



UNL

Universidad
Nacional
de Loja



UNIVERSIDAD NACIONAL DE LOJA

**FACULTAD DE LA ENERGÍA, LAS INDUSTRIAS Y LOS
RECURSOS NATURALES NO RENOVABLES**

**CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRÓNICA Y
TELECOMUNICACIONES**

**Estudio y análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz aire de las
comunicaciones móviles de 5G**

Trabajo de Titulación
previa a la obtención
del título de Ingeniera
en Electrónica y
Telecomunicaciones

AUTORA:

Dayanna Stefania Guadalima Guadalima

DIRECTOR:

Ing., Juan Gabriel Ochoa Aldeán Mg. Sc.

Loja – Ecuador

2022

CERTIFICACIÓN

Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, M. Sc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

CERTIFICA:

Haber dirigido, asesorado, revisado y corregido el presente trabajo de titulación, en su proceso de investigación cuyo tema versa en: **“ESTUDIO Y ANÁLISIS DE LAS TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA INTERFAZ AIRE DE LAS COMUNICACIONES MÓVILES DE 5G”**, previa a la obtención del título de **Ingeniera en Electrónica y Telecomunicaciones**, realizado por la señorita: Dayanna Stefania Guadalupe Guadalupe, la misma que cumple con la reglamentación y políticas de investigación, por lo que autoriza su presentación y posterior sustentación y defensa.

Loja, 04 de febrero de 2022

**JUAN
GABRIEL
OCHOA
ALDEAN**

Firmado digitalmente por
JUAN GABRIEL
OCHOA ALDEAN
Fecha: 2022.03.31
17:46:51 -05'00'

Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán, M. Sc.


DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

AUTORÍA

Yo, **DAYANNA STEFANÍA GUADALIMA GUADALIMA**, declaro ser la autora del presente trabajo de titulación y eximo expresamente a la Universidad Nacional de Loja y a sus representantes jurídicos de posibles reclamos o acciones legales por el contenido del misma.

Adicionalmente, acepto y autorizo a la Universidad Nacional de Loja, la publicación de mi trabajo de titulación en el Repositorio Institucional – Biblioteca Virtual.

Firma:



Cédula: 1150320107

Fecha: 01 de abril de 2022

Correo Electrónico: dayanna.guadalima@unl.edu.ec

Celular: 0980934304

**CARTA DE AUTORIZACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN POR PARTE DEL
AUTOR, PARA LA CONSULTA, PRODUCCIÓN PARCIAL O TOTAL Y
PUBLICACIÓN ELECTRÓNICA DEL TEXTO COMPLETO.**

Yo, **DAYANNA STEFANIA GUADALIMA GUADALIMA**, declaro ser autora del trabajo de titulación titulado: **“Estudio y análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz aire de las comunicaciones móviles de 5G ”**, como requisito para optar al grado de: **INGENIERA EN ELECTRÓNICA Y TELECOMUNICACIONES**; autorizo al Sistema Bibliotecario de la Universidad Nacional de Loja, para que con fines académicos, muestre al mundo la producción intelectual de la Universidad, a través de la visibilidad de su contenido de la siguiente manera en el Repositorio Institucional.

Los usuarios pueden consultar el contenido de este trabajo en el Repositorio Institucional, en las redes de información del país y del exterior, con las cuales tenga convenio la Universidad. La Universidad de Loja, no se responsabiliza por el plagio o copia del trabajo de titulación que realice un tercero.

Para constancia de esta autorización, en la ciudad de Loja, al primer día del mes de abril del dos mil veintidós.

Firma:



Autora: Dayanna Stefania Guadalima Guadalima

Cédula: 1150320107

Dirección: Loja, Clodoveo Jaramillo Alvarado

Correo Electrónico: dayanna.guadalima@unl.edu.ec

Celular: 0980934304

DATOS COMPLEMENTARIOS

Director del trabajo de titulación: Ing. Juan Gabriel Ochoa Aldeán Mg. Sc.

Tribunal de grado: - Ing. Paulo Alberto Samaniego Rojas Mg. Sc

- Ing. Ángel José Ordoñez Mendieta Mg. Sc

- Ing. Marianela del Cisne Carrión González Mg. Sc

DEDICATORIA

A mis padres que han sido la guía y un pilar fundamental en mi vida, por su esfuerzo que ha hecho posible que yo pueda salir adelante y por todo su apoyo incondicional que me ha permitido culminar con mi trabajo.

A mi hermano por sus palabras de aliento y apoyo a lo largo de este recorrido.

Dayanna Guadalupe

AGRADECIMIENTO

A Dios, por guiarme por el camino correcto, por la salud y las fuerzas necesarias para poder culminar con mis estudios.

A mi familia por su amor y apoyo que me ha motivado para poder cumplir mis metas.

A los docentes de la carrera de Ingeniería en Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad Nacional de Loja por sus enseñanzas y consejos brindados durante todo el trayecto académico y en especial a mi director de trabajo de titulación por el tiempo y guía durante el desarrollo del presente trabajo.

A mis amigos más cercanos por los buenos momentos en los que hemos aprendido y compartido juntos gratas experiencias.

Dayanna Guadalupe

ÍNDICE DE CONTENIDOS

| | |
|---|------------|
| Portada | i |
| Certificación | ii |
| Autoría | iii |
| Carta de autorización | iv |
| Dedicatoria | v |
| Agradecimiento | vi |
| Índice de contenidos | vii |
| Índice de tablas | x |
| Índice de figuras | xi |
| Índice de anexos | xiv |
| 1. TÍTULO | 1 |
| 2. RESUMEN | 2 |
| 2.1 ASTRACT | 4 |
| 3. INTRODUCCIÓN | 6 |
| 4. MARCO TEÓRICO | 8 |
| 4.1 Evolución de las Comunicaciones Móviles | 8 |
| 4.1.1 <i>Primera Generación (1G)</i> | 8 |
| 4.1.1.1 AMPS (Advanced Mobile Phone System) | 9 |
| 4.1.1.2 NMT (Nordic Mobile Telephone) | 10 |
| 4.1.1.3 TACS (Total Access Communication System) | 10 |
| 4.1.2 <i>Segunda Generación (2G)</i> | 11 |
| 4.1.2.1 D-AMPS (Digital-AMPS) | 12 |
| 4.1.2.2 GSM (Global System Mobile) | 12 |
| 4.1.2.3 CDMA ONE (Code Division Multiple Access One) | 13 |
| 4.1.2.4 PDC (Personal Digital Cellular) | 13 |
| 4.1.2.5 GPRS (General Packet Radio System) | 14 |
| 4.1.2.6 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution) | 15 |
| 4.1.3 <i>Tercera generación (3G)</i> | 15 |
| 4.1.3.1 CDMA2000 | 15 |
| 4.1.3.2 UMTS (Universal Mobile Telecommunications System) | 16 |
| 4.1.3.3 HSPA (High Speed Packet Access) | 16 |
| 4.1.3.4 HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access) | 17 |

| | | |
|------------|---|-----------|
| 4.1.4 | <i>Cuarta generación (4G)</i> | 17 |
| 4.1.4.1 | LTE (Long Term Evolution) | 17 |
| 4.1.4.1 | LTE Advanced (Long Term Evolution-Advanced) | 37 |
| 4.1.4.2 | LTE Advanced Pro..... | 39 |
| 4.2 | Quinta generación (5G-NR)..... | 40 |
| 4.2.1 | <i>Escenarios de Uso de IMT 2020</i> | 41 |
| 4.2.1.1 | Banda ancha móvil mejorada (eMBB)..... | 41 |
| 4.2.1.2 | Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC)..... | 41 |
| 4.2.1.3 | Comunicaciones masivas tipo maquina (mMTC)..... | 41 |
| 4.2.2 | <i>Arquitectura 5G</i> | 42 |
| 4.2.2.1 | 5G NSA (Non-StandAlone). | 42 |
| 4.2.2.2 | 5G SA (StandAlone). | 44 |
| 5 | METODOLOGÍA | 48 |
| 5.1 | ASPECTOS CLAVES PARA EL DESARROLLO DE 5G | 50 |
| 5.1.1 | <i>Ondas milimétricas</i> | 50 |
| 5.1.2 | <i>Bandas de frecuencia</i> | 52 |
| 5.1.3 | <i>Modelos de canal 5G</i> | 55 |
| 5.1.4 | <i>Modelos de propagación para 5G</i> | 57 |
| 5.1.4.1 | Modelo CI (Close-In)..... | 57 |
| 5.1.4.2 | Modelo CIF | 58 |
| 5.1.4.3 | Modelo ABG (Alfa-Beta-Gama) | 59 |
| 5.1.5 | <i>Escenarios de ondas milimétricas</i> | 59 |
| 5.1.5.1 | Microcelda urbana (UMi) | 59 |
| 5.1.5.2 | Macrocelda urbana (UMa)..... | 60 |
| 5.1.5.3 | Macrocelda rural (RMa) | 60 |
| 5.1.5.4 | Punto de acceso interior (InH) | 60 |
| 5.1.6 | <i>Simulador mmWave</i> | 61 |
| 5.2 | TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA INTERFAZ AIRE | 62 |
| 5.2.1 | <i>Formas de onda candidatas para 5G</i> | 62 |
| 5.2.1.1 | FBMC (Filter Bank Multi Carrier) | 63 |
| 5.2.1.2 | UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier) | 64 |
| 5.2.1.3 | GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing) | 65 |
| 5.2.2 | <i>Esquemas de Modulación para 5G</i> | 68 |
| 5.2.3 | <i>Codificación de canal 5G</i> | 70 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 5.2.3.1 | Códigos Polares | 70 |
| 5.2.3.2 | Códigos de paridad de baja densidad..... | 74 |
| 5.2.4 | <i>Técnicas de Acceso múltiple 5G</i> | 77 |
| 5.2.4.1 | Fundamentos básicos OFDMA..... | 77 |
| 5.2.4.2 | Mejoras en la Interfaz Aire | 84 |
| 5.2.3 | <i>Sistemas de antenas</i> | 88 |
| 5.2.3.1 | Massive MIMO..... | 88 |
| 5.2.3.2 | 3D Beamforming | 91 |
| 5.2.4 | <i>Radio cognitiva</i> | 92 |
| 5.2.5 | <i>Indicadores claves de rendimiento para 5G</i> | 94 |
| 6 | RESULTADOS | 99 |
| 6.1 | NYUSIM en el análisis de mmWave..... | 99 |
| 6.1.1 | <i>Escenario: Microcelda urbana</i> | 109 |
| 6.1.2 | <i>Escenario: Macrocela urbana</i> | 117 |
| 6.1.3 | <i>Escenario: Macrocela rural</i> | 125 |
| 6.1.4 | <i>Escenario: Punto de Acceso Interior</i> | 130 |
| 6.2 | Interpretación de las Formas de Onda | 138 |
| 6.3 | Visión de esquemas de modulación actuales y futuros..... | 139 |
| 6.4 | Codificación de canal propuestas para 5G..... | 140 |
| 6.5 | Exploración hacia los sistemas de antenas futuros | 141 |
| 6.6 | Radio cognitiva como tecnología emergente para 5G | 142 |
| 6.7 | Impacto de tecnologías para la interface de radio en el cumplimiento de KPis en 5G..... | 143 |
| 7 | DISCUSIÓN | 145 |
| 8 | CONCLUSIONES | 147 |
| 9 | RECOMENDACIONES | 151 |
| 10 | BIBLIOGRAFÍA | 152 |
| 11 | ANEXOS | 157 |

