertenecen al fronthaul y backhaul de la red de acceso.

La "Potencia" que se asignó para la transmisión es de 10 W, menos que el valor por defecto de Xirio (32 W), debido a que la zona de Bogotá donde se implementó el enlace tiene una densidad poblacional alta, lo que implica que en la zona se encuentran implementadas bastantes antenas de los diferentes operadores móviles que prestan servicio en esa zona, un ejemplo de la cantidad de antenas, se puede observar en la figura 57, es por esta razón que se decidió disminuir la potencia para que no se genere mayor interferencia en el servicio, otra razón es que el enlace que se implementó tiene una distancia corta, por lo tanto, no es necesario manejar una potencia tan alta, lo que mejora la eficiencia del sistema. La asignación del valor de la potencia se obtuvo realizando varias simulaciones, en las que se iba reduciendo la potencia hasta llegar a un punto en el que las prestaciones fueron óptimas y se redujeran al mínimo la interferencias con las demás estaciones base, en el estudio de multicobertura se comprobará el efecto de esta baja interferencia de la estación base implementada (estación base sur), con una estación base adicional que se implementará en ese estudio (estación base norte).

La cuarta sección ***"Parámetros LTE"*** se puede visualizar en la figura 84, las variables LTE del sector, son inicialmente configuradas por Xirio por defecto al seleccionar el servicio (tecnología) del estudio, con valores estándar o típicos del tipo de simulación a realizar.



Figura 84: Propiedades del sector (Parámetros LTE).

8.5.1.3. Planificador

El planificador es el algoritmo que se encarga de distribuir los recursos del canal de LTE (frecuencia y tiempo) de forma dinámica entre los distintos usuarios del sistema. Para modificar el algoritmo y otros parámetros se debe oprimir el botón "Ver propiedades", luego se abre la ventana emergente de la figura 85. En Xirio se dispone de tres tipos de algoritmos teóricos de planificador para realizar los cálculos de capacidad; Proportional Fair (PF), Maximum Rate (MR), Round Robin (RR). Para los planificadores Proportional Fair y Maximum Rate se definen ganancias tanto para el enlace de subida como para el de bajada.

El planificador RR es equitativo, pero asigna de manera estática los recursos, por lo tanto, es el menos eficiente y ofrece un throughput más bajo que el PF y el MR, Xirio considera este planificador como el básico "planificador base", por lo cual, no se le asigna una ganancia. El resto de planificadores son más eficientes y mediante las ganancias configurables se indica que tan buenos son con respecto al RR.

El planificador puede hacer uso de curvas de eficiencia espectral definidas en el terminal de usuario o en el mismo planificador.

- **Curvas de eficiencia espectral definidas en el terminal de usuario:** Este botón de chequeo es el que Xirio tiene seleccionado de manera predefinida, este parámetro indica que el comportamiento

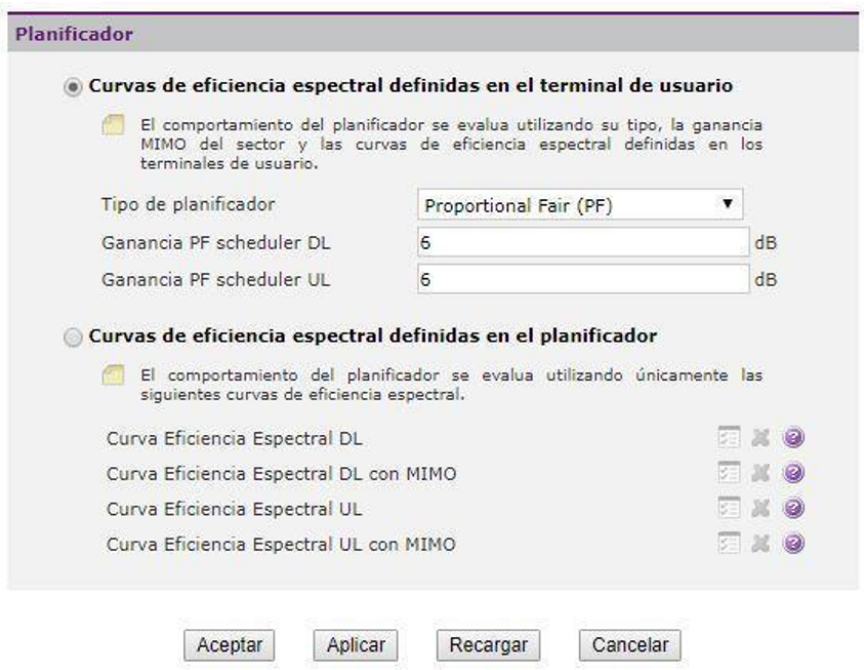


Figura 85: Propiedades del planificador.

del planificador se evalúa a partir del tipo de planificador, la ganancia del enlace de subida y bajada, la configuración MIMO del sector (parámetros LTE del sector) y las curvas de eficiencia espectral definidas en los terminales de usuario (parámetros LTE del terminal móvil).

- **Curvas de eficiencia espectral definidas en el planificador:** Por medio de este botón de chequeo, el comportamiento del planificador de LTE se evalúa únicamente por las curvas de eficiencia espectral definidas por el usuario en el planificador. Estas curvas deben incorporar la ganancia del enlace de subida y bajada, derivada de utilizar un determinado planificador y de utilizar una determinada configuración MIMO, en este caso el usuario debe agregar una a una las curvas necesarias para el planificador, las curvas de eficiencia espectral que se pueden definir en el planificador son:
  - Curva de eficiencia espectral DL
  - Curva de eficiencia espectral DL con MIMO
  - Curva de eficiencia espectral UL
  - Curva de eficiencia espectral UL con MIMO

8.5.1.3.1. Curva de eficiencia espectral

La ventana emergente que se despliega para definir los parámetros de las curvas anteriores se muestra en la figura 86.

Estas curvas relacionan la tasa binaria requerida con el ancho de banda necesario para una determinada relación SINR. Los parámetros a modificar en estas curvas se definen a continuación:

- **Curvas por defecto:** En Xirio existen una serie de curvas definidas por defecto. Estas curvas consideran diferentes modalidades de MIMO (SIMO, 2x2 CLM1, 2x2 multiplexación espacial) y planificadores de usuarios (RR, FDPS). Al cambiar la curva seleccionada se actualizan automáticamente los parámetros de la curva, las curvas por defecto son:

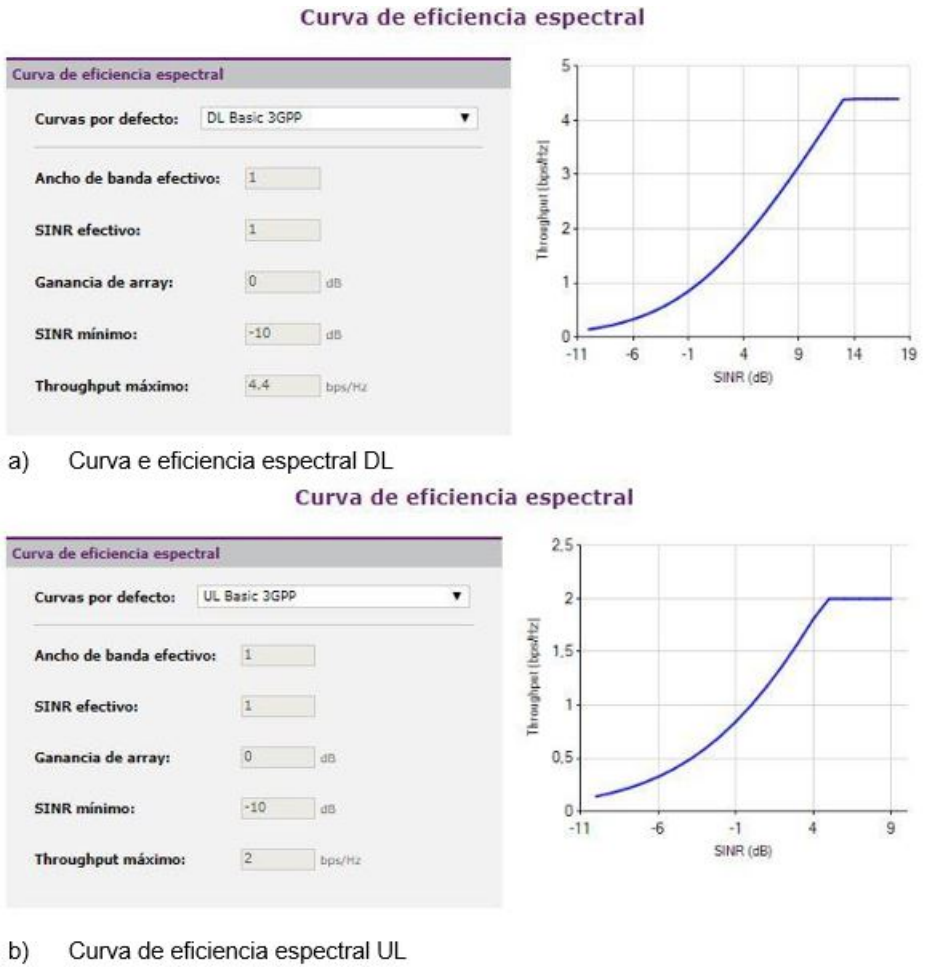


Figura 86: Curvas de eficiencia espectral.

- DL y UL Basic 3GPP
- DL Morgensen SISO RR
- DL Morgensen SISO FDPS
- DL Morgensen SIMO RR
- DL Morgensen SIMO FDPS
- DL Morgensen 2X2 CLM1 RR
- DL Morgensen 2X2 CLM1 FDPS
- DL Morgensen 2X2 Mux Espacial RR

También es posible que el usuario defina sus propios parámetros de configuración.

- **Ancho de banda efectivo:** El ancho de banda efectivo de la curva es un parámetro de las curvas del 3GPP. En principio, representa el porcentaje de los recursos que son destinados a tráfico. En Xirio este valor debería ser 1 (100 %), ya que Xirio hace el cálculo teniendo en cuenta las configuraciones seleccionadas de los parámetros LTE y tiene en cuenta la señalización internamente. Si por ejemplo se configura 0.7, estaríamos indicando a Xirio que considere el 70 % de los recursos sobre su propio cálculo, es decir se estaría desaprovechando un 30 % de los recursos disponibles. En Xirio este valor tiene un rango de 0-1 (0 % - 100 %).

- **SINR efectivo:** El SINR efectivo de la curva es un parámetro de las curvas del 3GPP. Representa el porcentaje de la relación señal a interferencia más ruido que es utilizado en los cálculos finales de Xirio, de la misma manera que sucede en el ancho de banda efectivo. En Xirio este valor tiene un rango de 0-1 (0 % - 100 %).
- **Ganancia (dB):** Parámetro que cuantifica la ganancia obtenida debido a la utilización de esquemas de múltiples antenas (MIMO).
- **SINR mínimo (dB):** Por debajo de este valor de SINR se considera que el throughput que obtendrá el usuario es de 0 bps/Hz.
- **Throughput máximo (bps/Hz):** Máximo throughput que se puede alcanzar con la curva de eficiencia espectral.

Las curvas de eficiencia espectral DL y UL que se pueden ver en la figura 86, utilizan las curvas por defecto DL y UL Basic 3GPP, ya que son las curvas más acordes para el servicio LTE-A, dado que manejan los parámetros estandarizados por el 3GPP, se diferencian en que el throughput del enlace de bajada es mayor, debido a que los prestadores del servicio normalmente asignan más recursos al enlace de bajada, porque los usuarios exigen mayores prestaciones para este enlace en casi la totalidad de las ocasiones, debido a que necesitan mayores recursos para los servicios que utilizan o consumen.

Para nuestro caso se dejaron las curvas de eficiencia espectral definidas en el terminal de usuario, ya que Xirio asigna unas curvas adecuadas para el servicio seleccionado (LTE-A), el tipo de planificador que se seleccionó fue el Propotional Fair (PF), debido a que el Round Robin (RR) asigna el canal durante el mismo tiempo para todos los usuarios y por ende no tiene en cuenta las condiciones del canal, por ello, no es el algoritmo más eficiente, el Maximum Rate (MR) es un algoritmo muy eficiente, ya que los usuarios que experimenten las mejores condiciones del canal serán los que se les asignen los recursos, pero no es muy justo, debido a que siempre serán los usuarios que se encuentren más cerca a la estación base a los que se les asigne la mayoría de recursos, por lo tanto, los usuarios del borde se les asignan muy pocos recursos con este algoritmo, por el contrario el Proportional Fair (PF), aunque no tiene la eficiencia más alta, reparte los recursos de una manera más justa, ya que evalúa la tasa de transmisión de cada usuario y con este valor asigna más o menos recursos a estos, buscando que esta tasa de transmisión sea equilibrada respecto a la que experimentan los demás usuarios. Los valores de ganancia asignados para el enlace de subida y bajada fueron de 6 dB, valores comunes para el servicio LTE-A.

De nuevo en la ventana ***"Propiedades del sector"***, sección ***"Parámetros LTE"*** (figura 84), en la subsección ***"Configuración IoT"***, se debe indicar si el servicio móvil va a hacer uso de la tecnología IoT, Xirio maneja tres opciones para este parámetro; No, LTE-M y NB-LTE, estos parámetros se explican a continuación:

- **LTE-M:** El estándar LTE-M (Long Term Evolution for Machines), es una tecnología LPWA (Low Power Wide Area), desarrollada para aplicaciones IoT que hace uso de la red existente de LTE, por lo tanto, aprovecha ventajas de las redes 4G, como la seguridad o la privacidad de la información.

  Se trata de un protocolo para comunicaciones celulares de ancho de banda estrecho que conecta a Internet dispositivos de baja complejidad que transmiten pequeñas cantidades de datos en largos periodos de tiempo, con un bajo consumo de energía. LTE-M es una tecnología complementaria y puede ser fácilmente implementada en los dispositivos 2G, 3G y 4G actuales [47].

- **NB-LTE:** El estándar NB-LTE (Narrow Band Long Term Evolution), es una tecnología LPWA (Low Power Wide Area), desarrollada específicamente para aplicaciones IoT, hace uso de la red existente de LTE, pero limita el ancho de banda a una única banda estrecha de 180 kHz, es un protocolo de comunicaciones de banda estrecha que se centra específicamente en la cobertura en interiores, bajo costo de los dispositivos, bajo consumo de energía y alta densidad de conexión, además se puede desplegar en espectros de frecuencias diferentes [48].

En la figura 87 se pueden ver la comparación entre estos dos estándares de IoT soportados por la tecnología LTE.



Figura 87: Comparación NB-IoT vs LTE-M [48].

En la subsección "Configuración ICIC", el primer parámetro que se debe asignar es el tipo de ICIC de red, dependiendo de esta elección se habilitan o deshabilitan otros parámetros, los tipos de ICIC de red son:

- **Estático:** Los recursos utilizados por cada célula son prefijados, los parámetros a configurar para el tipo ICIC estático se pueden observar en la figura 88.

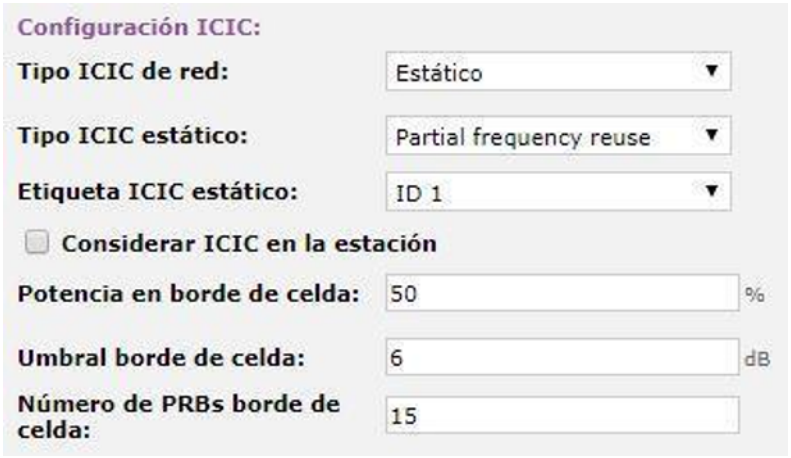


Figura 88: Configuración ICIC estático.

- **Tipo ICIC estático:** En Xirio se dispone de cuatro esquemas de reutilización de frecuencias en función de la ubicación de los usuarios en el centro o en el borde de la celda, los cuales son:
  - Reutilización de factor 1 (Frequency Reuse of 1, FR1).
  - Reutilización de factor 3 (Frequency Reuse of 3, FR3).

    - Reutilización parcial de frecuencias (Partial Frequency Reuse, PFR).
    - Reutilización soft de frecuencias (Soft Frequency Reuse, SFR).
- **Etiqueta ICIC estático:** La etiqueta ICIC estática define el grupo de recursos que una estación base dedica a los usuarios en el borde de la celda, de este modo dos estaciones que comparten la misma etiqueta de ICIC estático dedican los mismos recursos a estos usuarios. Este parámetro sólo es configurable para los esquemas FR3, PFR y SFR.

  Cuando se están simulando estaciones sectoriales cada uno de los sectores deberá utilizar una etiqueta de ICIC estático diferente. De este modo se consigue mitigar el efecto de la interferencia intercelular.

  En el caso de FR3 esta etiqueta diferencia el espectro de frecuencias que utilizará cada sector, para el PFR la etiqueta indica el respectivo espectro de frecuencias del borde de la celda para cada sector y su respectiva potencia, la cual es mayor a la utilizada en el centro de la celda, además indica la potencia y la banda de frecuencias que es utilizada en el centro de la celda, que es la misma utilizada en todos los sectores, por último, para el SFR esta etiqueta identifica el espectro de frecuencias que utiliza el borde de la celda para cada sector y la potencia que se utiliza, la cual puede ser diferente, para el centro de la celda identifica la banda de frecuencias restante, usada en cada sector y la respectiva potencia, en este caso la potencia es la misma para todos los sectores.

  Este cálculo está especialmente optimizado para estaciones base formadas por tres sectores. Si se trata de estaciones compuestas por un único sector es aconsejable procurar en la medida de lo posible que células adyacentes tengan etiquetas diferentes.
- **Considerar ICIC en la estación:** Este cuadro de chequeo indica si se debe realizar coordinación de interferencia en la misma estación base. Este parámetro también se dispone en el tipo ICIC de red dinámico. Si está activo, las señales provenientes de sectores pertenecientes a la misma estación que el mejor servidor no se considerarán interferentes en el resultado de cálculo de interferencias. En el caso del cálculo de capacidad, además de estar marcado el check, las señales recibidas que no sean del mejor servidor han de estar dentro del margen (en dB, indicado por el umbral de borde de celda) respecto a la señal del mejor servidor para que no se consideren interferentes. De esta esta manera Xirio identifica qué señales son de la misma estación, para considerar que no son señales interferentes.
- **Potencia en borde de celda [%]:** Este parámetro establece el porcentaje de potencia dedicada a los recursos destinados a los usuarios ubicados en el borde la celda. Este parámetro sólo es configurable para los esquemas PFR y SFR, en los cuales, para el rango de frecuencias seleccionado para el borde de la celda, se radia con mayor potencia, específicamente se radia el porcentaje seleccionado por el usuario de la potencia máxima que puede emitir la estación base.
- **Umbral borde de celda [dB]:** Determina si un usuario se encuentra en el centro o en el borde de la celda. Cuando el nivel de señal deseada respecto a la interferente es mayor que este valor se considera que el usuario se encuentra en el centro de la celda. En caso contrario se encuentra en el borde. Este parámetro sólo es configurable para los esquemas PFR y SFR.
- **Número de PRB's borde de celda:** Este parámetro indica la cantidad de PRBs (Phisical Radio Blocks) reservados para el borde de la celda, solo es configurable para el esquema PFR. El PRF al igual que los otros tres esquemas de reutilización de frecuencias utilizados, considera únicamente 3 sectores por lo que este parámetro deberá ser múltiplo de 3. Se debe tener en cuenta que según la canalización se tiene un número específico de PRB's, como se puede observar en la tabla 1.

- **Dinámico:** Los recursos utilizados por cada célula se evalúan dinámicamente para mejorar la interferencia intercelular.

- **Eficiencia ICIC dinámico (%):** En lugar de una gestión estática de los recursos es posible que está se haga de forma totalmente dinámica. Esto supone una mejora de la interferencia intercelular presente en las comunicaciones. La eficiencia de ICIC dinámico define esta reducción de la interferencia tomando valores desde el 0 % (no hay coordinación de interferencia), lo que significa que toda la señal se considera interferente, hasta el 100 % hay coordinación perfecta de la interferencia, por lo tanto, se elimina toda la interferencia existente.

Para la realización de esta simulación se seleccionó el "Tipo ICIC de red" dinámico, ya que esto implica que los recursos se evalúan en tiempo real, lo que permite mejorar la interferencia, la "Eficiencia ICIC dinámica" se configuró en un 50 %, por lo cual, la evaluación que realiza este parámetro va a ser equilibrada respecto a señales que se considerarán interferentes y las que no, por último, sí se "Consideró ICIC en la estación", para que de esta manera Xirio identifique qué señales son de la misma estación y no las considerare señales interferentes.

En la subsección ***"Parámetros Downlink"*** que se observa en la figura 84, los parámetros a modificar son:

- **Configuración Pb:** En LTE se puede asignar mayor potencia a ciertos recursos, típicamente a las señales de referencia (RS). Para ello se utiliza el concepto de offset de potencia, que establece una relación entre la potencia de los recursos que se transmiten por medio del canal PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) símbolos con señales de referencia (RS) y la potencia de los recursos que se transmiten por medio del canal PDSCH símbolos sin señales de referencia (RS).

Configuración	P_a/P_b	
	1 antena	2 o 4 antenas
0	1	5/4
1	4/5	1
2	3/5	3/4
3	2/5	1/2

Tabla 5: Configuración P_b

- **Pa [dB]:** Es la relación de potencia en dB utilizada en la transmisión de símbolos en instantes de tiempo donde no se transmiten señales de referencia (RS), por medio del canal PDSCH (Physical Downlink Shared Channel) con respecto a la potencia de un recurso elemental RS.
- **Número de símbolos PDCCH:** Indica el número de símbolos dedicados al canal de control por subtrama (la subtrama está compuesta por dos ranuras temporales "slots"). Para las canalizaciones de 3 MHz a 20 MHz puede tomar los valores 1, 2 o 3 de un máximo de 14 símbolos. Para la canalización de 1.4 MHz puede tomar valores de 2, 3 o 4 de un máximo de 14 símbolos.
- **MIMO DL:** Permite activar o desactivar la utilización de MIMO en el sentido descendente (downlink-descarga). En Xirio están disponibles las opciones de MIMO de 2x2 (2 antenas transmisoras – 2 antenas receptoras), 4x2, 4x4, y 8x8 en caso de LTE-A. El uso de este tipo de técnicas permite la obtención de tasas de transmisión de datos muy altas, mediante la utilización de múltiples canales en paralelo.
- **Ganancia MIMO DL:** Este parámetro cuantifica la ganancia obtenida en el caso de utilizar técnicas de MIMO en el sentido descendente, el usuario debe ingresar de manera manual dicho valor según el tipo de MIMO que utilice.
- **Considerar ganancia por diversidad de antena:** Este cuadro de chequeo indica si se incluye o no la ganancia por diversidad de antena atendiendo a la configuración MIMO seleccionada en el parámetro MIMO DL.

- **Carga de tráfico [%]:** Define el porcentaje utilizado del total de los recursos disponibles en el sector. Sirve para modelar el efecto de la interferencia intercelular producido entre las estaciones. En Xirio se ofrecen resultados para tres escenarios de estudio:
  - Estaciones sin carga (0 %).
  - Estaciones con carga definida por el usuario.
  - Estaciones a plena carga (100 %).

Para el cálculo de la interferencia SINR Xirio utiliza este parámetro. Si el usuario no dispone de estimaciones de este valor es recomendable configurarlo al 100 % para situarse en el peor de los casos. Tras la realización de un cálculo de capacidad el usuario obtendrá valores de carga de tráfico que permitirán realimentar el cálculo de interferencia SINR y obtener una mancha definitiva de cobertura.

En esta subsección ***"Parámetros Downlink"*** (figura 84), se seleccionó en el parámetro "Configuración Pb", la configuración 1, debido a que al utilizar 2 o más antenas (MIMO), la relación entre la potencia para símbolos que no transmiten señales de referencia (Pa) y la potencia para símbolos que transmiten señales de referencia (Pb) es 1, con esto lo que se busca es que exista un equilibrio, porque de esta manera se está utilizando el mismo nivel de potencia para transmitir señales de referencia y señales que no son de referencia, además este es uno de los parámetros preestablecidos de Xirio, lo que indica que es un valor estándar o típico para este servicio, se asignó en "Pa" un valor de 0 dB, porque se asume que la potencia del PDSCH con símbolos sin señal de referencia (RS) es igual a la potencia de RS propiamente dicha, el "Número de símbolos PDCCH" se establece como 1, debido a que la configuración de los parámetros para este estudio radioeléctrico se han configurado buscando que el enlace tenga condiciones óptimas de funcionamiento, por lo tanto, no se hace necesario manejar más símbolos de control, en cambio, se pueden utilizar más símbolos para mejorar las prestaciones del servicio, para este servicio se utilizó una configuración "MIMO DL" de 2 X 2, debido a que la mayoría de los dispositivos móviles que actualmente soportan MIMO solo manejan 2 antenas, por el momento, y en el caso de nuestra estación base se manejaron solo 2, debido a que esta estación base va a dar cobertura a una zona pequeña, por lo que la puesta en marcha de 4 o 8 antenas en una implementación real sería un costo que probablemente no brinde las ganancias económicas necesarias, la "Ganancia MIMO DL" se dejó en el valor por defecto de Xirio de 1.48, debido a que es un valor estándar que brinda resultados adecuados para este servicio, sí se "Consideró la ganancia por diversidad de antena" ya que estamos manejando un MIMO 2 x 2 y en el caso que sea necesario se puede emplear esta técnica de transmisión, lo que genera mejoras en el rendimiento de la red móvil, siguiendo el consejo que nos brinda el manual de Xirio en el que se indica que si no conocemos un valor para el porcentaje de "Carga de tráfico" manejemos el peor escenario posible, por lo tanto, se escogió una carga de 100 %, con esto se conocerá cual es el límite de carga de tráfico que tiene la red móvil y de esta manera conocer si será posible prestar un servicio óptimo en la zona.

En la sección ***"Parámetros Uplink"*** que se puede observar en la figura 84, los parámetros a modificar son:

- **Incremento de ruido [dB]:** Este parámetro cuantifica la interferencia que recibe la estación base en el sentido ascendente, es un factor que representa las posibles interferencias recibidas en la estación base por parte del resto de terminales presentes en el escenario simulado.
- **P0 (control de potencia) [dBm]:** La potencia transmitida por el terminal móvil se limita, debido a un mecanismo de control de potencia, a un valor de $P_0 + \alpha * PL_{DL}$, donde PL_{DL} son las pérdidas en el trayecto, α es el factor de compensación de estas pérdidas y P_0 es la potencia deseada en la estación base que se obtiene a partir de la SINR objetivo definida por el usuario, por lo tanto, se obtiene:

$$P_0 - PL_{DL} + (\alpha * PL_{DL}) = P_0 \quad cuando\ \alpha = 1 \tag{4}$$

- **Alpha (control de potencia):** Es el factor de compensación de las pérdidas en el trayecto $PL - DL$.
- **Factor de ruido [dB]:** El factor de ruido del sector es la magnitud del ruido generado por un dispositivo electrónico u óptico, este factor indica la degradación de la relación señal/ruido provocada

por el dispositivo. En otras palabras, se define como el cociente entre la S/N (relación señal/ruido) a la entrada de un dispositivo y la S/N a la salida del mismo, y nos da una indicación de cuánto se degrada la misma:

$$F = \frac{\frac{S}{N}in}{\frac{S}{N}out} \tag{5}$$

La figura de ruido (NF) es simplemente el factor de ruido en unidades logarítmicas:

$$NF = 10\ Log(F)\ [dB] \tag{6}$$

En otras palabras, este valor nos indica cuanto se degrada en dB una señal, por el hecho de "atravesar" el dispositivo receptor. En la práctica, es una cantidad en dB que se suma al ruido de Johnson-Nyquist o térmico, de modo que:

$$Pnoise\ [dBm] = -174 + 10\ Log10(f(Hz)) + Factor\ de\ ruido \tag{7}$$

- **MIMO UL:** Permite activar o desactivar la utilización de MIMO en el sentido ascendente (uplink) en el caso de LTE-A. En Xirio están disponibles las opciones de MIMO de 1x2 (1 antena transmisora – 2 antenas receptoras), 1x4, 1x8, 2x2, 2x4, 2x8, 4x4, y 4x8.

  Se debe tener en cuenta que la cantidad de antenas transmisoras y receptoras realmente se configuran en el parámetro MIMO DL. En este parámetro MIMO UL, se configura la cantidad de antenas transmisoras, que el terminal móvil usará en el enlace de subida, de las definidas en el parámetro MIMO DL.

  El uso de este tipo de técnicas permite la obtención de altas tasas de datos en el sentido ascendente.

- **Ganancia MIMO UL:** Este parámetro cuantifica la ganancia obtenida en el caso de utilizar técnicas de MIMO en el sentido ascendente para el caso de LTE-A, el usuario debe ingresar de manera manual dicho valor según el tipo de MIMO que utilice.

NOTA: Las ganancias MIMO DL y MIMO UL sólo son efectivas cuando se utilizan las curvas de eficiencia espectral definidas en el terminal de usuario (configuración dentro del scheduler) y son ganancias totales. Si la eficiencia viene definida en unas curvas que son del terminal, el usuario debe indicar qué ganancia se obtiene por utilizar MIMO en el planificador. Con estos parámetros MIMO DL y MIMO UL se configuran esas ganancias. Estos son valores configurables que, por defecto, Xirio les asigna un valor de 1.48, aunque su valor no varía cuando cambia el valor de MIMO (2x2, 4x4, etc.) internamente estos valores sí se tienen en cuenta para calcular la señalización y el ancho de banda efectivo en los cálculos. Por lo tanto, esta ganancia MIMO debería ser configurada por el usuario en función de sus necesidades y del arreglo MIMO utilizado.

En esta subsección ***"Parámetros Uplink"*** se asigno un valor de 3 dB predefinido por Xirio para el parámetro "Incremento de ruido", para el "P0" (potencia deseada en la estación base) el valor asignado fue de -90 dBm el cual es un valor óptimo de potencia para el servicio que se seleccionó, a "Alpha" se le asignó un valor de 1, ya que este parámetro indica cuánto se va a compensar de las pérdidas del trayecto, un valor menor a 1 implica que no se compensen todas las pérdidas y por ende que la potencia transmitida hacía la estación base no sea la que realmente se reciba, al "Factor de ruido" de la estación base se le asignó un valor de 2 dB que es un valor común para este tipo de servicio móvil según las recomendaciones de Xirio, en el parámetro "MIMO UL" se seleccionó MIMO 2 X 2 y una "Ganancia MIMO UL" de 1.48 al igual que en los ***"Parámetros Downlink"***, para los parámetros MIMO DL y ganancia MIMO DL.

8.5.2. Propiedades del terminal

La ventana emergente del terminal ***"Propiedades del terminal"***, que se despliega al presionar "Crear nuevo terminal" se puede ver en la figura 89 y 90. Para esta ventana en la sección ***"Emplazamiento"***, subsección ***"Coordenadas"*** se ingresaron las coordenadas de "Latitud" y "Longitud" de la Universidad Distrital.

Los parámetros de la sección ***"Parámetros de radio"*** se pueden observar en la figura 90.



Figura 89: Propiedades del terminal (Terminal y Emplazamiento).



Figura 90: Propiedades del terminal (Parámetros de radio y Parámetros LTE).

8.5.2.1. Antena del terminal

La ventana emergente en la que se configuran los parámetros de la antena del terminal se muestra en la figura 91, su configuración es la misma que tiene la antena del sector.



Figura 91: Propiedades de la antena del terminal.

8.5.2.1.1. Diagramas del terminal

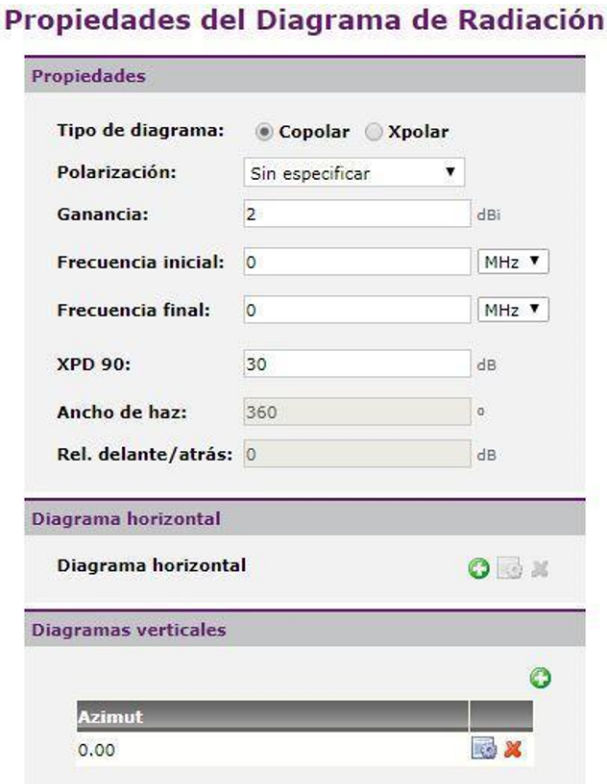


Figura 92: Propiedades del diagrama de radiación del terminal.

Las ventanas de configuración del diagrama de radiación se pueden observar en las figuras 92 y 93, la "Polarización" se configuro en la opción "sin especificar", para que cualquier tipo de polarización sea válido, la antena del terminal no tiene diagrama de radiación horizontal, debido a que en este plano tiene radiación omnidireccional, ya que la estación móvil con respecto a la estación base puede estar en diferentes lugares, el terminal móvil necesita recibir la radiación de la estación base proveniente desde cualquier lugar en el plano horizontal, por lo tanto, siempre la antena del terminal móvil en el plano horizontal tiene radiación omnidireccional.

1. **Diagrama Vertical**

   A continuación, se observa el diagrama de radiación del terminal móvil.

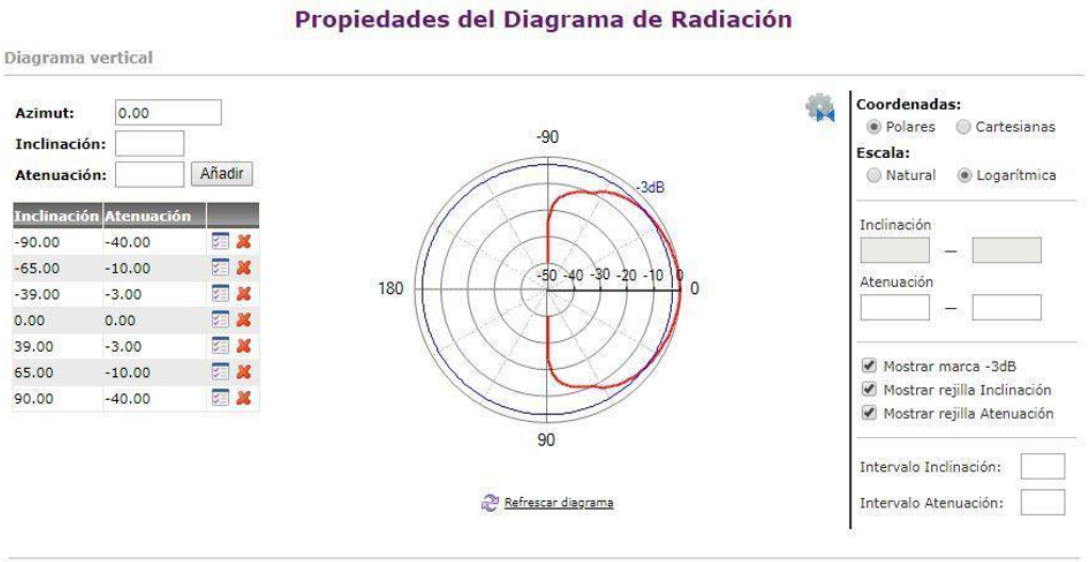


Figura 93: Propiedades del diagrama de radiación del terminal (Vertical).

De regreso en la ventana ***"Propiedades del terminal"***, subsección ***"Parámetros de radio"*** (figura 90), la "Antena" seleccionada es una antena preestablecida (3G/4G Antenna 2 dBi Omni) por Xirio, que por defecto tiene configurados todos los parámetros estándar y más comunes para antenas de dispositivos móviles que hacen uso de este servicio móvil (LTE-A), la "Altura" que se le asignó fue de 1,5 m, debido a que la altura promedio aproximada de los hombres en Colombia es de 1,68 m y de las mujeres 1,56 m, por tanto en promedio sería de 1,62 m, teniendo en cuenta que un dispositivo móvil utilizado de manera común, se usa a una altura máxima determinada por el oído del usuario, lo que implica que se le debe restar a los 1,62 m aproximadamente 10 cm, que es la distancia entre la parte superior de la cabeza y el oído, por lo tanto, se obtiene redondeando una altura de la antena de 1,5 m, con respecto a la información brindada por Xirio, un dispositivo terminal maneja unas "Pérdidas por pasivos" de 3 dB en promedio, la "Potencia de transmisión" preestablecida por Xirio es 23 dBm, sin embargo, se pasó a vatios, obteniendo el valor de 0,1995262315 W y se aproximó a 0,2 W, para que la comparación entre potencias sea más fácil.

En la sección ***"Parámetros LTE"*** se debe tener en cuenta la definición del siguiente parámetro:

- **RSRP threshold [dBm]:** Potencia umbral recibida de la señal de referencia (RSRP), el RSRP umbral indica la potencia necesaria en recepción para la señal RSRP, el rango de valores de señal RSRP que el terminal puede reportar al sector varía desde -140 dBm a 44 dBm.

Los parámetros LTE seleccionados fueron; 7 dB para el "Factor de ruido" del dispositivo móvil, el uso de tecnología MIMO y por último el valor de la señal de referencia "RSRP threshold" de -112, dichos valores corresponden a los parámetros estándar para el servicio LTE-A establecidos por Xirio.

8.6. Parámetros de cálculo

Ubicados en la ventana ***"Propiedades del estudio de Enlace"***, sección ***"Parámetros de cálculo"*** (figura 70), se selecciona y configura el método de cálculo del estudio radioeléctrico.

8.6.1. Método de cálculo

La ventana emergente del ***"Método de cálculo"*** que se despliega, se puede ver en la figura 94.

Para el servicio LTE-Advance, es posible hacer uso de varios métodos de cálculo disponibles en Xirio para servicios móviles, la selección del método se realizó teniendo en cuenta que no todos los métodos de cálculo posibles manejan una gama de frecuencias alta, por lo tanto, no era posible utilizarlos para la banda de frecuencias escogida para realizar este proyecto (2500 MHz – 2800 MHz), definida para los servicios LTE-A y 5G Non Stand Alone, y mucho menos para las bandas 5G que serán utilizadas en Colombia como lo indica la ANE (Agencia Nacional del Espectro) [53]:

- **Bandas Bajas (frecuencias inferiores a 1 GHZ)**
  - Banda 600 MHz
  - Banda 700 MHz
- **Bandas Medias (frecuencias en el rango de 1 GHz a 6 GHz)**
  - Banda 3.4 GHz
  - Banda 3.5 GHz
  - Banda 3.6 GHz
- **Bandas Altas (frecuencias mayores a 6 GHz)**
  - 24.25 GHz – 27.5 GHz
  - 26.5 GHz – 29.5 GHz
  - 31.8 GHz – 33.4 GHz
  - 37 GHz – 43.5 GHz
  - 45.5 GHz – 50.2 GHz
  - 50.4 GHz – 52.6 GHz
  - 66 GHz – 76 GHz
  - 81 GHz – 86 GHz

Las bandas mencionadas anteriormente se alejan más de los límites de algunos métodos de cálculo. También se tuvo en cuenta que algunos métodos de cálculo necesitan del uso de cartografía MDE, cartografía con la cual no se dispone, por último, otra característica que agregó valor en la elección del "Método de cálculo" llamado "Nuevo Met526_13", es que este método de cálculo maneja varios procedimientos para el cálculo de pérdidas por difracción.

Como se puede observar en la figura 94, la "Resolución" que se seleccionó es de 100 m/pixel, esta es la resolución que nos brinda la capa cartográfica MDT adquirida por la universidad, para este conjunto de simulaciones no se hizo uso del botón de chequeo "Limitar la distancia máxima del cálculo", debido a que se limitará el área en la sección "Área del Cálculo" (figura 98), para los parámetros "Factor K", "Margen de desvanecimiento [dB]", "Permitividad relativa", y "Conductividad [S/m]", se utilizaron los valores predefinidos que Xirio selecciona para este tipo de servicio, para mayor información acerca de los cálculos ver la información en la ***"Recomendación ITU-R P.526-13"*** [49]. La "Penetración en edificios" no se tubo en cuenta para este conjunto de simulaciones, por lo tanto, se seleccionó en el botón de chequeo "No aplicar" (figura 95).

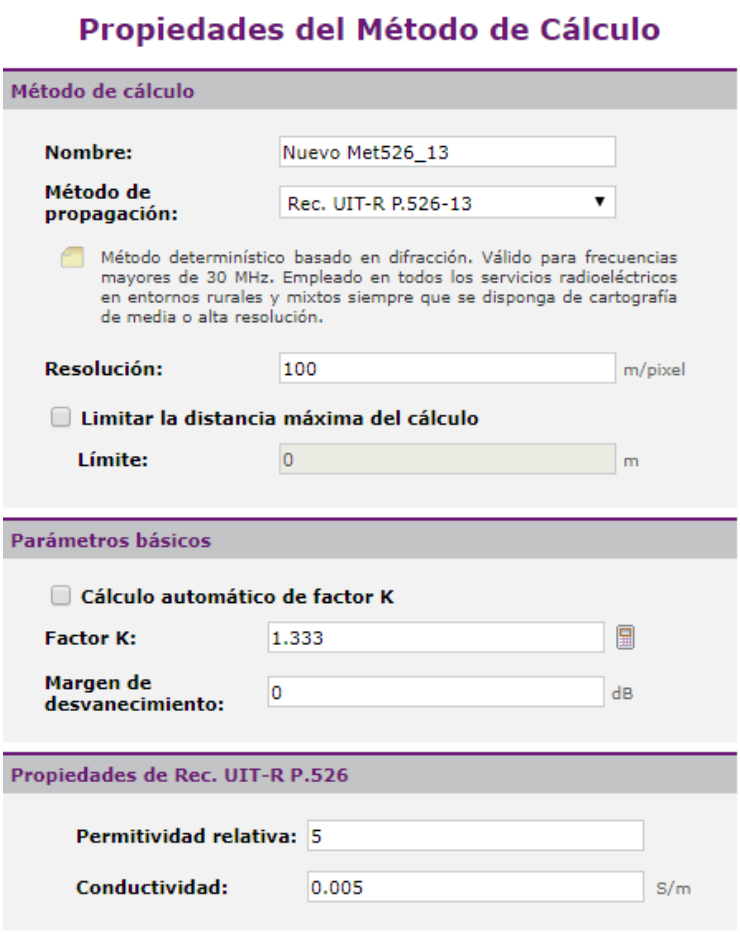


Figura 94: Propiedades del método de cálculo (Método de cálculo, Parámetros básicos y Propiedades de Rec. UIT-R P.526).

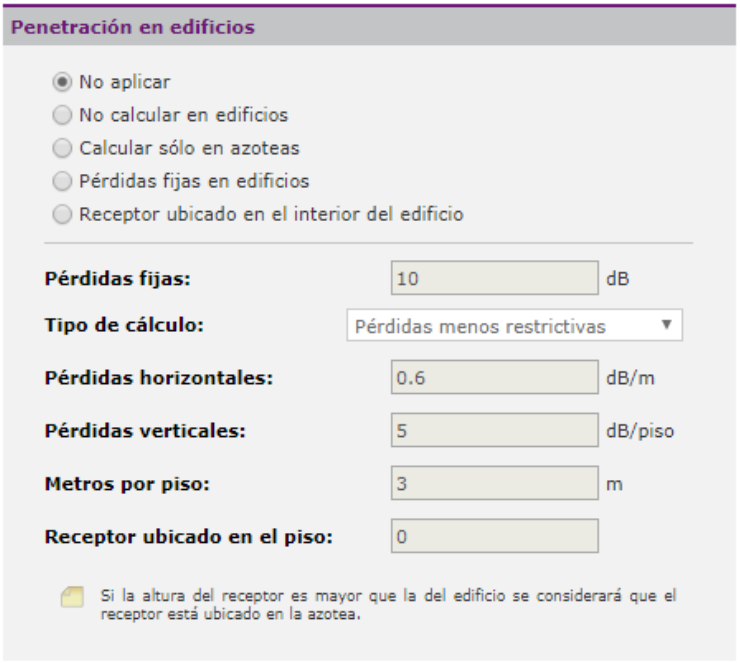


Figura 95: Propiedades del método de cálculo (Penetración en edificios).

Por último, en la ventana ***"Propiedades del estudio de Enlace"***, sección ***"Parámetros de cálculo"*** (figura 70), se selecciona y configura la capa cartográfica del estudio radioeléctrico.

8.6.2. Capas de cartografía

Es necesario conocer los tipos de cartografía que maneja Xirio, debido a que diferentes parámetros como; método de cálculo, método de propagación, referencia de alturas de antenas, entre otros, dependen y/o pueden ser utilizados si se tiene la cartografía adecuada o solicitada, de lo contrario los resultados no serán precisos. Por otro lado, algunos de los cálculos que se pueden realizar en cada tipo de estudio radioeléctrico también requieren cartografía específica.

En la sección ***"Parámetros de cálculo"***, subsección ***"Capas de cartografía"*** se hace la selección de la capa de cartografía más acorde y de mejor resolución que se tenga del lugar seleccionado para realizar la simulación, en este caso para la localidad de Chapinero en la ciudad de Bogotá, se utilizó la licencia adquirida por la Universidad Distrital, la cual hace uso de la cartografía tipo MDT (Modelo Digital de Terreno) de Colombia del año 2019 con una resolución de 100 metros.

8.7. Estudio Radioeléctrico de cobertura

Para este estudio de cobertura se utilizó la misma estación base (estación base sur) y sus respectivos parámetros configurados en el estudio de enlace, por lo tanto, sólo se mostrarán los cambios, adiciones o parámetros que no se han mencionado antes.

Este estudio representa los valores de la señal transmitida por una estación base, en términos de campo eléctrico o potencia, en todos los puntos dentro del área de cobertura seleccionada por el usuario, teniendo en cuenta el modelo de propagación y las características del transmisor y del receptor elegidos.

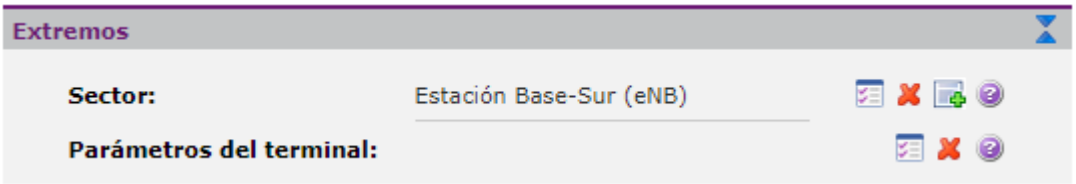


Figura 96: Extremos del estudio radioeléctrico de cobertura.

En la ventana principal ***"Propiedades del estudio de cobertura"***, en la sección ***"Extremos"***, se puede configurar el "Sector" y los "Parámetros del terminal" (figura 96). Los "Parámetros del terminal" se configuran para los dispositivos móviles a los cuales se les brindará cobertura.

En la sección ***"8.5.1 Propiedades del sector"*** se modificó el parámetro "Orientación", debido a que ya no se estaba apuntando a un solo dispositivo móvil, y se necesitaba que el lóbulo principal del diagrama de radiación del sector cubriera la zona a la cual le queríamos brindar cobertura, se realizaron varias simulaciones y se llegó a la conclusión de que una orientación de 53° era adecuada, para brindar cobertura a la zona sur y parte del centro, de la localidad de Chapinero.

En la ventana auxiliar ***"Propiedades de parámetros de recepción del terminal"*** (figura 97), los parámetros son los mismos que se asignaron en el terminal en el estudio de enlace, como se puede observar en ***"8.5.2 Propiedades del terminal"*** (figuras 89 y 90), la diferencia que existe es que en este estudio no se prestará servicio a un único dispositivo móvil, por lo tanto, en esta ventana no está el parámetro de localización y sus respectivas coordenadas, ni tampoco los parámetros de inclinación y orientación porque cada dispositivo móvil tendrá los suyos.

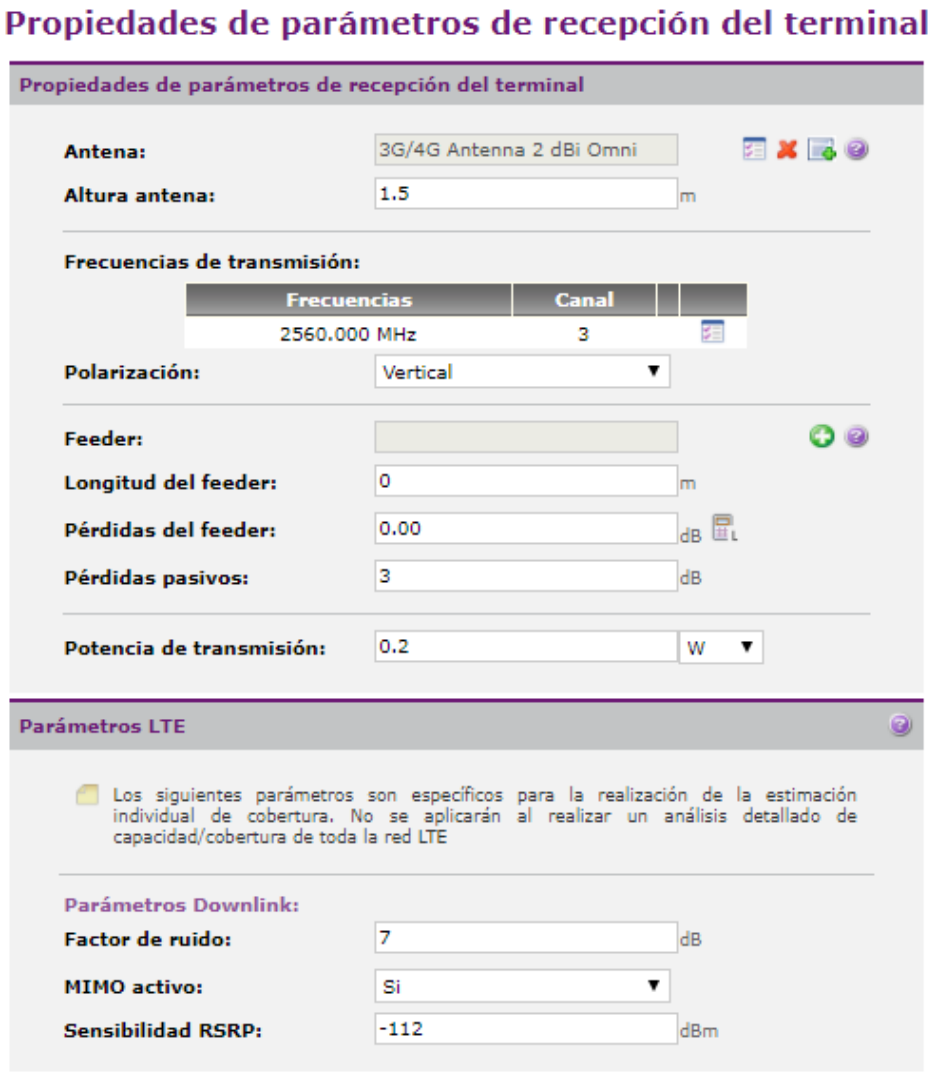


Figura 97: Propiedades de parámetros de recepción del terminal.

8.7.1. Área del cálculo

En la ventana ***"Propiedades del estudio de cobertura"***, aparece otra sección llamada ***"Área del cálculo"*** que se puede ver en la figura 98, en la cual se debe demarcar el área en la cual se va a evaluar la cobertura del servicio móvil, esto se puede hacer de manera manual ingresando la "Latitud" y "Longitud" de los puntos, se puede hacer mediante un "Ajuste automático del área de cálculo" como se puede observar en la figura 99 o se puede hacer "Definiendo el área en el visor" de Xirio, en este caso se realizó demarcando la zona en el visor de Xirio.

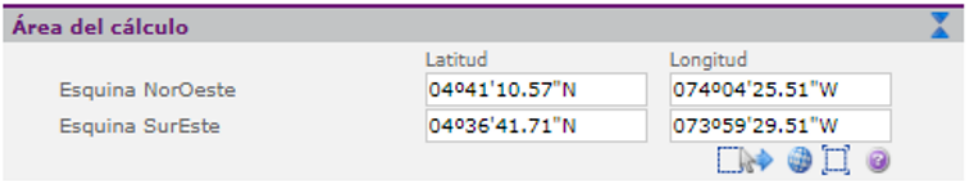


Figura 98: Selección del área de cálculo.

8.7.1.1. Ajuste automático de áreas

La ventana auxiliar ***"Ajuste automático de áreas"*** se puede observar en la figura 99. El ajuste del área de cálculo consiste en una estimación aproximada de la distancia máxima alcanzada por cada transmisor en radios generados cada 10°. Esta estimación se realiza utilizando la cartografía seleccionada en el estudio, utilizando la resolución máxima del cálculo gratuito (RMCG) y el método de cálculo específico de cada estudio.

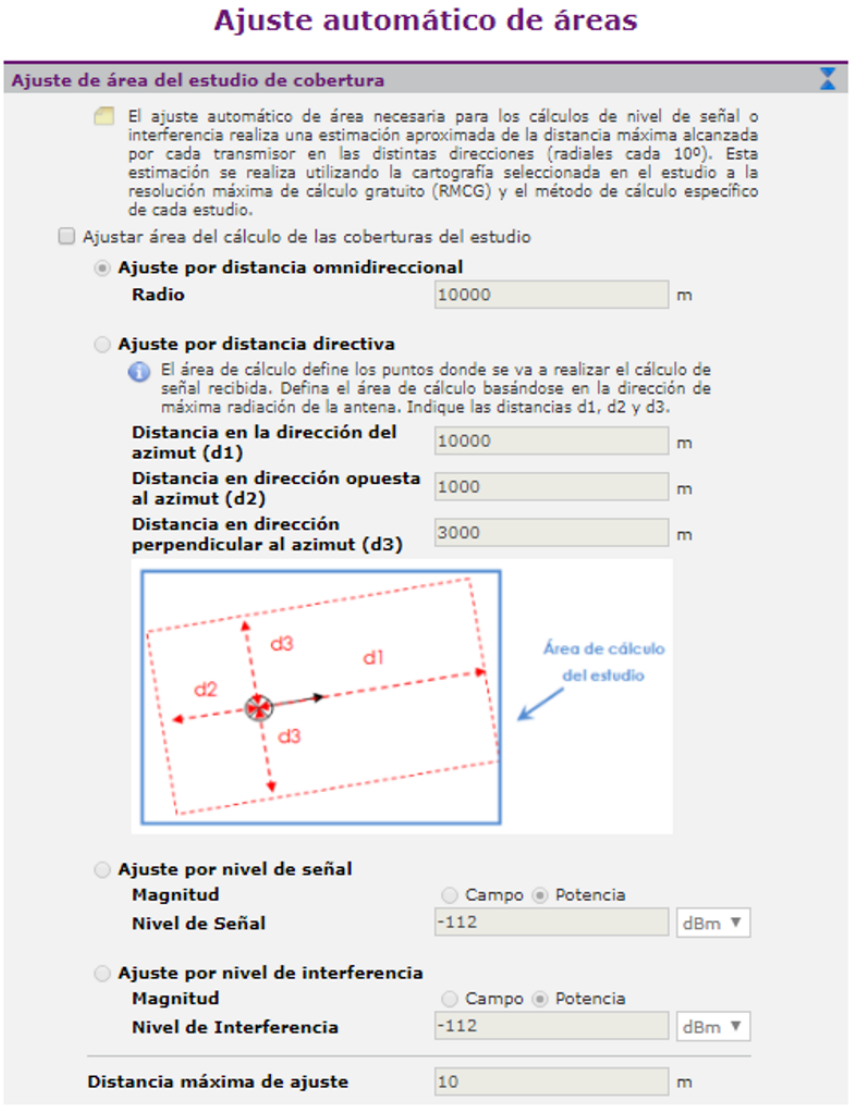


Figura 99: Ajuste automático de áreas.

Se puede optar entre las siguientes opciones de ajuste automático de áreas:

- **Ajuste por distancia omnidireccional:** Permite especificar el radio del área de cobertura.
- **Ajuste por distancia directiva:** Permite ajustar el área de las coberturas en función de las distancias máximas de radiación de la antena, distancias tales como; distancia en la dirección del azimut (d1), es la máxima distancia de radiación del lóbulo frontal, distancia en dirección opuesta al azimut (d2), es

la máxima distancia de radiación del lóbulo posterior, distancia en dirección perpendicular al azimut (d3), es la máxima distancia de radiación de los lóbulos laterales.

- **Ajuste por nivel de señal:** Permite ajustar el área de las coberturas en función del nivel de señal (en campo o potencia) especificado por el usuario. Habitualmente, este valor coincide con el umbral de recepción del receptor. No obstante, teniendo en cuenta que los perfiles se calculan cada 10° es recomendable dejar un margen de error de unos 10 dB a 20 dB, según la tecnología simulada y el entorno orográfico sobre el que se realice la planificación. Es necesario limitar la distancia máxima, por lo tanto, el usuario debe especificar este valor en el parámetro distancia máxima de ajuste.
- **Ajuste por nivel de interferencia:** Permite ajustar el área de las coberturas en función del nivel de señal (en campo o potencia) interferente generada por cada una de ellas. Para asegurar que el área se ajusta a toda la cobertura libre de interferencia, este valor deberá ser al menos la suma del umbral de recepción del transmisor más el valor de la relación de protección cocanal establecida en el factor de rechazo (parámetro de interferencia del estudio de cobertura multitransmisor). Es necesario limitar la distancia máxima, por lo tanto, el usuario debe especificar este valor en el parámetro distancia máxima de ajuste.

Para realizar el ajuste del área del cálculo con alguna de las funcionalidades anteriores, es necesario seleccionar el botón de chequeo "Ajustar área del cálculo de las coberturas del estudio".

8.7.2. Rangos

De nuevo en la ventana ***"Propiedades del estudio de cobertura"***, se encuentra la última sección ***"Rangos"*** (figura 100), en esta ventana se configura una convención, en la cual se relacionan rangos de señal con colores y adicionalmente si el usuario lo desea puede agregar una descripción. En esta sección el usuario puede crear la cantidad de rangos que crea convenientes, asignar sus respectivos colores y cuando sea pertinente agregar descripciones.

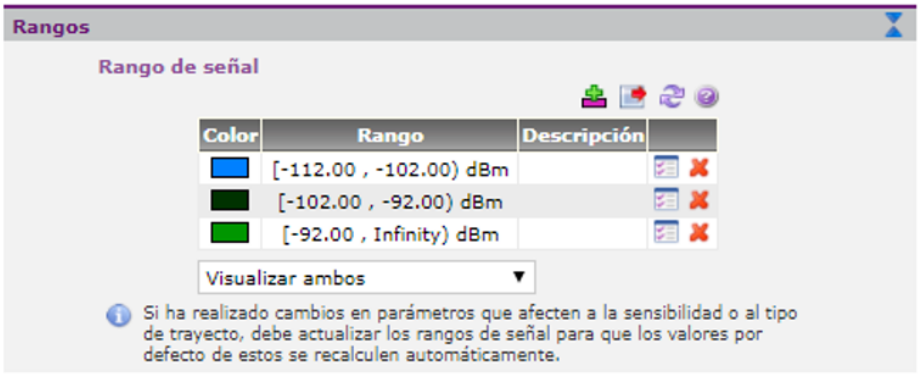


Figura 100: Rangos.

Tener en cuenta la recomendación que realiza Xirio, en la que se indica que al realizar un cambio en los parámetros que afecten a la sensibilidad o al tipo de trayecto, se deben actualizar los rangos, oprimiendo el botón "refrescar rangos". Un parámetro que modifica los rangos de señal, es el RSRP threshold, este es un parámetro de la ventana emergente ***"Propiedades de parámetros de recepción del terminal"*** de la sección ***"Extremos"***.

8.8. Estudio Radioeléctrico de multicobertura

Este estudio consiste en una combinación de estudios de coberturas simples, esto implica que se pueden realizar diferentes estudios de cobertura individuales y luego agregarlos a un único estudio multicobertura, este estudio tiene como finalidad realizar los siguientes tipos de cálculo:

- Cobertura radioeléctrica que alcanza una red de estaciones.
- Estadísticas de superficie y población cubiertos.
- Cálculo de interferencias (relación portadora/interferencia C/I).
- Cálculo de capacidad (sólo servicios LTE).
- Visualización de medidas en ruta.

En el estudio radioeléctrico de multicobertura propuesto, se implementaron dos estaciones base (estación base sur y estación base norte), que tienen por finalidad dar cobertura a la zona urbana de la localidad de Chapinero de la ciudad de Bogotá, debido a que la implementación de una sola estación base para dar cobertura al área definida (localidad de Chapinero) no es suficiente, como se puede ver en los resultados del estudio radioeléctrico de cobertura.

Como se mencionó anteriormente en este estudio se hizo necesario implementar otra estación base (estación base norte), que se encuentra ubicada en el norte de la localidad de Chapinero como se puede ver en la figura 57 b).

La mayoría de parámetros que se deben configurar en la nueva estación base (estación base norte) son los mismos que los de la estación base sur, por lo tanto, se puede utilizar otra funcionalidad de Xirio que se encuentra en el panel de acciones, dicha funcionalidad es "duplicar estudio", la cual hace una copia del estudio de cobertura seleccionado, en este caso, el estudio de cobertura de la estación base sur, los parámetros de este estudio de cobertura ya fueron explicados en los estudios radioeléctricos de enlace y cobertura.

Los cambios que se hicieron a los parámetros de la copia del estudio de cobertura de la estación base sur fueron:

- **Nombre:** Estación Base-Norte (LTE-A).
- **Coordenadas:** Localización de la estación base obtenida de la aplicación Opensignal (figura 57 b)).
  - **Latitud:** 04°40'58.57"N
  - **Longitud:** 074°02'40.93"W
- **Orientación:** Es necesario cambiar la orientación, debido a que la antena está apuntando hacia el norte como se puede ver en la figura 47, debido a que se desea dar cobertura a un área específica, se realizaron varias simulaciones y se llegó a la conclusión de que una buena orientación que se le podía dar a la antena de la estación base norte, era alrededor de 210°.
  - **Orientación del sector:** 210°
- **Frecuencia de transmisión del sector y del terminal:** Las estaciones base contiguas deben manejar diferentes frecuencias de transmisión, con el fin de evitar interferencias, pero se dejaron frecuencias contiguas por si existen interferencias, actúen tecnologías como el ICIC.
  - **Frecuencia:** 2540 MHz
  - **Canal:** 2

La ubicación y cobertura de la estación base norte se pueden observar en la figura 101.

Cuando ya se tienen los estudios de cobertura que se quieren asociar para ampliar la red móvil es posible crear el estudio multicobertura.

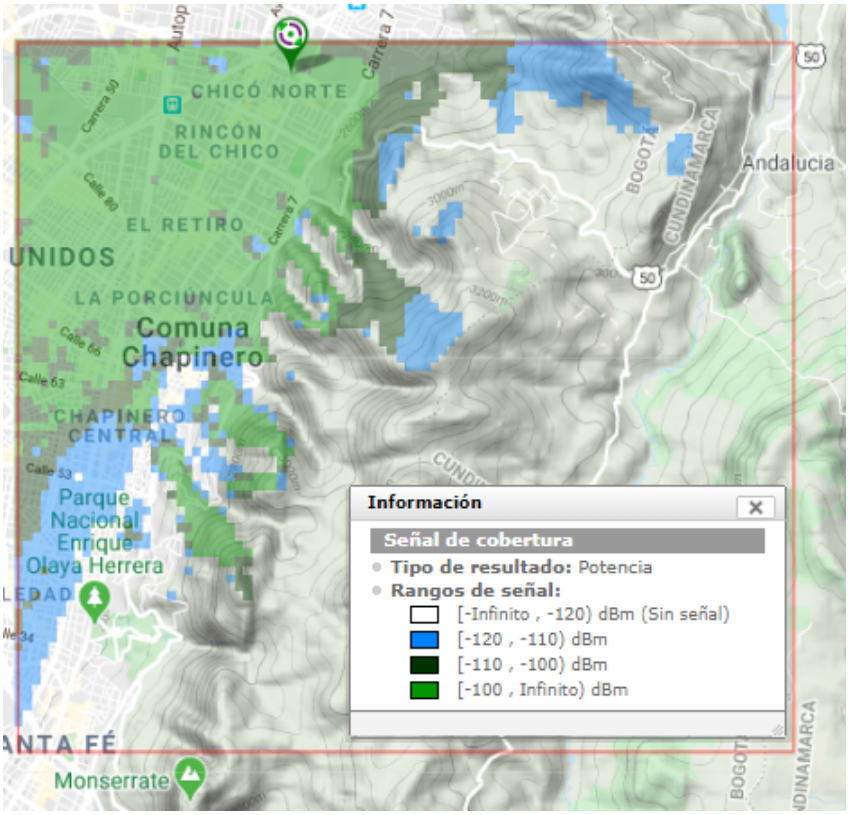


Figura 101: Resultado cobertura estación base-norte.

En la segunda sección ***"Coberturas de red"***, de la ventana ***"Propiedades del estudio de Cobertura Multitransmisor"*** (figura 102), existe la opción de crear las coberturas y la de añadir coberturas existentes, en nuestro caso se añadieron las dos coberturas existentes, que previamente en el documento se explicaron (Estación Base-Sur (LTE-A) y Estación Base-Norte (LTE-A)).



Figura 102: Propiedades del estudio de cobertura multitransmisor.

La ventana auxiliar ***"Añadir coberturas al estudio"***, que se despliega cuando se selecciona la opción

"añade una cobertura existente" se muestra en la figura 103, en esta ventana se puede filtrar por nombre, por área y por última fecha de modificación.

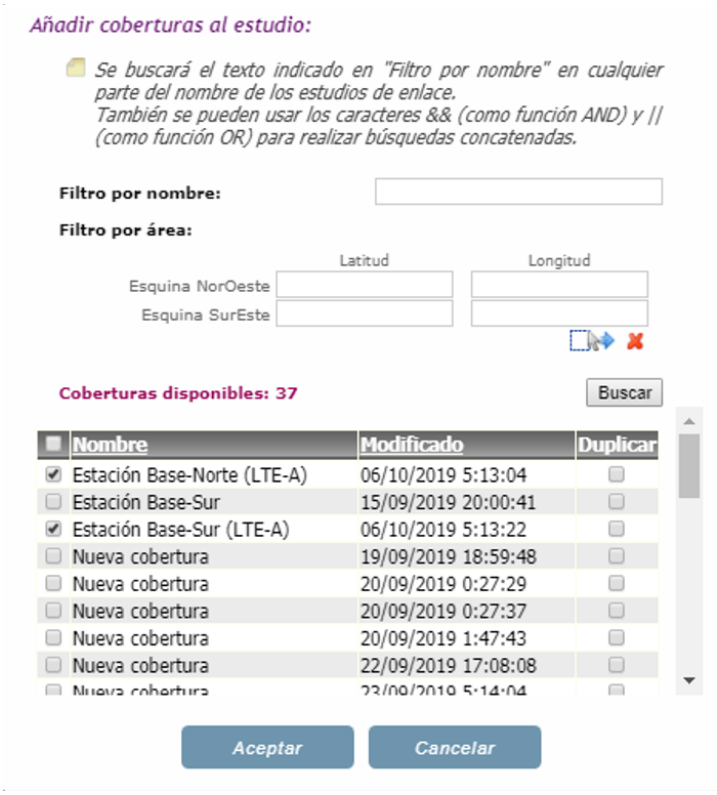


Figura 103: Añadir coberturas al estudio de cobertura multitransmisor.

Al agregar los estudios de cobertura mencionados anteriormente a un estudio de multicobertura, se añaden nuevos parámetros a las propiedades del sector de cada uno de los estudios, como se puede ver en la figura 104.

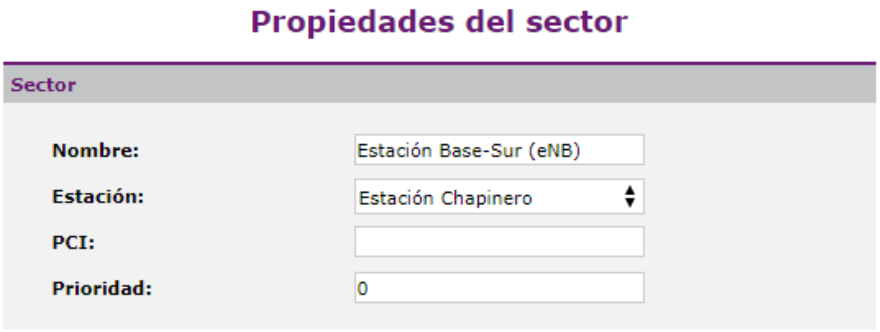


Figura 104: Propiedades del sector en el estudio de cobertura multitransmisor.

Los parámetros que se añaden son:

- **Estación:** Es el nombre y/o número que se le asigna a la estación base, la diferencia que tiene ese parámetro con el de nombre, es que, por ejemplo, se tiene una torre con 3 sectores, cada sector tendría

su estudio de cobertura, cada uno con un transmisor con un nombre distinto, pero los 3 tendrían el mismo valor en el parámetro estación.

- **PCI (Identidad física de la célula):** El PCI (Physical Cell ID) es un identificador de la capa física de una célula, el cual permite que, en el proceso de conexión de un UE a una célula, el terminal pueda identificar unívocamente una señal de referencia específica (RS) de la celda y comenzar así su proceso de conexión, "network attach", handover, entre otros. En la configuración del proceso, se establecerá tal como establece el 3GPP un rango de IDs para los PCIs de 0 a 503, este valor depende de la combinación de PSS (Señal de sincronización primaria), numerada de 0 a 2 y SSS (Señal de sincronización secundaria) numerada de 0 a 167, lo que permite efectivamente 504 combinaciones que se reutilizan en las fases de planificación y optimización de células [50].
- **Prioridad:** Es un valor numérico que indica la prioridad que tiene este sector con respecto a los demás en la red, el 0 indica que no tiene prioridad, puede tomar cualquier valor, cuanto más alto, mayor prioridad. Si, por ejemplo, dos sectores llegan a un punto con señales por encima del umbral de recepción indicado en los "Parámetros de recepción", se toma como mejor servidor el sector que tenga un valor de prioridad mayor, aunque tenga menor nivel de señal. Esto es útil, por ejemplo, en planificación móvil, cuando una banda de frecuencias es más prioritaria que otra.

8.8.1. Parámetros de capacidad

En la tercera sección ***"Parámetros de capacidad"*** (figura 105), de la ventana ***"Propiedades del estudio de Cobertura Multitransmisor"***, con el objetivo de realizar cálculos que se ajusten fielmente al comportamiento real de la red, el usuario debe configurar sus propias distribuciones de usuarios. Para ello es posible definir entornos de usuarios móviles, que permiten simular diferentes comportamientos para cada cobertura del estudio, y grupos de usuarios, los cuales se distribuyen en puntos fijos distribuidos por el área de estudio. Estos parámetros no son necesarios cuando se realizan cálculos de interferencia entre estaciones base.



Figura 105: Parámetros de capacidad.

- **Entorno:** Los entornos son el conjunto de terminales, servicios, propiedades, parámetros y medidas de consumo, que caracterizan el servicio seleccionado para un grupo de usuarios distribuidos en una zona geográfica especifica.

8.8.1.1. Usuarios Móviles

Para usuarios móviles (figura 105) existen dos opciones de asignación del entorno:

- **Asignación de entornos a zona de cobertura de estaciones:** Esta opción permite que el o los entornos creados se apliquen a los estudios de cobertura asociados en el estudio de cobertura multitransmisor.
- **Asignación de entornos a capa morfográfica:** Esta opción permite que el o los entornos creados se apliquen a una capa morfográfica, el usuario debe adquirir esta capa morfográfica por un costo adicional.

Para la creación de un entorno se debe seleccionar el botón que tiene por nombre "Crear un nuevo entorno", al seleccionarlo se abre la ventana auxiliar ***"Entorno"***, la cual, se puede ver en las figuras 106 y 107, en esta ventana se le asigna un nombre al entorno y se debe indicar si la cantidad de usuarios que se va a simular se manejan por número total de usuario indoor y/o outdoor o si se manejan por densidad de usuarios indoor y/o outdoor (usuarios/Km2).



Figura 106: Entorno-Norte-Centro.



Figura 107: Entorno-Sur.

Para las simulaciones que se realizaron no se agregaron usuarios indoor, debido a que no se tienen las capas cartográficas que permiten hacer un adecuado cálculo de los indicadores de calidad del servicio.

Después de realizar varias simulaciones y con base en los resultados del mejor servidor (figura 170), se observo que la estación base norte brinda una mayor cobertura en la localidad, por lo tanto, de la población total de la localidad (160.000 habitantes), se definió que la estación base norte le prestara servicio al 60 % de la población como se puede observar en la figura 106 y la estación base sur al restante (figura 107).

Por otro lado, en la zona de cobertura de la estación base sur, se agregaron usuarios fijos, con la finalidad de observar el comportamiento y las implicaciones que producen en el rendimiento y la calidad de la red, estos usuarios fijos se ubicaron en la Universidad Distrital (Facultad Ingeniería), donde aproximadamente hay 8500 estudiantes [54] recibiendo clases (figura 105).

Luego se oprime el botón "Abre el dialogo de propiedades del terminal", para configurar los usuarios del entorno" y se despliega la ventana ***"Usuario"*** figura 108 y 109, en la cual se pueden modificar ciertas características y parámetros, pero dependiendo del tipo de usuario, datos o conversacional, se modificarán ciertas medidas de consumo propias de cada tipo.

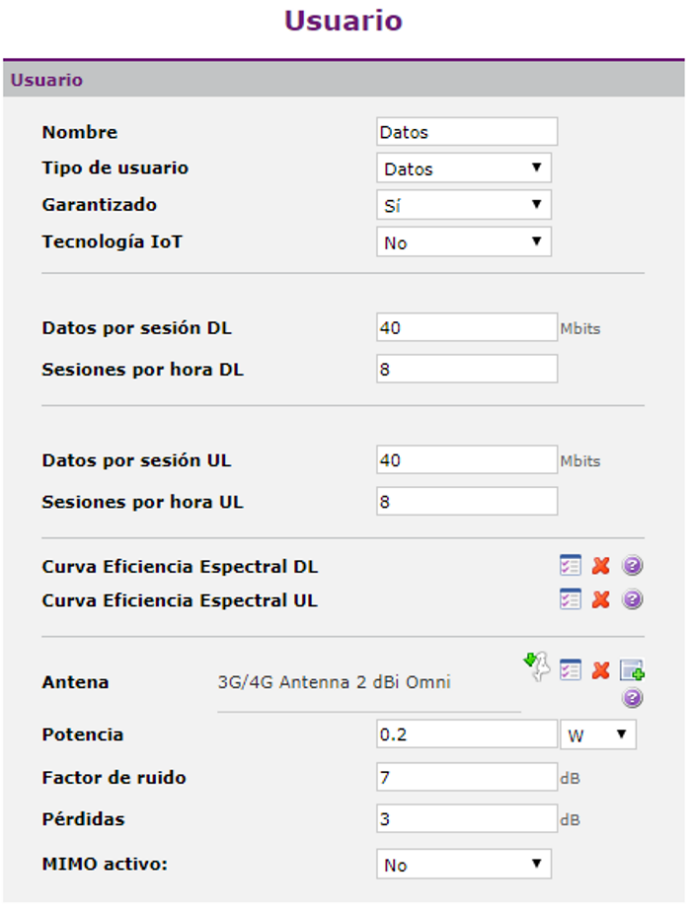


Figura 108: Parámetros para un tipo de usuario que consume datos.

Los parámetros a modificar en la ventana "Usuario", para un tipo de usuario de datos son:

- **Garantizado:** Es posible definir un tipo de usuario como garantizado (prioritario) si su tráfico debe ser transmitido con prelación a los demás tipos de usuarios. Por ejemplo, servicios de datos frente a

los servicios de voz o viceversa.

- **Sesiones por hora DL y UL:** Número de sesiones que tiene en cada hora, es decir, las veces que se conecta al servicio de datos para consumir.
- **Datos por sesión DL y UL:** Consumo de datos realizado en una sesión del enlace de subida y/o del enlace de bajada.

Para este caso el parámetro "Garantizado" se configuro en "Sí", lo que permitirá que el tráfico de estos usuarios sea prioritario con respecto a los del entorno Conversacional y Conversacional-MIMO, debido al vertiginoso aumento en el consumo de datos, no se hizo uso de la "Tecnología IoT" en este documento, los "Datos por sesión DL y UL" se configuraron en 40 Mbits y las "Sesiones por hora DL y UL" en 8, debido a que son valores que Xirio Online maneja como promedio para este servicio móvil, los demás parámetros fueron configurados de la misma manera que se explicó en ***"Curva de eficiencia espectral"*** y ***"Propiedades del terminal"***, aclarando que las pérdidas que se mencionan en la figura 108, son las mismas que las pérdidas de pasivos.

La única diferencia entre los entornos Datos y Datos-MIMO es que para el segundo se activó la tecnología MIMO.

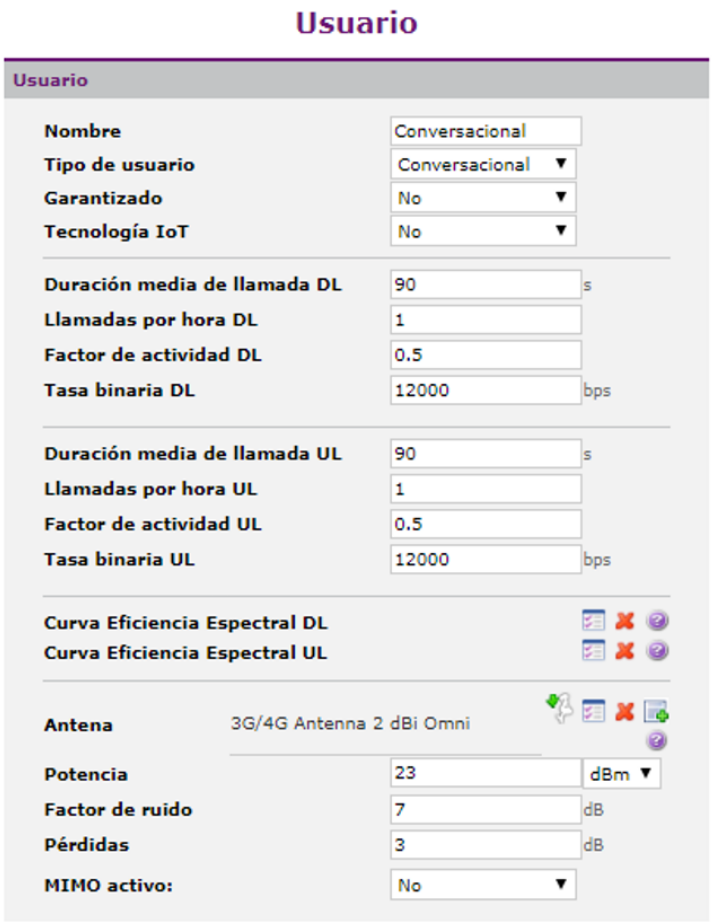


Figura 109: Parámetros para un tipo de usuario conversacional.