Índice de tablas

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Rangos de frecuencia GSM | 13 |
| Tabla 2. Rangos de frecuencia PDC | 14 |
| Tabla 3. Bandas operativas E-UTRA | 21 |
| Tabla 4. Categorías de equipos de usuario LTE | 23 |
| Tabla 5. Configuración: Matriz de recursos Slot en DL..... | 32 |
| Tabla 6. Configuración: Matriz de recursos Slot en UL..... | 32 |
| Tabla 7. Número de PRB y subportadoras dependiendo canalización..... | 33 |
| Tabla 8. Señales Físicas enlace descendente | 34 |
| Tabla 9. Canales Físicos enlace descendente | 35 |
| Tabla 10. Señales Físicas enlace ascendente | 35 |
| Tabla 11. Canales Físicos enlace ascendente | 35 |
| Tabla 12. Velocidades pico LTE-A/LTE-A-Pro | 40 |
| Tabla 13. Rango de frecuencias designado por 3GPP (Release 16)..... | 53 |
| Tabla 14. Rangos de frecuencias NR- FR1 | 53 |
| Tabla 15. Rangos de frecuencias NR en FR2 | 54 |
| Tabla 16. Esquemas de modulación 5G | 68 |
| Tabla 17. Orden de modulación 5G..... | 69 |
| Tabla 18. Valores determinados para CP normal y extendido | 80 |
| Tabla 19. Numerologías definidas para μ | 81 |
| Tabla 20. Duración de símbolos 5G | 83 |
| Tabla 21. Latencia del plano de usuario | 96 |
| Tabla 22. Valores definidos para los parámetros de canal | 102 |
| Tabla 23. Valores definidos para bloque de propiedades de antena..... | 104 |
| Tabla 24. Valores definidos para bloque de consistencia espacial..... | 106 |
| Tabla 25. Valores definidos para modelo con bloqueo humano | 108 |
| Tabla 26. Pérdidas de trayectoria y potencia recibida NYUSIM | 136 |
| Tabla 27. Pérdidas de trayectoria y potencia recibida NYUSIM | 137 |
| Tabla 28. Longitud máxima para códigos polares..... | 140 |
| Tabla 29. Características códigos LDPC 5G | 140 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Técnicas de acceso múltiple..... | 12 |
| Figura 2. Arquitectura general LTE | 18 |
| Figura 3. Equipos de usuario | 23 |
| Figura 4. Subportadoras OFDM | 25 |
| Figura 5. Distribución subportadoras OFDM..... | 25 |
| Figura 6. Prefijo cíclico OFDM..... | 26 |
| Figura 7. OFDMA, asignación de recursos para usuarios..... | 27 |
| Figura 8. Protocolos de plano de usuario | 28 |
| Figura 9. Estructura trama tipo 1 | 30 |
| Figura 10. Estructura trama tipo 2 | 31 |
| Figura 11. Matriz de Recursos de un Slot en DL | 32 |
| Figura 12. Matriz de Recursos de un Slot en UL | 33 |
| Figura 13. Distribución de condiciones de canal en OFDMA, SC-FDMA..... | 34 |
| Figura 14. Protocolos del plano de control..... | 36 |
| Figura 15. Principio de formación de Haz..... | 37 |
| Figura 16. Agregación de portadoras | 38 |
| Figura 17. Relays Node | 39 |
| Figura 18. Opciones de arquitectura 5G..... | 43 |
| Figura 19. Arquitectura SDN..... | 45 |
| Figura 20. Arquitectura NFV..... | 46 |
| Figura 21. Ventana de Inicio NYUSIM (Versión 3.0) | 49 |
| Figura 22. Línea de tiempo, avances Releases 3GPP | 49 |
| Figura 23. Representación de Cobertura y Capacidad según rango de frecuencia..... | 52 |
| Figura 24. Escenarios ondas milimétricas | 60 |
| Figura 25. Software NYUSIM..... | 61 |
| Figura 26. Estructura general de red..... | 62 |
| Figura 27. a) Espectro OFDM, b) Espectro FBMC..... | 64 |
| Figura 28. Comparación Filtrado..... | 65 |
| Figura 29. Proceso de transmisión/recepción GFDM | 66 |
| Figura 30. Diagrama de bloques GFDM | 67 |
| Figura 31. Canal Binario, Discreto sin memoria (B-DMC) | 71 |
| Figura 32. Representación de un canal básico W_2 | 71 |

| | |
|---|-----|
| Figura 33. Canales de código polar W_N | 72 |
| Figura 34. Representación gráfica Kernel Polar..... | 73 |
| Figura 35. Codificación polar $N=8$ | 73 |
| Figura 36. Bloque LDPC | 75 |
| Figura 37. Gráfico de Tanner para códigos LDPC | 76 |
| Figura 38. Estructura de matriz LDPC para 5G NR..... | 77 |
| Figura 39. Estructura general de trama de radio..... | 79 |
| Figura 40. Representación de un slot de NR | 81 |
| Figura 41. Diferentes espaciamentos entre subportadoras | 82 |
| Figura 42. Asignación de recursos OFDMA vs NOMA | 85 |
| Figura 43. Enlace descendente NOMA | 86 |
| Figura 44. Enlace ascendente NOMA | 87 |
| Figura 45. Arquitectura sistemas de radio 5G | 90 |
| Figura 46. Red de Radio Cognitiva | 94 |
| Figura 47. Indicadores claves de rendimiento 5G | 95 |
| Figura 48. NYUSIM – Parámetros de canal y propiedades de antena | 99 |
| Figura 49. NYUSIM – Parámetros bloque de consistencia espacial..... | 104 |
| Figura 50. NYUSIM – Parámetros para bloqueo humano | 106 |
| Figura 51. Parámetros ingresados para escenario UMi..... | 109 |
| Figura 52. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMi-LOS..... | 109 |
| Figura 53. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMi-LOS..... | 110 |
| Figura 54. PDP direccional con mayor potencia, UMi-LOS..... | 111 |
| Figura 55. PDP pequeña escala, UMi-LOS..... | 111 |
| Figura 56. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMi-LOS..... | 112 |
| Figura 57. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMi-NLOS..... | 112 |
| Figura 58. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMi-NLOS..... | 113 |
| Figura 59. PDP direccional con mayor potencia, UMi-NLOS..... | 113 |
| Figura 60. PDP pequeña escala, UMi-NLOS | 114 |
| Figura 61. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMi-NLOS..... | 114 |
| Figura 62. Mapa de intensidad de desvanecimiento por sombra, UMi | 115 |
| Figura 63. Mapa de condición LOS/NLOS correlacionados espacialmente, UMi | 116 |
| Figura 64. Dirección y distancia de pista de usuario, UMi | 116 |
| Figura 65. PDP omnidireccionales consecutivas a lo largo de trayectoria del usuario, UMi..... | 117 |

| | |
|---|-----|
| Figura 66. PDP direccionales consecutivas con mayor potencia a lo largo de trayectoria del usuario, UMi | 117 |
| Figura 67. Parámetros ingresados para escenario UMa | 117 |
| Figura 68. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMa-LOS | 118 |
| Figura 69. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMa-LOS | 118 |
| Figura 70. PDP direccional con mayor potencia, UMa-LOS | 119 |
| Figura 71. PDP pequeña escala, UMa-LOS | 119 |
| Figura 72. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMa LOS | 120 |
| Figura 73. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMa-NLOS | 120 |
| Figura 74. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMa-NLOS | 121 |
| Figura 75. PDP direccional con mayor potencia, UMa-NLOS | 121 |
| Figura 76. PDP pequeña escala, UMa-NLOS | 122 |
| Figura 77. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMa-NLOS | 122 |
| Figura 78. Mapa de intensidad de desvanecimiento por sombra, UMa | 123 |
| Figura 79. Mapa de condición LOS/NLOS correlacionados espacialmente, UMa..... | 123 |
| Figura 80. Dirección y distancia de pista del usuario, UMa..... | 124 |
| Figura 81. PDP omnidireccionales consecutivas a lo largo de trayectoria del usuario, UMa..... | 124 |
| Figura 82. PDP direccionales consecutivas con mayor potencia a lo largo de trayectoria del usuario, UMa | 124 |
| Figura 83. Parámetros ingresados para escenario RMa..... | 125 |
| Figura 84. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, RMa-LOS | 125 |
| Figura 85. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, RMa-LOS..... | 126 |
| Figura 86. PDP direccional con mayor potencia, RMa-LOS | 126 |
| Figura 87. PDP pequeña escala, RMa-LOS | 127 |
| Figura 88. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, RMa-LOS | 127 |
| Figura 89. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, RMa-NLOS | 128 |
| Figura 90. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, RMa-NLOS..... | 128 |
| Figura 91. PDP direccional con mayor potencia, RMa-NLOS | 129 |
| Figura 92. PDP pequeña escala, RMa-NLOS..... | 129 |
| Figura 93. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, RMa-NLOS | 130 |
| Figura 94. Parámetros ingresados para escenario InH | 130 |
| Figura 95. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, InH-LOS | 131 |
| Figura 96. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, InH-LOS | 131 |

| | |
|--|-----|
| Figura 97. PDP direccional con mayor potencia, InH-LOS | 132 |
| Figura 98. PDP pequeña escala, InH-LOS | 132 |
| Figura 99. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, InH-LOS | 133 |
| Figura 100. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, InH-NLOS | 133 |
| Figura 101. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, InH-NLOS | 134 |
| Figura 102. PDP direccional con mayor potencia, InH-NLOS | 134 |
| Figura 103. PDP pequeña escala, InH-NLOS | 135 |
| Figura 104. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, InH-NLOS | 135 |