Los parámetros a modificar en la ventana ***"Usuario"***, para un tipo de usuario conversacional son:

- **Duración media de llamada DL y UL:** Número de llamadas promedio que recibe o hace en una hora.
- **Llamadas por hora DL y UL:** Estimado en segundos del tiempo que el usuario puede estar en conversación telefónica por cada llamada.
- **Factor de actividad DL y UL:** Tasa de tiempo de la comunicación durante la que se hace uso del canal, para transmisión de datos. Puede tomar valores entre 0 y 1. Se define tanto para el enlace ascendente como el descendente. Se utiliza únicamente para el tipo de usuario conversacional
- **Tasa binaria DL y UL:** Es la cantidad de bits transmitidos por unidad de tiempo, en otras palabras, es la velocidad de transmisión del enlace de subida o del enlace de bajada, respectivamente.

Para este caso el parámetro "Garantizado" se configuro en "No", lo que indica que este entorno no va a ser priorizado, la "Duración media de llamada DL y UL" se configuro en 90 s, las "Llamadas por hora DL y UL" en 1 y la "Tasa binaria DL y UL" en 12000 bps, debido a que son valores que Xirio Online maneja como promedio para este servicio móvil, el parámetro "Factor de actividad DL y UL" se configuro en 0.5, lo que indica que la mitad del tiempo el enlace será utilizado por el usuario.

La única diferencia entre los entornos Conversacional y Conversacional-MIMO es que para el segundo se activó la tecnología MIMO.

En el caso del parámetro antena, si no se define ninguna antena por defecto se utiliza la definida en los parámetros del terminal del estudio de cobertura. En este caso se agregó una antena del catálogo de elementos, para agregar la antena se oprime el botón "Seleccionar antena principal", luego de esto se despliega una ventana (figura 110), con dos opciones, crear antena desde catálogo y crear nueva antena.

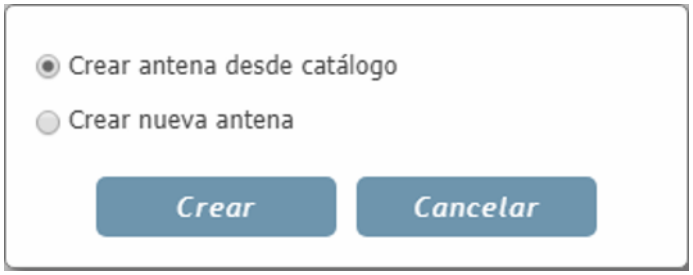


Figura 110: Crear antena desde catálogo.

En la opción crear nueva antena se deben asignar y ajustar los valores de los parámetros que se indicaron en las figuras 78 - 81.

En la opción crear antena desde catálogo, se despliega la ventana ***"Antenas disponibles"*** (figura 111), en la cual se visualizan todas las antenas que Xirio tiene predefinidas para los diferentes servicios que se pueden simular, en nuestro caso son útiles; la antena **3G/4G Antennna 17,5 dBi 65°**, que es la utilizada para la estación base y la antena **3G/4G Antennna 2 dBi Omni** utilizada en el terminal móvil. Luego de elegir la antena se oprime el botón "Seleccionar", de esta manera se asigna una antena que ya se encuentra configurada, a el estudio radioeléctrico.

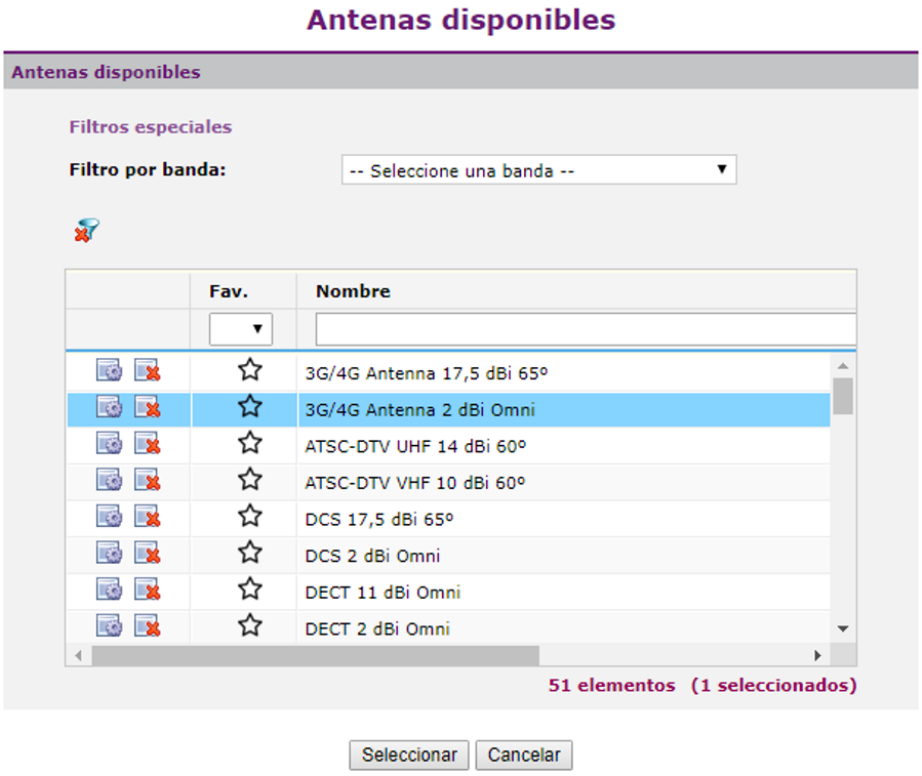


Figura 111: Antenas disponibles.

Por último, luego de crear los entornos se deben asignar a una capa morfográfica o a los estudios de coberturas individuales, en este caso debido a que no se cuenta con una capa morfográfica, se asignaron los entornos a los estudios de cobertura "Estación Base-Norte (LTE-A)" (figuras 102 y 106) y "Estación Base-Sur (LTE-A)" (figuras 102 y 107), para realizar este proceso se debe oprimir el botón "Asigna el entorno seleccionado a una o varias coberturas", luego se visualizará la ventana **"Asignar área de cobertura al entorno: (nombre del entorno)"** (figura 112), en esta ventana se seleccionan los estudios a los cuales se les va a asignar el entorno creado.

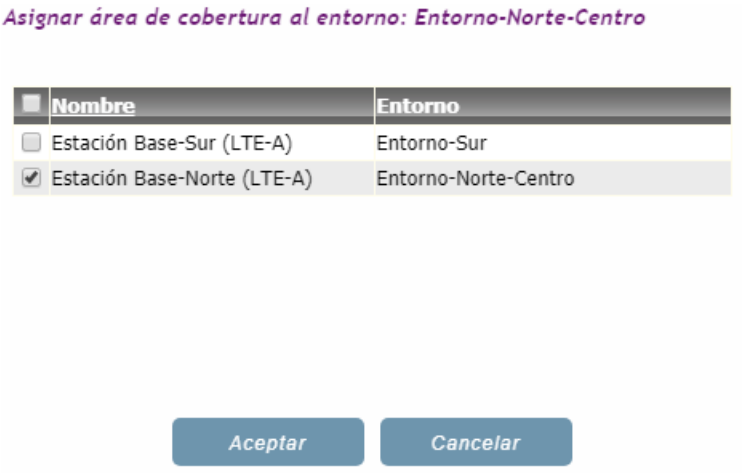


Figura 112: Asignar área de cobertura al entorno.

8.8.1.2. Usuarios Fijos

Para la creación de usuarios fijos (figura 105), se debe oprimir el botón "Crear un nuevo grupo de usuarios", de esta manera se despliega la ventana auxiliar ***"Grupo de usuarios"*** (figura 113), en la cual se asigna el nombre que tendrá este grupo y además se deben agregar la cantidad de terminales (tipos de usuarios), que harán parte de este con sus respectivas características, para esto se debe oprimir el botón "Añadir nuevo terminal al grupo de usuarios", luego de esto se le asigna el nombre al terminal, y para modificar sus propiedades se oprime el botón "Abre el diálogo de propiedades del terminal", propiedades que ya fueron explicadas (Usuarios Móviles) y que se muestran en las figuras 108 – 111, la diferencia con respecto a los usuarios móviles, es que en este caso se crea una lista de usuarios, a los cuales se les asigna una ubicación geográfica específica con la importación de coordenadas desde un fichero en formato KMZ, KML o formato de texto (figuras 117 - 119).



Figura 113: Creación de grupo de usuarios (Usuarios-Universidad-Distrital-Datos).

Para esta simulación en cuanto al parámetro de usuarios fijos, lo que se realizó fue crear cuatro grupos de usuarios; datos, datos-MIMO, conversacional y conversacional-MIMO (figura 105), los cuales estarán ubicados en la facultad de ingeniería de la Universidad Distrital.

Todos los grupos de usuarios en este caso (usuarios fijos), van a manejar la misma cantidad de clientes, por lo tanto, los 8500 estudiantes de la facultad de ingeniería [54] se dividieron en cuatro partes iguales (2125 estudiantes), como se puede observar en la figura 105, para cada grupo de usuarios se agrego un terminal con las características propias que indica su nombre, como ejemplo se puede observar el grupo (Usuarios-Universidad-Distrital-Datos) en la figura 113, las características de estos estudiantes son las mismas que se configuraron para usuarios móviles (figura 108).

Luego lo que se hizo fue utilizar otra funcionalidad de Xirio, para crear un punto de interés, el cual fue la ubicación de la Universidad Distrital, para facilitar la configuración. Para realizar este proceso se selecciona la opción "Crear nuevo punto de interés" en la barra de herramientas de Xirio, como resultado se despliega la ventana ***"Propiedades del Punto de Interés"*** (figura 114), en esta ventana se agrega el "Nombre", un "Contenido" opcional, y la localización del punto, está localización se puede configurar manualmente ingresando la "Latitud y "Longitud" o se puede seleccionar el "Punto en el visor" de Xirio.

Por último, se creó un archivo de texto con la lista de usuarios y su respectiva ubicación geográfica, que en este caso será la misma. Para crear este archivo fue necesario pasar las coordenadas del punto de interés de GMS (grados, minutos, segundos) a GD (grados decimales), esto se realizó con la opción "Abre calculadora

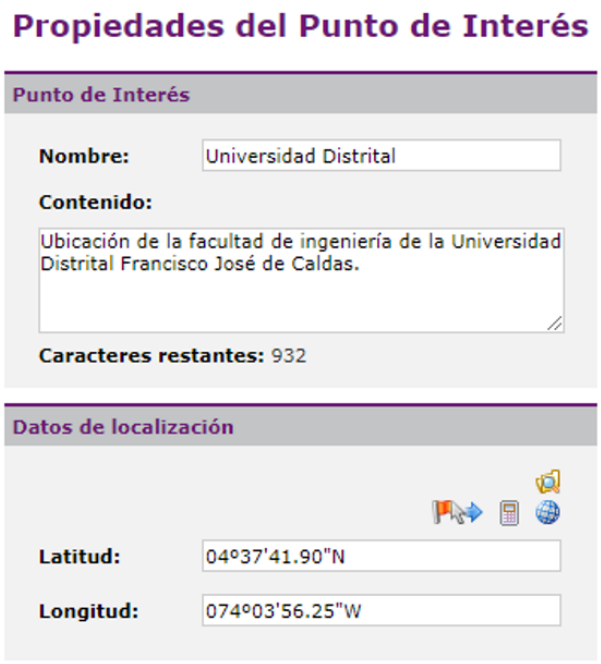


Figura 114: Propiedades del punto de interés.

de coordenadas" de la ventana ***"Propiedades del Punto de Interés"*** (figura 114), luego de oprimir esta opción se despliega la ventana auxiliar ***"Calculadora de coordenadas"*** (figura 115), en la cual, solo es necesario ingresar elegir el botón de chequeo "Geográficas (WGS84)" y oprimir el botón "Aceptar", de esta manera ya que las coordenadas geográficas estaban en GMS se pasarán a GD, como se puede observar en la figura 116.

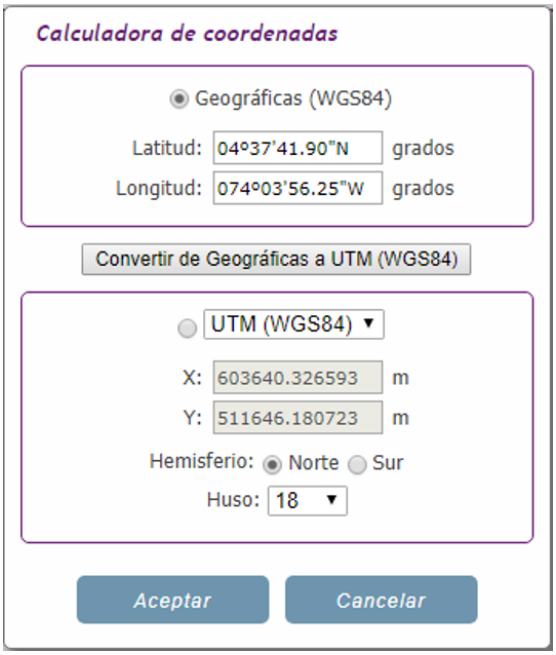


Figura 115: Calculadora de coordenadas.

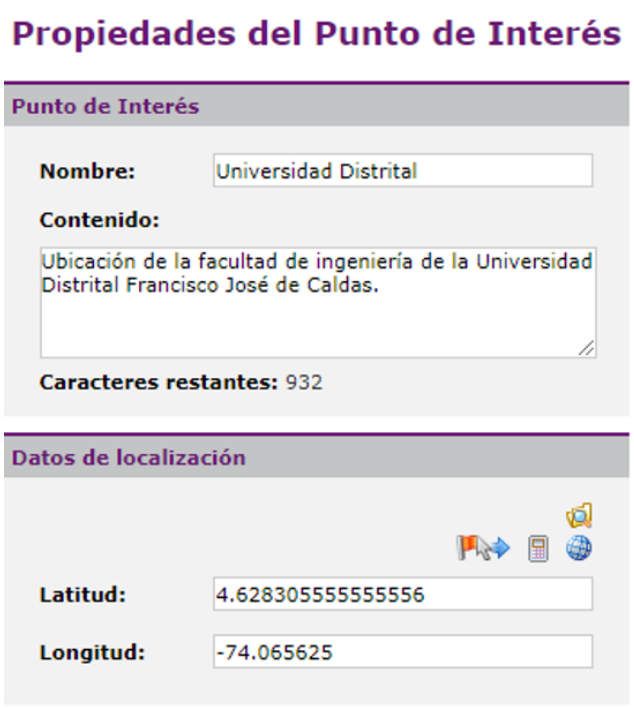


Figura 116: Propiedades del punto de interés, cambio de coordenadas.

Según las indicaciones que nos brinda el manual de Xirio [39], el archivo de texto debe quedar como se muestra en la figura 117, este archivo es un fichero ASCII con extensión .txt con una cabecera y una línea por cada usuario fijo a importar.

La cabecera está formada por una línea con los siguientes campos separados por punto y coma (;):

- **Name:** Nombre del usuario.
- **X:** Longitud, por defecto en coordenadas geográficas WGS84.
- **Y:** Latitud, por defecto en coordenadas geográficas WGS84.

Luego se agrega una línea por cada usuario fijo, respetando el anterior orden de columnas y separando los campos por punto y coma (;). El separador de decimales es el punto (.).

```
name;x;y
usuario1;-74.065625;4.628305555555556
usuario2;-74.065625;4.628305555555556
usuario3;-74.065625;4.628305555555556
usuario4;-74.065625;4.628305555555556
usuario5;-74.065625;4.628305555555556
usuario6;-74.065625;4.628305555555556
usuario7;-74.065625;4.628305555555556
usuario8;-74.065625;4.628305555555556
usuario9;-74.065625;4.628305555555556
usuario10;-74.065625;4.628305555555556
```

Figura 117: Fichero para la creación de usuarios fijos.

Después de crear el archivo de texto se deben asignar estos usuarios al grupo de usuarios que se desee, para

realizar este proceso, abrimos la ventana ***"Propiedades del estudio de Cobertura Multitransmisor"*** y en la sección ***"Parámetros de capacidad"*** (figura 105), subsección ***"Usuarios fijos"***, se oprime el botón "Importar usuarios desde un fichero", a continuación, se desplegara la ventana auxiliar ***"Importador de Usuarios"*** (figura 118), ventana en la que se selecciona el archivo, se indica el separador decimal y por último se oprime el botón "Importar Usuarios", cuando finaliza el proceso se visualiza el mensaje de resumen "Importación de usuarios" (figura 119).

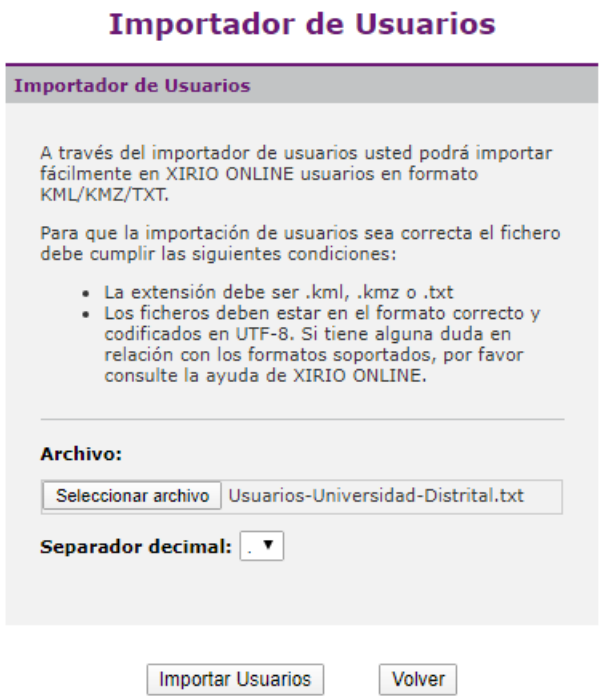


Figura 118: Importador de usuarios.

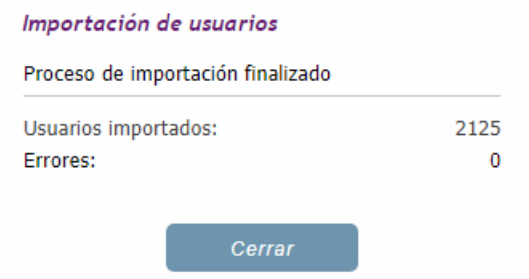


Figura 119: Validación e importación de usuarios.

8.8.2. Parámetros de cálculo de la señal

En la ventana ***"Propiedades del estudio de Cobertura Multitransmisor"***, la cuarta sección ***"Parámetros de cálculo de señal"*** (figura 120), permite indicar la forma en que el terminal móvil seleccionará la estación base (servidor), la cual le brindará los servicios móviles requeridos por el usuario.

- **Tipo de servidor:** Selecciona la metodología para determinar el transmisor (estación base) deseado, los tipos de metodología de selección son:
  - **Mayor señal:** Transmisor que proporcione mayor nivel de señal.
  - **Prioridad:** Transmisor que se encuentre priorizado para el servicio.
  - **Distancia:** Transmisor que este ubicado más cerca.
  - **Retardo:** Transmisor que proporcione el servicio con menor retardo.
  - **Mayor diferencia a umbral:** Hace referencia al margen entre la señal recibida en el terminal y el umbral de recepción definido por el estudio de cobertura del cual se recibe dicha señal. Por ejemplo, cada cobertura puede tener unos parámetros de recepción distintos, para este caso sector "A" y "B". Por lo tanto, "Mayor diferencia de umbral" realiza la comparación, respecto a las señales recibidas en un punto (terminal de usuario), entre la señal recibida del sector A (ejemplo -70 dBm) y el umbral del receptor A (ejemplo -112 dBm), y la diferencia entre la señal recibida del sector B (ejemplo -50 dBm) y el umbral del receptor B (ejemplo -55 dBm). Por lo cual, aunque la señal del sector B llegara con mayor intensidad se escogería la del sector A debido a que es mayor la diferencia respecto a su señal de umbral.
- **Considerar distancia máxima de mejor servidor:** Este cuadro de chequeo, permite establecer una distancia a partir de la cual un transmisor no será considerado en la elección de mejor servidor en un punto.
  - Distancia máxima de mejor servidor [Km]

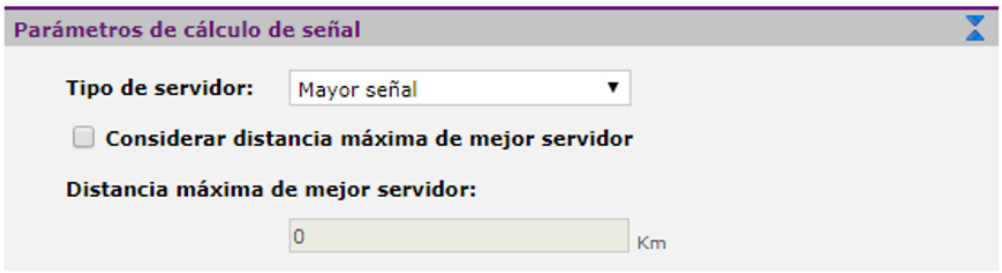


Figura 120: Párametros de cálculo de señal.

En este caso el método de selección elegido fue el de mayor señal, debido a que esto implica que el terminal tiene mejores condiciones del canal con esta estación y no se limitó la distancia máxima en la cual podía ubicarse el servidor.

8.8.3. Parámetros de interferencia

En la ventana ***"Propiedades del estudio de Cobertura Multitransmisor"***, la séptima sección ***"Parámetros de interferencia"*** (figura 121), permite configurar los parámetros específicos para realizar los cálculos de interferencia.

Los parámetros a modificar en esta sección son:

- **Cálculo de interferencias de coberturas de red:** Permite seleccionar el método de cálculo de las interferencias, Xirio establece dos opciones:

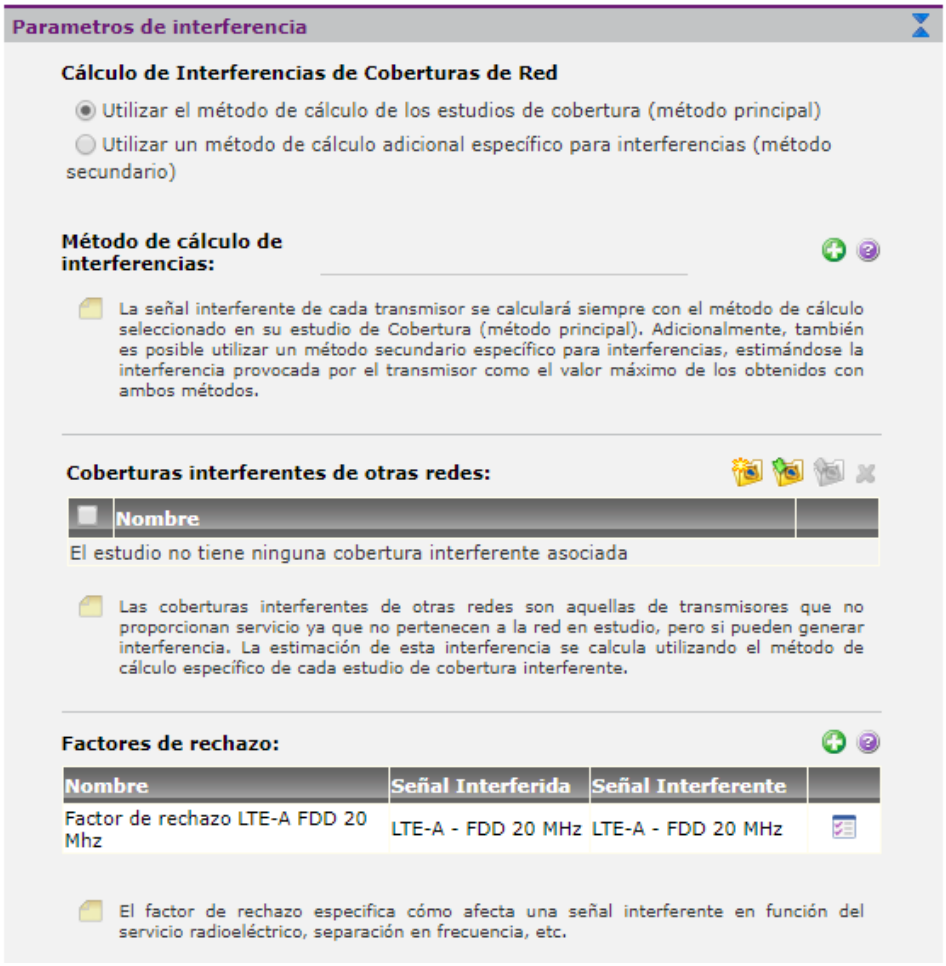


Figura 121: Parámetros de cálculo de señal.

- **Utilizar el método de cálculo de los estudios de cobertura (método principal):** Este botón de chequeo permite calcular las interferencias con el mismo método de cálculo empleado en el cálculo de los estudios de cobertura individuales, denominado "método principal".
- **Utilizar el método de cálculo adicional específico para interferencias (método secundario):** Este botón de chequeo permite calcular las interferencias con un método adicional, que es ideal para el cálculo de interferencias, denominado “método secundario”.
    - Método de cálculo de interferencias

La señal interferente de cada transmisor se calcula siempre con el método principal. Si se selecciona la opción de utilizar un método secundario específico para interferencias, se estimará la interferencia provocada por el transmisor como el valor máximo que se obtenga entre los dos métodos.

- **Coberturas interferentes de otras redes:** Las coberturas interferentes de otras redes son aquellas que no proporcionan servicio ya que no pertenecen a la red en estudio, pero sí pueden generar interferencia sobre la red. La estimación de esta interferencia se calcula utilizando el método de cálculo específico de cada estudio de cobertura interferente. Para agregar una cobertura es posible crear una cobertura nueva o añadir una cobertura existente.
- **Factores de rechazo:** El factor de rechazo define como afectan las señales interferentes producidas por transmisores de un servicio a la señal deseada del mismo u otro servicio en función de su separación en

frecuencia. Se especifica mediante una máscara formada por un conjunto de pares de valores (separación en frecuencia y atenuación). Para configurar este parámetro se oprime el botón "modificar" y se despliega la ventana emergente ***"Factor de Rechazo"*** (figura 122).

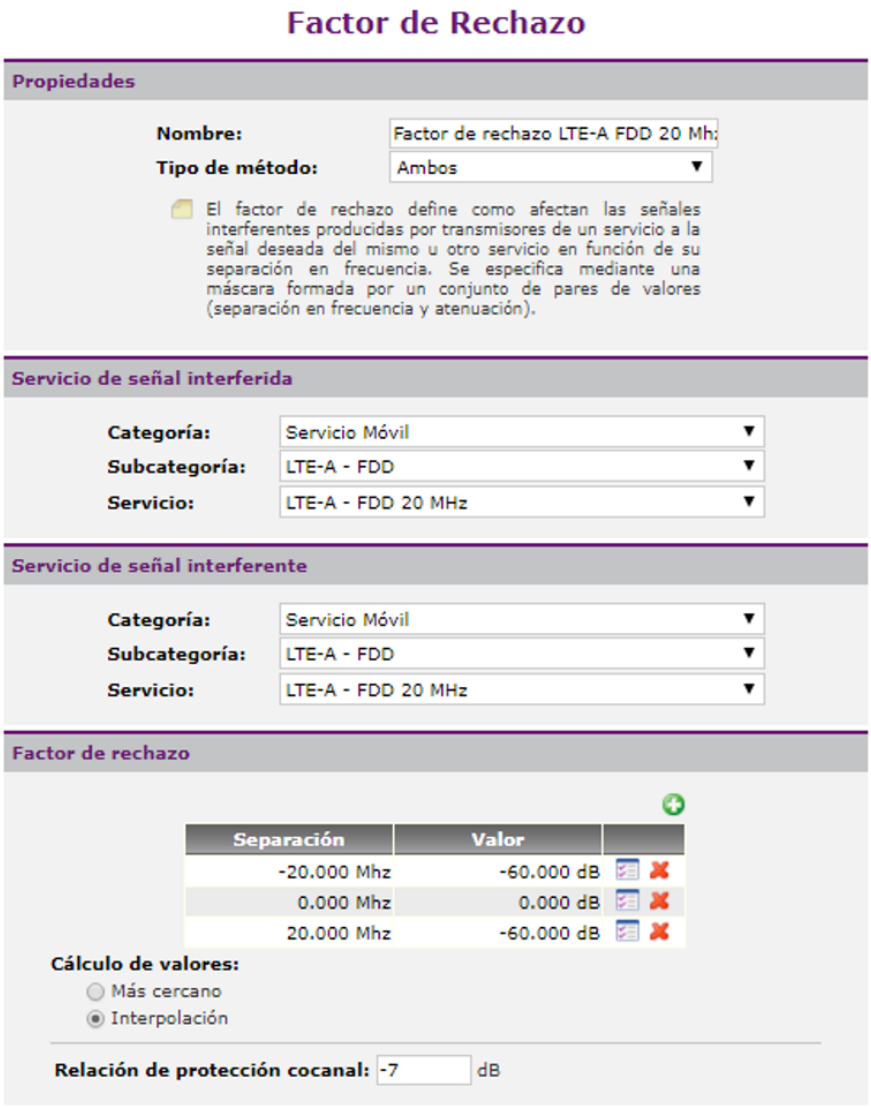


Figura 122: Factor de rechazo.

En la sección ***"Propiedades"***, se asigna un nombre para este factor de rechazo, en el "Tipo de método", se selecciona una de estas opciones:

- **Principal:** Indica que el método de cálculo de interferencias será el empleado en el cálculo de los estudios de cobertura individuales, denominado "método principal".
- **Complementario:** Indica que el método de cálculo de interferencias utilizado será un método adicional, que es ideal para el cálculo de interferencias, denominado "método secundario" o "método complementario".
- **Ambos:** Indica que se utilizarán ambos métodos de cálculo de interferencias y se seleccionará el resultado del método de cálculo que sea mayor.

En la sección ***"Servicio de señal interferente"***, se debe tener en cuenta que no necesariamente la señal interferente es proveniente de la misma red o servicio que se está implementando.

En la sección ***"Factor de rechazo"***, se agregan las separaciones en frecuencia que se pueden dar entre los servicios mencionados, en las secciones ***"Servicio de señal interferida"*** y ***"Servicio de señal interferente"*** con su respectiva atenuación. Si la o las separaciones de frecuencia agregadas por el usuario, no son las obtenidas en la simulación, el cálculo de la atenuación se puede obtener eligiendo la separación de frecuencia más cercana al valor conseguido o se puede realizar mediante la interpolación de los valores, lo que haría más preciso el cálculo de la atenuación.

Por último, la relación de protección cocanal es la diferencia mínima que debe haber entre la señal deseada y la interferente cocanal. Este parámetro se emplea únicamente en el cálculo del campo utilizable.

Para realizar el cálculo de interferencias, se configuró una señal interferente que proviene del mismo tipo de servicio móvil de estudio, de este documento (4G LTE-A), por lo tanto, el "Servicio de la señal interferida e interferente" tienen las siguientes características; LTE-A, FDD y una canalización de 20 MHz, como se puede observar en la figura 122. La configuración de los parámetros de la sección ***"Factor de rechazo"***, los genera Xirio automáticamente con la selección del servicio, más exactamente con la elección de la canalización del servicio, la canalización va a ser la "Separación en frecuencia" y la "Atenuación" es de -60 dB un valor acorde a este servicio móvil, al igual que los -7 dB de "Relación de protección cocanal", el "Cálculo de valores" se manejo por medio de interpolación debido a que es un método con el cual se puede obtener mayor precisión, en el "Tipo de método de cálculo" de interferencias se seleccionó; ambos, esto significa que el cálculo se realizó con un método principal y uno secundario, seleccionando el resultado que represente el peor escenario posible.

En la figura 122 en la sección factor de rechazo en separación en frecuencias, se puede observar una separación de -20 MHz, esto ocurre debido a que Xirio no permite duplicar una separación, por lo tanto, si la interferencia es de un servicio móvil con la misma canalización, a una de las señales se debe configurar con separación en frecuencia negativa, el error que se genera se puede observar en la figura 123.



Figura 123: Separación en frecuencias.

8.8.4. Rangos

En la sección ***"Rangos"*** (figura 124 - 131), se muestran los rangos de potencias de las señales, relaciones de potencia, tasas de rendimiento y otras características a calcular en el estudio de multicobertura.

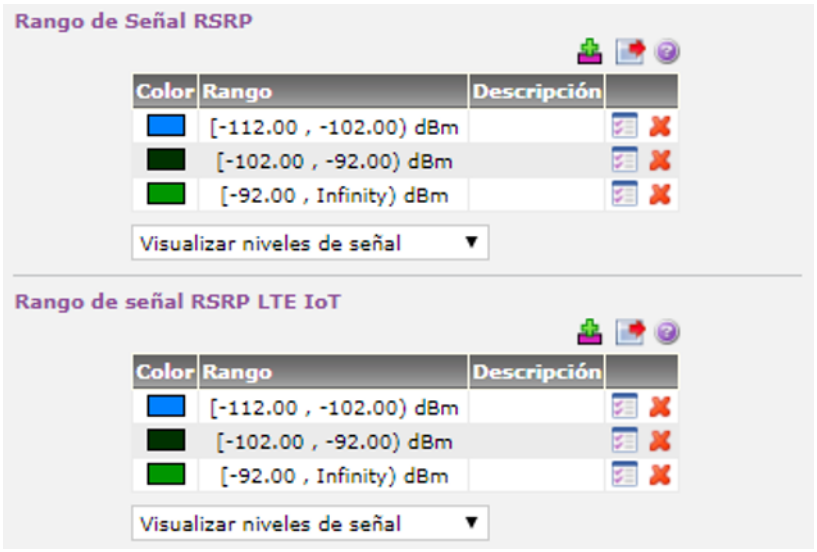


Figura 124: Rango de la señal RSRP.

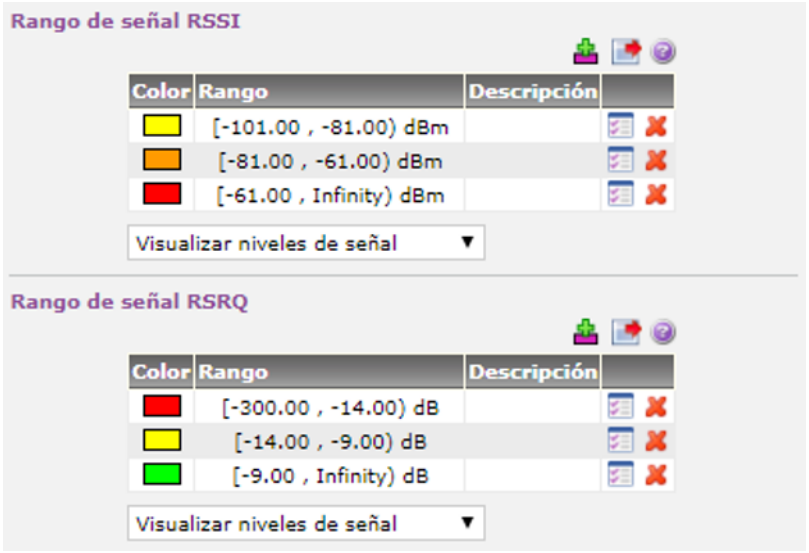


Figura 125: Rango de las señales RSSI y RSRQ.



Figura 126: Rango de solapamiento.

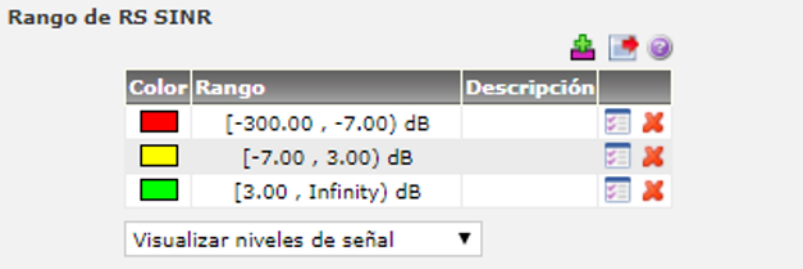


Figura 127: Rango de la señal RS SINR.



Figura 128: Rango de señales interferentes.

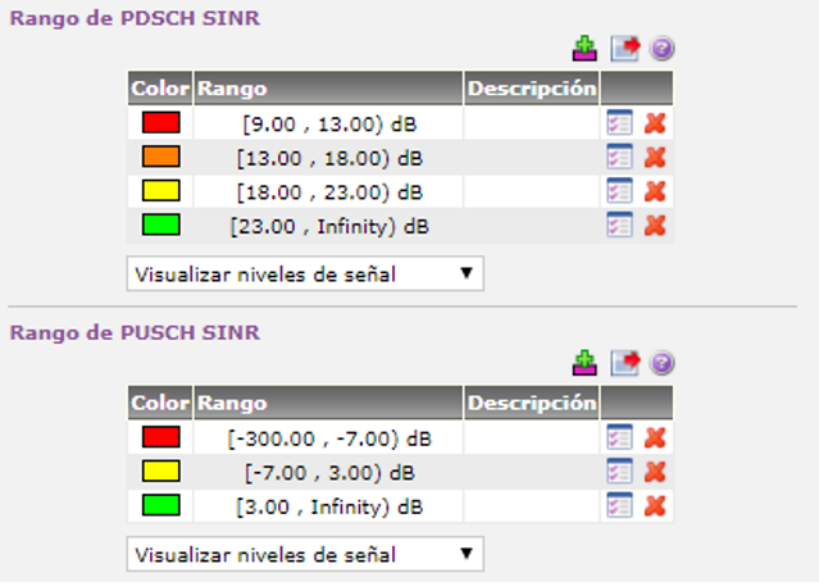


Figura 129: Rango de la señal SINR de los canales PDSCH y PUSCH.

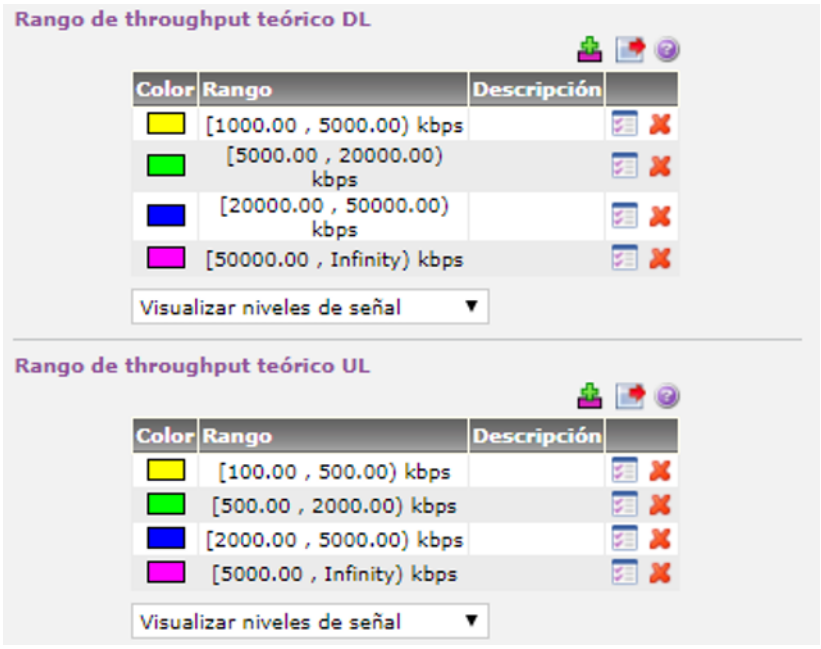


Figura 130: Rango de throughput téorico DL y UL.



Figura 131: Rango de throughput téorico DL y UL por usuario.

8.9. Estudio radioeléctrico de enlace 5G

Para este estudio de enlace se van a utilizar los mismos parámetros configurados en el estudio de enlace 4G LTE, con el fin de realizar una comparación de los resultados que "Xirio Online" nos permite obtener. Se debe tener en cuenta que sólo se mencionan los cambios, adiciones o parámetros que no se han mencionado antes.