Índice de anexos

| | |
|--|-----|
| Anexo 1. Certificación de Traducción | 157 |
|--|-----|

1. TÍTULO

Estudio y análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz aire de las comunicaciones móviles de 5G

2. RESUMEN

La presente investigación se desenvuelve en torno a las comunicaciones móviles de quinta generación, a medida que evoluciona la infraestructura de las redes, también se espera un incremento en las capacidades que ofrecen a los usuarios. Características que recaen especialmente en el desarrollo de la capa física de las redes 5G NR, la misma que se desenvuelve mediante las distintas tecnologías que son aplicadas en la interfaz de radio, por ende, el análisis de cada una de las tecnologías y fundamentos básicos se desarrollan a lo largo de tres capítulos.

En el primer capítulo se lleva a cabo la revisión de los fundamentos teóricos acerca de la evolución de las tecnologías implementadas desde la primera hasta la cuarta generación, conjuntamente a la arquitectura básica para la implementación de 5G. En el segundo capítulo se inicia con el desarrollo de la metodología enfocada a las ondas milimétricas (mmWave) en donde, mediante la representación en el software NYUSIM se extraen los principales datos del modelo de canal como pérdidas del trayecto y potencias recibidas, desde el punto de vista de diferentes escenarios (UMi, UMa, RMa y InH). Finalmente, en el tercer capítulo se desarrollan las bases de las tecnologías que se aplican en la interfaz radio, teniendo; formas de onda, modulación, codificación y técnicas de acceso múltiple, junto con el sistema de antenas necesaria para llevar a cabo el despliegue de 5G.

Los resultados mediante el software NYUSIM comprenden el comportamiento de mmWave, en donde las pérdidas serán proporcionales a la distancia en la que se encuentra el equipo de usuario y de acuerdo al modelo de bloqueo humano. En términos de potencia recibida se mantiene en un rango óptimo, característico para 5G.

En las tecnologías aplicadas en la interfaz, OFDMA se mantiene como técnica favorita de acceso múltiple, sin embargo, el desarrollo de NOMA se perfila como un buen candidato, al igual que GFDM como técnica de forma de onda al superar principalmente las limitaciones de FBMC o de UFMC. Referente a los esquemas de modulación a pesar que el esquema recomendado es el de 256 QAM, la posibilidad de 1024 QAM crea una gran expectativa. De la misma manera los códigos polares y LDPC como técnicas para corregir errores que son producidos en el canal de información, esto dentro de los procesos de codificación desarrollados para 5G.

Se destacan los reportes y especificaciones técnicas del Release 16 del 3GPP, las recomendaciones generadas envuelven a las tecnologías analizadas haciendo cumplir con los principales indicadores claves de rendimiento de 5G. Adicionalmente, se analiza la Radio Cognitiva como una de las tecnologías emergentes para mejorar parámetros o limitantes de tecnologías actuales.

Palabras clave: 5G, Release 16, Nyusim, mmWave, acceso múltiple, codificación de canal.

2.1 ASTRACT

This research is developed around the fifth generation mobile communications, as the network infrastructure evolves, it is also expected an increase in the capabilities offered to users. These characteristics fall especially on the development of the physical layer of 5G NR networks, which is developed through the different technologies that are applied in the radio interface, therefore, the analysis of each of the technologies and basic fundamentals are developed over three chapters.

The first chapter reviews the theoretical foundations of the evolution of the technologies implemented from the first to the fourth generation, together with the basic architecture for the implementation of 5G. The second chapter starts with the development of the methodology focused on millimeter waves (mmWave) where, by means of the representation in the NYUSIM software, the main data of the channel model such as path losses and received powers are extracted from the point of view of different scenarios (UMi, UMa, RMa and InH). Finally, the third chapter develops the basics of the technologies applied in the radio interface, including waveforms, modulation, coding and multiple access techniques, together with the antenna system required for 5G deployment.

The results using NYUSIM software comprise the mmWave behavior, where the losses will be proportional to the distance of the user equipment and according to the human blocking model. In terms of received power, it remains in an optimal range, characteristic for 5G.

In the technologies applied at the interface, OFDMA remains the favorite multiple access technique; however, the development of NOMA is emerging as a good candidate, as is GFDM as a waveform technique, since it mainly overcomes the limitations of FBMC or UFMC. Regarding modulation schemes, although the recommended scheme is 256 QAM, the possibility of 1024 QAM creates a great expectation. In the same way, polar codes and LDPC as techniques to correct errors that are produced in the information channel, this within the coding processes developed for 5G.

The reports and technical specifications of 3GPP Release 16 are highlighted, the recommendations generated involve the technologies analyzed to comply with the main key performance indicators of 5G. Additionally, Cognitive Radio is analyzed as one of the emerging technologies to improve parameters or limitations of current technologies.

Keywords: 5G, Release 16, Nyusim, mmWave, multiple access, channel coding.

3. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en el ámbito de redes de comunicaciones móviles se han desplegado diferentes generaciones, cada una establecida con características esenciales y específicas según su periodo de desarrollo. Se manifiesta una clara evolución iniciando desde lo que se conoce como una primera generación, hacia los esfuerzos generados por la industria para el despliegue y desarrollo de la actual quinta generación (5G) cuyo propósito es optimizar las diferentes exigencias del usuario. Con ello, a nivel general, la quinta generación busca una cobertura a nivel mundial, que permita una comunicación predominante en todo sentido. Si bien es cierto, esta tecnología ya ha sido lanzada comercialmente en alrededor de 58 países de todo el mundo y asimismo en el resto de países se encuentran en fase de preparación para su incorporación, representando un avance importante en las telecomunicaciones.

Una parte fundamental dentro de un sistema de comunicaciones móviles se ve reflejada en la interfaz radio (aire), la misma que por medio de todo un conjunto de características de la red permitirá transmitir toda la información entre la estación base y los equipos de usuario. Todo el funcionamiento de una red se puede resumir en tres niveles específicos: nivel físico, nivel enlace de datos y nivel de red. Al poner un mayor enfoque en el proceso de transmisión de datos, se desarrolla especialmente un estudio sobre todas las tecnologías que se involucran específicamente en el nivel físico.

Como requisito inicial y clave para el desarrollo de 5G, se encuentra uno de los recursos naturales protagonista para todas las comunicaciones inalámbricas, de esta forma, el espectro radioeléctrico traduce todas aquellas bandas de frecuencia superiores e indispensable para que se desarrollen los diferentes servicios de comunicación que se procura ofrecer.

En general, una vez contando con el rango de frecuencias necesarias, todo el esquema de comunicación de 5G precisa un estudio puntualizando la propagación por la interfaz aire. Dentro del sistema de comunicación, la interfaz representa un elemento sobresaliente en la transmisión y recepción de información, esto precisamente para habilitar mejoras referentes al alcance y prestaciones que desea incorporar la generación.

Con el transcurso del tiempo, la demanda de usuarios llega a incrementarse en un porcentaje superior, por ende, 5G debe reflejar mejores técnicas de acceso múltiple. Como técnicas ya desarrolladas e implementadas en base a métodos de multiplexación tradicionales, puede encontrarse la de tipo ortogonal OFDMA. Sin embargo, diversas investigaciones llegan hacia tecnologías cuyo proceso es no ortogonal las cuales, para un futuro se pueden perfeccionar y presentarse también como candidatas, como es el caso de NOMA. Se tiene como principal fundamento, la mejora de la transferencia de datos y la obtención de mayores capacidades, esto de forma conjunta a los procesos de modulación y codificación.

Para el establecimiento y desarrollo de todo un proceso de comunicación es indispensable contar con los elementos o dispositivos inteligentes que permitan enviar y recibir aquellas señales de información, siendo Massive MIMO una de las tecnologías encargada de poder multiplicar la conectividad a un número mayor de dispositivos de usuario, compensando al mismo tiempo la demanda creciente que se presenta en 5G NR.

Generalmente al hablar de una quinta generación no se refiere únicamente a términos de telefonía, sino también a una serie de procesos o escenarios como; movilidad inteligente, salud, educación, industrias y del medio en general, de manera que se fortalece todo un entorno tecnológico, por lo tanto, sin importar el tipo de servicio que se esté utilizando, la experiencia del usuario final mejora significativamente en todos los sentidos al utilizar este tipo de redes. En base a lo planteado se definen los siguientes objetivos:

- Desarrollar los conceptos principales sobre la evolución y estructura básica de las comunicaciones móviles de 5G.
- Analizar el uso de las ondas milimétricas, como alternativa a la saturación del espectro radioeléctrico; en la interfaz aire de las comunicaciones móviles de 5G.
- Analizar las técnicas de acceso múltiple y MIMO, con los principales métodos de codificación y modulación necesarios en 5G para alcanzar las tasas de transmisión requeridas por los usuarios.
- Evaluar la radio cognitiva como una tecnología emergente que permita una distribución dinámica y eficiente del espectro radioeléctrico disponible.
- Evaluar el impacto que tendrían las tecnologías estudiadas para la interfase de radio en el cumplimiento de los KPis planteados en 5G.

CAPÍTULO 1

4. MARCO TEÓRICO

4.1 Evolución de las Comunicaciones Móviles

La manera de comunicarse ha ido evolucionando de forma exponencial; en un inicio con medios de comunicación como la imprenta, telégrafo, teléfono, radio, televisor, la aparición del internet hasta con lo que hoy en día se conoce como teléfono móvil y con él, el desarrollo de numerosas aplicaciones que en la actualidad son indispensables. La evolución de cada una de las formas de comunicación móvil posee características esenciales dependiendo las tecnologías que fueron implementadas, dando sus orígenes en la denominada Primera Generación (1G) hasta la actual etapa de implementación y desarrollo de Quinta Generación (5G), presentando un importante crecimiento en cuestión tecnológica.

Como conceptos iniciales sobre telefonía celular se empiezan a desarrollar a partir de 1947, en base a distintas pruebas desarrolladas en los laboratorios Bell perteneciente a la empresa AT&T (*American Telephone & Telegraph*) en Estados Unidos. Teniendo como referencia las comunicaciones que inicialmente se desarrollaban en automóviles, se estudia la manera de implementar teléfonos móviles que presten el servicio en áreas más pequeñas y poner en marcha características más precisas como la reutilización de frecuencias, un conjunto importante que daría paso más adelante al incremento de tráfico. (Gámez et al., 2005)

Martin Cooper (Barreno et al., 2016) considerado como pionero en el desarrollo de telefonía celular, para 1970 y 1973 construye un primer radioteléfono con características bien definidas, para ese entonces el primer modelo desarrollado presentaba un tamaño y peso considerable. Posteriormente en los mismos laboratorios Bell, en 1977 se continúa con el desarrollo de prototipos para obtener mejoras en el sistema de telefonía celular, obteniendo un año después en la ciudad de Chicago, pruebas públicas más eficientes realizado con más de 2000 abonados celulares experimentales.

4.1.1 Primera Generación (1G)

Como primer paso en el desarrollo de comunicaciones móviles se encuentra 1G la cual inicia a partir de 1979, una generación completamente analógica en donde los servicios

de comunicación se desarrollaban con el único objetivo de enviar y recibir tráfico de voz, al ser analógica las señales podían ser fácilmente alteradas por fuentes externas, por lo tanto, proporcionaban una seguridad y calidad de voz baja.

Como uno de los mecanismos iniciales para el acceso al medio se encontraba FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), y al desarrollarse por primera vez en 1G, el método operaba con un ancho de banda limitado de 20 MHz. Por su parte, utilizaba el espectro disponible de manera ineficiente, generando obstáculos en la ejecución de las llamadas, dando como resultado una calidad baja en la transmisión. (Zuñiga, 2013)

Durante el desarrollo de 1G se reflejan diferentes sistemas, cada uno de ellos se diferencia principalmente por las regiones en las que se extienden y bandas de frecuencia de trabajo, entre las cuales se detallan a continuación:

4.1.1.1 AMPS (Advanced Mobile Phone System)

Como uno de los sistemas más predominantes se presenta AMPS o Sistema Telefónico Móvil Avanzado. AMPS pone en consideración propuestas iniciales basadas en el desarrollo de un sistema que permita el uso eficiente del espectro, así como también el aumento en la disponibilidad de cobertura. (Fernández et al., 1997)

A pesar de ser introducida por primera vez en Estados Unidos, AMPS se presenta ampliamente para el resto de regiones de América, Australia y África con celdas de 10 a 20 km de diámetro, cada una de las celdas utilizaba propiamente un conjunto de frecuencias las cuales eran enviadas a las redes contiguas, lo que conlleva a que las señales viajaban hacia distintos caminos, disminuyendo las interferencias en la comunicación. (Sánchez & Toapanta, 2010)

Para el desempeño y manejo del tráfico de voz el sistema emplea una modulación en frecuencia (FM) por medio de canales de 30KHz, asignando rangos de frecuencia comprendidos entre 869 - 894 MHz para la transmisión desde la estación base a la estación móvil (*Downlink*) y frecuencias de 824 - 849 MHz para la transmisión de la estación móvil a la estación base (*Uplink*). (Sharma, 2013)

4.1.1.2 NMT (Nordic Mobile Telephone)

Como otra de los sistemas empleados es el de Telefonía Móvil Nórdica. Basado en la técnica FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), el espectro bajo el cual trabaja es de 450 MHz y de 900 MHz, a partir de estas frecuencias, se puede distinguir dos versiones: NMT-450 y NMT-900.

En lo referente a la evolución del sistema, NMT-450 es la primera en desarrollarse para entornos nórdicos llevada a cabo por empresas como Nokia y Ericsson, más adelante, con el objetivo de llegar a zonas de mayor extensión y ofrecer mayor capacidad se perfecciona la versión dando paso a NMT-900, sin necesidad de realizar grandes inversiones (Robledo, 2007).

En NMT se adiciona la transmisión y recepción de señales al mismo tiempo por lo que se considera como un sistema full-dúplex, al presentar un mayor número de canales posibilita que se realicen mayor cantidad de llamadas. Además, se destaca como el primer sistema que añade características como el envío y recepción de mensajes de texto, al que se denominó como DMS (*Data and Messaging Service*) un servicio similar al SMS (*Short Message Service*), sin embargo, DMS no tuvo gran acogida, implementándose únicamente en países como Rusia y Polonia. (Sánchez & Toapanta, 2010, p 14)

4.1.1.3 TACS (Total Access Communication System)

En base a las características que se desarrollaron en AMPS, el Reino Unido implementa un nuevo sistema de comunicación de acceso total TACS, particularmente para acoplarlos a los requisitos europeos.

La operación del sistema no se alejaba de los sistemas anteriores, asignando la banda de 900 MHz, empleaba una modulación en frecuencia, con un ancho de banda por canal de 25 KHz, los rangos de frecuencia para Downlink eran de 935 a 960 MHz y frecuencias de 890 a 915 MHz para Uplink.

Para la implementación de sistemas posteriores, TACS divide la banda de frecuencia en sub-bandas de 905-915 MHz y de 950-960 MHz. Asimismo, se agrega al sistema los rangos 872-890 MHz y 917-935 MHz para dar lugar a la extensión de TACS original conocido como E-TACS y mejorar la capacidad del sistema. (Lara, 2006, p 86)

Es importante puntualizar que el sistema TACS define únicamente la interfaz radio, es decir, el proceso entre estación base y su estación móvil, características adicionales como el traspaso de una estación base a otra (handover), roaming y comunicación entre el resto de elementos se encuentran a opinión del fabricante. (Zhunio, 2008)

Si bien es cierto, los sistemas encontrados en 1G eran sencillos por el hecho de ser analógicos, sin embargo, constituyen un punto de inicio importante como generación pionera, permitiendo a los usuarios por primera vez llevar un teléfono de manera inalámbrica y posibilitar el desarrollo de las posteriores generaciones de comunicaciones móviles.

4.1.2 Segunda Generación (2G)

La introducción hacia una nueva generación se desarrolla a inicios de 1990 debido a la gran demanda que presentó 1G. En 2G se marca una de las principales diferencias entre generación, el cambio de telefonía analógica hacia la digital, permitiendo la primera aparición de servicios como datos, fax y SMS.

Al presentar una demanda superior, 2G se desarrolla con el fin de ofrecer capacidades superiores, empleando la división del canal de frecuencia para que este pueda ser empleado por varios usuarios, incluyendo técnicas de acceso múltiple que se detallan a continuación:

- **TDMA (Time Division Multiple Access)**

Como una de las técnicas más utilizadas, permite al usuario transmitir una señal en diferentes intervalos de tiempo como se ilustra en la figura 1 (a), subdividiendo los canales para proporcionar al sistema de 3 a 6 veces más capacidad.

- **CDMA (Code Division Multiple Access)**

En la figura 1 (b), el espectro de frecuencia se comparte a todos los usuarios en un mismo tiempo, entregando a cada canal el total del volumen disponible de manera que pueda existir una transmisión simultánea de varias comunicaciones, cada una con un código diferente.

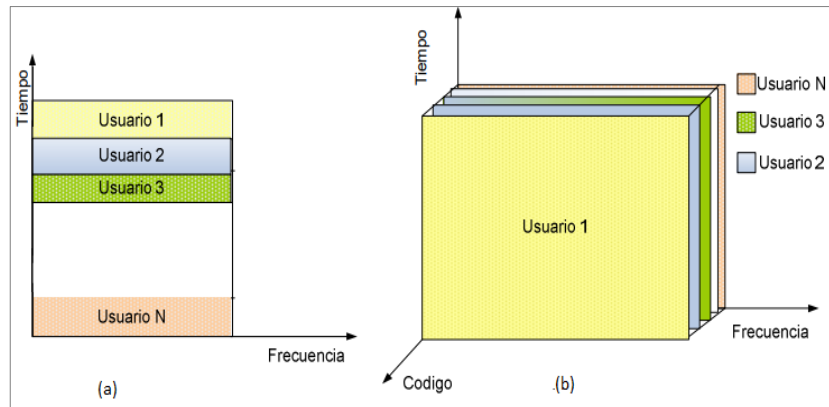


Figura 1. Técnicas de acceso múltiple

a) TDMA Acceso múltiple por división de tiempo b) CDMA Acceso múltiple por división de código

Fuente: (Espín & Maldonado, 2008)

En base a las técnicas mencionadas, se desarrollan las tecnologías de segunda generación, entre ellas se encuentran:

4.1.2.1 D-AMPS (Digital-AMPS)

Basado en el sistema implementado en 1G, D-AMPS se desarrolla como la versión digital de AMPS, conocido también como el estándar IS-136 (*Interim Standard 136*), centrado en el uso de TDMA. Al utilizar esta técnica es equivalente a utilizar tres canales más en comparación con AMPS, triplicando la cantidad de llamadas simultáneas para un canal, sin embargo, al tener un ancho de banda únicamente de 30KHz, el sistema es más sensible a las interferencias. D-AMPS además de permitir servicios de voz, se empiezan a añadir servicios de datos con velocidades aproximadas de hasta 16,2 Kbps para cada usuario. (Zhunio, 2008)

4.1.2.2 GSM (Global System Mobile)

Como un nuevo sistema, GSM es desarrollado como estándar para las regiones de Europa, sin embargo, la acogida de la mismo permitió que se extendiera al resto del mundo siendo una de las más predominantes y exitosas para esta generación.