8.9.1. Banda

La ventana emergente para la configuración de banda en el estudio 5G ***"Propiedades de la banda de frecuencias"*** se puede ver en la figura 132.

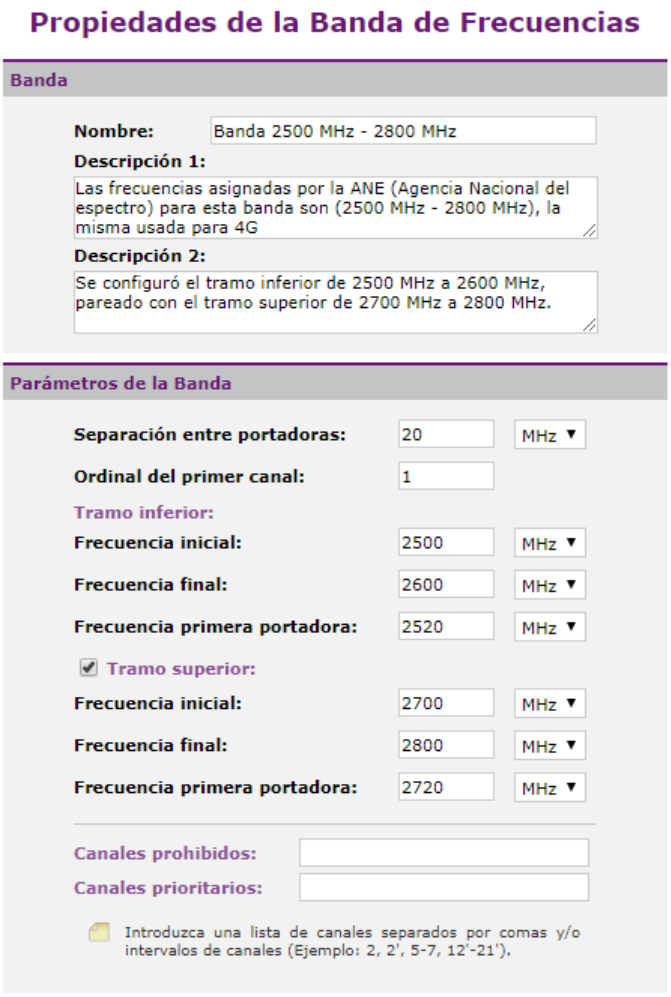


Figura 132: Propiedades de la banda de frecuencias 5G.

Para esta configuración se plantea utilizar el mismo ancho de banda y separación entre portadoras que se empleo en los estudios de 4G (LTE-A), se debe tener en cuenta que debido al tipo de servicio implementado en LTE (FDD) es necesario configurar "Tramo superior", al igual que en dicho estudio, por lo cual se tomo la banda que inicia desde 2700 MHz dejando una separación de 100 MHz entre las bandas pareadas, como se puede ver en la figura 132.

Es necesario mencionar que a diferencia de los estudios disponibles para LTE donde se puede especificar que el tipo de servicio es FDD, para 5G solo se tiene un tipo de estudio asignado, por lo cual se debe especificar el tipo de servicio en el parámetro "Configuración de slots" de la subsección ***"Parámetros 5G"***, en dicho parámetro se selecciono "no TDD" ya que esto nos indica que el servicio es FDD, debido a esto Xirio exige una banda superior, con el fin de poder realizar los cálculos del estudio radioeléctrico correspondiente.

8.9.2. Propiedades del sector

La ventana emergente que se despliega del parámetro sector ***"Propiedades del sector"*** se puede ver en la figura 133, se debe tener en cuenta que se utiliza la misma ubicación de la estación base sur de 4G.

- **Coordenadas:** La localización de la estación base creada en el estudio 4G corresponde a los siguientes valores:
  - **Latitud:** 04°37'35.12"N
  - **Longitud:** 074°04'12.00"W

La orientación e inclinación mecánica por defecto vienen con valor de cero, sin embargo, se ajustaron estos valores con la funcionalidad "Orientar antenas de forma automática", dicha opción se encuentra en la ventana principal del estudio, y se hace con el fin de obtener las mejores prestaciones posibles, es decir una buena visibilidad, cuando se realice el cálculo del estudio. Se escoge el canal 3 como frecuencia de transmisión, este

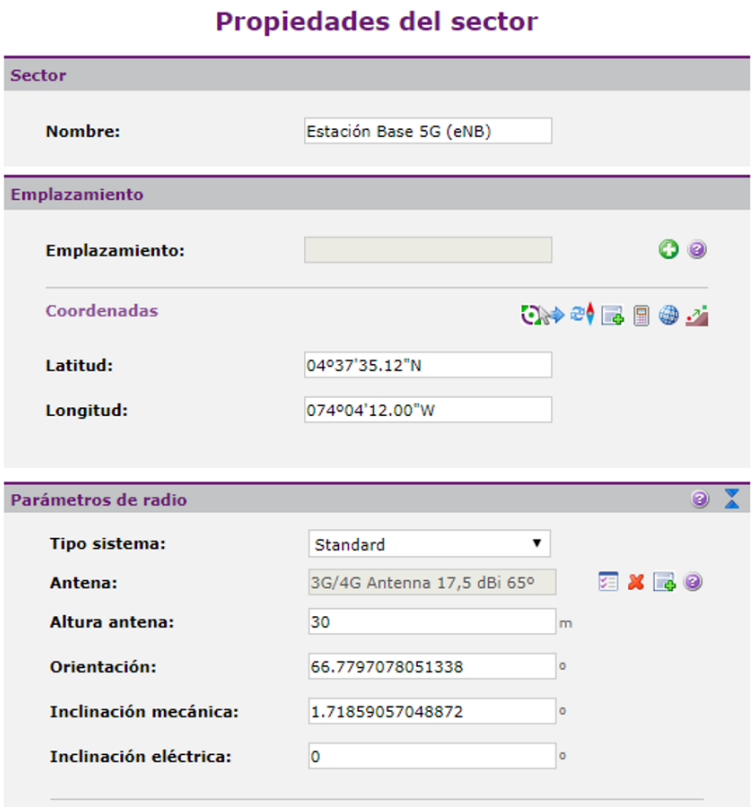


Figura 133: Propiedades del sector 5G (Sector, Emplazamiento y Parámetros de radio).

canal se define en la ventana de ***"Propiedades del sector"*** y en la ventana ***"Propiedades del terminal"***, esto con el fin de que las dos antenas se encuentren sincronizadas en la misma frecuencia, la potencia es igual a la establecida en el estudio de enlace de 4G.



Figura 134: Propiedades del sector 5G (Parámetros de radio).

Con respecto a 4G en este apartado se aprecian nuevos parámetros, siendo propios de 5G, sin embargo, algunos otros son equivalentes por lo cual se configuran igual que en 4G, con el fin de hacer una comparación de los resultados obtenidos.

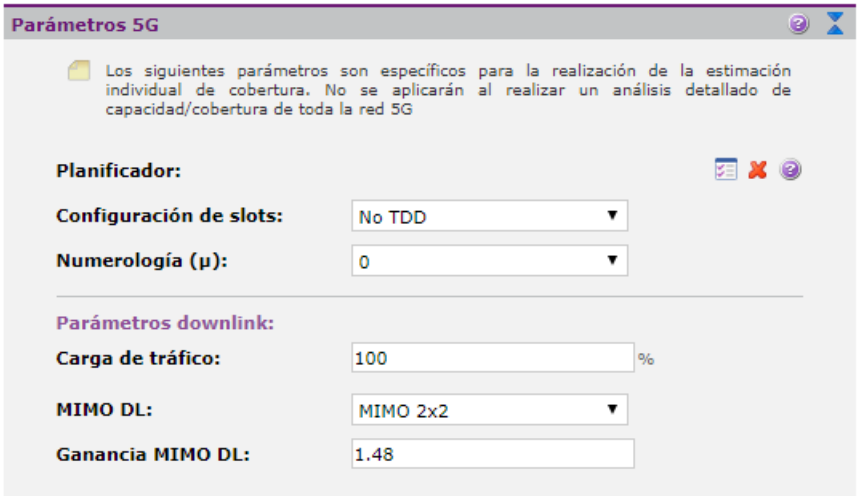


Figura 135: Propiedades del sector 5G (Parámetros 5G).

- **Configuración de slots:** En este parámetro se define la configuración con la cual se distribuyen los slots disponibles para el estudio. Teniendo una gran variedad de configuraciones para servicios tipo TDD, exactamente 62 configuraciones diferentes, algunas de estas se pueden observar en la figura 136, o en caso contrario se tiene la habilitada la configuración "No TDD", lo cual nos indica que es un servicio FDD.

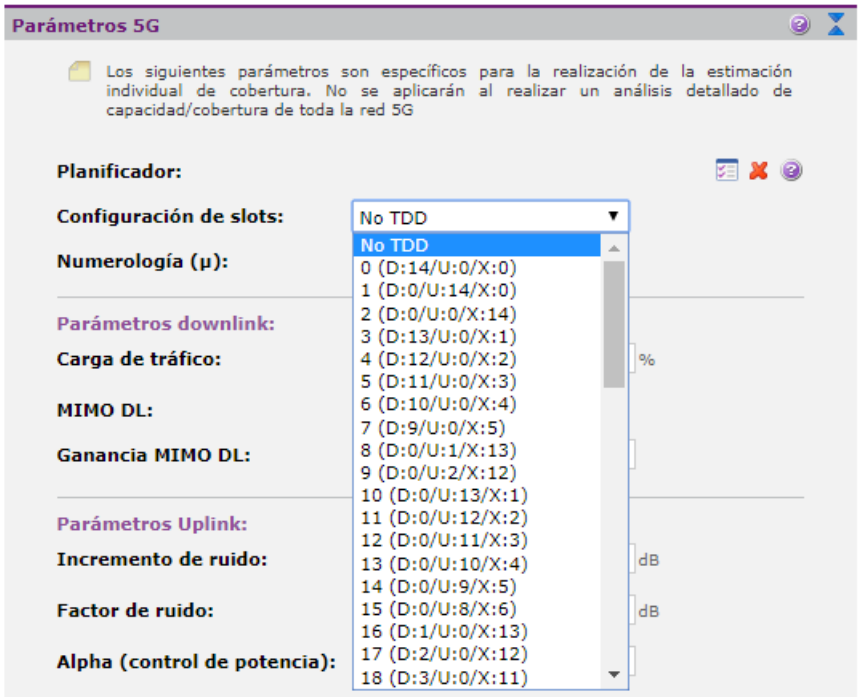


Figura 136: Configuraciones TDD.

- **Numerología (μ):** En 5G el ancho de banda que ocupa cada subportadora puede variar según la expresión 15 kHz $*2^{\mu}$, el valor de puede ser 0, 1, 2, 3, 4 o 5 (solamente soportado en Versión 16), este ancho de banda se diferencia de LTE donde dicho valor es fijo, siendo 15 kHz.

  Ya que en 4G se utilizó la configuración FDD, para el caso 5G se hace de igual manera, para su posterior comparación, el valor de numerología se dejo por defecto en cero, de esta manera este estudio manejo el mismo ancho de banda que el estudio de 4G.

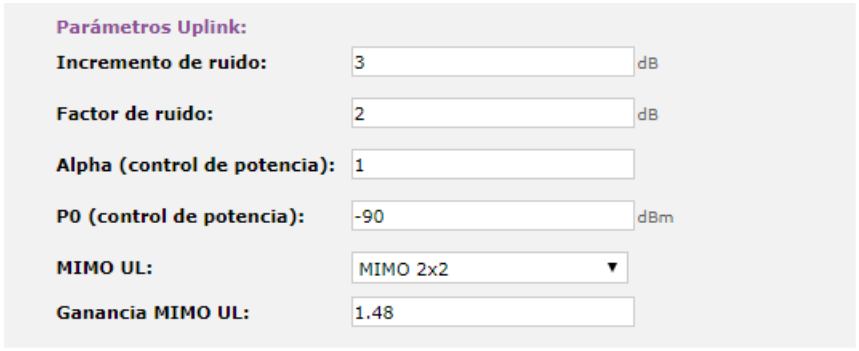


Figura 137: Propiedades del sector (Parámetros 5G).

8.9.3. Propiedades del terminal

Al igual que en 4G definimos como terminal las coordenadas de la Universidad Distrital, y se definen los valores mostrados a continuación, en las figuras 138 - 140:



Figura 138: Propiedades del terminal 5G (Terminal y Emplazamiento).

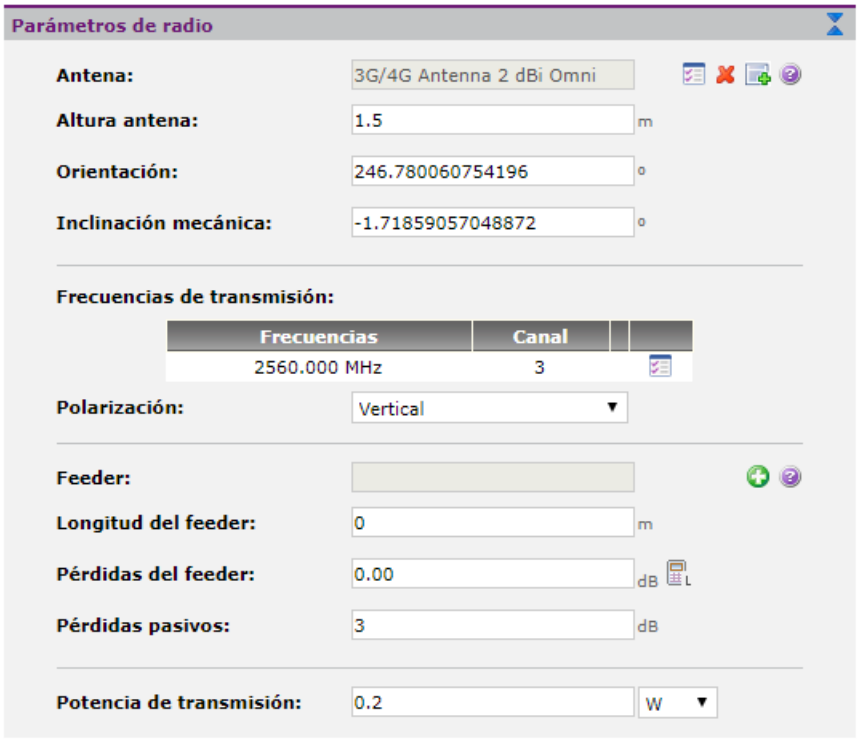


Figura 139: Propiedades del terminal 5G (Parámetros de radio).

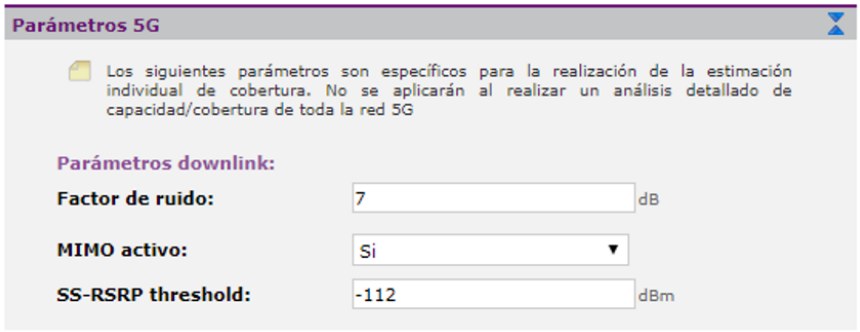


Figura 140: Propiedades del terminal 5G (Parámetros 5G).

- **SS-RSRP threshold:** (Synchronization Signal based Reference Signal Received Power) Es el límite de potencia de recepción de la señal de referencia basada en la señal de sincronización [52].

Como se puede observar los parámetros son muy similares a los del servicio 4G, por lo cual se realizó su configuración equivalente.

Una vez se configuran todos los parámetros la ventana de ***"Propiedades del estudio de enlace"*** debería verse de la siguiente manera (figuras 141 y 142).

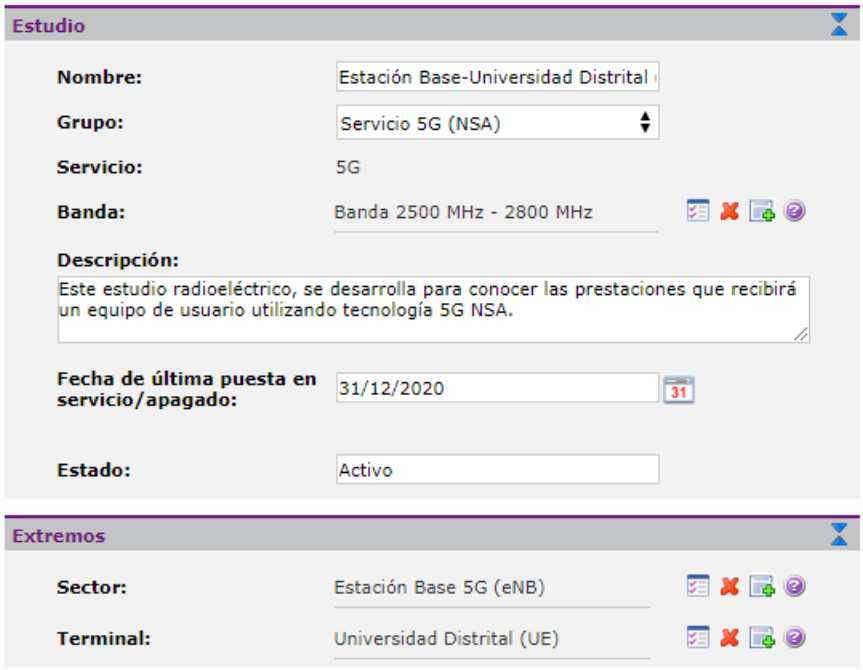


Figura 141: Propiedades del estudio de enlace 5G (Estudio y Extremos).

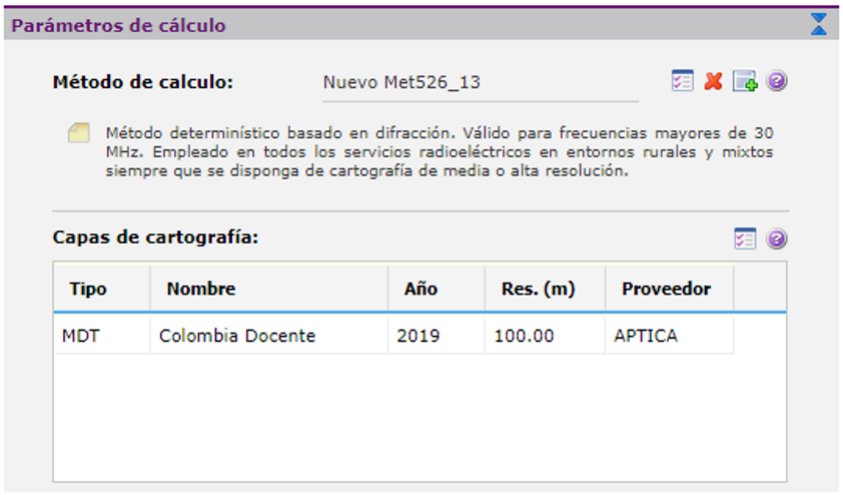


Figura 142: Propiedades del estudio de enlace 5G (Parámetros de cálculo).

8.10. Estudio radioeléctrico de cobertura 5G

Al igual que en el estudio anterior se utilizarán las características del estudio respectivo de 4G, se debe tener en cuenta que este estudio posee algunos parámetros a configurar iguales al estudio de enlace 5G, por lo cual asignaremos los mismos valores mostrados en "8.9 Estudio radioeléctrico de enlace 5G".

Este estudio nos permite saber cómo se comporta el campo eléctrico dentro del área de cobertura seleccionada durante la configuración, es importante mencionar que al igual que en el estudio de enlace anterior se comparte el método de cálculo ya que este funciona para las frecuencias donde podría desplegarse la tecnología 5G.

Una vez configurados los valores solicitados en la ventana principal del estudio el resultado fue (figuras 143, 144 y 145):



Figura 143: Propiedades del estudio de cobertura 5G (Estudio y Extremos).

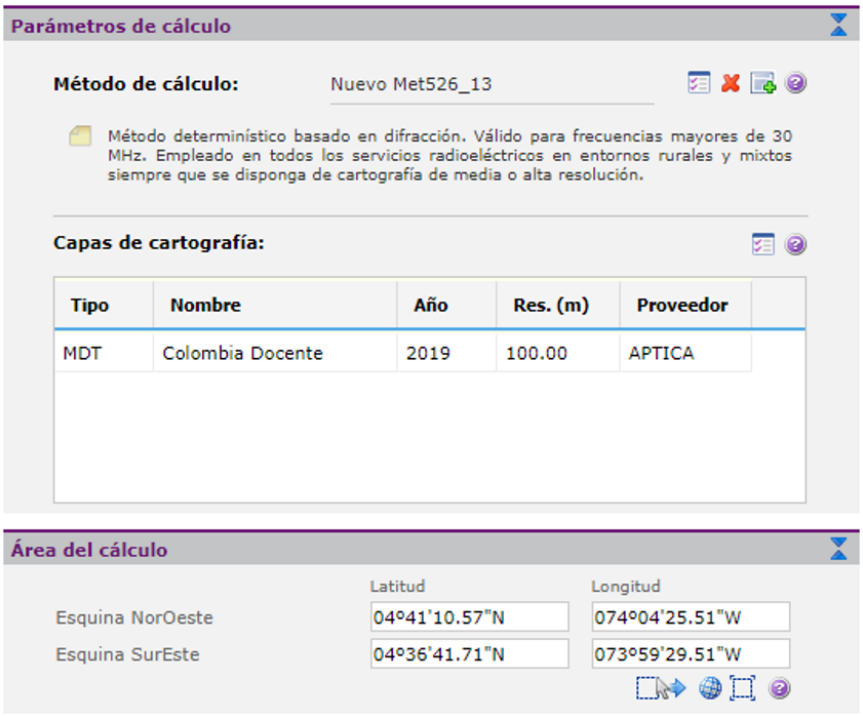


Figura 144: Propiedades del estudio de cobertura 5G (Parámetros de cálculo).



Figura 145: Propiedades del estudio de cobertura 5G (Rangos).

8.11. Estudio radioeléctrico de multicobertura 5G

Para realizar este estudio se plantea utilizar las mismas coordenadas del servicio 4G, por lo cual se duplica el estudio de cobertura del ítem anterior y se cambian sus coordenadas con el fin de tener dos estudios de cobertura con las mismas prestaciones, pero en diferentes puntos.

Los parámetros cambiados son los siguientes:

- **Nombre:** Estación Base-Norte (5G NSA)
- **Coordenadas:** La localización como se mencionó anteriormente corresponde a la "Estación Base-Norte" del estudio 4G, teniendo los siguientes valores:
  - **Latitud:** 04°40'58.57"N
  - **Longitud:** 074°02'40.93"W
- **Orientación:** Debido a que la antena debe dar cobertura a un área específica se hace necesario variar

su orientación, con el fin de realizar la comparación correspondiente se utiliza el mismo valor que en el estudio de 4G, es decir 210°.

  - **Orientación del sector:** 210°

- **Frecuencia de transmisión del sector y del terminal:** Las estaciones base contiguas deben manejar diferentes frecuencias de transmisión, con el fin de evitar interferencias, por lo cual se asigna el canal 2 para esta estación.

  - **Frecuencia:** 2540 MHz
  - **Canal:** 2

Otro cambio respecto a la configuración 4G es que en el servicio 5G no aparece la configuración de ***"Entorno"***, por lo cual, no es posible agregar grupos de usuarios o sus diferentes características de consumo.

Una vez se añaden los dos estudios de cobertura el resultado se puede observar en las figuras 146 y 147:

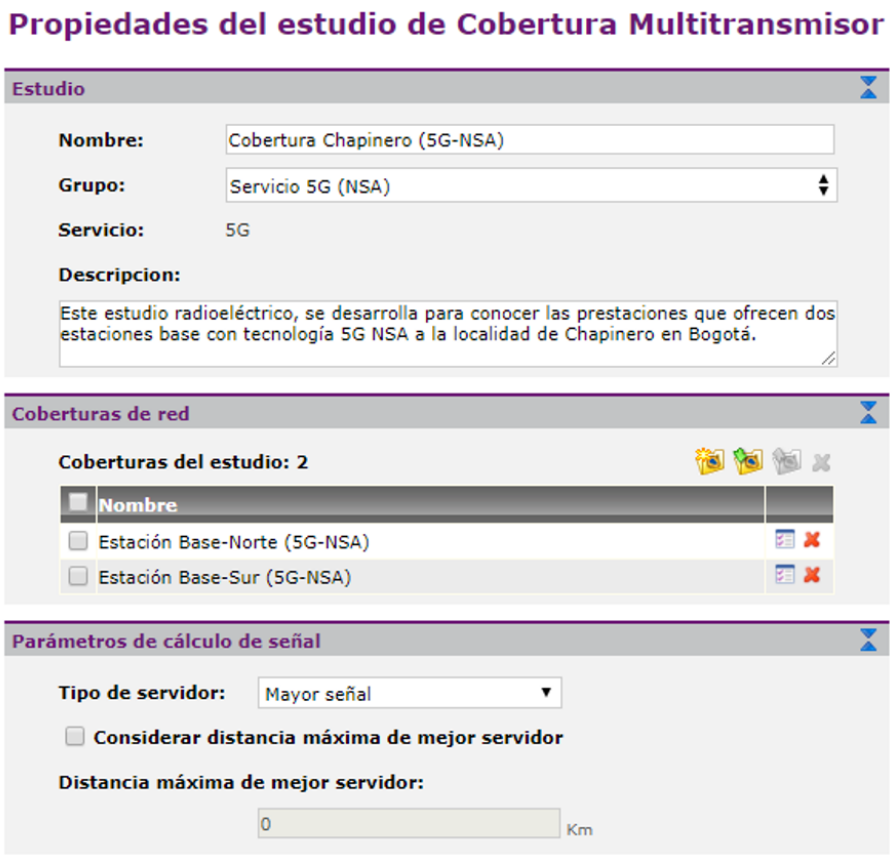


Figura 146: Propiedades del estudio multitransmisor 5G (Estudios, Coberturas de red y Parámetros de cálculo de señal).

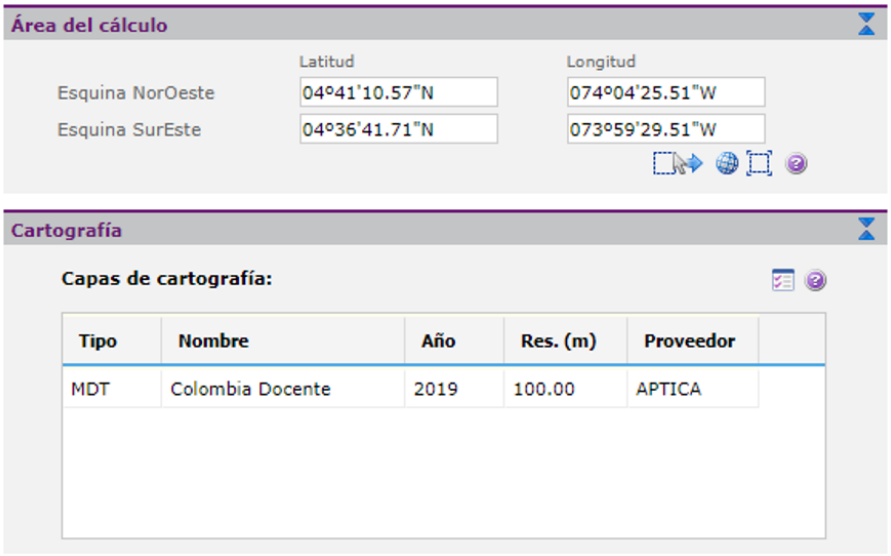


Figura 147: Propiedades del estudio multitransmisor 5G (Área de cálculo y Cartografía).

Como se puede apreciar la configuración para este estudio es muy similar al estudio multicobertura de 4G, sin embargo, en ***"Parámetros de interferencia"*** se asigna de manera automática el factor de rechazo a los servicios 5G, esto es debido a que nuestro estudio debe rechazar la señal interferente de servicios (de la misma tecnología) externos a los seleccionados en ***"Coberturas de red"***.

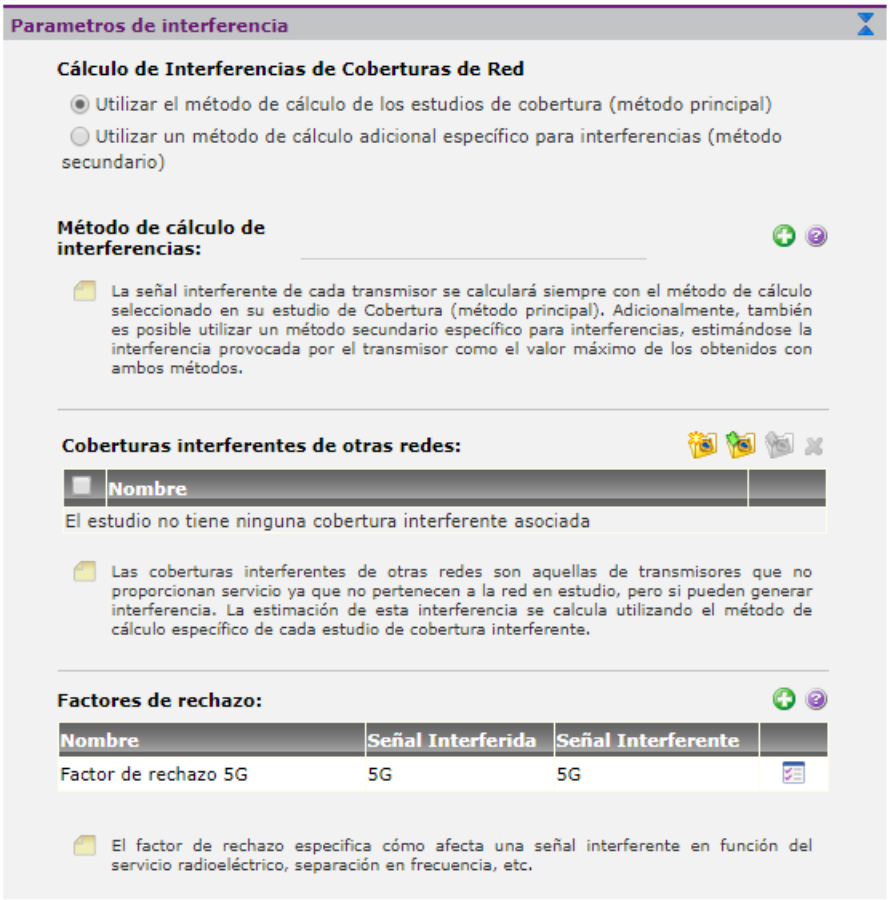


Figura 148: Parámetros de interferencia 5G.

La configuración de los parámetros de interferencia en términos generales es la misma que la de 4G, pero en este caso las señal interferente y la interferida son 5G non-stand-alone (figuras 148 y 149).

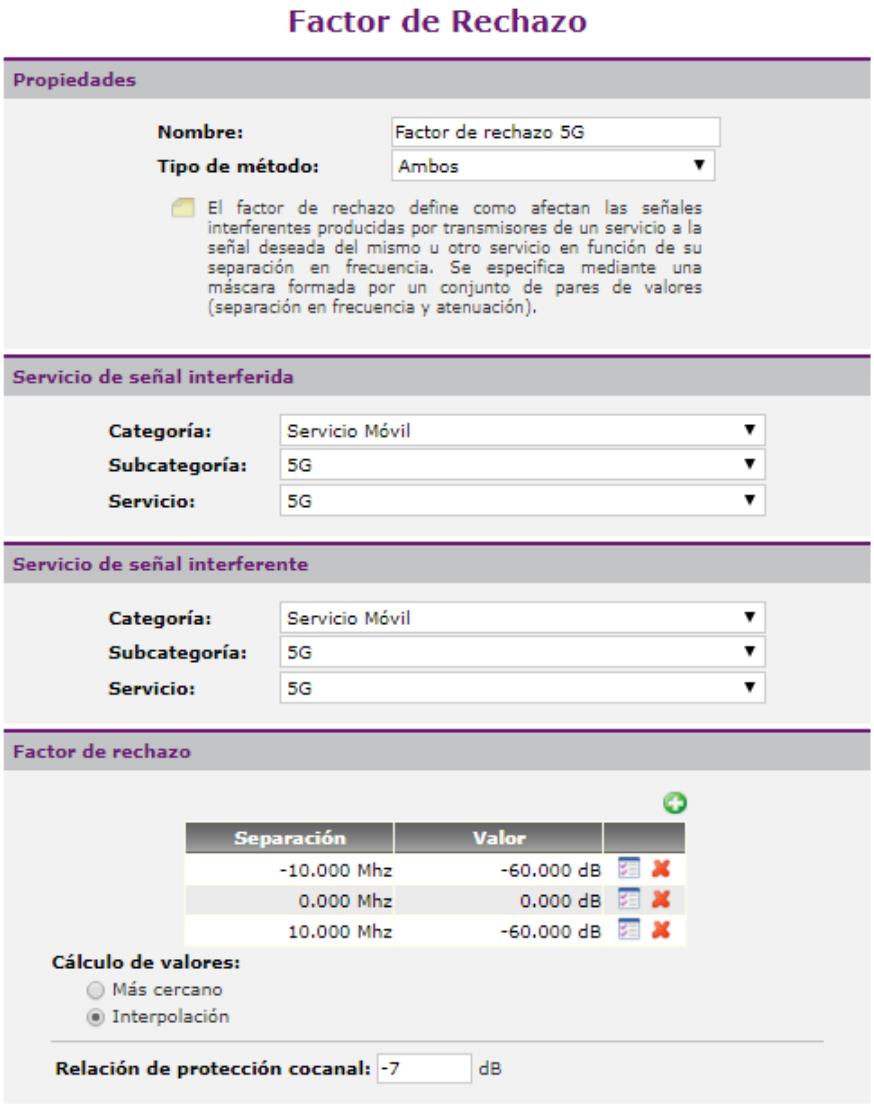


Figura 149: Factor de rechazo 5G.

Al igual que en en el estudio de 4G se realiza una configuración de los rangos de las diferentes señales que se pueden obtener, como se aprecia en las figuras 151 - 154.



Figura 150: Rangos (Señales de interferencia).



Figura 151: Rangos (Señal SS-RSRP y Solapamiento).

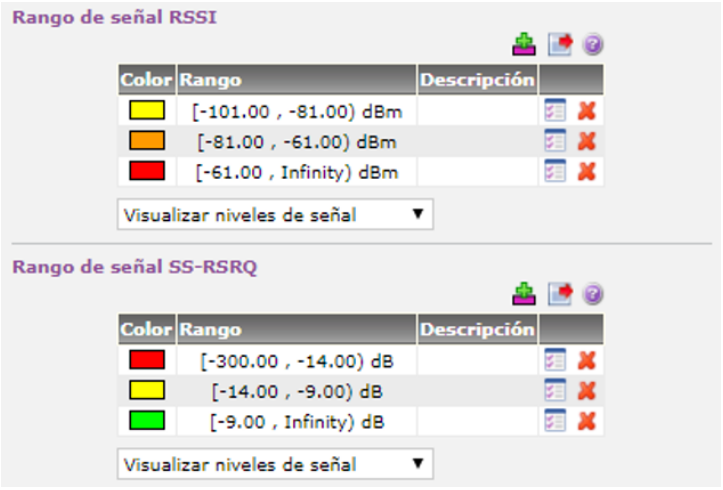


Figura 152: Rangos (RSSI y SS-RSRQ).

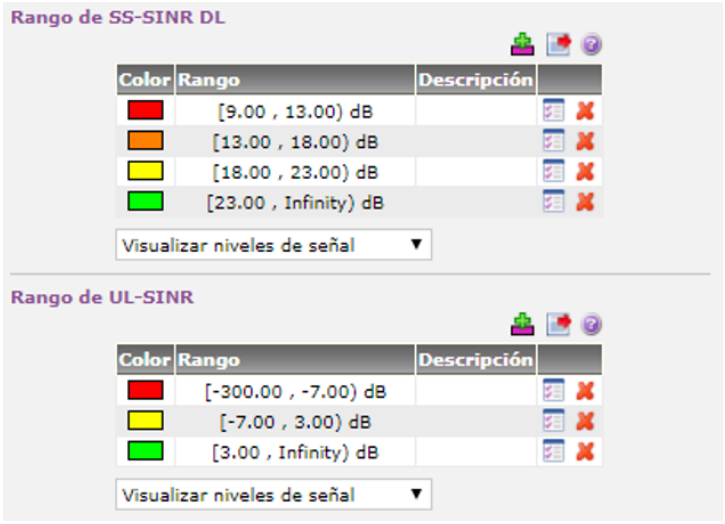


Figura 153: Rangos (SS-SINR DL y UL-SINR).

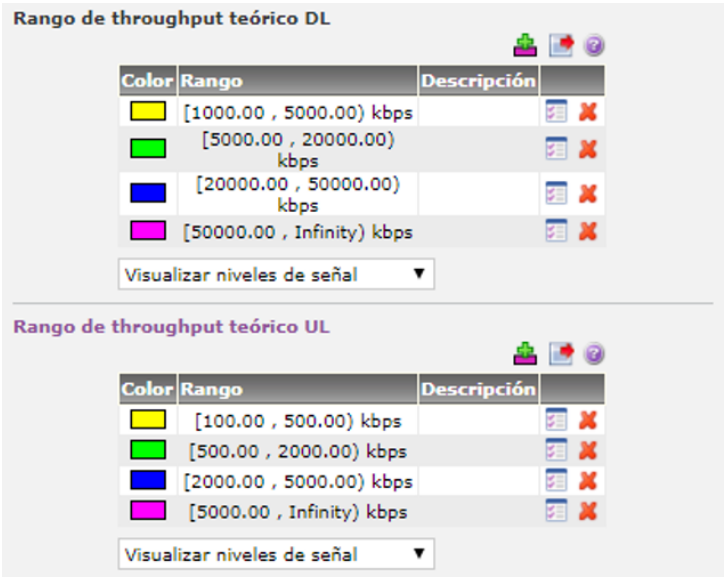


Figura 154: Rangos (Throughput teórico DL y Throughput teórico UL).

9. Xirio Online: Simulaciones, resultados y comparación

Al igual que en el capítulo 8, en el cual se explica la configuración de los diferentes estudios en Xirio, en la comparación de los resultados de las simulaciones se omitirá la información que sea redundante y que sea notorio que aplica para ambas tecnologías.

9.1. Resultados y comparación del estudio radioeléctrico enlace

Obtención de resultados de la simulación enlace:

Luego de realizar la selección y configuración de los parámetros del estudio, se procede a pulsar sobre los botones “Aplicar” y luego “Aceptar”, esto cerrará la ventana de configuración y podremos ver que en la ventana principal de Xirio aparece el estudio configurado.

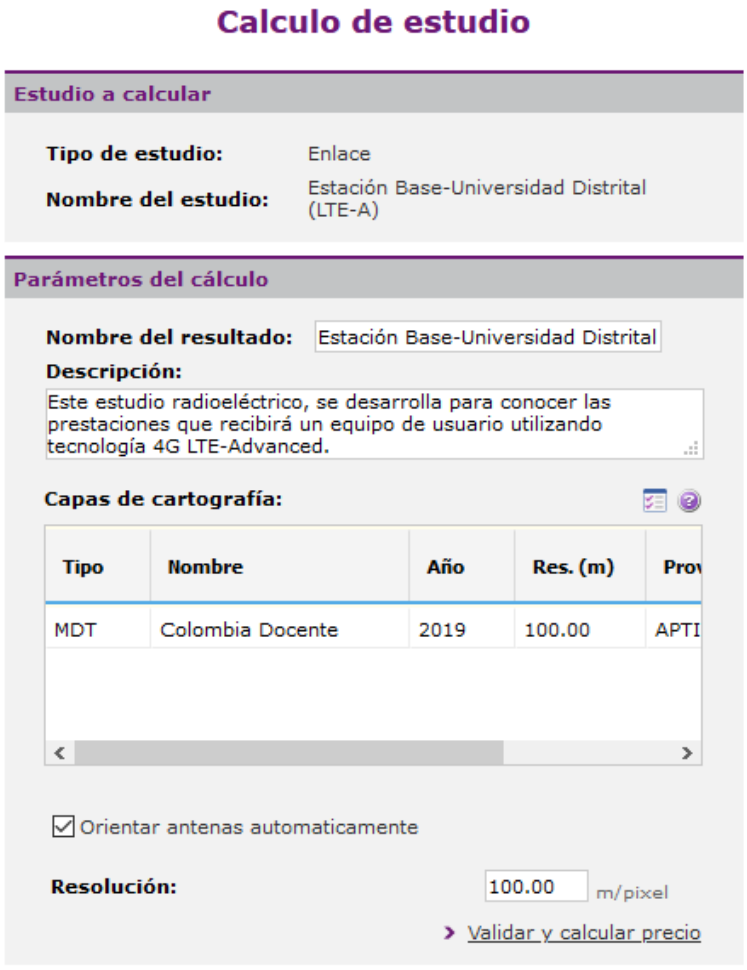


Figura 155: Cálculo del estudio.

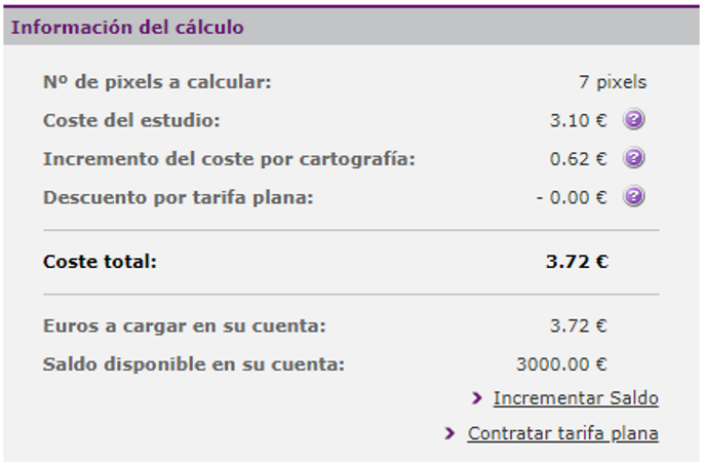


Figura 156: Información del cálculo.

Desde la ventana principal se procede a realizar los cálculos, para esto se selecciona la opción de calcular estudio a alta resolución en el panel de acciones (parte inferior izquierda), la ventana que se despliega es la que se muestra en la figuras 155 y 156, en esta ventana se puede seleccionar la capa cartográfica a utilizar, además se puede indicar si se quiere que Xirio oriente las antenas automáticamente, se recomienda habilitar esta opción, ya que las antenas se configuraran para intentar tener línea de vista y además dejar libre la 1ra zona de Fresnel, cambiando la inclinación y orientación de las antenas. Para realizar el cálculo del estudio se debe validar que los parámetros mínimos del estudio radioeléctrico se encuentren bien configurados, para esto se debe seleccionar la opción "Validar y calcular precio", si la configuración es correcta se mostrará la sección de información del cálculo al final de la ventana, de no ser así Xirio nos mostrará un mensaje de error con el fin de informar qué parámetros se deben reconfigurar.

9.1.1. Enlace (LTE-A)

En la figura 157 se muestran las convenciones que manejan los resultados de enlace.

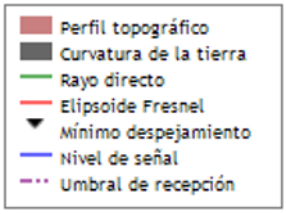


Figura 157: Convenciones resultados del estudio radioeléctrico de enlace.

En la figura 158 se visualiza el perfil topográfico del terreno que separa la estación base y el equipo de usuario, muestra el nivel de señal del rayo directo (LOS), como se puede observar la línea de vista no se encuentra obstruida, además indica el elipsoide de Fresnel (1ra Zona de Fresnel), este resultado indica que la primera zona de Fresnel se encuentra libre, por lo tanto, la interferencia causada por la reflexión de las ondas en los diferentes elementos y objetos en el trayectoria serán menores, por último, los niveles de señal recibidos por el equipo de usuario (-68,94 dBm – -64,06 dBm) se encuentran dentro de su nivel de sensibilidad umbral, RSRP threshold (-122 dBm – 44 dBm), este resultado indica que la información enviada por la estación base fue recibida por el equipo de usuario.

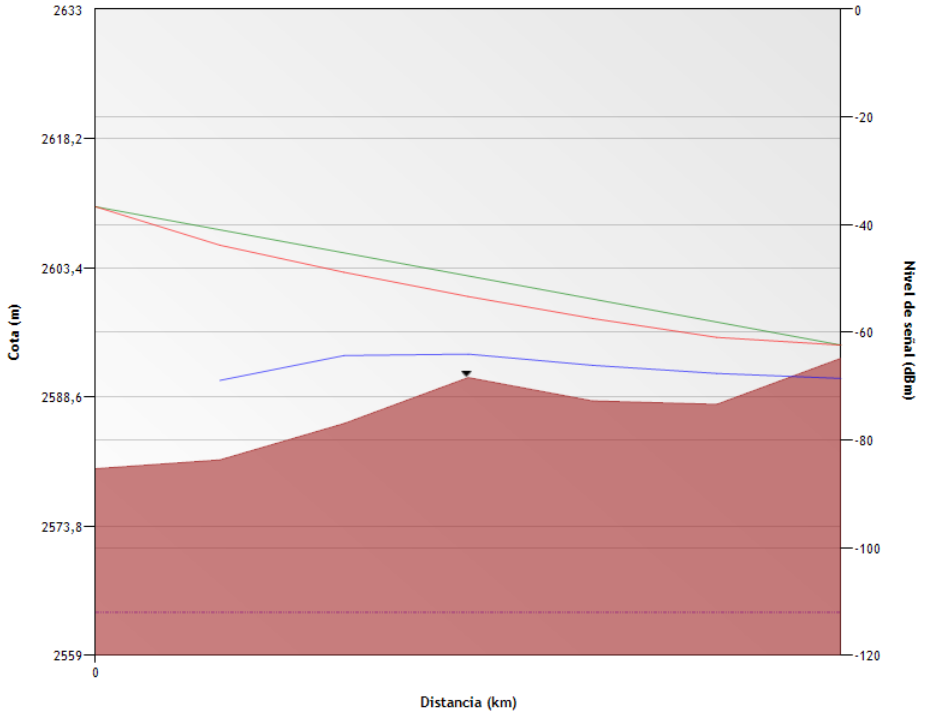


Figura 158: Resultado enlace (LTE-A).

Informe de enlace

Distancia (km)	Cota (m)	Nivel de señal (dBm)
0	2580,38	---
0,088	2581,38	-68,94
0,176	2585,56	-64,32
0,264	2590,81	-64,06
0,352	2588,15	-66,14
0,44	2587,75	-67,64
0,528	2593,03	-68,57

Figura 159: Informe enlace (LTE-A).

En la figura 159 se muestra una tabla con diferentes puntos que se encuentran dentro de la trayectoria del enlace, con su respectiva cota y nivel de señal recibido.

9.1.2. Enlace (5G)

En la figura 160 se visualiza el perfil topográfico del terreno que separa la estación base y el equipo de usuario, las características son aproximadamente las mismas a las que se mencionaron en 4G (9.1.1 Resultados del estudio radioeléctrico enlace (LTE-A)), por lo que es necesario diferenciarlos mediante el informe del enlace (figura 161), el cual indica que los niveles de señal recibido por el equipo de usuario están en el rango de (-76,85 dBm – -71,98 dBm) y por lo tanto, se encuentran dentro de su nivel de sensibilidad umbral, RSRP threshold (-122 dBm – 44 dBm), este resultado indica que la información enviada por la estación base fue recibida por el equipo de usuario.

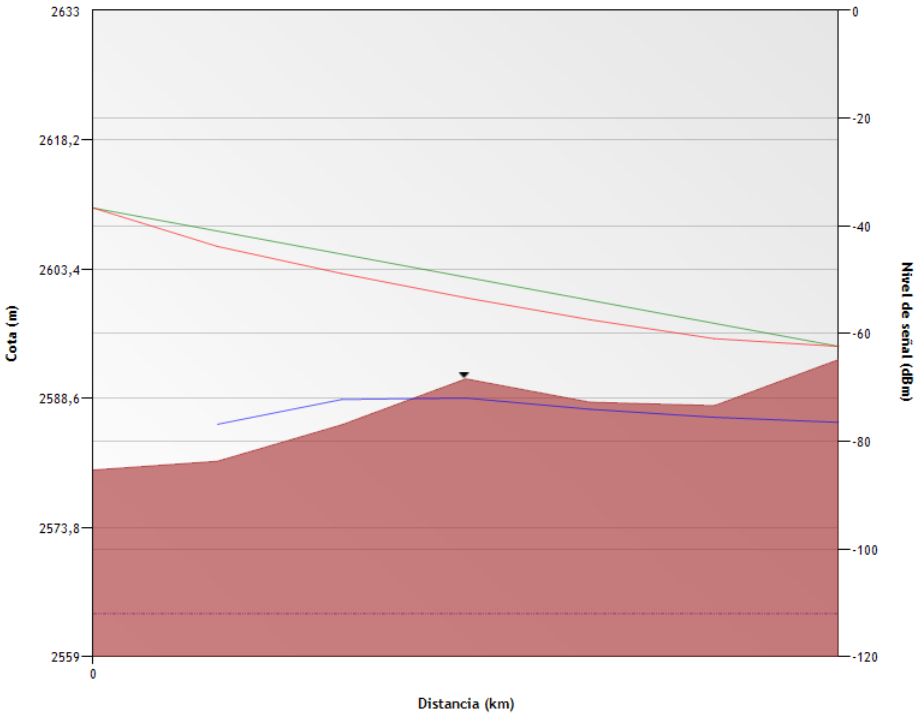


Figura 160: Resultado enlace (5G).

Informe de enlace

Distancia (km)	Cota (m)	Nivel de señal (dBm)
0	2580,38	---
0,088	2581,38	-76,85
0,176	2585,56	-72,24
0,264	2590,81	-71,98
0,352	2588,15	-74,05
0,44	2587,75	-75,56
0,528	2593,03	-76,49

Figura 161: Informe enlace (5G).

9.1.3. Comparación enlace

Como se puede observar en las figuras 158 y 160, para este enlace ambas tecnologías tienen línea de vista (LOS) y además las primera zona de Fresnel no se encuentra obstruida, lo que permite tener un adecuado servicio móvil, por lo tanto, para poder diferenciar estos servicios es necesario comparar sus informes de enlace (figuras 159 y 161), en los que se detallan la distancia [Km], la cota [m] y el nivel de señal [dBm] recibido en cada punto. Comparando los valores de nivel de señal obtenidos en estos estudios, se puede apreciar que para las diferentes distancias se tienen aproximadamente 8 dBm de diferencia, a favor de la tecnología LTE-A, lo que implica que la señal recibida del servicio móvil LTE-A es mayor en 8 dBm a la recibida por 5G, en otras palabras, el servicio móvil 5G tiene 8 dBm de perdidas con respecto a LTE-A.

9.2. Resultados y comparación del estudio radioeléctrico cobertura

Para la comparación de este estudio radioeléctrico, se crearon tres puntos de interés (figuras 114 y 162) a lo largo de la localidad de Chapinero, para evaluar los resultados numéricos en estos puntos específicos de la ciudad.

- Universidad Distrital (Facultad de Ingeniería).
- Centro Comercial Unilago.
- Estación de Transmilenio Calle 100.



Figura 162: Puntos de interés (Unilago y Estación calle 100).

En LTE, las mediciones de UE se realizan para RSRP, RSRQ y SINR asociadas con CRS (Señal de referencia específica de celda). En cambio para 5G NR se utiliza SS (señal de sincronización) y CSI (información de estado del canal) en lugar de CRS. Por esto la 3GPP estableció nuevas definiciones para las mediciones de UE [55], siendo SS-RSRP, SS-RSRQ Y SS-SINR, haciendo referencia a que su definición cambia en que su medición se realiza sobre los elementos que contienen señal de sincronización en lugar de realizarse sobre la señal de referencia. La definición de la señal que se calcula en esta sección se encuentran a continuación:

Señal RSRP: La definición de esta señal se menciona en ***"Conceptos"***. En la tabla 6 se aprecia una estimación de los niveles de intensidad de señal aceptables:

Intensidad de la señal [dBm]	Calificación
Mayor a -80	Excelente
-80 a -90	Bueno
-90 a -100	Regular
Menor a -100	Muy mala

Tabla 6: Margen nivel de la señal RSRP [56].

Para el estudio radioeléctrico de cobertura existe otro cálculo que se puede realizar, para esto se debe seleccionar en el panel de acciones la opción "calcular estadísticas de cobertura", este cálculo consiste de un informe detallado de los porcentajes de población y superficie cubiertos. Previo al cálculo el usuario deberá seleccionar una capa administrativa para realizar el cálculo, debido a que no se dispone de una capa administrativa no es posible realizar este cálculo, como se puede ver en la figura 163.

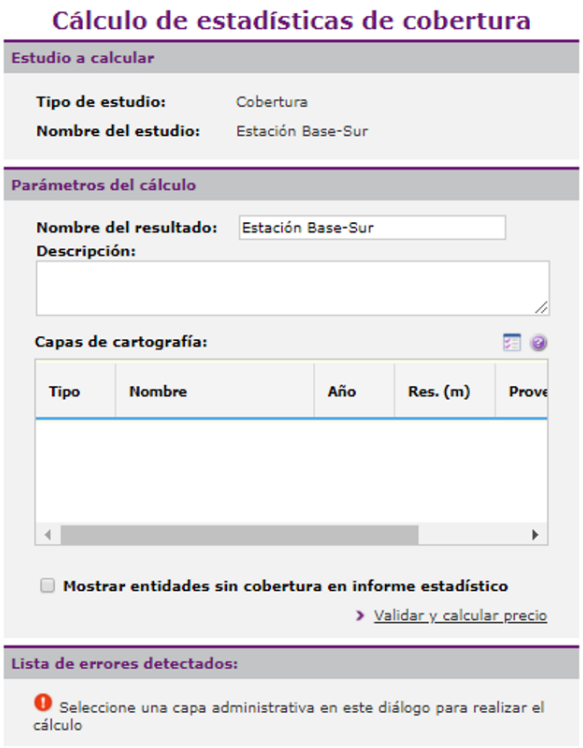


Figura 163: Cálculo de estadísticas de cobertura.

9.2.1. Señal RSRP (LTE-A)

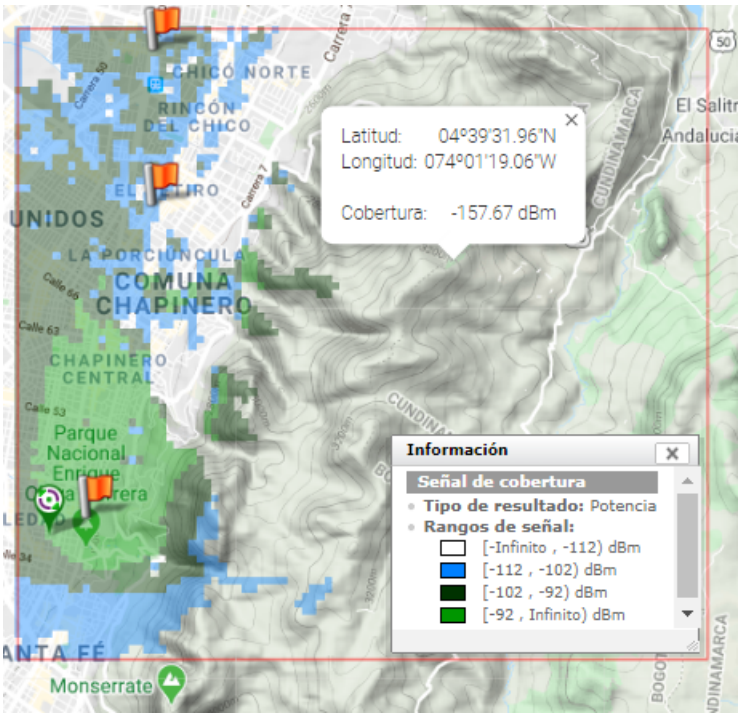


Figura 164: Señal RSRP (LTE-A).

En la figura 164 se puede observar el resultado del nivel de señal recibido en el área seleccionada, dentro de la cual se encuentra inmersa el área de la localidad de Chapinero a la cual se le va a dar cobertura, este resultado muestra que con solo la puesta en servicio de la estación base sur, no se pueden brindar servicios y prestaciones de alta calidad, ya que no se puede dar cobertura a toda la localidad, por esto se hace necesario agregar otra estación base a la red LTE-A que se está implementando, para realizar esto se debe realizar un estudio radioeléctrico multitransmisor.

En la figura 164 también se identifica porque en la zona suburbana y rural de la localidad, la señal no es recibida, esto se debe a que la zona es de alto relieve (Cerros Orientales), pero como se indicó en un principio, estas zonas no van a ser tenidas en cuenta. En esta misma figura, también se puede observar otra de las funcionalidades que posee Xirio, en el panel de acciones podemos seleccionar la opción "Leer valor en un punto", elegimos un lugar en el visor y luego se visualizará un cuadro de información con las coordenadas del lugar (latitud y longitud) y el nivel de señal recibida, esta es la funcionalidad que se utilizo para conocer la señal recibida en los tres puntos de interés (tabla 7).

Punto de interés	Nivel de la señal RSRP [dBm]
Universidad Distrital	-68.54
Unilago	-110.79
Estación Calle 100	-100.73

Tabla 7: Nivel de la señal RSRP (LTE-A).

Como se puede observar en la tabla 7, en los tres puntos de interés se recibe un nivel de señal que se encuentra dentro del nivel de sensibilidad umbral, RSRP threshold (-122 dBm – 44 dBm), lo que implica que en estos tres puntos de interés si se presta el servicio, obviamente con diferencias en la calidad.

En la parte inferior del área del cálculo de la figura 164, se puede observar que el nivel de señal disminuye rápidamente a una distancia relativamente corta de la estación base, esto ocurre debido a que el lóbulo posterior de radiación es pequeño, con respecto al lóbulo frontal, se debe tener en cuenta que el área de cálculo es mayor que la localidad de Chapinero, por lo tanto, la localidad se encuentra contenida, esto implica que la parte más sur de la localidad de Chapinero si recibe un nivel de óptimo de señal.

9.2.2. Señal SS-RSRP (5G)

Los niveles de señal SS-RSRP obtenidos de los tres puntos de interés se pueden observar en la tabla 8, los tres puntos de interés se recibe un nivel de señal que se encuentra dentro del nivel de sensibilidad umbral, SS-RSRP threshold (-122 dBm – 44 dBm).

Punto de interés	Nivel de la señal SS-RSRP [dBm]
Universidad Distrital	-76.46
Unilago	-118.71
Estación Calle 100	-108.65

Tabla 8: Nivel de la señal SS-RSRP (5G).

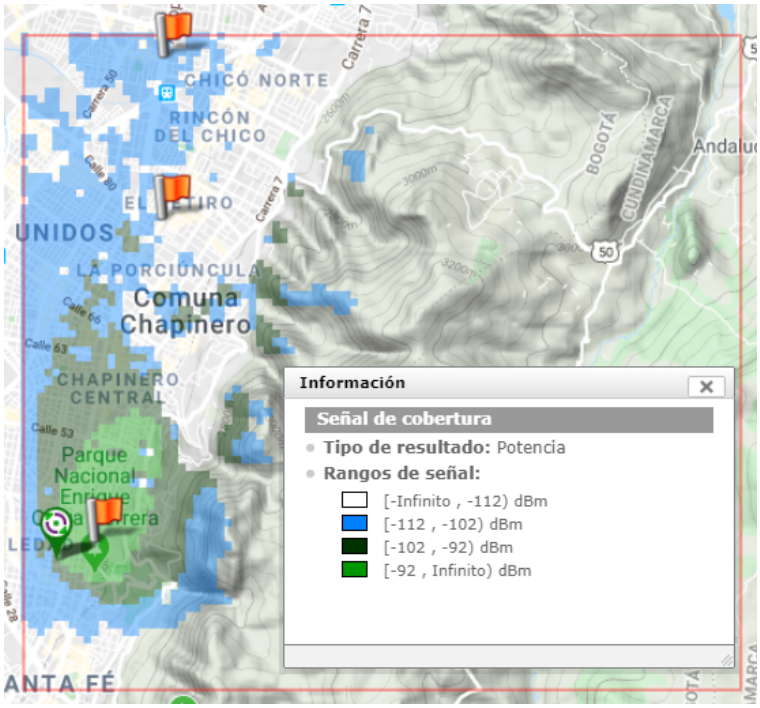


Figura 165: Señal SS-RSRP (5G).

9.2.3. Comparación cobertura

Como se puede identificar en las figuras 164 y 165, la cobertura y nivel de señal que otorgan las estaciones base son aproximadamente iguales, pero ya comprarando los tres puntos de interés se puede observar que existe una diferencia de aproximadamente 8 dBm, a favor de la tecnología LTE-A, lo que implica que la señal recibida del servicio móvil LTE-A es mayor en 8 dBm a la recibida por 5G, en otras palabras, el servicio móvil 5G tiene 8 dBm de perdidas con respecto a LTE-A, conclusión muy similar a la obtenida en la comparación enlace 9.1.3. También se debe tener en cuenta que para ambos servicios móviles, en los tres puntos de interés, los niveles de señal RSRP se encuentran dentro del rango umbral de sensibilidad, RSRP threshold (-122 dBm – 44 dBm), lo que implica que el servicio para los tres puntos de interés con las dos tecnologías funciona correctamente, con las diferencias de calidad dependiendo de la distancia con respecto a la estación base, teniendo que únicamente el punto de “Universidad Distrital” tiene un nivel de señal excelente.

9.3. Resultados y comparación del estudio radioeléctrico multicobertura

Para el estudio de multicobertura se pueden realizar diferentes cálculos, tales como:

1. Cálculo gratuito a baja resolución
2. Cálculo a alta resolución.
3. Calcular estadísticas de cobertura.
4. Cálculo de interferencias.
5. Calcular estadísticas de interferencia.
6. Cálculo de capacidad.
7. Cálculo y visualización de ruta.
8. Cálculo de ajuste de medidas.
9. Cálculo de interferencia en un punto.

De esta lista solo se realizaron los cálculos de los numerales 2, 4, 6 y 9, que son los cálculos que nos permite la licencia que nos otorgo la universidad, ya que para los demás cálculos se hace necesario tener una capa administrativa.

En términos generales los resultados que se obtuvieron se dividen en tres grupos para LTE-A y en dos para 5G, los cuales son;

- LTE-A
  - Resultado LTE
  - Capacidad
  - Resultado multicobertura
- 5G
  - Resultado 5G
  - Resultado multicobertura

En el momento de la realización de este proyecto de grado, los cálculos de capacidad para 5G aún no se encuentran disponibles.

Algunos de los conceptos que se mencionan en esta sección, se obtuvieron del proyecto de grado "Planificación de una Red 4G" [58].

Las definiciones de las señales encontradas en esta sección se encuentran a continuación:

- **Señal RSSI:** El indicador de intensidad de señal recibida (RSSI) es una medida estimada de lo bien que un dispositivo puede recibir señales de cualquier punto de acceso o de una antena específica. Más explícitamente se define como la media de la potencia total recibida en símbolos OFDM que contienen señales de referencia. Es un parámetro que ofrece información acerca de la potencia total recibida teniendo en cuenta interferencia, ruido térmico y la potencia recibida de celdas no servidoras. En la tabla 9 se aprecia una estimación de los niveles de intensidad de señal aceptables:

Intensidad de la señal [dBm]	Calificación
Mayor a -30	Excelente
-30 a -67	Bueno
-67 a -70	Regular
-70 a -80	Malo
Menor a -80	No aceptable

Tabla 9: Margen nivel de la señal RSSI [57].

- **Señal RSRQ:** Calidad de la señal de referencia recibida (RSRQ) proporciona información adicional en aquellas situaciones en las que RSRP no es suficiente. Esta medida trata de proporcionar una estimación de la calidad recibida desde una celda en particular. También se puede usar como entrada para los algoritmos de decisión de reselección de celda, handover y modulación adaptativa. La señal RSRQ esta definido como:

$$RSRQ = N * (\frac{RSRP}{RSSI}) \tag{8}$$

  Donde N es el número de PRB's del ancho de banda de medida, en otras palabras, N es el número de PRB's donde se mide tanto el RSRP como el RSSI. En la tabla 10 se aprecia una estimación de los niveles de intensidad de señal aceptables:

Intensidad de la señal [dB]	Calificación
Mayor a -10	Excelente
-10 a -15	Bueno
-15 a -20	Regular
Menor a -20	No aceptable

Tabla 10: Margen nivel de la señal RSRQ [56].

- **PDSCH SINR:** Este valor corresponde al resultado de SINR en el canal físico compartido del enlace descendente.
- **PUSCH SINR:** Este valor corresponde al resultado de SINR en el canal físico compartido en el enlace ascendente.
- **RS SINR:** Señal de referencia SINR (RS SINR) muestra la relación señal a interferencia más ruido de las señales de referencia contemplando únicamente los símbolos en los que hay transmisión de las mismas.
- **Potencia en recepción:** Se calcula como la potencia media, a la que se le aplica un margen por desvanecimiento que permita asegurar el nivel de cumplimiento considerado, más la suma de ganancias asociadas al receptor, como son las de la antena y la ganancia MIMO, más las pérdidas.

9.3.1. Señal RSRP (LTE-A)

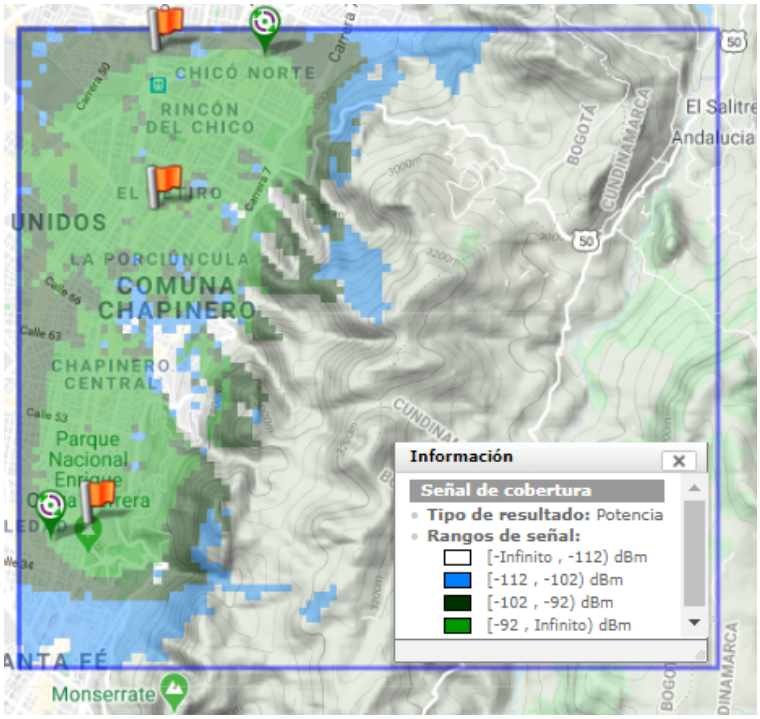


Figura 166: Señal RSRP (LTE-A - Multicobertura).

En la figura 166 se puede observar que la parte urbana de la localidad de Chapinero tiene una cobertura aproximadamente del 100 %, además que el nivel de señal es óptimo y mejoró notablemente con respecto a al estudio de cobertura (tabla 7), por lo tanto, también se encuentran dentro del rango del RSRP threshold, estos resultados se obtuvieron gracias a las prestaciones que se añadieron al implementar otra estación base en la parte norte de la localidad.

Los niveles de señal RSRP obtenidos de los tres puntos de interés se pueden observar en la tabla 11.

Punto de interés	Nivel de la señal RSRP [dBm]
Universidad Distrital	-68.60
Unilago	-82.70
Estación Calle 100	-93.80

Tabla 11: Nivel de la señal RSRP (LTE-A - Multicobertura).

9.3.2. Señal SS-RSRP (5G)

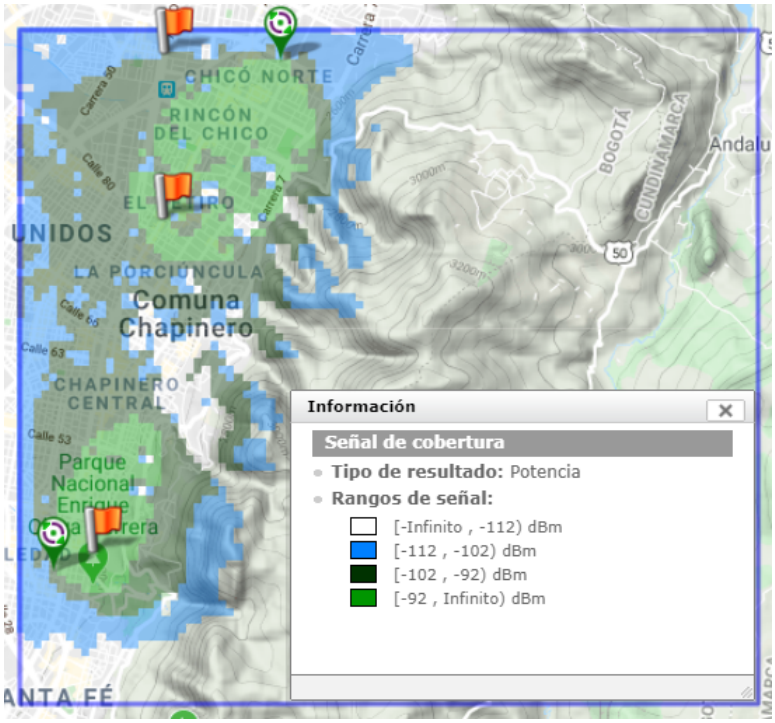


Figura 167: Señal SS-RSRP (5G - Multicobertura).

Los niveles de señal SS-RSRP obtenidos de los tres puntos de interés se pueden observar en la tabla 12.

Punto de interés	Nivel de la señal SS-RSRP [dBm]
Universidad Distrital	-76.50
Unilago	-90.60
Estación Calle 100	-101.70

Tabla 12: Nivel de la señal SS-RSRP (5G - Multicobertura).

9.3.3. Comparación RSRP

Como se pudo identificar en las figuras 166 y 167 para ambas tecnologías, el agregar una estación en la parte norte de la localidad de Chapinero aumento la cobertura, ahora la cobertura es aproximadamente del 100 % para la zona urbana, y el nivel de señal RSRP mejoro, ahora la mayor parte de la localidad maneja un nivel de señal alto, como lo indica el color verde de las figuras 166 y 167. Aunque se redujo un poco la diferencia entre los niveles de señal RSRP entre los servicios móviles, se mantiene en aproximadamente 8 dBm, a favor del servicio móvil LTE-A.

9.3.4. Solapamiento (LTE-A)

Este cálculo indica en cada punto de la zona, el número de señales que provienen de diferentes transmisores, cuyo nivel de señal es igual o superior al valor umbral de recepción, indica las zonas donde la señal de las estaciones base se solapan, en otras palabras, indica cuantos servidores operan en ciertas zonas del área de cobertura, lo que también representa el número de transmisores que compiten por ser el mejor servidor en cada zona, además también nos muestra en cuales áreas del territorio no hay recepción de señal de ningún servidor.

Además, este resultado también puede ser tomado como una guía para observar que zonas geográficas, son más susceptibles de producir interferencias, debido a la alta concentración radioeléctrica.

Al igual que en cálculo del nivel de señal RSRP, Xirio tiene la funcionalidad "Leer valor en un punto", está funcionalidad indica la posición geográfica del punto (latitud y longitud) y la cantidad de servidores que pueden prestar el servicio móvil, como se puede observar en la figura 168.

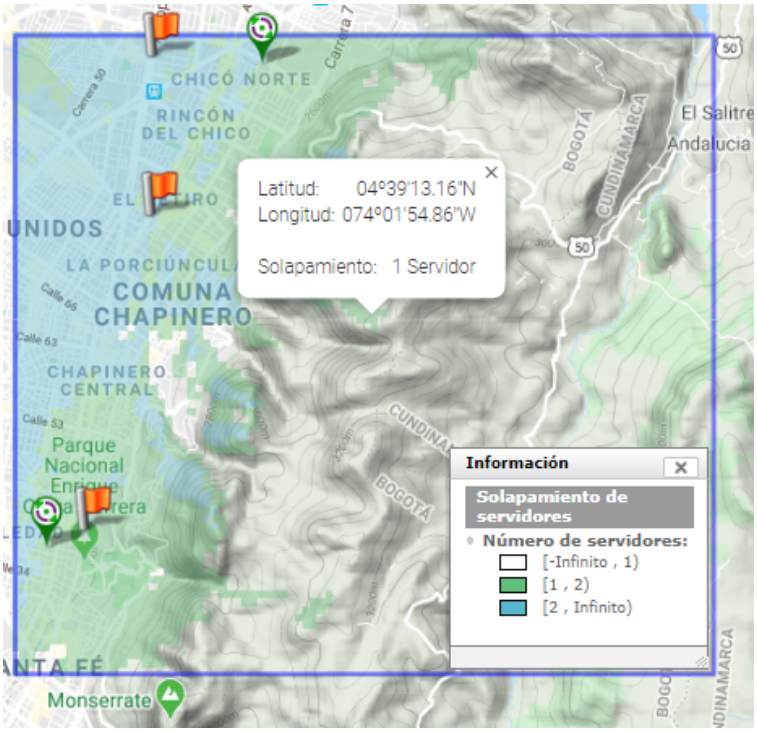


Figura 168: Solapamiento (LTE-A).

En la tabla 13, se muestra para cada punto de interés cuantos servidores prestan o podrían el servicio móvil LTE-A.

Punto de interés	Número de servidores
Universidad Distrital	1
Unilago	2
Estación Calle 100	2

Tabla 13: Solapamiento (LTE-A).

9.3.5. Solapamiento (5G)

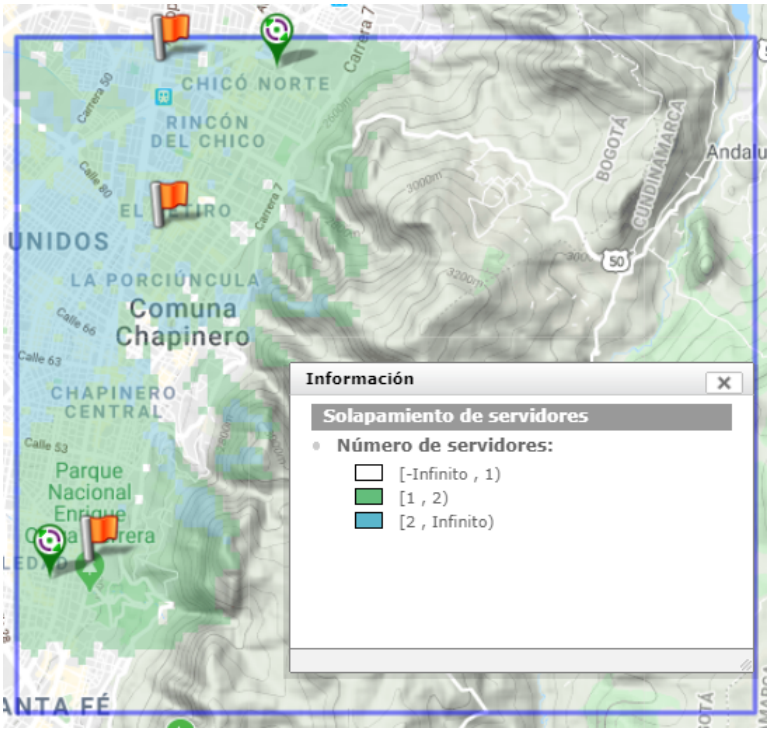


Figura 169: Solapamiento (5G).

En la tabla 14, se muestra para cada punto de interés cuantos servidores prestan o podrían el servicio móvil 5G.

Punto de interés	Número de servidores
Universidad Distrital	1
Unilago	1
Estación Calle 100	2

Tabla 14: Solapamiento (5G).

9.3.6. Comparación solapamiento

Como se puede observar en las figuras 168 y 169, además en las tablas 13 y 14, que los resultados son prácticamente los mismos, esto ocurre debido a que los niveles de señal y la cobertura de las dos tecnologías son aproximadamente las mismas, por lo tanto, para los tres puntos de interés la cantidad de servidores que podrían o prestan el servicio móvil son iguales.

Si en una zona existen varias estaciones base que pueden ser candidatas a mejor servidor, esto es beneficioso, en el sentido de que en el caso de que alguna estación base se encuentre saturada, falle o este fuera de servicio, entre más servidores existan, hay mayor posibilidad de que alguno otro pueda prestar los servicios del anterior servidor, con las mismas o casi las mismas prestaciones. También se debe tener en cuenta, que no siempre el que exista una mayor cantidad de servidores que puedan prestar el servicio en una zona (solapamiento) es una ventaja, debido a que, al existir una gran cantidad de señales en la zona, estás pueden generar un mayor nivel de interferencia en esta área.

9.3.7. Mejor servidor (LTE-A)

Este cálculo indica cuál es el mejor servidor, dependiendo de las prestaciones de las diferentes estaciones base del estudio, seleccionando la que suministre mejor calidad del servicio. Como se mostró en “8.8.2 Parámetros de cálculo de la señal”, el método de selección elegido para determinar el transmisor (estación base) deseado, fue el método de mayor señal y no se limitó la distancia máxima donde podría ubicarse el servidor.

En este caso la funcionalidad "Leer valor en un punto", nos indica la posición geográfica del punto (latitud y longitud) y el nombre de la estación base que ofrece mejores prestaciones y por lo tanto, es el mejor servidor, como se puede observar en la figura 170.

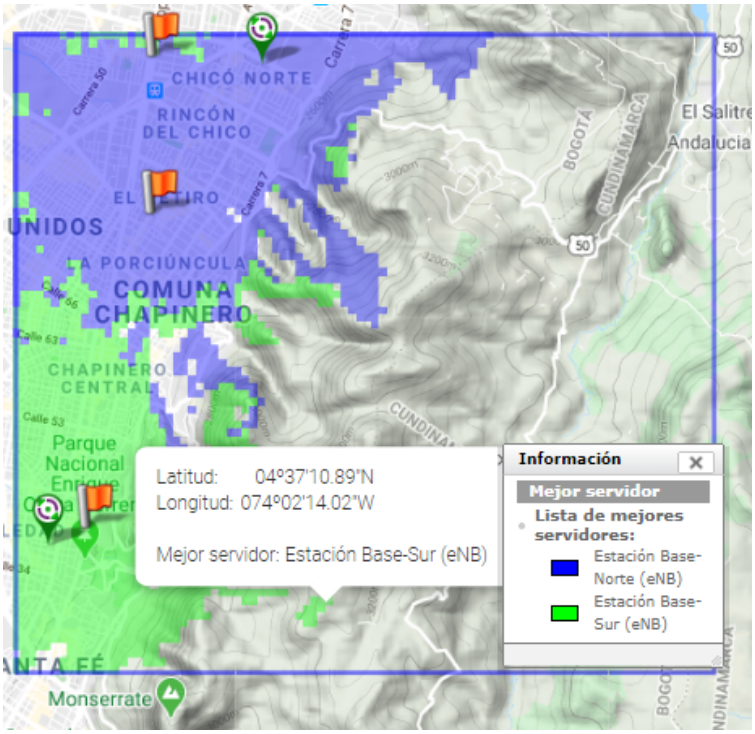


Figura 170: Mejor servidor (LTE-A).

En la tabla 15, se muestra para cada punto de interés cual es el mejor servidor para el servicio móvil LTE-A.

Punto de interés	Nombre del servidor
Universidad Distrital	Estación Base-Sur (eNB)
Unilago	Estación Base-Norte (eNB)
Estación Calle 100	Estación Base-Norte (eNB)

Tabla 15: Mejor servidor (LTE-A).