El trabajo de GSM lo realiza dentro de diferentes bandas de frecuencia, de este modo, proporciona versiones como: GSM-850, GSM-900, GSM-1800 y GSM-1900, cada una con sus respectivas bandas de transmisión para Downlink y Uplink, presentadas en la tabla 1.

Tabla 1. Rangos de frecuencia GSM

| Versiones | Downlink (MHz) | Uplink (MHz) |
|---------------------|----------------|--------------|
| GSM-850 | 869 - 894 | 824 - 849 |
| GSM-900 (Primario) | 935 - 960 | 890 - 915 |
| GSM-900 (Extendido) | 925 - 960 | 880 - 915 |
| GSM-1800 | 1805 - 1880 | 1710 - 1785 |
| GSM-1900 | 1930 - 1990 | 1850 - 1910 |

Fuente: (Espín & Maldonado, 2008)

Al igual que el sistema anterior (D-AMPS) emplea TDMA, con anchos de banda de 25 MHz dividiéndose en canales de frecuencia de 200 KHz. (Tapia, 2020) La trama se encuentra constituida por 8 slots o ranuras de tiempo, obteniendo velocidades totales de 270,833 Kbps y de 33,854 Kbps por usuario. (Espín & Maldonado, 2008)

GSM proporciona facilidad de establecer conversaciones más completas, es decir, hablar y escuchar al mismo tiempo, así como el servicio de mensajes cortos, hoy conocidos como SMS, para enviar y recibir para mensajes alfanuméricos, uno de los servicios más empleados después de la telefonía.

4.1.2.3 CDMA ONE (Code Division Multiple Access One)

Conocido también como estándar IS-95 (*Interim Standard 95*), es de los primeros sistemas que emplean el método de acceso CDMA desarrollado por Qualcomm, empresa de equipos de telecomunicaciones estadounidense.

CdmaOne se caracteriza por la operación en las mismas bandas de frecuencias de AMPS, posibilitando un tráfico de datos de 4,8 y de 14,4 Kbps. En función de la técnica de espectro extendido, permite que múltiples usuarios tengan acceso a la misma banda de frecuencia durante el mismo tiempo, por consiguiente, los usuarios se encuentran separados por canales de código, y no por canales de frecuencia (Díaz, 2006). Adicionalmente de los servicios de voz y datos (SMS), el sistema es capaz de ofrecer una calidad de sonido de 8 a 10 veces más.

4.1.2.4 PDC (Personal Digital Cellular)

PDC se presenta como un estándar de comunicación móvil digital para Japón con diversas similitudes con el sistema D-AMPS. PDC emplea TDMA y designa una tasa de

transmisión de bits más baja, ofreciendo 42 Kbps frente a 270,83 Kbps que utiliza GSM, permitiendo ser un sistema como mejor utilización del espectro y menores costos. (Pandya, 1999)

Tabla 2. Rangos de frecuencia PDC

| PDC | |
|----------------|--------------|
| Downlink (MHz) | Uplink (MHz) |
| 810 - 826 | 940 - 956 |
| 1477 - 1489 | 1429 - 1441 |
| 1501 - 1513 | 1453 - 1465 |

Fuente: (Pandya, 1999)

Las comunicaciones móviles continuaron su desarrollo, evidenciando principalmente sistemas que ofrecen capacidades superiores, por tal razón, una manera de denominar a los sistemas que se detallan a continuación fue 2.5G, cabe recalcar que esta no es considerada como una nueva generación, sino una extensión de los principales sistemas analizados anteriormente para 2G. A partir de los sistemas siguientes se distingue una importante característica, puesto que, se da inicio al empleo de conmutación de paquetes, que a diferencia de 1G y de los sistemas iniciales de 2G son redes únicamente basados en conmutación de circuitos.

4.1.2.5 GPRS (General Packet Radio System)

Uno de los sistemas iniciales que implementaron la conmutación de paquetes es GPRS, esta característica es agregada al sistema ya existente GSM. Al complementar los servicios que ya otorgaba GSM se mejora el ancho de banda, especialmente en la transmisión y recepción de pequeñas ráfagas de datos y el acceso a internet. (Tapia, 2020)

Al adicionar protocolos de conmutación de paquetes, hace que los procedimientos para transmitir datos sean más adecuados, ofreciendo un menor tiempo de configuración para las conexiones ISP (*Internet Service Provider*) y la posibilidad de cobrar al usuario dependiendo el consumo realizado, mas no, por tiempo de conexión. En lo referente a velocidades de datos, dispone de valores teóricos entre 56 a 115 Kbps, permitiendo más continuidad a la hora de establecer conexiones a internet. (Gawas, 2015)

4.1.2.6 EDGE (Enhanced Data rates for GSM Evolution)

EDGE tiene como fin el mejoramiento de las redes GPRS y GSM, alcanzando velocidades teóricas de 474 Kbps. Está basado en TDMA agregando procesos adicionales como esquemas de modulación y codificación 8-PSK (*Octagonal Phase Shift Keying*). EDGE alcanza un mayor nivel de eficiencia en el uso de la interfaz aérea, que es uno de los problemas más comunes e importantes a considerar en las redes móviles, y así, aumentar la transferencia de datos y utilización de toda la red. (Dudás, 2004) Además de presentar mayores velocidades de datos, representa un paso característico en la evolución de las redes 2G hacia una siguiente generación.

4.1.3 Tercera generación (3G)

Para una tercera generación, como propósito se mantiene ofrecer servicios de datos de alta velocidad, por ello, la Unión Internacional de Telecomunicaciones-Sector de Radiocomunicaciones (*UIT-R*) emprende el conjunto de recomendaciones para las telecomunicaciones móviles en el año 2000 (IMT-2000). (Karim & Sarraf, 2002) Además, se presenta el “Proyecto Asociación de Tercera Generación” (3GPP) para hacer cumplir las especificaciones mediante la definición de un sistema móvil.

Principalmente se presenta un incremento en la eficiencia y capacidad del espectro radioeléctrico, con interfaces y gestión de recursos más flexibles. (Tapia, 2020, p 29). Entre los estándares desarrollados en 3G se encuentran:

4.1.3.1 CDMA2000

Con la finalidad de mejorar los servicios presentados en cdmaOne, la creciente demanda en el envío de datos y la migración a la tecnología de 3G, surge cdma2000 conocida también como IS-95B. Tecnología de radiotransmisión que mantiene los parámetros y requerimientos establecidos por la UIT.

Inicialmente 3GPP es propuesto como organización global de tecnologías de 3G, sin embargo, más adelante se orientó hacia las especificaciones basadas en GSM, por ello, en la búsqueda de desarrollar un estándar natural para IS-95, que mejore específicamente la tecnología CDMA, se propone la creación de 3GPP2 (*Proyecto Asociación de tercera Generación 2*).

La principal ventaja de cdma2000 frente al resto de estándares IMT2000, es la fácil migración desde 2G hacia 3G (cdmaOne hacia cdma2000). Las velocidades de datos pueden variar entre 9,6Kbps a 2Mbps (Karim & Sarraf, 2002), admitiendo diferentes tipos de tráfico: Voz tradicional, voz sobre IP (VoIP), servicios como paquetes de datos, banda ancha móvil, SMS.

4.1.3.2 UMTS (Universal Mobile Telecommunications System)

UMTS, uno de los siguientes niveles de estándares en 3G, llega con un enfoque europeo, en donde la principal tecnología de radio que implementa fue WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) o acceso múltiple por división de código de banda ancha. Adicionalmente cuenta con métodos de duplexación por división de tiempo y frecuencia (TDD y FDD respectivamente), técnicas que fueron seleccionadas por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones - ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) (Kukushkin, 2018). Entre las principales características presentadas por UMTS se encuentran:

- Velocidades pico de 2Mbps y velocidades promedio de 220 a 320 kbps. (Vaca, 2005)
- Facturación de los servicios más detallados dependiendo categorías o tipo de servicio que el usuario transmita (voz, datos o información en tiempo real).
- Ancho de banda disponible para transmisiones según tipo de comunicación móvil empleado.

4.1.3.3 HSPA (High Speed Packet Access)

HSPA o el acceso a paquetes de alta velocidad, fue una de las tecnologías encargadas de optimizar UMTS/WCDMA en su desarrollo engloban HSDPA y HSUPA, quienes contribuyen que el funcionamiento sea el esperado.

- **HSDPA:** Representa el acceso a paquetes de enlace descendente, se incluye en las especificaciones del 3GPP, Release 5 publicado en 2002, mejora la capacidad de máxima transferencia de información incrementando tasas desde 2Mbps hasta 14.4 Mbps, emplea modulaciones de 16 QAM y QPSK. (Tapia, 2020)
- **HSUPA:** Acceso a paquetes de enlace ascendente, perteneciente al Release 6 del 3GPP y publicado en 2004, aumenta la velocidad del enlace ascendente hasta 5.76

Mbps y reduce la latencia de las conexiones, emplea modulación QPSK. (Becvar et al., n.d.)

4.1.3.4 HSPA+ (Evolved High Speed Packet Access)

Tecnología que representa la evolución y mejoramiento de HSPA, se encuentra especificado en el Release 7 del 3GPP. Provee velocidades de 14 hasta 42 Mbps de bajada (HDSPA+) y hasta 11Mbps de subida (HSUPA+), adicionalmente se incluye la técnica multi-antena (MIMO) en la que el emisor y receptor pueden emplear varias antenas, emplea modulación de 64-QAM para el enlace descendente y 16 QAM corresponde para enlace ascendente. (Becvar et al., n.d.)

4.1.4 Cuarta generación (4G)

La rápida evolución de las comunicaciones móviles conlleva a la cuarta generación, en esencia estas redes inalámbricas proporcionan un mejor soporte de banda ancha móvil, y con ello, el desarrollo de nuevas técnicas para el aprovechamiento eficiente el espectro radioeléctrico.

En esta generación la UIT como organismo encargado de la reglamentación y normalización integra: LTE (*Long Term Evolution*) y su versión evolucionada LTE-A (*LTE-Advanced*), como los nuevos sistemas desarrollados por 3GG.

4.1.4.1 LTE (Long Term Evolution)

LTE, se introduce a partir del Release 8 y 9 del 3GPP, como parte de la evolución de las redes HSPA. A diferencia de la técnica WCDMA que era utilizada en UMTS. LTE emplea la técnica OFDMA (Acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales) para el enlace descendente y SC-FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia de portadora única) para el enlace ascendente (Becvar et al., n.d.).

El desarrollo de LTE se fundamenta en una red basada completamente en el protocolo de internet (IP) y de una arquitectura SAE (*System Architecture Evolution*) definiendo una evolución en el núcleo de la red que utilizaba anteriormente GPRS y por ende presentando ventajas en términos de latencia, throughput y capacidad de la red. (Inga, 2010)

En términos de ancho de banda, LTE ofrece un rango de 1,4MHz a 20MHz, complementando en su interfaz aire técnicas FDD y TDD. Las bandas de frecuencia estándares que incorpora son: 700MHz, 850MHz, 1700MHz, 1800MHz, 1900MHz, 2100MHz, 2600MHz. (Jaramillo, n.d.)

- **Arquitectura de LTE**

Se representa principalmente con 3 elementos:

- Red troncal (CN): EPC
- Red de Acceso (AN): EUTRAN
- Equipo de Usuario (UE)

El trabajo en conjunto de la red de acceso y la red de troncal permiten realizar la transferencia de información basados en IP entre equipo de usuario, redes de paquetes externas e Internet. (Calle & Jiménez, n.d.)

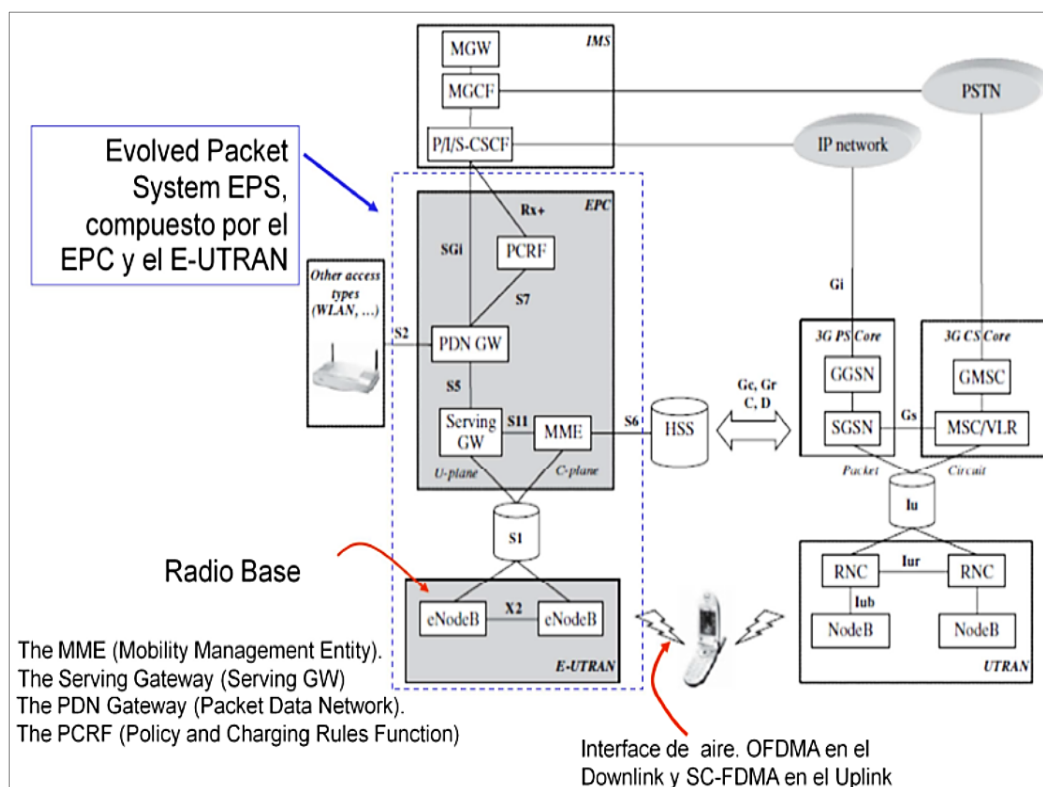


Figura 2. Arquitectura general LTE

Fuente: (Ramón et al., 2010)

En base a la fig. 2 se describe cada uno de los elementos que conforman la arquitectura LTE:

✓ **Red troncal - EPC (Evolved Packet Core)**

Como red troncal o núcleo de red, se encarga de realizar funciones de control de acceso a la red celular, autenticación de usuarios, interconexión con otras redes, además del control de servicios de usuario final, responsabilidades que los realiza mediante entidades:

○ **MME (Mobility Management Entity)**

La entidad se encarga de realizar procedimientos de señalización, es decir, gestionar el acceso de cada terminal móvil mediante la red E-UTRAN (acceso), para ello, a cada usuario se le asigna un MME para asegurar funciones de autenticación y seguridad, para ello, cada vez que un UE se registra por primera vez a la red, se debe conocer la identidad permanente del mismo para asegurar que sea el correcto, para ello, mediante el MME se procede a enviar una solicitud de autenticación al UE para conocer las redes previas que fueron visitadas, de esta manera se evitará la alteración por parte de terceros y proteger la comunicación.

Otra de las funciones que ofrece MME es la gestión de movilidad, para ello, una vez que un equipo de usuario hace su registro en la red por primera vez, se crea una entrada para señalar la ubicación del UE al HSS, de este modo se realiza un seguimiento de todos los UE que se encuentran en el área de servicio, para luego solicitar los recursos que sean necesarios para que sean instalados en el eNB.

○ **SGW (Serving Gateway)**

Representa el servicio de puerta de enlace, se responsabiliza del intercambio del tráfico de usuario entre el núcleo de red y la red de acceso, de esta manera los paquetes IP del usuario se transfieren mediante el SGW, asegurando la movilidad de los portadores de datos en dos escenarios; cuando el UE se mueve entre el eNB o cuando se encuentra en estado de reposo.

○ **PDN-GW (Packet Data Network Gateway)**

Se encarga del intercambio de tráfico con redes externas, cumpliendo el papel de router de borde esto entre el núcleo de la red y las redes de paquetes de datos externas. Otra de sus funciones es la asignación de las direcciones IP mediante DHCP (*Dynamic Host*

Configuration Protocol) a los equipos, siendo esto necesario para la comunicación con otros hosts IP en redes externas. La asignación de dirección IP, se lleva a cabo cuando el UE desea la conexión a la red de datos por paquetes PDN (Internet, redes privadas empresariales) siempre y cuando esté conectado a la red LTE.

○ **PCRF (*Policy Charging and Rules Function*)**

Encargada de la gestión de políticas y toma de decisiones en términos de calidad de servicio (QoS), proporciona control en el flujo de información que es procedente del PDN-GW y SGW.

○ **HSS (*Home Subscriber Server*)**

Servidor de base de datos central de usuarios del sistema EPS, mantiene todos los datos de suscripción de los usuarios de la red. Especialmente el servidor almacena información del usuario como su ubicación, identificadores del servicio, seguridad y cifrado.

✓ ***Red de Acceso – E UTRAN***

El elemento sobresaliente de la red de acceso es la estación base E-UTRAN Node B conocida mayormente como Evolved NodeB abreviado como eNodeB o eNB, representa el componente central para dar conectividad entre la red troncal y el UE. Mediante las interfaces que conforma E-UTRAN: Uu, X2 y S1, la estación de radio base se comunica hacia el resto de elementos del sistema.

Descripción de interfaces:

- **Interfaz E-UTRAN Uu:** Permite la transferencia de datos, información entre la estación base y el UE.
- **Interfaz S1:** Ofrece principalmente la conexión entre la estación base y la red troncal, esta interfaz puede ser de tipo “U” y “MME”. La interfaz S1-U forma parte del soporte del plano de usuario, encargada del envío de tráfico, mientras la interfaz S1-MME se encarga del plano de control, la cual se basa en funciones y procedimientos para la gestión de operación. (Ramón et al., 2010)
- **Interfaz X2:** Establece la comunicación (desplaza el tráfico) entre dos estaciones base, mejorando la gestión de recursos de radio, este proceso también es conocido como handover.

De esta manera, eNB se responsabiliza de la gestión de recursos de radio (RRM, *Radio Resource Management*), de decir, del control de las funciones y uso de la interfaz de radio, en donde se incluye la asignación de recursos, priorización del tráfico dependiendo la calidad del servicio y monitoreo periódico de los recursos.

Las bandas de frecuencia operativas E-UTRA se encuentran definidas en la tabla 3 de acuerdo al TS 36.101 del 3GPP.