9.3.8. Mejor servidor (5G)

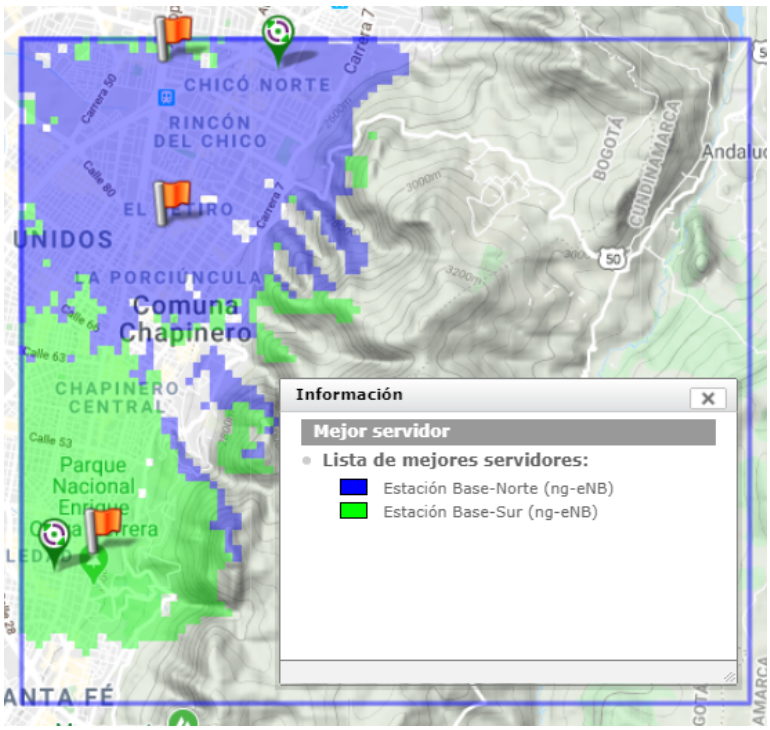


Figura 171: Mejor servidor (5G).

En la tabla 16, se muestra para cada punto de interés cual es el mejor servidor para el servicio móvil 5G.

Punto de interés	Nombre del servidor
Universidad Distrital	Estación Base-Sur (ng-eNB)
Unilago	Estación Base-Norte (ng-eNB)
Estación Calle 100	Estación Base-Norte (ng-eNB)

Tabla 16: Mejor servidor (5G).

9.3.9. Comparación mejor servidor

Para este cálculo los resultados son los mismos, debido a que los niveles de potencia de recepción son similares y los puntos de interés a comparar están muy próximos a una estación base especifica.

Se debe tener en cuenta, que no siempre el servidor más cercano a un punto es el que va a establecer comunicación con el terminal, estaciones base que estén situadas en una posición más alta que las demás, tienen un mayor alcance en cuanto al radio de cobertura, mejor línea de vista (LOS) y posiblemente tienen una menor obstrucción de la primera zona de Fresnel. Debido a esto es capaz de proporcionar mayor nivel de señal a una zona, aunque en esta zona existan estaciones base más cercanas.

9.3.10. Señal RSSI (LTE-A)

Este cálculo indica cuál es la potencia medida del RSSI en el área seleccionada, esta señal es un conjunto de la potencia total de la celda que da servicio, pero además, la potencia recibida de celdas no servidoras, ruido e interferencias. La potencia medida del RSSI debe de ser mayor que la del RSRP, ya que esta última solo mide la potencia de la señal de un sector, excluyendo ruidos, interferencias y otro tipo de señales.

En este caso la funcionalidad "Leer valor en un punto", nos indica la posición geográfica del punto (latitud y longitud) y el nivel de potencia de la señal RSSI, como se puede observar en la figura 172.

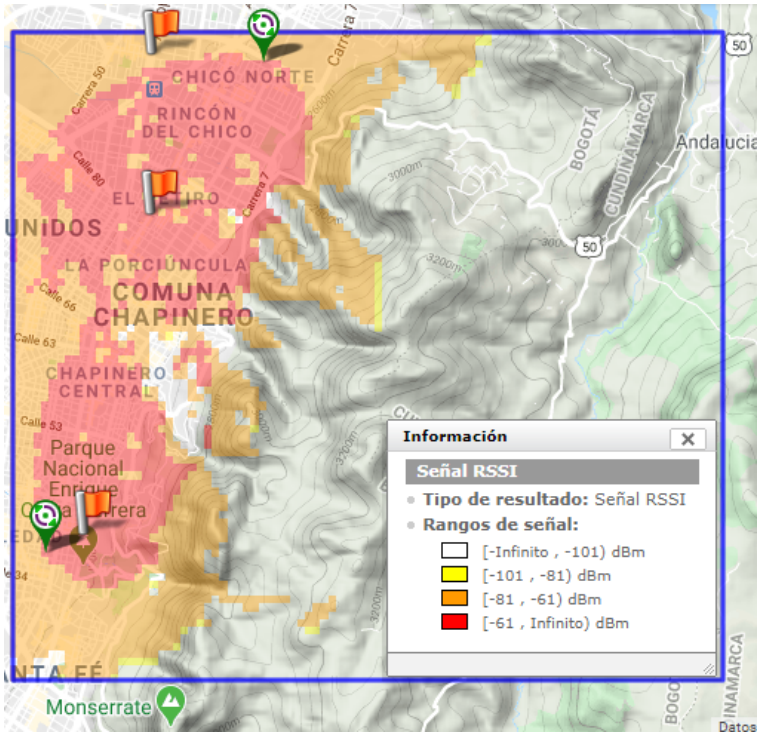


Figura 172: Señal RSSI (LTE-A).

En la tabla 17 se registran los valores medidos en los 3 puntos de interés, y al comparar con los valores obtenidos para la señal RSRP (tabla 11) observamos que es mayor 30 dBm en cada uno de los puntos, cumpliendo así lo mencionado anteriormente, además se puede observar que con los rangos seleccionados en Xirio (figura 172), los puntos de interés “Universidad Distrital” y “Unilago” están en el rango de mejor nivel de señal RSSI, mientras que el punto de interés “Estación calle 100” se encuentra en el segundo rango que al igual sigue siendo bueno, pero si comparamos los valores obtenidos en la tabla 17, con los valores estándar que nos indica la tabla 9 para los niveles de señal RSSI, se observa que; los tres puntos de interés tienen un nivel bueno de señal RSSI, que el punto de interés “Universidad Distrital” esta cercano a un nivel excelente de señal RSSI y en cambio, el punto de interés “Estación calle 100” esta muy cercano a un nivel de señal RSSI regular.

Punto de interés	Señal RSSI [dBm]
Universidad Distrital	-38.60
Unilago	-52.70
Estación Calle 100	-63.80

Tabla 17: Señal RSSI (LTE-A).

9.3.11. Señal SS-RSSI (5G)

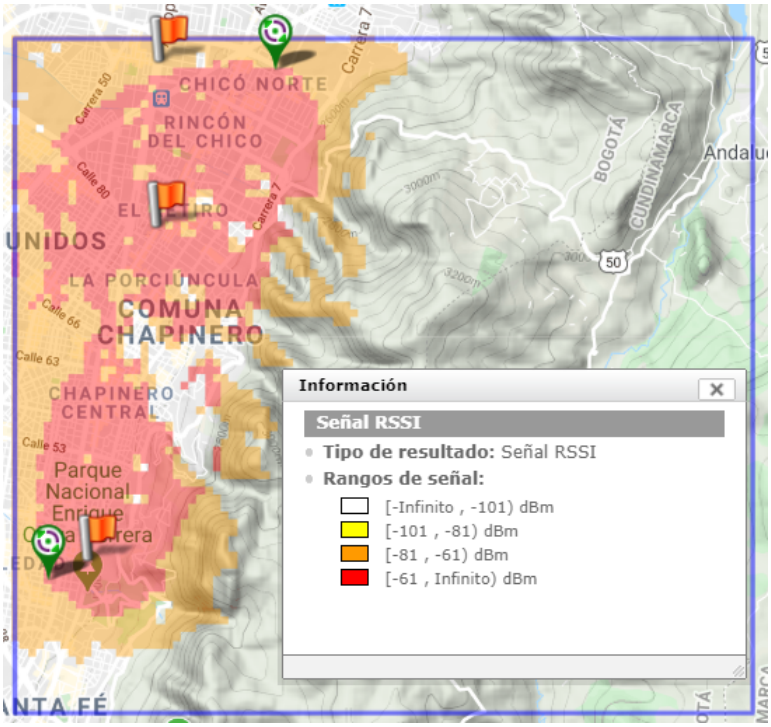


Figura 173: Señal RSSI (5G).

En la tabla 18 se registran los valores medidos en los 3 puntos de interés, y al comparar con los valores obtenidos para la señal RSRP (tabla 12) observamos que es mayor 38 dBm en cada uno de los puntos.

Punto de interés	Señal RSSI [dBm]
Universidad Distrital	-38.54
Unilago	-52.61
Estación Calle 100	-63.77

Tabla 18: Señal RSSI (5G).

9.3.12. Comparación RSSI

Se puede observar que en el estudio 4G (figura 172), existe una mayor zona de cobertura de la señal RSSI, que el estudio 5G (figura 173), esto se hace mas notorio en la parte posterior de la "Estación Base Sur" o del punto de interés "Universidad Distrital", sin embargo, en general se puede decir que los dos tipos de servicio brindan buen nivel de señal para el área seleccionada. Además al comparar los valores de cada uno de los puntos de las tablas 17 y 18, se observa que son muy similares los niveles de la señal RSSI, y por lo tanto, con respecto a los rangos de RSSI estándar de la tabla 9, para ambas redes, se tiene que los puntos de interés "Universidad Distrital" y "Unilago" con un nivel bueno de calidad en la señal, y con un menor valor un punto de interés "Estación calle 100" con un nivel de señal RSSI que se aproxima a un nivel regular, sin embargo, alcanza a calcificarse como bueno.

9.3.13. Señal RSRQ (LTE-A)

Este cálculo indica cuál es el nivel de la señal RSRQ en el área seleccionada, esta señal proporciona una estimación de la calidad que se tiene en la celda. Se puede afirmar que esta señal una medida del tipo portadora a ruido (C/I), la cual trata de indicar la señal de referencia recibida. La utilización del RSRQ es importante cuando no es suficiente con el uso del RSRP para hacer un traspaso o reselección de celda

En este caso la funcionalidad "Leer valor en un punto", nos indica la posición geográfica del punto (latitud y longitud) y el nivel de la señal RSRQ, como se puede observar en la figura 174.

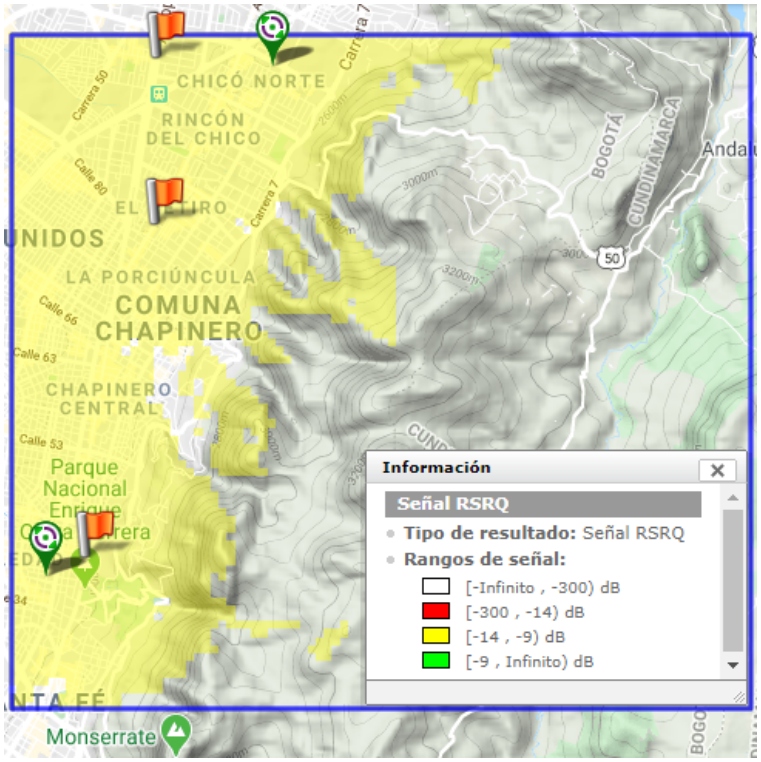


Figura 174: Señal RSRQ (LTE-A).

En la tabla 19 se registran los valores de RSRQ medidos en los 3 puntos de interés, estos valores son iguales en dichos puntos, y al observar la tabla 10 podemos ver que dicho nivel nos indica que en el área seleccionada se tiene una buena calidad de la señal, muy cercano a los niveles de calidad excelente.

Punto de interés	Señal RSRQ [dB]
Universidad Distrital	-10.00
Unilago	-10.00
Estación Calle 100	-10.00

Tabla 19: Señal RSRQ (LTE-A).

9.3.14. Señal SS-RSRQ (5G)

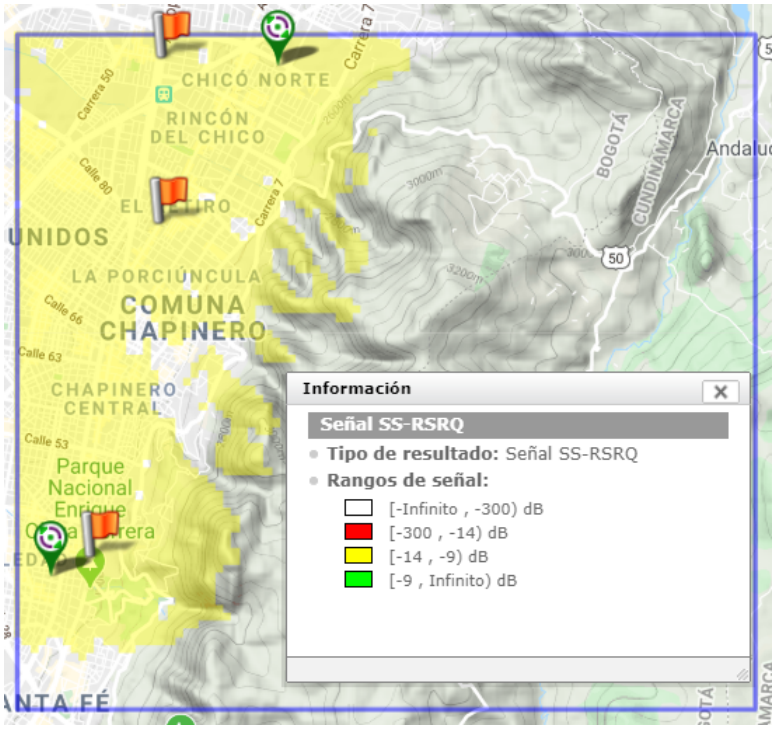


Figura 175: Señal SS-RSRQ (5G).

En la tabla 20 se registran los valores de RSRQ medidos en los 3 puntos de interés, estos valores son aproximadamente iguales en los tres puntos, y al observar la tabla 10 podemos ver que dicho nivel nos indica que el área seleccionada tiene una buena calidad de la señal, casi llegando a ser de calidad excelente.

Punto de interés	Señal SS-RSRQ [dB]
Universidad Distrital	-10.47
Unilago	-10.47
Estación Calle 100	-10.48

Tabla 20: Señal SS-RSRQ (5G).

9.3.15. Comparación RSRQ

Se puede observar en las figuras 174 y 175 que al igual que en la señal RSSI hay una mejor calidad de señal en un área un poco mayor de la zona de cobertura en el estudio LTE-A. Esto se puede revalidar al comparar los valores de cada uno de los puntos de las tablas 19 y 20 en los cuales se puede observar que es un poco mejor la señal RSRQ obtenida en el estudio LTE-A, además también se puede indicar que el nivel de calidad de ambas redes esta muy cercano a un nivel de calidad excelente, como lo indica la tabla 10.

9.3.16. Señal PDSCH SINR (LTE-A)

Este cálculo hace referencia a la relación señal a ruido del canal PDSCH, este canal se utiliza para transmitir información del usuario en el enlace descendente. Dicha información es entregada por la capa MAC del sistema, esto lo hace a través del canal de transporte DL-SCH, además sirve para entregar información de aviso PCH. Este canal no siempre esta en uso por el usuario, ya que solo se asigna cuando éste tiene que recibir información de enlace descendente y como resultado de la gestión de recursos realizada por el algoritmo de scheduling de dicho enlace.

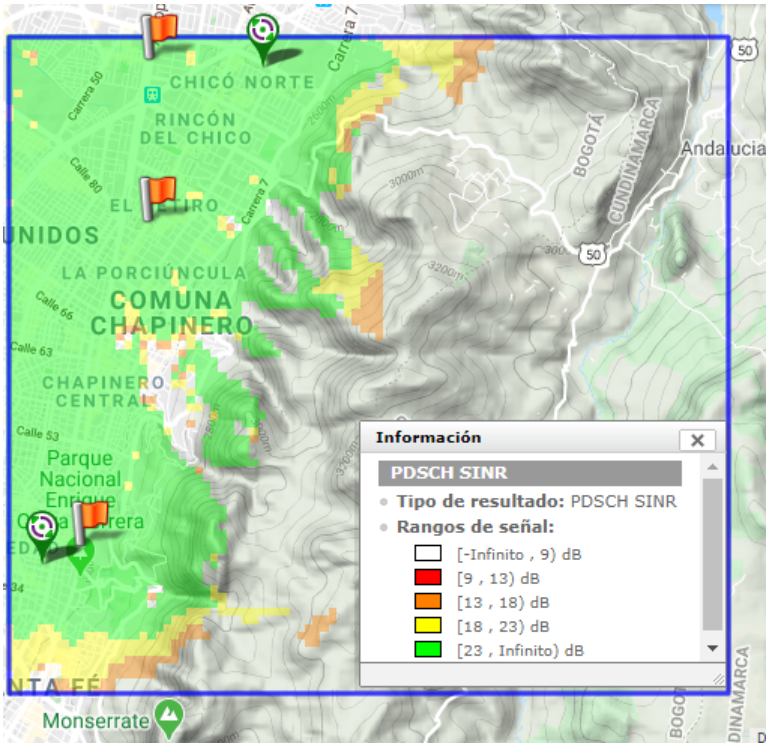


Figura 176: Señal PDSCH SINR (LTE-A).

En la tabla 21 se encuentran registrados los valores de la señal para los 3 puntos de interés, se aprecia que que todos están por encima de 30 dB, esto es bastante bueno ya que cuanto mayor valor de SINR se tenga, mayor será la diferencia entre la señal del canal PDSCH y el ruido que podría afectar la comunicación.

Punto de interés	PDSCH SINR [dB]
Universidad Distrital	58.84
Unilago	44.74
Estación Calle 100	33.64

Tabla 21: Señal PDSCH SINR (LTE-A).

9.3.17. Señal SS-SINR DL (5G)

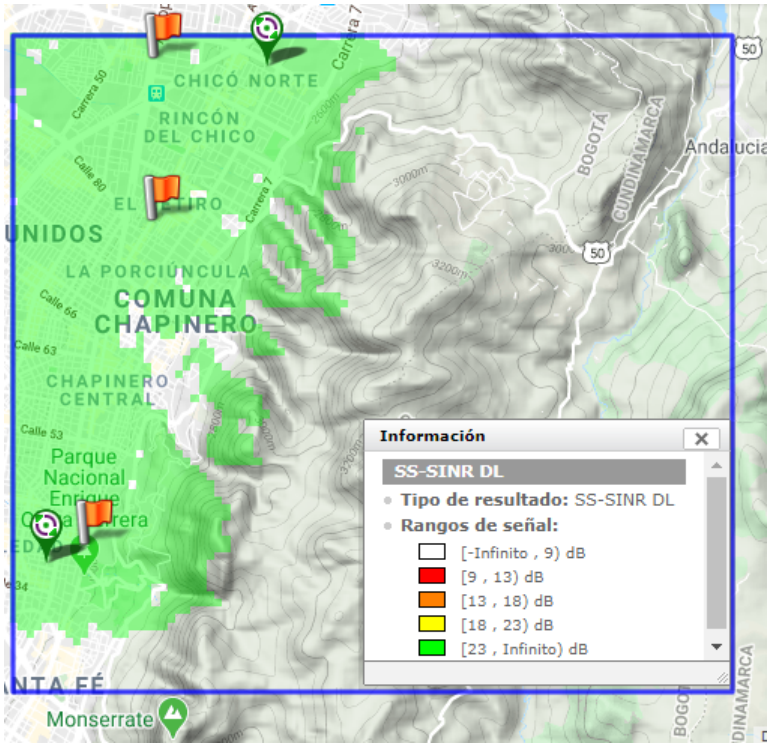


Figura 177: Señal SS-SINR DL (5G).

En la tabla 22 podemos apreciar que para los tres puntos de interés el valor de SINR esta por encima de 30 dB, indicándonos que la comunicación que se establezca, podrá garantizar una transmisión descendente óptima.

Punto de interés	SS-SINR DL [dB]
Universidad Distrital	59.78
Unilago	45.72
Estación Calle 100	34.55

Tabla 22: Señal SS-SINR DL (5G).

9.3.18. Comparación SINR en el canal DL

Se puede observar en la figura 176 y en la figura 177, que el área de cobertura en el cual la señal SINR en el enlace de bajada es óptima, es muy parecida entre las dos redes de tecnologías móviles, aunque la red LTE-A cubre una mayor área, pero solo por un poco. No obstante al comparar los valores de cada uno de los puntos de las tablas 21 y 22 se observa que hay una diferencia de casi 1 dB en el valor de SINR obtenido, dando un mayor valor en el estudio 5G, con estos resultados se podría indicar que la tecnología 5G tiene mejor nivel de señal, pero que 4G tiene mayor cobertura.

9.3.19. Señal PUSCH SINR (LTE-A)

Este resultado hace referencia a la relación señal a ruido del canal PUSCH, este canal se utiliza para enviar información del usuario en el enlace ascendente, que se transmite utilizando señales de SC-FDMA a través de una o varias subtramas. Dicho número de subtramas es definido por el scheduler del enlace ascendente. La asignación es realizada por el eNB y se transmite al terminal móvil mediante el canal PDCCH.

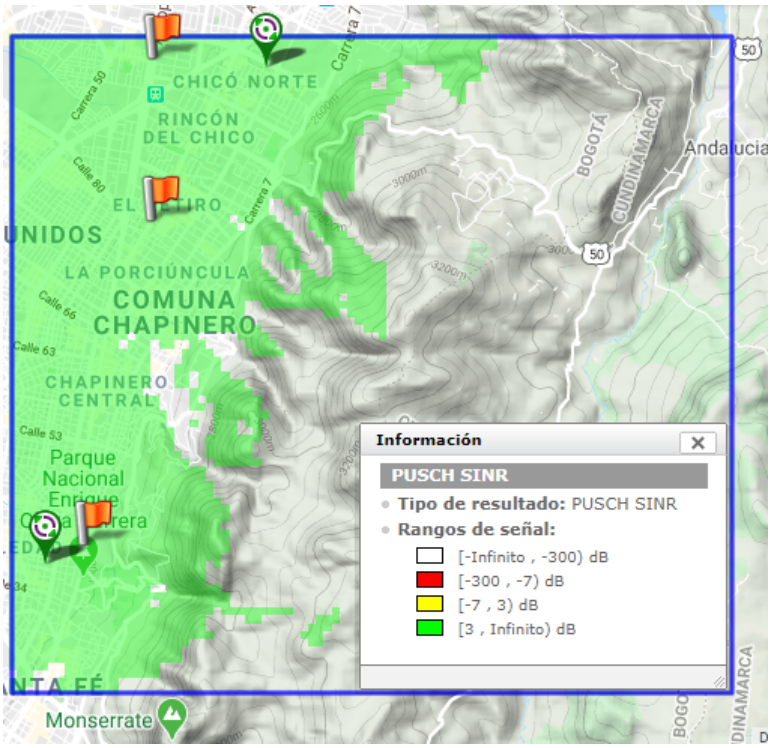


Figura 178: Señal PUSCH SINR (LTE-A).

En la tabla 23 se encuentran registrados los valores de la señal para los 3 puntos de interés, se aprecia que dos de los puntos están por encima de 30 dB, y uno tiene un valor de 21.66 dB, aunque este último sea más pequeño que los demás sigue siendo un buen nivel de señal, ya que 18 dB es el mínimo nivel de señal con el cual un equipo puede operar con un desempeño óptimo, con el fin de garantizar una comunicación sin interferencia o con un nivel muy bajo.

Punto de interés	PUSCH SINR [dB]
Universidad Distrital	32.45
Unilago	32.45
Estación Calle 100	21.66

Tabla 23: Señal PUSCH SINR (LTE-A).

9.3.20. Señal SINR UL (5G)

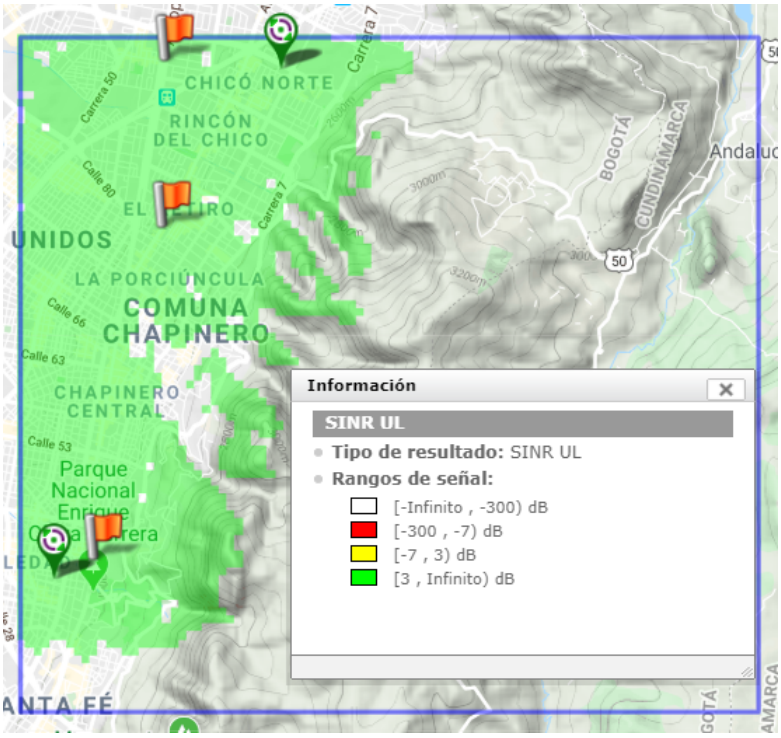


Figura 179: Señal SINR UL (5G).

En la tabla 24 podemos apreciar que para los tres puntos de interés el valor de SINR cumple con los requerimientos para garantizar una transmisión ascendente óptima.

Punto de interés	SINR UL [dB]
Universidad Distrital	43.24
Unilago	36.20
Estación Calle 100	25.03

Tabla 24: Señal SINR UL (5G)

9.3.21. Comparación SINR en el canal UL

Se puede observar en las figuras 178 y 179, que la relación de zona de cobertura de la señal SINR UL es similar a las señales comparadas en las anteriores subsecciones, también observamos que al comparar los valores de cada uno de los puntos de las tablas 23 y 24 son mayores los valores de SINR obtenidos en el estudio 5G, aunque en general para los dos estudios el nivel de SINR es adecuado para una transmisión óptima con baja interferencia, lo que en resumidas cuentas indica que en 5G existe un nivel de señal SINR más alto, pero en 4G se tiene una mayor cobertura.

9.3.22. Throughput teórico DL (LTE-A)

La velocidad ofrecida al usuario (throughput) está directamente relacionado con la SINR. A partir de la SINR se obtiene una velocidad máxima alcanzable por el usuario, sobre la que se aplica un modelo de carga y perfil diario de tráfico, para obtener una velocidad de usuario media. Partiendo de lo mencionado anteriormente el cálculo de throughput teórico permite obtener la cantidad máxima posible de los datos que se pueden transmitir en circunstancias ideales, es decir que en este caso se relaciona con la capacidad de los canales del sistema asignados para descarga.

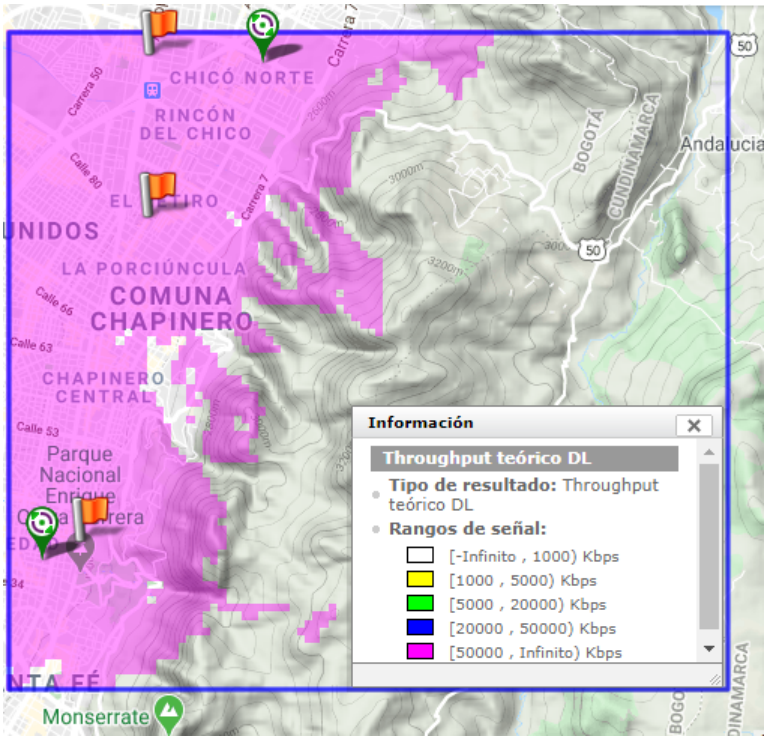


Figura 180: Throughput teórico DL (LTE-A).

En la tabla 25 se registran los valores obtenidos para los tres puntos de interés, se aprecia que para el punto "Universidad Distrital" se tiene un valor de 61.5 Mbps y que para los otros dos puntos se tienen valores de throughput por encima de 161 Mbps, lo que indica que los puntos de interés "Unilago" y "Estación calle 100" tienen aproximadamente más del doble de throughput que el obtenido en el punto de interés "Universidad Distrital".

Punto de interés	Throughput teórico DL [Kbps]
Universidad Distrital	61566.17
Unilago	161795.91
Estación Calle 100	161795.91

Tabla 25: Throughput teórico DL (LTE-A).

9.3.23. Throughput teórico DL (5G)

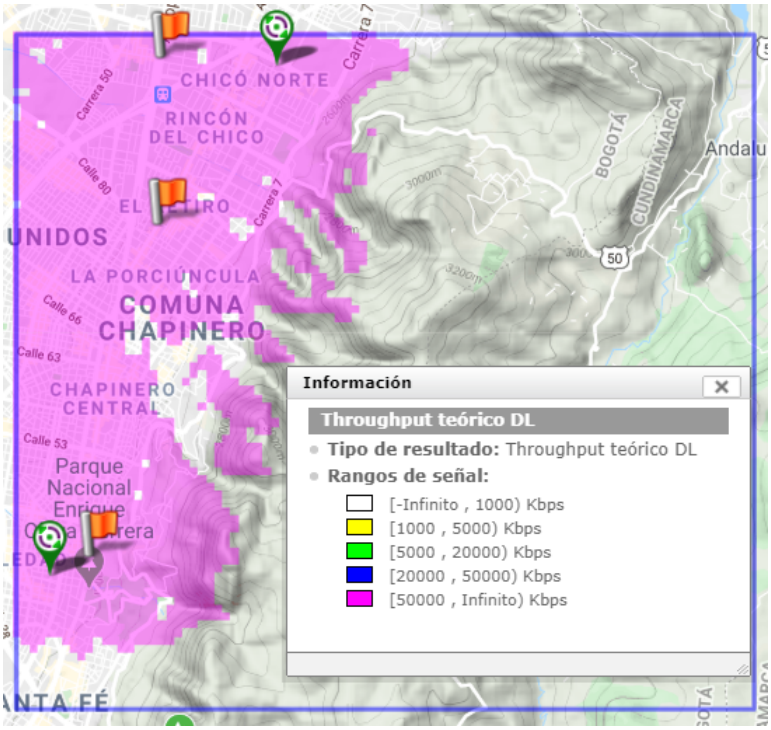


Figura 181: Throughput teórico DL (5G).

Como se puede observar en la tabla 26, los valores registrados de throughput para los tres puntos de interés son iguales y además son óptimos, para una comunicación de alta calidad.

Punto de interés	Throughput teórico DL [Kbps]
Universidad Distrital	650548.81
Unilago	650548.81
Estación Calle 100	650548.81

Tabla 26: Throughput teórico DL (5G).

9.3.24. Comparación Throughput teórico DL

Se puede observar al comparar los valores de cada uno de los puntos de las tablas 25 y 26que son mayores los valores de throughput obtenidos en el estudio 5G, siendo un poco más de cuatro veces mayor que en el caso de los puntos “Unilago” y “Estación Calle 100”, mientras que en “Universidad Distrital” es más de diez veces mayor, resultados que demuestran las grandes mejoras en prestaciones que la tecnología 5G alcanza.

9.3.25. Throughput teórico UL (LTE-A)

Este resultado tiene como finalidad saber la capacidad de los canales del sistema asignados para subida. En la figura 182 se aprecia que en general se tiene una buena zona de cobertura para el área seleccionada.

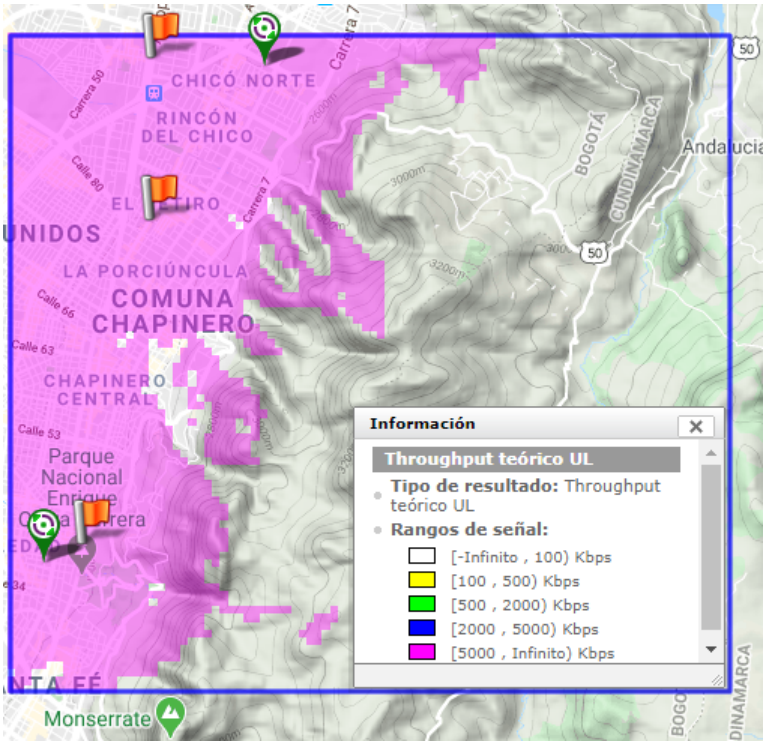


Figura 182: Throughput teórico UL (LTE-A).

En la tabla 27 se encuentran los valores medidos en los tres puntos de interés, al compararlos con la tabla 25, se observa que el valor disponible para subida es menor al de bajada, esto es bastante consecuente con el uso típico de los servicios móviles, ya que los usuarios de comunicaciones móviles por lo general, requieren mayor cantidad de recursos para la descarga que para la subida. En el punto de interés "Universidad Distrital" el throughput del DL es tres veces mayor que el throughput del UL, mientras que para los puntos de interés "Unilago" y "Estación calle 100" el throughput del DL es 3.5 veces mayor que el throughput del UL.

Punto de interés	Throughput teórico UL [Kbps]
Universidad Distrital	19234.29
Unilago	47271.77
Estación Calle 100	47701.03

Tabla 27: Throughput teórico UL (LTE-A).

9.3.26. Throughput teórico UL (5G)

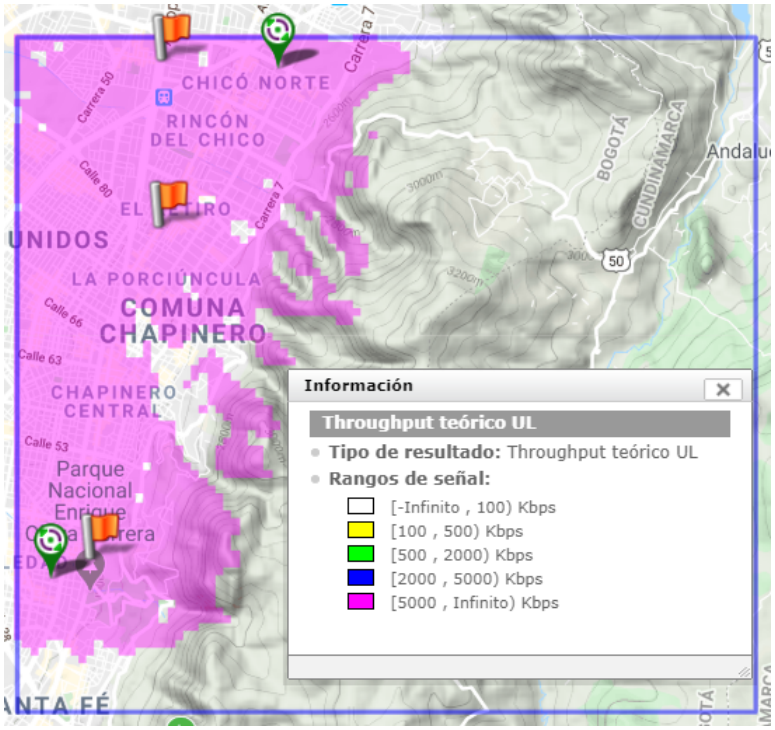


Figura 183: Throughput teórico UL (5G).

En la tabla 28 se registran los valores obtenidos en los tres puntos de interés, al igual que en el estudio LTE-A estos valores son menores que los medidos para el servicio de descarga del correspondiente estudio, sin embargo, son mayores a los obtenidos para el servicio de descarga de LTE-A como se evidencia en la tabla 25.

Punto de interés	Throughput teórico UL [Kbps]
Universidad Distrital	295704
Unilago	295704
Estación Calle 100	295704

Tabla 28: Throughput teórico UL (5G).

9.3.27. Comparación Throughput teórico UL

Se puede apreciar que al comparar los valores de cada uno de los puntos de interés de las tablas 27 y 28 son mayores los valores de throughput obtenidos en el estudio 5G, siendo más de quince veces mayor en el punto "Universidad Distrital", y un poco más de seis veces más grande en el caso de los puntos "Unilago" y "Estación Calle 100", estos valores reconfirman las grandes prestaciones que provee la tecnología 5G, pero se debe tener en cuenta que la zona de cobertura es un poco menor a la que provee la tecnología 4G.

9.3.28. Throughput teórico DL por usuario (LTE-A)

Este cálculo es utilizado para estimar la distribución del throughput disponible según el número de usuarios que se encuentren en el sector, la configuración del número de usuarios se hace mediante los entornos de usuarios móviles creados (figuras 106 y 107), es importante mencionar que después de varias simulaciones se observo que los usuarios fijos no son tenidos en cuenta para el cálculo de este resultado.

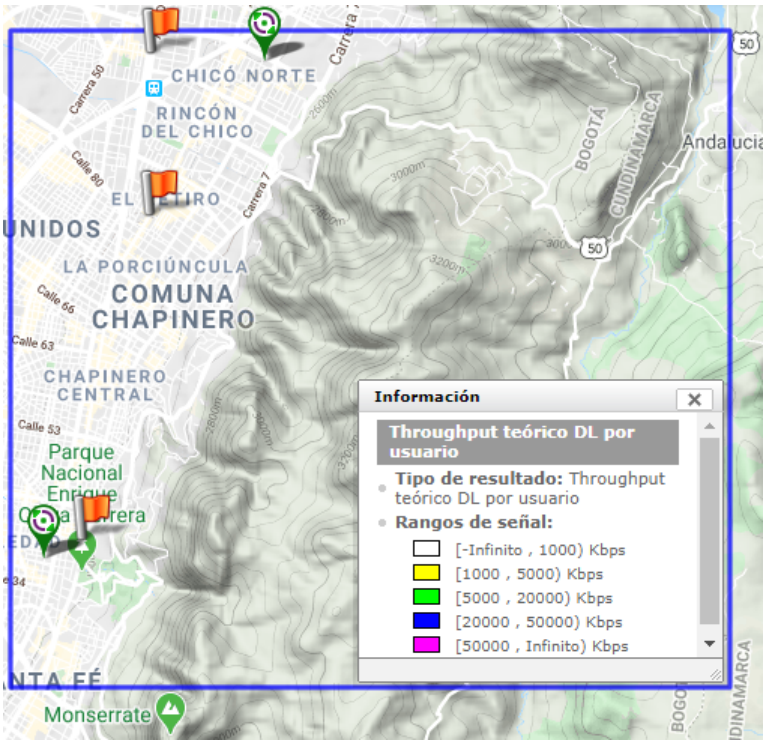


Figura 184: Throughput teórico DL por usuario (LTE-A).

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 29, estos valores corresponden a una configuración de entornos con 1600 usuarios móviles, esta cantidad es diferente a los entornos creado originalmente (figuras 106 y 107), esto es debido a que la cantidad de usuarios móviles planteados inicialmente eran demasiados para ser atendidos por el servicio propuesto, ya que los valores obtenidos en este resultado del estudio eran dos ordenes menores a los que se visualizan en la tabla 29, por ende, se bajo la cantidad de usuarios móviles dos ordenes, pasando de 160000 a 1600.

Punto de interés	Throughput teórico DL por usuario [Kbps]
Universidad Distrital	96.20
Unilago	168.54
Estación Calle 100	168.54

Tabla 29: Throughput teórico DL por usuario (LTE-A).

9.3.29. Throughput teórico UL por usuario (LTE-A)

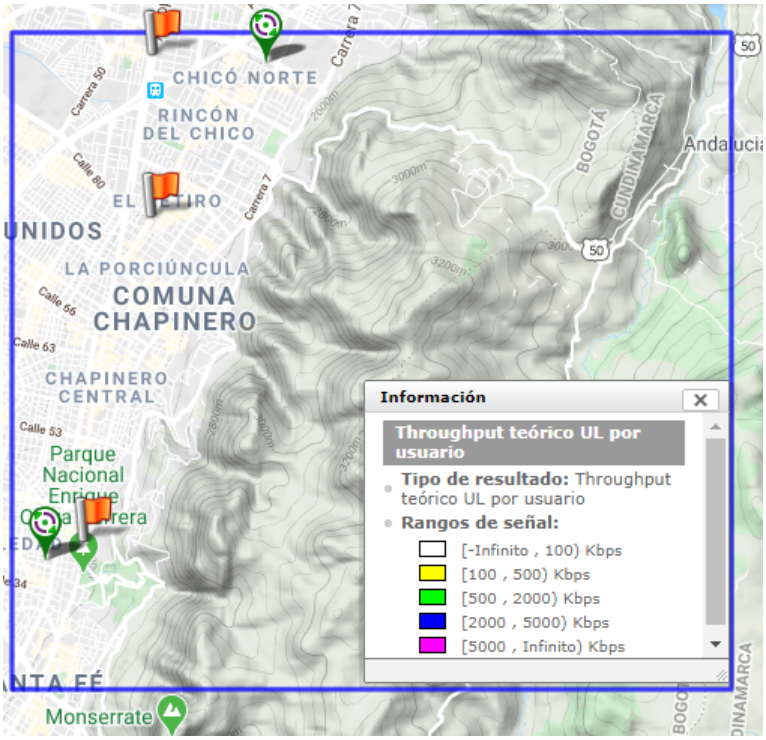


Figura 185: Throughput teórico UL por usuario (LTE-A).

Los resultados obtenidos para el servicio de subida se muestran en la tabla 30, estos valores al igual que los de bajada corresponden a una configuración de entornos con 1600 usuarios móviles.

Punto de interés	Throughput teórico UL por usuario [Kbps]
Universidad Distrital	30.05
Unilago	49.24
Estación Calle 100	49.69

Tabla 30: Throughput teórico UL por usuario (LTE-A).

De los valores obtenidos de las tablas 29 y 30 se observa que los valores de Throughput teórico DL por usuario, son un poco más de tres veces mayores a los del Throughput teórico UL por usuario, al igual a como se concluyo con anterioridad, los usuarios en la mayoría de las ocasiones exigen mayores prestaciones para el enlace de bajada, por esto, los operadores móviles enfocan sus esfuerzos en brindar mayor calidad y prestaciones al enlace de bajada. También se puede concluir que las velocidades por usuario del estudio propuesto son deficientes, ya que como se menciona en el artículo "Colombia: Mobile Network Experience Report January 2020" [59], actualmente los operadores móviles del país prestan servicios con velocidades de descarga pico de 14.1 Mbps y de subida pico de 6 Mbps. Estas bajas prestaciones se deben al tipo de estudio multicobertura planteado, ya que para cumplir con las características de velocidad deseadas se deberían incluir más estaciones base (estudios de cobertura LTE-A), con el fin de brindar una buena velocidad en el servicio a todos los usuarios propuestos para esta zona.

9.3.30. Señal RS SINR (LTE-A)

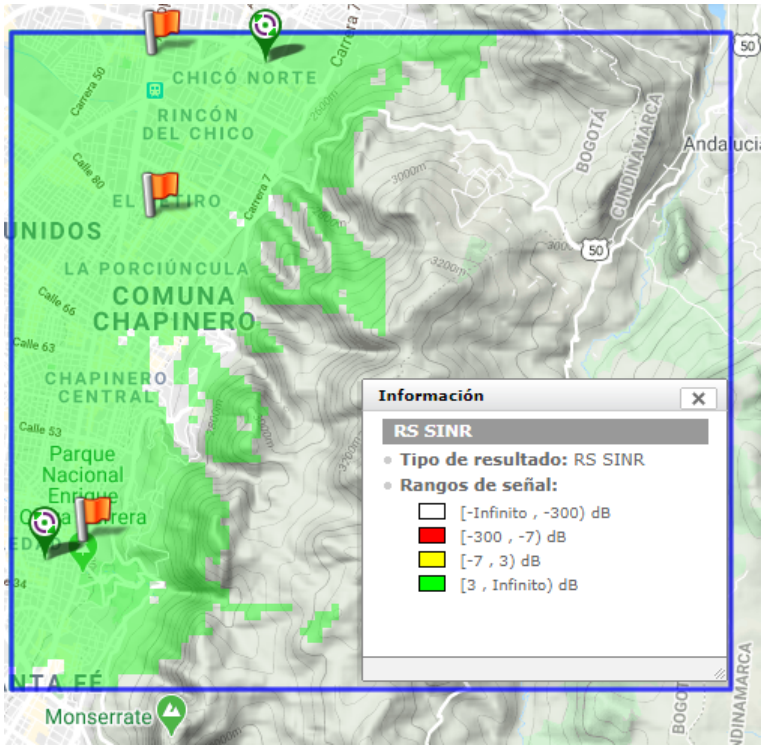


Figura 186: Señal RS SINR (LTE-A).

Los resultados obtenidos en este estudio se muestran en la tabla 31, se observa que los valores de la señal para los 3 puntos de interés están por encima de 30 dB, esto es bueno ya que nos indica que los símbolos en los que hay transmisión de las señales de referencia poseen baja interferencia, y que no es tan susceptible al ruido que podría afectar la comunicación, en otras palabras, el nivel de señal es lo suficientemente alto con respecto a la interferencia y ruido, lo que permite una comunicación de buena calidad.

Punto de interés	RS SINR [dB]
Universidad Distrital	62.64
Unilago	48.54
Estación Calle 100	37.44

Tabla 31: Señal RS SINR (LTE-A).

9.3.31. Capacidad (LTE-A)

Los cálculos de capacidad que realiza Xirio solo se pueden realizar para el servicio de LTE-A, ya que aún no se encuentra habilitado para el servicio de 5G.

Información detallada del archivo resultado

INFORME DE CAPACIDAD: Cobertura Chapinero (LTE-A) Intento Cap

Nº usuarios total	168501
Nº usuarios imposible atender	0

SECTORES

Desglose de los sectores.

Nombre	Nº usuarios total	Nº usuarios imposible atender	Carga de tráfico estimada (%)	Ancho de banda máximo DL (kHz)	DL BW garantizado (kHz)	DL BW no garantizado (kHz)	Ancho de banda máximo UL (kHz)	UL BW garantizado (kHz)	UL BW no garantizado (kHz)
Estación Base-Norte (eNB) (2540 MHz)	82926,31	0	100	15391,54	754809,7 754809,7 754809,7	1154,02 1154,02 1154,02	9617,14	1597278,28	2455,74
Estación Base-Sur (eNB) (2560 MHz)	85573,69	0	100	15391,54	343147,86 343147,86 343147,86	532,2 532,2 532,2	9617,14	658156,06	1043,41

Figura 187: Informe de ancho de banda (LTE-A).

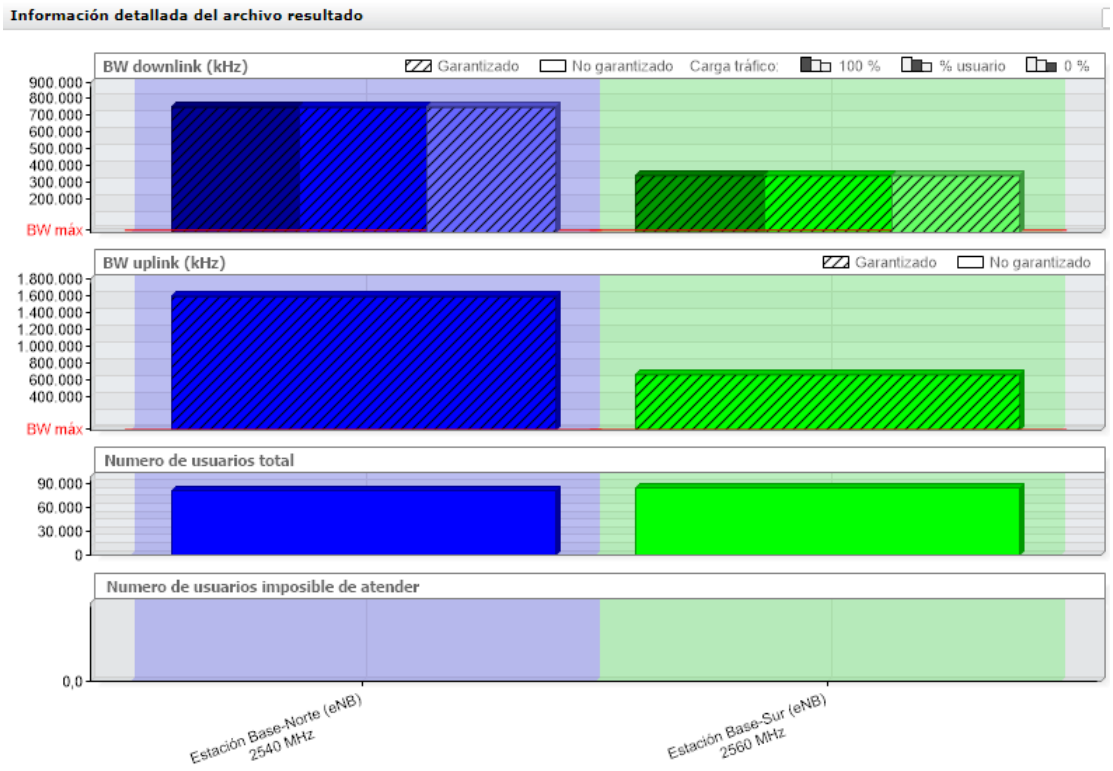


Figura 188: Gráfica de ancho de banda (LTE-A).

Información detallada del archivo resultado

INFORME DE THROUGHPUT: Cobertura Chapinero (LTE-A) Intento Cap

SECTORES

Desglose de los sectores.

Nombre	Nº usuarios total	Nº usuarios imposible atender	Carga de tráfico estimada (%)	DL ThP máximo (kbps)	UL ThP máximo (kbps)	DL ThP garantizado (kbps)	DL ThP no garantizado (kbps)	UL ThP garantizado (kbps)	UL ThP no garantizado (kbps)
Estación Base-Norte (eNB) (2540 MHz)	82926,31	0	100	70107,89 70107,89 70107,89	19863,47	3438129,19	5077,7	3299055,51	4911,49
Estación Base-Sur (eNB) (2560 MHz)	85573,69	0	100	66499,68 66499,68 66499,68	19231,64	1482581,92	2309,8	1316130,81	2086,82

Figura 189: Informe Throughput (LTE-A).

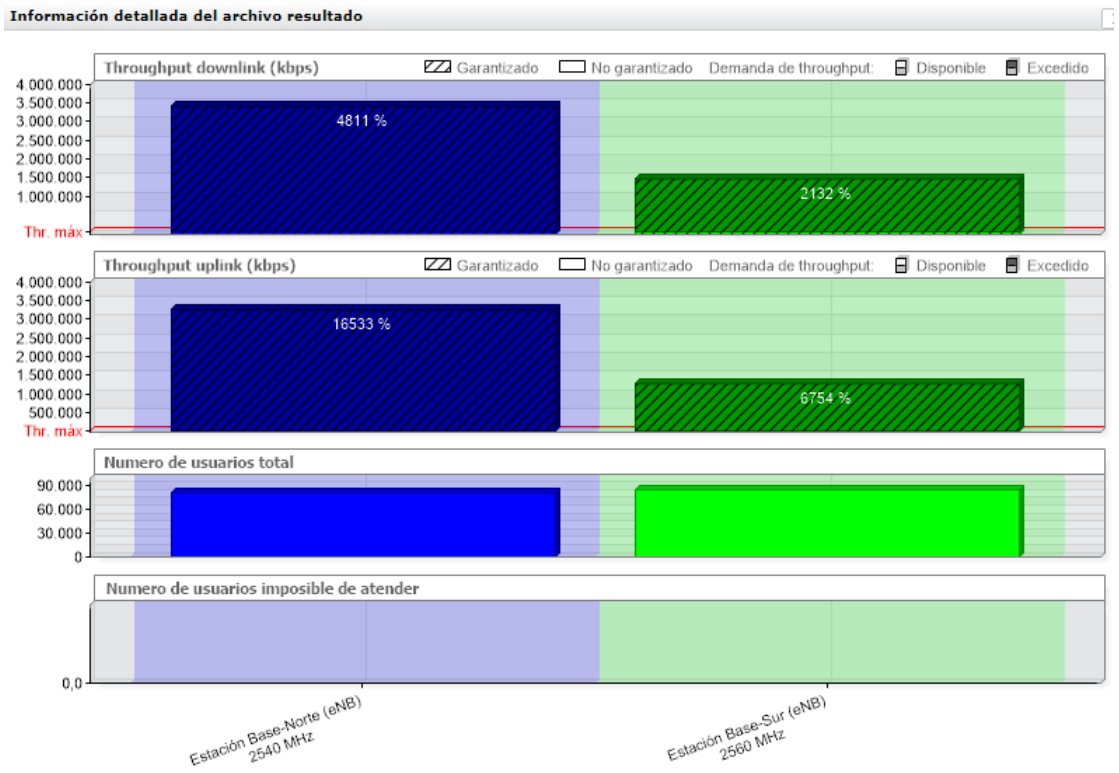


Figura 190: Gráfica de Throughput (LTE-A).

Luego de observar estos resultados de capacidad y ver que la cantidad de usuarios que se configuro esta sobredimensionada, se decidió modificar la cantidad de usuarios con el fin de obtener resultados más adecuados para realizar una descripción y explicación del cálculo de capacidad. Como lo indica el manual de Xirio el aumento o disminución de usuarios móviles o fijos en el estudio de múlticobertura solo produce cambios

en los resultados de capacidad y los resultados de throughput teórico por usuario en UL y DL, por lo tanto, en el número de usuarios móviles se decide bajar la cantidad en dos ordenes de magnitud (1600 usuarios) y para los usuarios fijos en un orden de magnitud, por lo tanto, serían 852 usuarios, lo que implica que son 213 usuarios por cada entorno (figura 105).

Información detallada del archivo resultado

INFORME DE CAPACIDAD: Cobertura Chapinero (LTE-A)

Nº usuarios total	2452
Nº usuarios imposible atender	0

SECTORES

Desglose de los sectores.

Nombre	Nº usuarios total	Nº usuarios imposible atender	Carga de tráfico estimada (%)	Ancho de banda máximo DL (kHz)	DL BW garantizado (kHz)	DL BW no garantizado (kHz)	Ancho de banda máximo UL (kHz)	UL BW garantizado (kHz)	UL BW no garantizado (kHz)
Estación Base-Norte (eNB) (2540 MHz)	828,48	0	49,09	15391,54	7543,59 7543,59 7543,59	11,53 11,53 11,53	9617,14	15977,95	24,57
Estación Base-Sur (eNB) (2560 MHz)	1623,52	0	75,3	15391,54	11570,98 11570,98 11570,98	19,06 19,06 19,06	9617,14	23639,77	39,22

Figura 191: Informe de ancho de banda redimensionado (LTE-A).

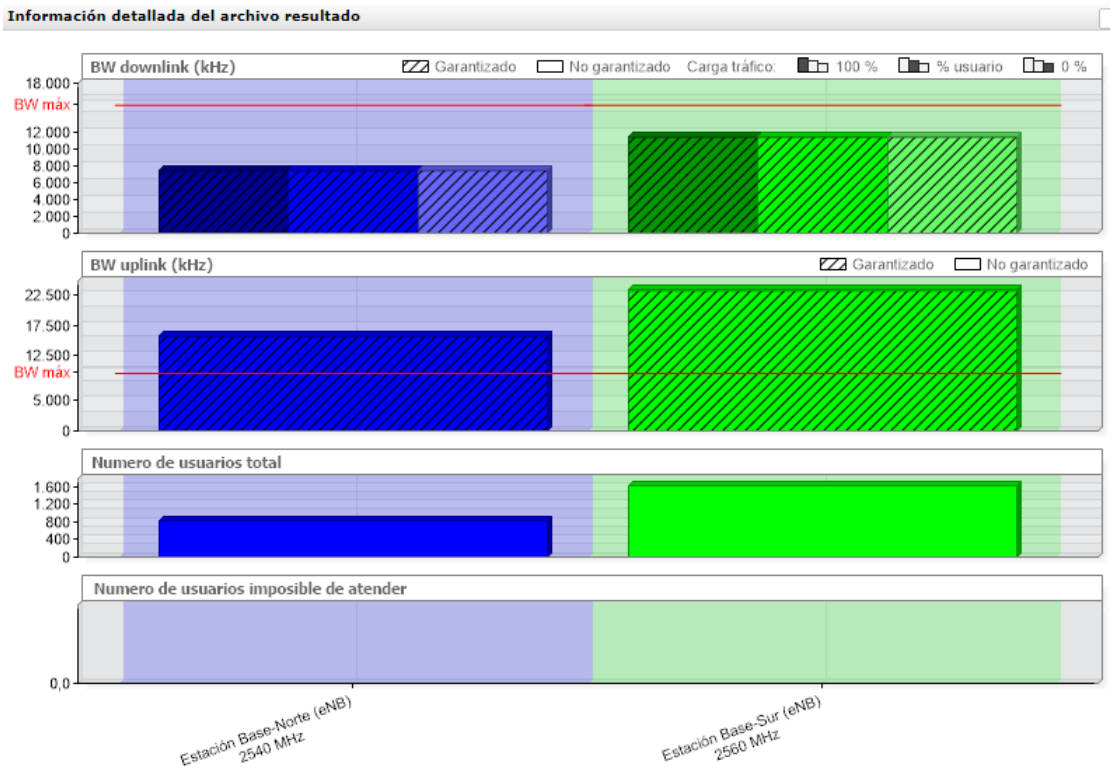


Figura 192: Gráfica de ancho de banda redimensionado (LTE-A).

En la gráfica 192 se puede observar que en este servicio de multicobertura el ancho de banda disponible para downlink cumple con la demanda solicitada por los usuarios, ya que el consumo no supera el nivel de máximo ancho de banda. Sin embargo, este no es el caso para uplink, donde se evidencia que el consumo solicitado es más del doble del ancho de banda máximo que se tiene para este tipo de servicio. Esto se debe a que los servicios prestados en telecomunicaciones móviles por lo general disponen de más recursos para downlink que los asignados para uplink, y en este contexto planteado los usuarios del los entornos tienen configurados los mismos requerimientos para subida y para bajada, además a esto se suma que como se aprecia en la figura 109 las curvas de eficiencia espectral son configurables, y en el caso de los entornos creados para este estudio se dejaron dichas curvas por defecto, por lo cual, las gráficas correspondientes son las de la figura 86, en estas curvas podemos apreciar que la comunicación downlink es más eficiente respecto a la comunicación uplink, por lo cual, transmitir la misma cantidad de datos consumirá mayor ancho de banda en el servicio de subida, como se observa en la figura 192

Información detallada del archivo resultado

INFORME DE THROUGHPUT: Cobertura Chapinero (LTE-A)

SECTORES

Desglose de los sectores.

Nombre	Nº usuarios total	Nº usuarios imposible atender	Carga de tráfico estimada (%)	DL ThP máximo (kbps)	UL ThP máximo (kbps)	DL ThP garantizado (kbps)	DL ThP no garantizado (kbps)	UL ThP garantizado (kbps)	UL ThP no garantizado (kbps)
Estación Base-Norte (eNB) (2540 MHz)	828,48	0	49,09	70104,64 70104,64 70104,64	19862,86	34360,96	50,75	33000,21	49,13
Estación Base-Sur (eNB) (2560 MHz)	1623,52	0	75,3	65092,71 65092,71 65092,71	19233,55	48935,04	80,65	47277,74	78,43

Figura 193: Informe Throughput redimensionado (LTE-A).

En la figura 193 apreciamos el informe de throughput, en el cual se evidencia que el consumo solicitado para el servicio de downlink y de uplink es muy cercano, esto era lo esperado ya que en la configuración de entornos se definió que el trafico de los dos servicios sería el mismo.

Adicional podemos ver en la figura 194 el consumo solicitado y el máximo disponible, al igual que en la gráfica 192 se evidencia que en el servicio de downlink el consumo solicitado no excede el máximo disponible, mientras que en el servicio de uplink si.

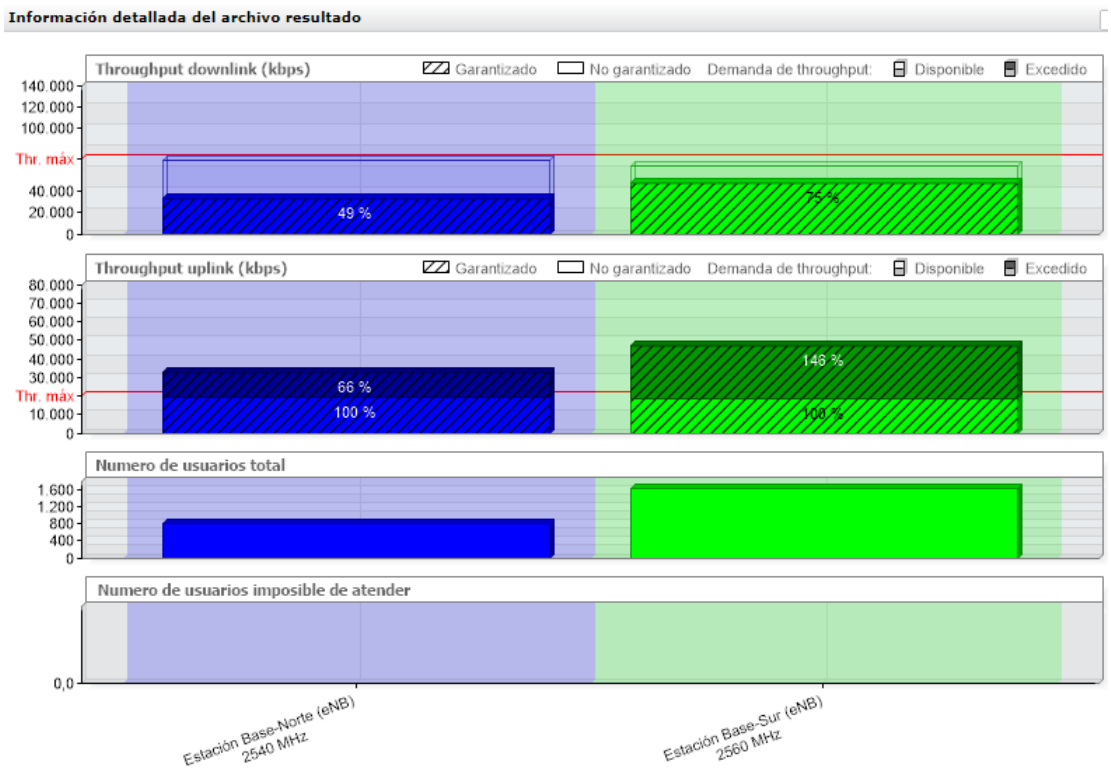


Figura 194: Gráfica de Throughput redimensionado (LTE-A).

10. Conclusiones

Una vez culminado el desarrollo del proyecto de grado, se puede concluir respecto a algunas de las características más relevantes mencionadas durante el proceso de creación del documento, buscando hacer un consolidado de las diferencias entre las tecnologías comparadas (LTE-A y 5G) y su impacto en el rendimiento de la red.

Una similitud significativa entre las dos tecnologías es el uso del esquema de transmisión OFDM, este esquema permite: obtener un gran ancho de banda para los datos, que los datos se transmitan de manera eficiente sin dejar de ofrecer un alto grado de protección frente a las reflexiones e interferencia, además tener una alta resistencia ante el desvanecimiento de la señal. Debido a la necesidad de flexibilidad en el ancho de banda de transmisión, la estructura básica NR al igual que en LTE admite la separación del enlace ascendente y el enlace descendente en el tiempo y/o frecuencia, estando sujeto a la operación semidúplex o full dúplex.

La tecnología 5G propuesta muestra variedad de cambios y mejoras con respecto a LTE-A, se seleccionaron de todo el documento los más relevantes, los cuales se mencionan a continuación:

Una de las grandes mejoras que se realizo en 5G es la del aumento en la cantidad de portadoras en carrier agregation, ya que en 5G permite realizar la agregación de 16 portadoras, posiblemente de diferentes anchos de banda y diferentes esquemas dúplex, esto permite anchos de banda muy superiores a los de 4G.

La incorporación de "mini-slots" mejora de manera notoria el aprovechamiento de los recursos disponibles, ya que no se desperdician símbolos OFDM que en el caso de LTE-A se enviaban vacíos esperando que se completara la duración definida para cada trama. Adicionalmente se genera una mejoría en los tiempos de respuesta del sistema de comunicación al permitir que un "mini-slot" pueda ser tan corto como un símbolo OFDM, también se da la posibilidad de comenzar en cualquier momento durante una trama. Lo indicado anteriormente muestra que los "mini-slots" pueden ser útiles en una gran variedad de escenarios, como lo son las transmisiones de baja latencia, las transmisiones en espectro sin licencia y las transmisiones en el espectro de onda milimétrica (banda mmWave). Se puede concluir que esta es una de las grandes diferencias que abre camino a nuevas aplicaciones para las telecomunicaciones móviles como lo son: el control remoto de vehículos y de maquinas biomédicas, la realidad virtual, entre otros, haciendo todo esto en "tiempo real". También se puede evidenciar la importancia que se da a las bajas latencias en la nueva generación al ver la modificación realizada en los estados RRC, en la cual se busca tener menos transiciones y de esta manera generar menor latencia.

Otra característica interesante agregada para esta nueva generación es la configuración de slots, ya que gracias a esto el dispositivo puede hacer algunas suposiciones respecto a la dirección de transmisión que se ha establecido, esto puede aportar en la reducción de señales de control innecesarias. Es importante recordar que en 5G se busca eliminar carga innecesaria en señales de control, por lo cual, en dicha generación se define el envío de estas señales sólo cuando es necesario y no de manera redundante como se realiza en 4G, ayudando así a tener mayor disposición de recursos para transmitir más datos experimentados o utilizados por el usuario, dando como resultado mayor capacidad de transmisión efectiva.

Se introduce un nuevo protocolo de control en la "estación base" (gNB) de la generación 5G con el fin de mejorar la calidad de las prestaciones, también se modifican algunas tareas de los demás protocolos, buscando hacer más óptima la comunicación entre gNB y los equipos de usuario. Estos cambios obedecen a los requerimientos de alta disponibilidad y confiabilidad que propone la nueva generación, además es necesario prestar especial atención al sistema de control requerido en gNB debido a la complejidad de la transmisión multi-antena planteada para 5G.

En el documento se explica que los tipos de implementaciones más comunes que se van a realizar en 5G requieren un prefijo cíclico corto. Además se encontró que el prefijo cíclico extendido de LTE no se uso en implementaciones prácticas, por lo cual, este último se hace innecesario en las nuevas tecnologías, causando que sea eliminado de NR.

En NR se ofrece funcionalidad de retransmisión desde tres capas de protocolo diferentes. Sin embargo, cabe recordar que esto solo sucede cuando es estrictamente necesario ya que la interfaz de radio busca eliminar redundancia, siendo esto diferencial respecto a 4G donde se definen retransmisiones en algunos casos redundantes. También es importante mencionar que la implementación masiva de multi-antenas hizo necesario tener la estructura de retransmisión multinivel mencionada anteriormente ya que de esta manera se puede tener una compensación que asegure la retroalimentación rápida y confiable de los informes de estado, siendo esto fundamental para garantizar el buen funcionamiento de la transmisión de datos ya que esta es dinámica y varía según el estado del canal.

Se observa como evolucionan las señales de referencias para posibilitar nuevas funciones según cambia la arquitectura de la red, esto también se relaciona con la implementación de la numerología, los dos cambios se hacen necesarios debido a la gran cantidad de aplicaciones y frecuencias en las que se va a desplegar tecnología NR, adicional busca cumplir uno de los requerimientos solicitados para esta nueva generación, conseguir una eficiencia espectral más elevada con respecto a LTE-A (Para NR, se ha acordado que la utilización del espectro será superior al 90 por ciento).

Vale la pena mencionar el cambio que tiene la subportadora DC en 5G, ya que para dicha generación no va a tener una ubicación definida durante la transmisión a diferencia de LTE-A, ya que el manejo especial de la subportadora DC sería engorroso en NR, en su lugar se decidió explotarla también para transmisión de datos. Aunque aplicar este cambio significa a su vez una desventaja, ya que se corre el riesgo de que la calidad de esta subportadora pueda degradarse en algunas situaciones que solo afectan a esta subportadora en especial. Es por ello que podemos decir que en algunos cambios se sacrifica calidad por eficiencia y complejidad menor.

Por todo lo mencionado anteriormente podemos decir que 5G supone diversos e importantes cambios respecto a 4G, con el fin de permitir que la transmisión de datos y comunicación de los dispositivos implicados en una conexión sea dinámica y flexible. De esta manera se garantiza la posibilidad de prestar diferentes tipos de servicios y dar cobertura a la gran cantidad de aplicaciones para las cuales se espera que NR suponga una revolución. Esto también es consecuencia del espectro que va a tener disponible para desplegarse, ya que la posibilidad de utilizar diferentes bandas según las necesidades solicitadas supone un mayor rango de funcionalidades y servicios disponibles para los clientes. En las especificaciones de rendimiento teóricas que se aprecian en el desarrollo del documento se puede ver que 5G es superior a 4G en todas a excepción de la eficiencia espectral, en la que son iguales, sin embargo, ya que el valor asignado corresponde al mínimo solicitado por IMT-2020 se espera que en la implementación se alcancen mejores resultados.

Respecto a las herramientas disponibles para la simulación de la interfaz de radio 5G vale la pena mencionar que para aplicaciones académicas son bastante limitadas, esto lo evidenciamos con la escasez de programas que nos permiten simular dicha generación, y en el caso específico de Xirio Online aunque nos permite realizar la simulación de la red de acceso 5G aún se encuentra en una fase temprana de desarrollo por lo cual, no nos permite modificar todos los parámetros que se definen para NR. Teniendo como consecuencia que en el desarrollo de este documento no se pudieran realizar todas las simulaciones deseadas para comparar las características de desempeño de 4G y 5G. Adicionalmente nos encontramos con otro impedimento durante el desarrollo, la capa a la cual tenemos acceso desde las cuentas de la universidad es académica, debido a esto, no están habilitados los cálculos de los resultados correspondientes a tráfico, visualización de ruta, entre otros. Por esto los resultados obtenidos se relacionan más con cobertura y propagación de las diferentes señales disponibles (RSRP, solapamiento, mejor servidor, throughput, entre otros).

En los diferentes estudios realizados se describen las similitudes y diferencias encontradas en los cálculos, de estos, los resultados más llamativos son los de throughput, ya que tanto para downlink como para uplink el servicio de 5G obtuvo los mejores valores en los tres puntos de interés, llegando inclusive a registrar en el punto "Universidad Distrital" un throughput de subida de más de quince veces el valor obtenido para LTE-A, apreciando así que 5G tiene una mejor eficiencia espectral, ya que la configuración de la banda de frecuencias es la misma para los dos servicios.

El algoritmo de control de la interfaz de radio establece en cada instante el formato de transmisión más adecuado, incrementando el throughput cuando el estado del canal lo permite y reduciéndolo cuando es necesario, con el fin de brindar mayor protección a la información. Es por esto que los resultados obtenidos en la simulación de "Xirio Online" nos indican que la red 5G logra obtener un mejor estado del canal permitiendo así aumentar el throughput disponible respecto a LTE-A. Esto se debe a los diversos protocolos y señales de control que se encargan de asegurar que la interfaz de radio 5G preste buenas condiciones de calidad para establecer una buena transmisión.

En términos generales, la tecnología 5G en el momento de la realización de este proyecto cumple con la mayoría de prestaciones que pretende ofrecer, esta conclusión se basa en los resultados obtenidos de las simulaciones, de la información teórica documentada y la comparación realizada con 4G.

11. Limitaciones

- En las herramientas de software actuales aún no es posible realizar configuraciones de redes de comunicaciones móviles exactas a las empleadas en la práctica, esta incapacidad no nos permite realizar modificaciones de parámetros importantes de la red de acceso de 4G y 5G que son relevantes en el momento de realizar la comparación entre las redes de acceso.
- Ya que las redes 5G se encuentran en una fase temprana de despliegue, muchas de las herramientas de software no han agregado características tecnológicas importantes con las que cuenta esta red, debido a que aún no se han estandarizado o son muy recientes.
- No es posible validar de manera práctica los resultados obtenidos en las simulaciones, dadas las limitaciones del laboratorio de la facultad en cuanto a infraestructura y equipos.
- Bastante documentación acerca de las redes de comunicaciones móviles de 5G son de propiedad de los grandes fabricantes, y debido a que es un nuevo mercado tecnológico las compañías no están dispuestas a compartir o liberar sus desarrollos en esta área, por lo tanto, no está a disposición para el uso académico.

12. Trabajos futuros

- Partiendo de este documento, de los nuevos trabajos acerca de 5G y las nuevas especificaciones que las entidades reguladoras y fabricantes establezcan, se propone validar y verificar por medio de simulaciones los avances que van surgiendo con esta tecnología, con el fin de analizar a fondo sus prestaciones y capacidades.
- Ya que la herramienta Xirio Online a través de las capas administrativas permite obtener más resultados que se consideran valiosos, sería ideal complementar los resultados obtenidos en este documento con dicha información.
- También es de bastante interés para la comunidad académica realizar una guía de conceptos, parámetros y tecnologías utilizadas para la simulación de la tecnología IoT implementada junto con el servicio de 5G.
- Realizar una implementación práctica con fines académicos de una red 5G, con el objetivo de comparar los datos reales de las prestaciones alcanzadas con la información que se obtenga por medio de las simulaciones de dicha red.

13. Abreviaturas y Acrónimos

- ***AMC:*** Modulación y codificación adaptativa. (Adaptative Modulation and Coding).
- ***ANE:*** Agencia Nacional del Espectro.
- ***ANSI:*** Instituto nacional estadounidense de estándares (American National Standards Institute).
- ***ARQ:*** Solicitud automática de repetición (Automatic Repeat Request).
- ***BS:*** Estación base (Base Station).
- ***BTS:*** Estación base transceptora (Base Transceiver Station).
- ***CCS:*** Estación de control y conmutación (Control and Switching Station).
- ***CDMA:*** Acceso múltiple por división de código (Code Division Multiple Access).
- ***CE:*** Equipo de control (Control Equipment).
- ***CEPT:*** Conferencia europea de administraciones de correos y telecomunicaciones (European Conference of Postal and Telecommunications Administrations).
- ***CoMP:*** Transmisión multipunto coordinada (Coordinated Multi-Point).
- ***CP:*** Prefijo cíclico (Cyclic Prefix).
- ***CQI:*** Indicador de la calidad del canal (Channel Quality Indicator).
- ***CRC:*** Códigos de redundancia cíclica (Cyclic Redundancy Check).
- ***CS:*** Conmutación de circuitos (Circuit Switching).
- ***DAS:*** Sistema de antenas distribuidas (Distributed Antennas Systems).
- ***DFT:*** Transformada discreta de Fourier (Discrete Fourier Transform).
- ***DL:*** Enlace de bajada (Downlink).
- ***DS-CDMA*** Acceso múltiple por división de código en secuencia directa (Direct Sequence Code Division Multiple Access).
- ***D2D:*** Dispositivo a dispositivo (Device to Device).
- ***E-DCH:*** Canal de transporte dedicado mejorado (Enhanced Dedicated Channel).
- ***EDGE:*** Entorno GSM de datos mejorado, datos avanzados para la evolución de GSM (Enhanced Data rates for GSM Evolution).
- ***EHF:*** Frecuencía extremadamente alta (Extremely High Frequency).
- ***eICIC:*** Coordinación de interferencia inter-celda optimizada (Enhanced Inter-Cell Interference Coordination).
- ***eNB:*** Nodo B de E-UTRAN o nodo B evolucionado (Evolved Node B).
- ***EPC:*** Núcleo de paquetes evolucionado (Evolved Packet Core).
- ***EPS:*** Sistema de paquetes evolucionado (Evolved Packet System).
- ***ETSI:*** Instituto europeo de normas de telecomunicaciones (European Telecommunications Standards Institute).