Tabla 3. *Bandas operativas E-UTRA*

| Banda operativa E-UTRA | Banda operativa Enlace ascendente | Banda operativa Enlace descendente | Modo Dúplex |
|-----------------------------------|--|---|------------------------|
| 1 | 1920 – 1980 | 2110 – 2170 | FDD |
| 2 | 1850 – 1910 | 1930 – 1990 | FDD |
| 3 | 1710 – 1785 | 1805 – 1880 | FDD |
| 4 | 1710 – 1755 | 2110 – 2155 | FDD |
| 5 | 824 – 849 | 869 – 894 | FDD |
| 6 ¹ | 830 – 840 | 875 – 885 | FDD |
| 7 | 2500 – 2570 | 2620 – 2690 | FDD |
| 8 | 880 – 915 | 925 – 960 | FDD |
| 9 | 1749,9 – 1784,9 | 1844,9 – 1879,9 | FDD |
| 10 | 1710 – 1770 | 2110 – 2170 | FDD |
| 11 | 1427,9 – 1447,9 | 1475,9 – 1495,9 | FDD |
| 12 | 699 – 716 | 729 – 746 | FDD |
| 13 | 777 – 787 | 746 – 756 | FDD |
| 14 | 788 – 798 | 758 – 768 | FDD |
| 15 | Reservado | Reservado | FDD |
| 16 | Reservado | Reservado | FDD |
| 17 | 704 – 716 | 734 – 746 | FDD |
| 18 | 815 – 830 | 860 – 875 | FDD |
| 19 | 830 – 845 | 875 – 890 | FDD |
| 20 | 832 – 862 | 791 – 821 | FDD |
| 21 | 1447,9 – 1462,9 | 1495,9 – 1510,9 | FDD |
| 22 | 3410 – 3490 | 3510 – 3590 | FDD |
| 23 ¹ | 2000 – 2020 | 2180 – 2200 | FDD |
| 24 | 1626,5 – 1660,5 | 1525 – 1559 | FDD |
| 25 | 1850 – 1915 | 1930 – 1995 | FDD |

| | | | |
|-----|---------------|---------------|------------------|
| 26 | 814 – 849 | 859 – 894 | FDD |
| 27 | 807 – 824 | 852 – 869 | FDD |
| 28 | 703 – 748 | 758 – 803 | FDD |
| 29 | N/A* | 717 – 728 | FDD |
| 30 | 2305 – 2315 | 2350 – 2360 | FDD |
| 31 | 452,5 – 457,5 | 462,5 – 467,5 | FDD |
| 32 | N/A* | 1462 – 1496 | FDD |
| 33 | 1900 – 1920 | 1900 – 1920 | TDD |
| 34 | 2010 – 2025 | 2010 – 2025 | TDD |
| 35 | 1850 – 1910 | 1850 – 1910 | TDD |
| 36 | 1930 – 1990 | 1930 – 1990 | TDD |
| 37 | 1910 – 1930 | 1910 – 1930 | TDD |
| 38 | 2570 – 2620 | 2570 – 2620 | TDD |
| 39 | 1880 – 1920 | 1880 – 1920 | TDD |
| 40 | 2300 – 2400 | 2300 – 2400 | TDD |
| 41 | 2496 – 2690 | 2496 – 2690 | TDD |
| 42 | 3400 – 3600 | 3400 – 3600 | TDD |
| 43 | 3600 – 3800 | 3600 – 3800 | TDD |
| 44 | 703 – 803 | 703 – 803 | TDD |
| 45 | 1447 – 1467 | 1447 – 1467 | TDD |
| 46 | 5150 – 5925 | 5150 – 5925 | TDD ² |
| 47 | 5855 – 5925 | 5855 – 5925 | TDD ³ |
| 48 | 3550 – 3700 | 3550 – 3700 | TDD |
| 49 | 3550 – 3700 | 3550 – 3700 | TDD |
| 50 | 1432 – 1517 | 1432 – 1517 | TDD |
| ... | | | |

¹ No aplicable

² Banda sin licencia

³ Banda utilizada para comunicación V2X

* Valor no disponible.

Fuente: (3GPP, 2021)

✓ *Equipos de Usuario*

Para que un usuario pueda acceder a los servicios de una red móvil mediante la interfaz radio requiere de equipos de usuario. Básicamente se trata de dispositivos de mano así como un teléfono inteligente o una tarjeta de datos concretamente, las funciones

desarrolladas anteriormente en un eNB se envían hacia el terminal móvil, y este a su vez está conformado por dos elementos: Módulo de identificación del usuario (SIM/USIM) y Equipo móvil (ME) en este último se asocian las entidades de terminación móvil (MT) y equipo terminal (TE) (Ramón et al., 2010), como se describe en la figura 3.

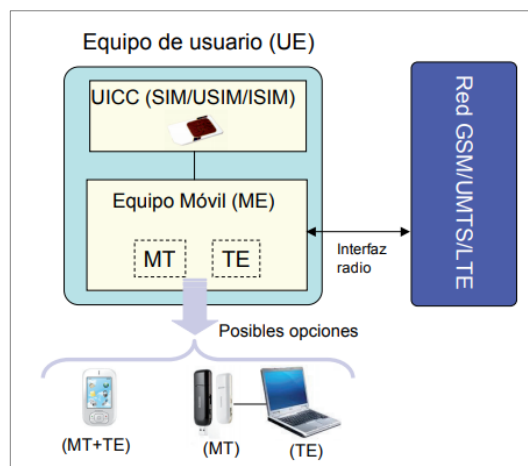


Figura 3. Equipos de usuario
Fuente: (Ramón et al., 2010)

○ Categorías y capacidad de Equipos de Usuario

A partir de la primera aparición de LTE, definido en el Release 8, se presentan distintas categorías de equipos de usuarios con el fin de especificar el rendimiento que poseen las estaciones base y obtener una comunicación eficaz, es decir, mediante las categorías se puede definir y asegurar que el eNB establezca una correcta comunicación con el equipo de usuario u otro equipo.

En la evolución de las categorías de equipos de usuario para LTE se pueden definir 12 principales categorías, distribuidas en los Releases 8, 10 y 11. En la tabla 4 se detallan los valores de rendimiento aproximado para cada una de ellas.

Tabla 4. Categorías de equipos de usuario LTE

| Categoría | Máxima Capacidad UL(Mbps) | Máxima capacidad DL (Mbps) | MIMO | Release |
|-----------|---------------------------|----------------------------|-------|---------|
| 1 | ~5 | ~10 | 1 | 8 |
| 2 | ~25 | ~50 | 2 | |
| 3 | ~50 | ~100 | 2 | |
| 4 | ~50 | ~150 | 2 | |
| 5 | ~75 | ~300 | 4 | |
| 6 | ~50 | ~300 | 2 o 4 | 10 |
| 7 | ~100 | ~300 | 2 o 4 | |
| 8 | ~1500 | ~3000 | 8 | |

| | | | | |
|----|------|------|-------|----|
| 9 | ~50 | ~450 | 2 o 4 | |
| 10 | ~100 | ~450 | 2 o 4 | 11 |
| 11 | ~50 | ~600 | 2 o 4 | |
| 12 | ~100 | ~600 | 2 o 4 | |

Fuente: Elaboración propia, tomado de (3GPP, 2021)

- **Principios básicos LTE**

- ✓ ***Técnicas de Multiplexación***

Para el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas móviles actuales, OFDM (Multiplexación por división de frecuencia ortogonal) es uno de los métodos más populares para la transmisión de señales especialmente en 4G que será necesario en base a sus principales características para afrontar los futuros retos de 5G, al repartir el canal de frecuencia en diferentes sub canales paralelos facilita todo un proceso de recepción y como bien lo menciona en sus siglas, se introduce la ortogonalidad como una característica especial para la transmisión.

De forma general, el proceso que se lleva a cabo mediante la división de un canal, implica a la formación de sub canales (subportadoras) con un parámetro en particular, la ortogonalidad. Con ello, es probable presentar inconvenientes conocidos como ICI (*Intercarrier Interference*), al no poseer un ancho de banda total superior al que se ocupa individualmente para cada una de las subportadoras, conlleva a la interferencia entre subportadoras. De este modo, frente a las interferencias presentadas se da respuesta con la incorporación de la ortogonalidad, cumpliendo con el criterio:

$$\int_0^T \cos(\omega_i t) * \cos(\omega_j t) dt = 0 \quad i \neq j \quad (1)$$

Donde,

$T=1/T_u$ Representa la velocidad de transmisión que toma cada subportadora. (T_u , duración del símbolo).

Haciendo hincapié que las señales son independientes y diferentes ($i \neq j$). Al cumplir con las condiciones del criterio, se evitará que las señales que son moduladas no se traslapen entre sí, junto con un ancho de banda más eficiente de forma general en todo el sistema.

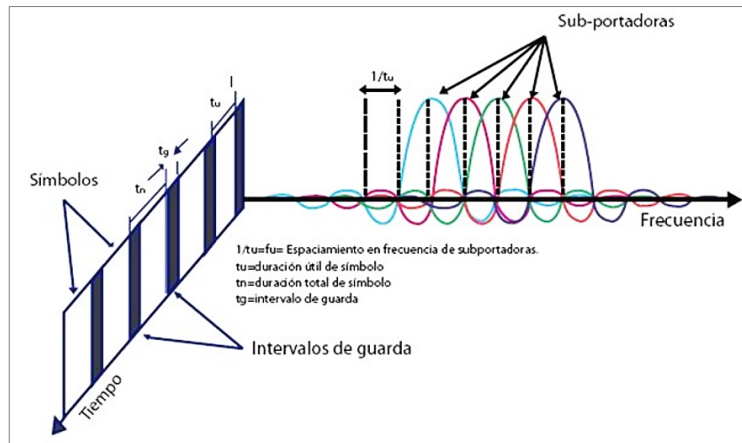


Figura 4. Subportadoras OFDM
Fuente: (Vargas et al., 2007)

En la figura 4 se puede visualizar la distribución de las señales que son multiplexadas en OFDM, en donde cada subportadora cumple con el parámetro de ortogonalidad, obteniendo la transmisión ordenada de cada una, de esta manera, mientras la amplitud de una subportadora sea máxima, las subportadoras restantes se encontrarán en cero, esto permite visualizar que no existen interferencias con las demás subportadoras.

Adicionalmente se encuentran los símbolos OFDM. Un conjunto que reúne toda la información que contienen las subportadoras, producido en el dominio digital, en donde pueden aplicarse modulaciones como BPSK y QAM. El flujo de datos se presenta de manera paralela (figura 5), siendo de tipo: de datos, piloto, no activas y bandas de guarda.