- ***E-UTRAN:*** Red de acceso terrestre universal evolucionado (Evolved-UMTS Terrestrial Radio Access Network).
- ***FDD*** Duplexación por división de frecuencia (Frequency División Duplexing).
- ***FDE:*** Ecualización en el dominio de la frecuencia (Frequency Domain Equalization).
- ***FDMA:*** Acceso múltiple por división de frecuencia (Frequency Division Multiple Access).
- ***FDPS:*** Planificador de paquetes en el dominio de frecuencia (Frequency Domain Packet Scheduler).
- ***FEC:*** Corrección de errores hacia adelante (Forward Error Correction).
- ***FFT:*** Transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform).
- ***FS:*** Estación fija (Fixed Station).
- ***GERAN:*** Red de radio acceso GSM/EDGE (GSM EDGE Radio Access Network).
- ***GMSK:*** Modulación por desplazamiento mínimo gaussiano (Gaussian Minimum Shift Keying).
- ***GPRS:*** Servicio general de paquetes vía radio (General Packet Radio Service).
- ***GSM:*** Sistema global de comunicaciones móviles (Global System Mobile).
- ***H-ARQ:*** Solicitud automática de repetición híbrida (Hybrid Automatic Repeat Request).
- ***HET-NET:*** Red heterogénea (Heterogeneous Network).
- ***HSCSD:*** Datos por conmutación de circuitos a alta velocidad (High Speed Circuit Switched Data).
- ***HS-DSCH:*** Canal compartido de descarga de alta velocidad (High Speed Downlink Shared Channel).
- ***HSDPA:*** Acceso descendente de paquetes a alta velocidad (High Speed Downlink Packet Access).
- ***HSPA:*** Acceso de paquetes a alta velocidad (High Speed Packet Access).
- ***HSS:*** Bases de datos de usuario o servidor de Abonado (Home Subscriber Server).
- ***HSUPA:*** Acceso ascendente de paquetes a alta velocidad (High Speed Uplink Packet Access)
- ***ICIC:*** Coordinación de interferencias intercelulares (Inter-Cell Interference Coordination).
- ***IFFT:*** Transformada rápida de Fourier inversa (Inverse Fast Fourier Transform).
- ***IMS:*** Subsistema Multimedia IP (IP Multimedia Subsystem).
- ***IMT ADVANCED:*** Telecomunicaciones móviles internacionales avanzadas (International Mobile Telecommunications-Advanced).
- ***IMT-2000:*** Telecomunicaciones móviles internacionales-2000 (International Mobile Telecommunications-2000).
- ***IoT:*** Internet de las cosas (Internet of Things).
- ***IP:*** Protocolo de Internet (Internet Protocol).
- ***ISI:*** Interferencia entre símbolos (Intersymbol Interference).
- ***ISP:*** Proveedor de servicios de Internet (Internet Service Provider).
- ***LDCP:*** Comprobación de paridad de baja densidad (Low Density Parity Check).
- ***LTE:*** Evolución a largo plazo (Long Term Evolution).

- ***LTE-Advance:*** Evolución a largo plazo avanzada (Long Term Evolution Advanced).
- ***MAC:*** Control de acceso al medio (Media Access Control).
- ***ME:*** Equipo móvil (Mobile Equipment).
- ***MIMO:*** Múltiples entradas, múltiples salidas (Multiple Input Multiple Output).
- ***MISO:*** Múltiples entradas, una salida (Multiple Input Single Output).
- ***MME:*** Entidad de gestión de movilidad (Mobility Management Entity).
- ***MMW:*** Ondas milimétricas (Millimeter Wave).
- ***MS:*** Estación móvil (Mobile Station).
- ***M2M:*** Máquina a máquina (Machine to Machine).
- ***NR:*** Nueva radio (New Radio).
- ***NSA:*** No independiente (Non Standalone).
- ***OFDM:*** Múltiple división de frecuencias ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiple).
- ***OFDMA:*** Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales (Orthogonal Frequency Division Multiple Access).
- ***OMT:*** Transductor OrtoModal (Orthogonal Mode Transducer).
- ***OSI:*** Modelo de interconexión de sistemas abiertos (Open System Interconnection).
- ***PAPR:*** Relación de potencia pico a promedio (Peak to Average Power Ratio).
- ***PDCP:*** Protocolo de convergencia de datos de paquetes (Packet Data Convergence Protocol).
- ***PS:*** Conmutación de paquetes (Packet Switched).
- ***PSK:*** Modulación por desplazamiento de fase (Phase Shift Keying).
- ***QAM:*** Modulación de amplitud en cuadratura (Quadrature Amplitude Modulation).
- ***QoS:*** Calidad del servicio (Quality of Service).
- ***QPSK:*** Modulación por desplazamiento de fase en cuadratura (Quadrature Phase Shift Keying).
- ***RAN:*** Red de acceso por radio (Radio Access Network).
- ***RB:*** Servicio portador radio (Radio Bearer).
- ***RDSI:*** Red Digital de Servicios Integrados (Integrated Services Digital Network - ISDN).
- ***RF:*** Radiofrecuencia (Radio frequency).
- ***RLC:*** Control radio enlace (Radio Link Control).
- ***RNC:*** Controlador de la red radio (Radio Network Controller).
- ***RRC:*** Protocolo de control de recursos de radio (Radio Resource Control)
- ***RS:*** Estación repetidora (Repeater Station)
- ***SA:*** Independiente (Standalone).
- ***SC:*** Portadora única (Single Carrier).

- ***SC-FDMA:*** Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única (Single Carrier Frequency Division Multiple Access).
- ***SHF:*** Frecuencia súper alta (Super High Frequency).
- ***SIMO:*** Una entrada, múltiples salidas (Single Input Multiple Output).
- ***SINR:*** Relación señal a interferencia más ruido (Signal to Interference plus Noise Ratio).
- ***SISO:*** Una entrada, una salida (Single Input Single Output).
- ***SM:*** Multiplexación espacial (Spatial multiplexing).
- ***SMS:*** Servicio de mensajes cortos o servicio de mensajes simples (Short Message Service).
- ***TDD:*** Duplexación por división de tiempo (Time Division Multiplexing).
- ***TDMA:*** Acceso múltiple por división de tiempo (Time Division Multiple Access).
- ***UE:*** Equipo de usuario (User Equipment).
- ***UHF:*** Frecuencia ultra alta (Ultra High Frequency).
- ***UIT:*** Unión internacional de telecomunicaciones (Union Internationale des Télécommunications) (International Telecommunication Union-ITU).
- ***UL:*** Enlace de subida (Uplink).
- ***UMTS:*** Sistema universal de telecomunicaciones móviles (Universal Mobile Telecommunications Service).
- ***UTRAN:*** Red de acceso radio terrestre UMTS (UMTS Terrestrial Radio Access Network).
- ***VoIP:*** Voz sobre protocolo de Internet o voz por protocolo de Internet (Voice over Internet Protocol).
- ***WCDMA:*** Acceso múltiple por división de código de banda ancha (Wideband Code Division Multiple Access).
- ***WiFi:*** Fidelidad sin cables o inalámbrica (Wireless Fidelity).[2]
- ***WiMAX:*** Interoperabilidad mundial para acceso por microondas (Worldwide Interoperability for Microwave Access).
- ***XPD:*** Discriminación por polarización cruzada (Cross Polar Discrimination).
- ***1G:*** Primera Generación.
- ***2G:*** Segunda Generación.
- ***2.5G:*** Generación 2.5
- ***3G:*** Tercera Generación.
- ***3.5G:*** Generación 3.5
- ***3GPP:*** Proyecto asociación de tercera generación (3rd Generation Partnership Project).
- ***4G:*** Cuarta Generación.
- ***4.5G:*** Generación 4.5
- ***5G:*** Quinta Generación.
- ***5G PPP:*** Alianza público privada 5G (5G Public Private Partnership)

[2]La frase se inventó tras el nombre. Fue una vez ya habíamos escogido Wi-Fi de una lista de diez nombres que propuso Interbrand. La frase fue inventada por los primeros seis miembros de la junta y además no significa nada. Escrito por Phil Belanger (miembro fundador de la Wi-Fi Alliance que presidió la elección del nombre "Wi-Fi")

Índice de figuras

1. Acceso Múltiple por División de Frecuencia [14] . . . 22
2. Acceso Múltiple por División de Tiempo [14] . . . 23
3. Acceso Múltiple por División de Código [14] . . . 24
4. Sistemas MIMO [19] . . . 27
5. Modulación 16-QAM [23]. . . . 29
6. Modulación BPSK [23]. . . . 30
7. Modulación QPSK [23]. . . . 30
8. Señal modulada con QPSK [23]. . . . 31
9. Transmisión de señales con CP [24] . . . 31
10. Patrón de reúso 3/9 todas las frecuencias disponibles, en 9 grupos, se reparten en los 3 emplazamientos (A, B y C), que cubren 9 células (sectores) [13] . . . 34
11. Arquitectura de alto nivel de los sistemas (GSM, UMTS y LTE) [10]. . . . 44
12. Arquitectura del sistema de comunicaciones móviles LTE [10]. . . . 45
13. Red de acceso E-UTRAN [10]. . . . 47
14. Estructura de canales en LTE en las diferentes capas [32]. . . . 48
15. Mecanismos de transferencia de información en la interfaz radio [10]. . . . 49
16. Protocolos de la interfaz de radio de E-UTRAN [10]. . . . 50
17. Equipo de usuario [10]. . . . 54
18. Bloque de recursos físicos (PRB) [10]. . . . 56
19. Estructura de trama FDD [10]. . . . 57
20. Agregación de portadora [34]. . . . 59
21. Alternativas intra-band e inter-band para agregación de portadoras [34]. . . . 59
22. LTE-Advanced técnica CoMP [34]. . . . 61
23. Escenario de Single-Site MIMO [34]. . . . 61
24. Escenario de Multiple-Site MIMO [34]. . . . 62
25. Fases de transmisión y recepción de un repetidor y un relay node [34]. . . . 63
26. Terminología para la red de nodos relay. [34]. . . . 64
27. Casos de uso de IMT-2020 y ma peo a escenarios de uso [36]. . . . 66
28. Relación entre las capacidades clave y los tres escenarios de uso del ITU-R [36]. . . . 67
29. Diferentes combinaciones de redes core y tecnologías de acceso por radio, para redes 4G y 5G. [36] . . . 67
30. Interfaces de red de acceso por radio. [36] . . . 68
31. Conexión dual LTE-NR utilizando la opción 3 [36]. . . . 68
32. Protocolo NR de plano de usuario enlace descendente [36]. . . . 69
33. Estados RRC [36] . . . 71
34. Esquemas Dúplex [36]. . . . 76
35. Un subconjunto de los posibles formatos de ranura en NR (“D” es enlace descendente, “U” es enlace ascendente y “-” es flexible) [36]. . . . 77
36. Mini-slots en NR [36]. . . . 78
37. Ejemplos de estructura de trama basada en TDD para eMBB, URLLC y operación en espectro sin licencia [36]. . . . 78
38. Tramas, subtramas y slots en NR [36]. . . . 79
39. Panel de antena rectangular con 64 elementos de antena de doble polarización, comparada en tamaño con una batería AAA [36]. . . . 81
40. Procesamiento analógico vs digital de múltiples antenas [36]. . . . 81
41. Procesamiento analógico de múltiples antenas que proporciona formación de haz [36]. . . . 82
42. Haz del dominio del tiempo (no simultáneo) que se forma en múltiples direcciones [36]. . . . 82
43. Forma de haz simultáneo (multiplexado en frecuencia) en múltiples direcciones [36]. . . . 82
44. Par de haces en la dirección del enlace descendente. Directo (izquierda) y mediante reflexión (derecha) [36]. . . . 85
45. Portadora SUL coexistiendo con portadora de enlace ascendente LTE [36]. . . . 85

46. Agregación de portadora versus enlace ascendente suplementario [36]. 86
47. Adaptación de ancho de banda utilizando partes de ancho de banda [36]. 87
48. Principio básico de doble conectividad [36]. 88
49. LTE / NR de doble conectividad en un escenario de múltiples capas [36]. 88
50. Doble conectividad LTE / NR, despliegue compartido [36]. 89
51. Doble conectividad LTE / NR, despliegue compartido en diferentes espectros [36]. 89
52. Comparación de las generaciones móviles. 92
53. Bogotá-Localidad de Chapinero (Google Maps-Mapa). 93
54. Bogotá-Localidad de Chapinero (Google Maps-Sátelite). 94
55. Desempeño operadores móviles Avantel y Claro (Opensignal). 95
56. Desempeño operadores móviles Movistar y Tigo (Opensignal). 95
57. Ubicación de las estaciones base norte y sur (Opensignal). 96
58. Página inicial de Xirio Online. 97
59. Inicio de sesión Planning Tool. 97
60. Entorno gráfico de la herramienta de planificación radioeléctrica (Planning Tool). 98
61. Botones comunes de Xirio Online. 99
62. Relación señal a ruido (SNR) [41] 101
63. Elemento de recurso (resource element) [44]. 102
64. Reutilización de factor 1 (FR1) [38]. 103
65. Reutilización de factor 3 (FR3) [38]. 103
66. Reutilización parcial de frecuencias (PFR) [38]. 103
67. Reutilización suave de frecuencias (SFR) [38]. 104
68. Crear nuevo estudio. 105
69. Propiedades del estudio de enlace (Estudio y Extremos). 106
70. Propiedades del estudio de enlace (Parámetros de cálculo). 106
71. Propiedades de la banda de frecuencias. 108
72. Indicador de canales prioritarios [38]. 108
73. Propiedades del sector (Sector y Emplazamiento). 109
74. Gestor de catálogo (Emplazamientos). 110
75. Grupos de emplazamientos. 110
76. Propiedades del emplazamiento. 111
77. Propiedades del sector (Parámetros de radio). 112
78. Propiedades de la antena del sector. 113
79. Propiedades del diagrama de radiación del sector. 114
80. Propiedades del diagrama de radiación del sector (Horizontal). 115
81. Propiedades del diagrama de radiación del sector (Vertical). 116
82. Frecuencia y canal de transmisión. 118
83. Propiedades del feeder. 118
84. Propiedades del sector (Parámetros LTE). 120
85. Propiedades del planificador. 121
86. Curvas de eficiencia espectral. 122
87. Comparación NB-IoT vs LTE-M [48]. 124
88. Configuración ICIC estático. 124
89. Propiedades del terminal (Terminal y Emplazamiento). 129
90. Propiedades del terminal (Parámetros de radio y Parámetros LTE). 129
91. Propiedades de la antena del terminal. 130
92. Propiedades del diagrama de radiación del terminal. 130
93. Propiedades del diagrama de radiación del terminal (Vertical). 131
94. Propiedades del método de cálculo (Método de cálculo, Parámetros básicos y Propiedades de Rec. UIT-R P.526). 133
95. Propiedades del método de cálculo (Penetración en edificios). 133
96. Extremos del estudio radioeléctrico de cobertura. 134
97. Propiedades de parámetros de recepción del terminal. 135

98. Selección del área de cálculo. . . . 135
99. Ajuste automático de áreas. . . . 136
100. Rangos. . . . 137
101. Resultado cobertura estación base-norte. . . . 139
102. Propiedades del estudio de cobertura multitransmisor. . . . 139
103. Añadir coberturas al estudio de cobertura multitransmisor. . . . 140
104. Propiedades del sector en el estudio de cobertura multitransmisor. . . . 140
105. Parámetros de capacidad. . . . 141
106. Entorno-Norte-Centro. . . . 142
107. Entorno-Sur. . . . 142
108. Parámetros para un tipo de usuario que consume datos. . . . 143
109. Parámetros para un tipo de usuario conversacional. . . . 144
110. Crear antena desde catálogo. . . . 145
111. Antenas disponibles. . . . 146
112. Asignar área de cobertura al entorno. . . . 146
113. Creación de grupo de usuarios (Usuarios-Universidad-Distrital-Datos). . . . 147
114. Propiedades del punto de interés. . . . 148
115. Calculadora de coordenadas. . . . 148
116. Propiedades del punto de interés, cambio de coordenadas. . . . 149
117. Fichero para la creación de usuarios fijos. . . . 149
118. Importador de usuarios. . . . 150
119. Validación e importación de usuarios. . . . 150
120. Párametros de cálculo de señal. . . . 151
121. Parámetros de cálculo de señal. . . . 152
122. Factor de rechazo. . . . 153
123. Separación en frecuencias. . . . 154
124. Rango de la señal RSRP. . . . 155
125. Rango de las señales RSSI y RSRQ. . . . 155
126. Rango de solapamiento. . . . 155
127. Rango de la señal RS SINR. . . . 156
128. Rango de señales interferentes. . . . 156
129. Rango de la señal SINR de los canales PDSCH y PUSCH. . . . 156
130. Rango de throughput téorico DL y UL. . . . 157
131. Rango de throughput téorico DL y UL por usuario. . . . 157
132. Propiedades de la banda de frecuencias 5G. . . . 158
133. Propiedades del sector 5G (Sector, Emplazamiento y Parámetros de radio). . . . 159
134. Propiedades del sector 5G (Parámetros de radio). . . . 160
135. Propiedades del sector 5G (Parámetros 5G). . . . 160
136. Configuraciones TDD. . . . 161
137. Propiedades del sector (Parámetros 5G). . . . 161
138. Propiedades del terminal 5G (Terminal y Emplazamiento). . . . 162
139. Propiedades del terminal 5G (Parámetros de radio). . . . 162
140. Propiedades del terminal 5G (Parámetros 5G). . . . 163
141. Propiedades del estudio de enlace 5G (Estudio y Extremos). . . . 163
142. Propiedades del estudio de enlace 5G (Parámetros de cálculo). . . . 164
143. Propiedades del estudio de cobertura 5G (Estudio y Extremos). . . . 164
144. Propiedades del estudio de cobertura 5G (Parámetros de cálculo). . . . 165
145. Propiedades del estudio de cobertura 5G (Rangos). . . . 165
146. Propiedades del estudio multitransmisor 5G (Estudios, Coberturas de red y Parámetros de cálculo de señal). . . . 166
147. Propiedades del estudio multitransmisor 5G (Área de cálculo y Cartografía). . . . 167
148. Parámetros de interferencia 5G. . . . 167
149. Factor de rechazo 5G. . . . 168

150. Rangos (Señales de interferencia). 169
151. Rangos (Señal SS-RSRP y Solapamiento). 169
152. Rangos (RSSI y SS-RSRQ). 169
153. Rangos (SS-SINR DL y UL-SINR). 170
154. Rangos (Throughput teórico DL y Throughput teórico UL). 170
155. Cálculo del estudio. 171
156. Información del cálculo. 172
157. Convenciones resultados del estudio radioeléctrico de enlace. 172
158. Resultado enlace (LTE-A). 173
159. Informe enlace (LTE-A). 173
160. Resultado enlace (5G). 174
161. Informe enlace (5G). 174
162. Puntos de interés (Unilago y Estación calle 100). 175
163. Cálculo de estadísticas de cobertura. 176
164. Señal RSRP (LTE-A). 176
165. Señal SS-RSRP (5G). 178
166. Señal RSRP (LTE-A - Multicobertura). 181
167. Señal SS-RSRP (5G - Multicobertura). 182
168. Solapamiento (LTE-A). 183
169. Solapamiento (5G). 184
170. Mejor servidor (LTE-A). 185
171. Mejor servidor (5G). 186
172. Señal RSSI (LTE-A). 187
173. Señal RSSI (5G). 188
174. Señal RSRQ (LTE-A). 189
175. Señal SS-RSRQ (5G). 190
176. Señal PDSCH SINR (LTE-A). 191
177. Señal SS-SINR DL (5G). 192
178. Señal PUSCH SINR (LTE-A). 193
179. Señal SINR UL (5G). 194
180. Throughput teórico DL (LTE-A). 195
181. Throughput teórico DL (5G). 196
182. Throughput teórico UL (LTE-A). 197
183. Throughput teórico UL (5G). 198
184. Throughput teórico DL por usuario (LTE-A). 199
185. Throughput teórico UL por usuario (LTE-A). 200
186. Señal RS SINR (LTE-A). 201
187. Informe de ancho de banda (LTE-A). 202
188. Gráfica de ancho de banda (LTE-A). 202
189. Informe Throughput (LTE-A). 203
190. Gráfica de Throughput (LTE-A). 203
191. Informe de ancho de banda redimensionado (LTE-A). 204
192. Gráfica de ancho de banda redimensionado (LTE-A). 204
193. Informe Throughput redimensionado (LTE-A). 205
194. Gráfica de Throughput redimensionado (LTE-A). 206

Índice de Tablas

1. Número de PRBs y subportadoras disponibles en función de la canalización. 56
2. Propuesta del 3GPP para que LTE-A se considere 4G [34] 58
3. Espacios de subportadora admitidos por NR [36]. 75
4. Descripción general de los requisitos mínimos de rendimiento técnico para IMT-2020 [36] . . . 87
5. Configuración P_b 126
6. Margen nivel de la señal RSRP [56]. 175
7. Nivel de la señal RSRP (LTE-A). 177
8. Nivel de la señal SS-RSRP (5G). 177
9. Margen nivel de la señal RSSI [57]. 180
10. Margen nivel de la señal RSRQ [56]. 180
11. Nivel de la señal RSRP (LTE-A - Multicobertura). 181
12. Nivel de la señal SS-RSRP (5G - Multicobertura). 182
13. Solapamiento (LTE-A). 183
14. Solapamiento (5G). 184
15. Mejor servidor (LTE-A). 185
16. Mejor servidor (5G). 186
17. Señal RSSI (LTE-A). 187
18. Señal RSSI (5G). 188
19. Señal RSRQ (LTE-A). 189
20. Señal SS-RSRQ (5G). 190
21. Señal PDSCH SINR (LTE-A). 191
22. Señal SS-SINR DL (5G). 192
23. Señal PUSCH SINR (LTE-A). 193
24. Señal SINR UL (5G) 194
25. Throughput teórico DL (LTE-A). 195
26. Throughput teórico DL (5G). 196
27. Throughput teórico UL (LTE-A). 197
28. Throughput teórico UL (5G). 198
29. Throughput teórico DL por usuario (LTE-A). 199
30. Throughput teórico UL por usuario (LTE-A). 200
31. Señal RS SINR (LTE-A). 201

Referencias

[1] Luis Fernando Arias Macías, "La Capa Física de los Futuros Sistemas de 5^{ta} Generación 5G", Tesis pregrado, Universidad de Sevilla, 2016 [En línea]. Disponible en: https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/44551. [Accedido: 29-Ago-2018]

[2] Anand R. Prasad, Alf Zugenmaier, Adrian Escott, Mirko Cano Soveri, "3GPP 5G Security", Publicación, 3GPP, 2018 [En línea]. Disponible en: http://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1975-sec_5g. [Accedido: 05-Sep-2018]

[3] Equipo de trabajo Qualcomm, "The 5G Economy", Estudio, Qualcomm Technologies Inc, 2017 [En línea]. Disponible en: https://www.qualcomm.com/invention/5g/economy. [Accedido: 02-Sep-2018]

[4] IHS Economics & IHS Technology, "The 5G economy: How 5G technology will contribute to the global economy", Reporte, IHS Markit Ltd, 2017 [En línea]. Disponible en: https://cdn.ihs.com/www/pdf/IHS-Technology-5G-Economic-Impact-Study.pdf. [Accedido: 02-Sep-2018]

[5] Sbani Patricia Rincon Torres, Alcides Jose Gomez Meza, "Fundamentos de las comunicaciones móviles", Tesis pregrado, Universidad Tecnológica De Bolívar, 2008[En línea]. Disponible en: http://biblioteca.utb.edu.co/notas/tesis/0043125.pdf?fbclid=IwAR2QSAD-2fmx3nC2W1a9_aWaZNmpexdVXMCTiVJnUN9rAJ04lXXMROQizGks. [Accedido: 06-Feb-2019]

[6] Marcos Alvarado Márquez, "Sistemas de comunicaciones Móviles", Libro, 2016[Físico]. Disponible en: https://docplayer.es/1428717-Sistemas-de-comunicaciones-moviles.html. [Accedido: 06-Feb-2019]

[7] Alberto Sendín Escalona, "Fundamentos de los sistemas de comunicaciones móviles", Libro, McGraw-Hill, 2004[En línea]. Disponible en: Biblioteca Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Sede Ingeniería. [Accedido: 06-Feb-2019]

[8] Equipo de trabajo Telefónica I+D, "Las Telecomunicaciones de Nueva Generación", informe, Dirección General de Relaciones Institucionales de Telefónica, 2016 [En línea]. Disponible en: https://docplayer.es/513140-Las-telecomunicaciones-de-nueva-generacion.html. [Accedido: 06-Feb-2019]

[9] José Capmany Francoy, Beatriz Ortega Tamarit, "Redes ópticas", Libro, Universidad Politécnica de Valencia, 2007 [Físico]. Disponible en: Biblioteca Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Sede Ingeniería. [Accedido: 06-Feb-2019]

[10] Ramón Agusti, Francisco Bernardo, Fernando Casadevall,Ramon Ferrús, Jordi Pérez-Romero, Oriol Sallent, "LTE: nuevas tendencias en comunicaciones móviles", Libro, Fundación Vodafone España, 2010 [En línea]. Disponible en: http://www.fundacionvodafone.es/publicacion/lte-nuevas-tendencias-en-comunicaciones-moviles. [Accedido: 06-Feb-2019]

[11] Ordóñez Luque, Javier "Espectro electromagnético y espectro radioeléctrico", libro, Asociación de autores científico - técnicos y académicos (ACTA), 2017 [En línea]. Disponible en: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/062017.pdf [Accedido: 01-Jul-2019]

[12] Docentes y estudiantes colaboradores Esopo, "Ondas milimétricas", artículo, Esopo, 2018 [En línea]. Disponible en: https://iie.fing.edu.uy/proyectos/esopo/ondas-milimetricas/ [Accedido: 01-Jul-2019]

[13] José Manuel Huidobro Moya, "Comunicaciones Móviles Sistemas GSM, UMTS y LTE", Libro, RA-MA Editorial, 2012 [En línea]. Disponible en: http://www.ra-ma.es/libros/COMUNICACIONES-MOVILES-SISTEMAS-GSM-UMTS-Y-LTE/71951/978-84-9964-129-4. [Accedido: 06-Feb-2019]

[14] Angel Gabriel Baltazar Sánchez, Maria del Rocio Medina Rodríguez, Amor Eunice Montiel García, "Sistemas de telefonía móvil basados en el estándar WCDMA", Tesis pregrado, Instituto Politécnico Nacional, 2007 [En línea]. Disponible en: https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/55/TESISbaltazarsanchez.pdf?sequence=1&isAllowed=y. [Accedido: 06-Feb-2019]

[15] Luis Enrique Ibarra Rosales, "Características tecnológicas de los sistemas móviles de 3G y 4G lte: situación actual en el Ecuador", Tesis pregrado, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, 2016 [En línea]. Disponible en: http://repositorio.ucsg.edu.ec/bitstream/3317/5395/1/T-UCSG-PRE-TEC-ITEL-126.pdf. [Accedido: 06-Feb-2019]

[16] Mustafa Ergen, "Mobile Broadband: Including WiMAX and LTE", Libro capítulo 7, Springer, 2009 [En línea]. Disponible en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-68192-4_7. [Accedido: 06-Feb-2019]

[17] Sergio Andres Sepulveda Leiva, "Evolución de las telecomunicaciones móviles y posibilidades de migración a redes 4G", Tesis pregrado, Universidad Santo Tomás, 2014 [En línea]. Disponible en: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/748/Evolucion%20-de%20las%20telecomunicaciones%20moviles%20y%20posibilidades%20de-%20migracion%20a%20re-des%204g.pdf?sequence=1&fbclid=IwAR0J7q93-sg3uwsxNcqKQfIxF3mKkv6W2YSmPlVeGZ0zaNz-Hc2CTyMBTev7A. [Accedido: 06-Feb-2019]

[18] José María Hernando Rábanos, Luis Mendo Tomás, José Manuel Riera Salís, "Comunicaciones móviles", Libro, Editorial Universitaria Ramón Areces, 2015 [En línea]. Disponible en:https://books.google.com.co/books?id=lnqnDAAAQBAJ&pg=PA26&lpg=PA26&dq=modo+de+explotacion+FDD&source=bl&ots=LmpId4BEqt-&sig-=EJzqNbSEqjxuNuEym29oCbN6fHQ&hl=es419&sa=X&ved=2ahUK-EwidrIPkoa3eAhUQq1kKHdMYD9QQ6AEw CnoECAcQAQ#v=onepage&-q=modo%20de%20explotacion%20FDD&f=false [Accedido: 06-Feb-2019]

[19] Elinisi G. Arevalo A., Maria A. Rodriguez N., "SISTEMA DE COMUNICACIONES CON ANTENAS MIMO", Tesis pregrado, Universidad de Carabobo,2016 [En línea]. Disponible en: http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/5338/elarmaro.pdf ?sequence=3. [Accedido: 20-Jun-2019]

[20] José Javier Anguís Horno, "Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de la WLAN de Wheelers Lane Technology College", Tesis pregrado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2008 [En línea]. Disponible en: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11579. [Accedido: 29-Jun-2019]

[21] Inmaculada Hernáez Rioja, "Modulación QAM", Apuntes de asignatura, University of the Basque Country [En línea]. Disponible en: https://aholab.ehu.es/users/inma/psc/tema3.pdf. [Accedido: 29-Ene-2020]

[22] Docente Sistemas de comunicación II, "Modulación PSK", Apuntes de asignatura, Universidad Don Bosco, 2011 [En línea]. Disponible en: http://www.udb.edu.sv/udb/archivo/guia/electronica-ingenieria/sistemas-de-comunicacion-ii/2011/ii/guia-7.pdf. [Accedido: 29-Ene-2020]

[23] Docentes BirtLH, "La señal de radiodifusión. Primera parte: TV terrestre.", Curso, Eusko Jaurlaritza Gobierno Vasco [En línea]. Disponible en: https://ikastaroak.ulhi.net/edu/es/IEA/ICTV/ICTV02/es_IEA_ICTV02_Contenidos/website_55_tcnicas_de_modulacin_digital.html. [Accedido: 29-Ene-2020]

[24] Leo Pedrini, "¿Qué es CP (Prefijo Cíclico) en LTE?", Artículo, telecomHall, 2014 [En línea]. Disponible en: http://www.telecomhall.com/es/que-es-cp-prefijo-ciclico-en-lte.aspx. [Accedido: 06-Feb-2020]

[25] Vallejo Huanga Diego Fernando, Álvarez Rueda Robin Gerardo, "Estudio y simulación de turbo códigos utilizando el algoritmo MAP y SOVA", Paper, Escuela Politécnica Nacional, 2008 [En línea]. Disponible en: https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/4905/1/Estudio%20y%20Simulaci%C3%B3n%20de%20Turbo.pdf. [Accedido: 06-Feb-2020]

[26] Alfonso Francos Romero, "Estudio Teórico de la Arquitectura de Turbo-códigos para aplicaciones de Telefonía Celular de 3G", Tesis pregrado, Universidad de las Américas de Puebla, 2007 [En línea]. Disponible en: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lem/francos_r_a/. [Accedido: 06-Feb-2020]

[27] Paúl Esteban Cárdenas Delgado, Josué Bernardo Vanegas Samaniego, “Implementación de los procesos relacionados a la capa física de una red LTE utilizando MATLAB", Tesis pregrado, Universidad de Cuenca, 2017 [En línea]. Disponible en: http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/27362. [Accedido: 06-Feb-2020]

[28] Wilson Giovanni Castañeda Barbosa, “Estructuras y Características de Desempeño de los Códigos LDPC (Low-Density Parity-Check Codes) ", Tesis maestría, Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, 2013 [En línea]. Disponible en: https://inaoe.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1009/224/1/Casta %C3 %B1edaBWG.pdf. [Accedido: 06-Feb-2020]

[29] Jorge Bernal Borrero, “Creación de una plataforma de desarrollo de componentes web orientados al acceso desde dispositivos móviles con adaptación dinámica de contenidos", Tesis pregrado, Universidad de Sevilla, 2010 [En línea]. Disponible en: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/11911/direccion/Volumen+1 %252F. [Accedido: 06-Feb-2019]

[30] María Dolores Arguinchona Echavarri, “Optimización Diseño Red de Acceso de Transmisión de Telefonía Móvil”, Tesis pregrado, Universidad de Sevilla, 2015 [En línea]. Disponible en: http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/12404/fichero/PFC+-+Optimizaci %C3 %B3n+Red+de+Transmisi %C3 %B3n.pdf [Accedido: 06-Feb-2019]

[31] Ing. Pablo Cárdenas Sánchez & Ing. Daniela Gáfaro Chivatá, “Diseño de un Red 4g LTE en el Municipio de Bucaramanga y Floridablanca”, Tesis especialización, Universidad Santo Tomas, 2016 [En línea]. Disponible en: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/1609/2016Daniela-%20Gafaro %2C %20Pablo %20Cardenastrabajo %20de %20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y&fbclid=-IwAR0dHY0__2_JNA4U32Rh1XXDWaB0-tjII3x59qiFHUXbl95jP07dSNYqgFTY. [Accedido: 06-Feb-2019]

[32] Jesús Jiménez Motilla, Jaime Ochovo Pavón, “Evaluación comparativa de redes móviles”, Tesis pregrado, Universidad Politécnica de Madrid, 2017 [En línea]. Disponible en: http://oa.upm.es/49728/1/PFC_JESUS_JIMENEZ_MOTILLA_JAIME-_OCHOVO_PAVON.pdf?fbclid=IwAR36cp3KYyJQgEjWCspsPVxWoZz-Q3h_GsB6eb0YT42w7Ey-F71xNkdR1BzEs. [Accedido: 06-Feb-2019]

[33] Equipo de trabajo 5G-PPP, “LTE on 5G Architecture”, Whitepaper, 5G Infrastructure Public Private Partnership, 2017 [En línea]. Disponible en: https://5g-ppp.eu/wp-content/uploads/2017/07/5G-PPP-5G-Architecture-White-Paper-2-Summer-2017_For-Public-Consultation.pdf. [Accedido: 06-Feb-2019]

[34] Camilo Iván Calle Cáceres, “Estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías 4G Long Term Evolution (LTE) y LTE Advanced", Tesis pregrado, Escuela Politécnica nacional, Ecuador, 2013 [En línea]. Disponible en: http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6667. [Accedido: 02-Ene-2020]

[35] Ali A. Zaidi, Robert Baldemair, Mattias Andersson, Sebastian Faxér, Vicent Molés-Cases, Zhao Wang, “Designing for the future: the 5G NR physical layer", Artículo, Ericsson, 2017 [En línea]. Disponible en: https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/designing-for-the-future-the-5g-nr-physical-layer?fbclid=IwAR1xLgSU08fCSLfpQHIaipAdASV3nTuHtAy2t1wQavEQiceWgr4u9tAxHR0.

[Accedido: 15-Feb-2020]

[36] Erik Dahlman, Stefan Parkvall, Johan Sköld, “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology”, Libro, Academic Press, 2018 [Físico]. Disponible en: Compra Amazon. [Accedido: 15-Feb-2020]

[37] Miembros de Aptica, “Bienvenido a XIRIO ONLINE", Página Web, Aptica [En línea]. Disponible en: http://www.xirio-online.com. [Accedido: 21-Feb-2020]

[38] Miembros de Aptica, “Manual XIRIO", Manual, Aptica [En línea]. Disponible en: https://www.xirio-online.com/help/es/index.htm. [Accedido: 21-Feb-2020]

[39] Miembros de Aptica, “Formato de Usuarios Fijos", Manual, Aptica [En línea]. Disponible en: http://www.xirio-online.com/help/es/fixedusersformat.htm. [Accedido: 21-Feb-2020]

[40] Anónimo, “Definición duplexor", Artículo, Electrónica Básica, 2017 [En línea]. Disponible en: http://www.electronica-basica.com/duplexor.html. [Accedido: 27-Nov-2019]

[41] Grupo Informática XI, “SNR (Signal To Noise Ratio)", Trabajo de curso, Universidad Tecnológica Oteima, 2017 [En línea]. Disponible en: https://recursoinformatico.weebly.com/uploads/1/0/7/3/107381475/snr.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[42] Mung Chiang, “Interference and Signal to Interference Ratio (SIR)", Video de curso, Princeton University, 2016 [En línea]. Disponible en: https://es.coursera.org/lecture/friends-money-bytes/interference-and-signal-to-interference-ratio-sir-XKa4C. [Accedido: 22-Feb-2020]

[43] Juan Luis Dorado, “Conceptos básicos sobre planificación de redes", Artículo, Wordpress, 2012 [En línea]. Disponible en: https://diarioredesyservicios.wordpress.com/2012/01/11/conceptos-basicos-sobre-planificacion-de-redes/. [Accedido: 22-Feb-2020]

[44] Patel Vijaykumar, “Efficiency improvement in wireless channels studies and investigations", Libro, Ganpat University, 2015 [En línea]. Disponible en: https://shodhganga.inflibnet.ac.in/bitstream/10603/137824/4/chapter%203.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[45] Equipo Mintic, “Proceso se selección objetiva para asignación de espectro radioeléctrico en las bandas 700 MHz (Dividendo Digital), 900 MHz, 1.900 MHz y 2.500 MHz para servicios móviles terrestres", Documento de Consulta Pública, MINTIC, 2015 [En línea]. Disponible en: https://www.mintic.gov.co/portal/604/articles-9301_recurso_1.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[46] Fabio Andres Jaimes Carrero, “Propuesta de diseño e implementación de un sistema distribuido de antenas (DAS) para mejorar la red móvil del operador claro en el centro comercial titán plaza", Tesis Especialización, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2016 [En línea]. Disponible en: http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/4559/1/TRA.%20FINAL%20-%20DAS%20TITAN%20PLAZA%20-%20FABIO%20JAIMES.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[47] Ana García Novo, “LTE-M, el despliegue esperado para IoT", Artículo, Orange, 2019 [En línea]. Disponible en: https://hablemosdeempresas.com/grandes-empresas/lte-m-despliegue-soluciones-iot/. [Accedido: 22-Feb-2020]

[48] Raquel Ligero, “Diferencias entre NB-IoT y LTE-M", Artículo, Accent Systems, 2018 [En línea]. Disponible en: https://accent-systems.com/es/blog/diferencias-nb-iot-lte-m/ [Accedido: 22-Feb-2020]

[49] Miembros de ITU-R, “Recommendation ITU-R P.526-13", Artículo, ITU-R, 2013 [En línea]. Disponible en: http://www.srrc.org.cn/spreadmodel/PDFile/R-REC-P.526-13-201311-I!!PDF-E.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[50] Miembros de MPIRICAL, “PCI - Physical Cell Identity", Definición, MPIRICAL [En línea]. Disponible en: https://www.mpirical.com/glossary/pci-physical-cell-identity. [Accedido: 22-Feb-2020]

[51] Susana Pérez Mantilla, “El sistema de comunicaciones móviles de proxima generación 5G y su caso de uso IoT", Tesis de maestría, Universitat Oberta de Catalunya, 2019 [En línea]. Disponible en: http://openaccess.uoc.edu/webapps/o2/bitstream/10609/90205/6/supermantillaTFM0119memoria.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[52] Miembros de ETSI, “5G; NR; Requirements for support of radio resource management", Libro, ETSI, 2018 [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138100_138199/138133/15.03.00_60/ts_138133v150300p.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[53] Miembros de ANE, “Documento de Consulta Pública sobre las Bandas De Frecuencia para 5G en Colombia", Documento de Consulta Pública, ANE, 2019 [En línea]. Disponible en: http://portalanterior.ane.gov.co/images/ArchivosDescargables/consultapublica/5G/20190401_Consulta_Publica_5G_ANE_Colombia.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[54] Ing. Oscar Alexis Gil Rojas, Ing. Nicolás Rosero Peralta, “Población estudiantil y déficit de espacios físicos", Informe “Oficina asesora de planeación y control", Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2013 [En línea]. Disponible en: http://www1.udistrital.edu.co:8080/documents/3842330/3880846/F2-04.+Poblacion+Estudiantil+y+Deficit+de+espacios+fisicos.pdf. [Accedido: 22-Feb-2020]

[55] Administrador Techplayon, “5G NR Measurements: RSRP, RSSI, RSRQ and SINR", Artículo, Techplayon, 2019 [En línea]. Disponible en: http://www.techplayon.com/5g-nr-measurements-rsrp-rssi-rsrq-and-sinr/ [Accedido: 22-Feb-2020]

[56] Miembros de Teltonika, “RSRP and RSRQ", Artículo, Teltonika, 2018 [En línea]. Disponible en: https://wiki.teltonika-networks.com/view/RSRP_and_RSRQ [Accedido: 22-Feb-2020]

[57] Miembros de MetaGeek, “Understanding RSSI", Artículo, MetaGeek LLC, 2019 [En línea]. Disponible en: https://www.metageek.com/training/resources/understanding-rssi.html [Accedido: 22-Feb-2020]

[58] Rubén Martín Cubero, “Planificación de una Red 4G", Tesis de pregrado, Universidad Politécnica de Madrid [En línea]. Disponible en: http://oa.upm.es/38378/7/PFG_RUBEN_MARTIN_CUBERO.pdf [Accedido: 22-Feb-2020]

[59] Hardik Khatri, “Colombia: Mobile Network Experience Report January 2020", Artículo, Opensignal, 2020 [En línea]. Disponible en: https://www.opensignal.com/reports/2020/01/colombia/mobile-network-experience/ [Accedido: 22-Feb-2020]