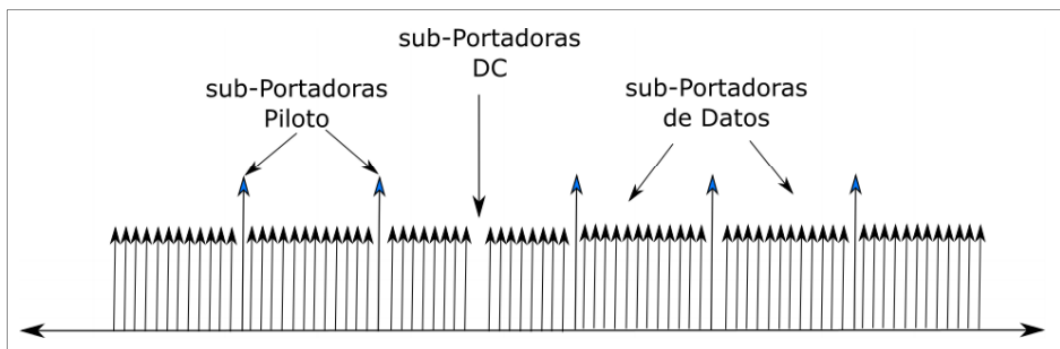


Figura 5. Distribución subportadoras OFDM
Fuente: (Vargas et al., 2007)

○ Bases de Prefijo cíclico

Al estar los símbolos conformados por la información de las subportadoras, también se presenta la interferencia entre símbolos (Intersymbol Interference) o abreviada únicamente como ISI, una característica adicional que se introduce como una degradación

en la transmisión, presentando interferencias en el proceso de ortogonalidad mencionado anteriormente. De esta manera, el prefijo cíclico (CP) se manifiesta como un parámetro para dar solución y minimizar la ISI.

La descripción del escenario en el que se pueden presentar las interferencias es sencilla. Se conoce que la información se encuentra en una secuencia de símbolos, que a su vez tiene diferentes maneras de llegar hacia su destino, en el trayecto hay la posibilidad de encontrar diferentes obstáculos (árboles, elevaciones, edificios, etc.), haciendo que las señales lleguen en distintos tiempos, por su parte, el receptor recibirá las réplicas de la señal que es transmitida. Se tiene como consecuencia que los símbolos tiendan a mezclarse unos con otros, obteniendo una comunicación no deseada.

En base al escenario, se puede definir formalmente al CP como un intervalo de tiempo para reducir la ISI, es decir, el objetivo del CP, se centra en aumentar el intervalo de tiempo entre cada símbolo (se adiciona antes o después del símbolo). El tiempo de separación que se añade tiene como fin conservar la periodicidad del símbolo y evitar que se mezclen los símbolos unos con otros, en la figura 6 se muestra la forma de transmisión la misma que está conformada por la parte útil y la información redundante que corresponde al CP.

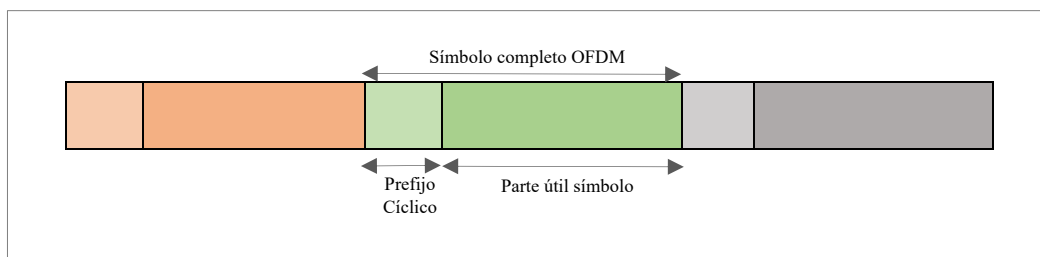


Figura 6. Prefijo cíclico OFDM
Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente es importante considerar que el objetivo para evitar la ISI se cumple siempre y cuando la duración del CP sea mayor a la duración del retardo de la señal que llega al receptor, de modo que, es fundamental la duración dentro de la transmisión, siendo esta dependiente del tipo de CP (normal: $4.7\mu\text{s}$ y extendido: $16.67\mu\text{s}$). El incremento del intervalo de tiempo disminuye la tasa de transmisión, ocasionando un desperdicio de la eficiencia espectral, siendo importante la optimización en la duración del CP.

✓ *Técnicas de Acceso Múltiple*

Como base en OFDM, se adopta un enfoque multiportadora para el acceso múltiple en LTE y de acuerdo a la elección del 3GPP, las técnicas para permitir a los usuarios intercambiar información por un mismo medio se centran en OFDMA y SC-FDMA, esquemas dentro del dominio de la frecuencia para aportar flexibilidad al sistema LTE.

OFDMA: Dedicada para el enlace descendente, como lo indica la figura 7, el acceso múltiple se lleva a cabo mediante la división del ancho de banda total en subportadoras, las mismas que se distribuyen indistintamente a los diferentes usuarios dependiendo el servicio o función que esté realizando. Con la asignación de más subportadoras se puede mejorar la calidad y velocidad de transmisión. (Calle & Jiménez, n.d.) Además, debido a su baja complejidad del receptor de banda base, las favorables características espectrales conjuntamente a la compatibilidad con tecnologías de receptor y antenas producen que sea la principal motivación de ser implementada como técnica en el enlace descendente.

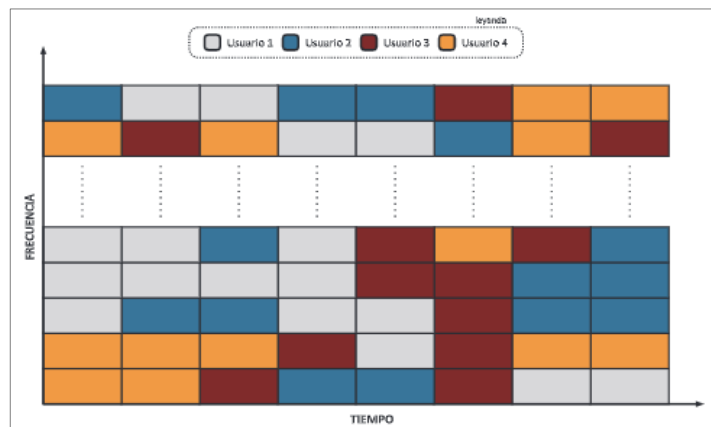


Figura 7. OFDMA, asignación de recursos para usuarios
Fuente: (Becvar et al., n.d.)

Como un factor adverso se encuentra el hecho de realizarse la modulación independiente, por tal razón se presenta una diferencia de potencia en cada subportadora, lo que conlleva a una asignación alta de niveles entre potencia máxima y potencia media (PAPR), produciendo mayor consumo de energía. (Becvar et al., n.d.)

SC-FDMA: Dedicado para el enlace ascendente, permite la división del ancho de banda en múltiples subportadoras de manera paralela, a diferencia de OFDMA que realiza una modulación independiente, SC-FDMA permite la combinación lineal de todos los símbolos para ser transmitidos simultáneamente. (Calle & Jiménez, n.d.), por lo tanto,

ayuda a reducir la PAPR, minimizando la interferencia y el consumo de batería del UE, contribuyendo a su vez que este sea más sencillo y económico.

- **Arquitectura de protocolos LTE**

Se define una estructura de capas, en donde se establecen los protocolos más comunes, proporcionando las reglas para el establecimiento de la comunicación. Como se observa en la fig. 2 en la arquitectura general de la red LTE se maneja el plano de control y el plano de usuario, permitiendo una organización en los protocolos en la interfaz de LTE y facilitar el envío de tráfico a cada usuario.

Para el establecimiento de la pila de protocolos se distinguen tres capas: Capa física, Capa de enlace de datos (PDCP, RLC) y Capa de red (NAS, RRC), los cuales se detallan para cada uno de los planos.

- ✓ **Plano de usuario**

Es el responsable de transferir los datos de usuario, esto lo consigue conectando el eNB a la red troncal mediante la interfaz S1-U, lo que conlleva a una pila de protocolos utilizados para el envío de tráfico. Los protocolos correspondientes al plano de usuario se observan en la figura 8 y descritos brevemente a continuación.

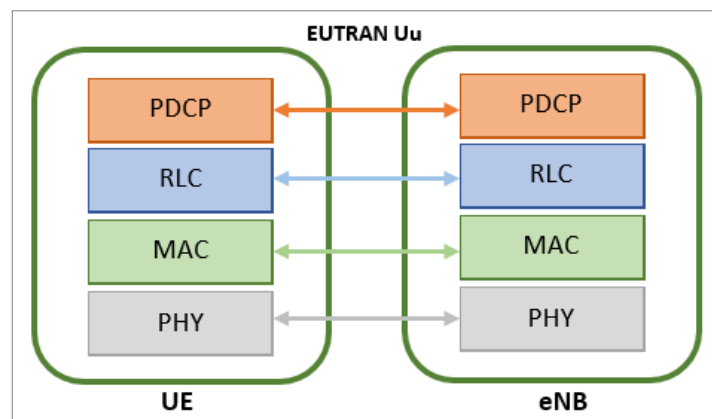


Figura 8. Protocolos de plano de usuario
Fuente: Elaboración propia.

- **PDCP (Packet Data Convergence Protocol)**

Especificado en el TS 36.323 del 3GPP, el protocolo de convergencia de datos por paquetes, facilita el servicio de transferencia de datos, de modo que, los datos de usuario

viajen a través de la capa PDCP (envío y recepción eficiente de paquetes IP). Entre las funciones claves se encuentran:

- La compresión de cabecera y cifrado de paquetes IP
- Integridad y verificación de información, asegurando que su procedencia sea de fuentes correctas.
- Cifrado y descifrado de datos en planos de usuario y de control

○ **RLC (Radio Link Control)**

Control de enlace de radio se encuentra especificado en el TS 36.322 del 3GPP, se encarga del envío de los paquetes PDCP, esto entre el UE y eNB, para ello, la comunicación con la capa PDCP la realiza mediante el punto de acceso de servicio SAP (*Service Access Point*) y con la capa MAC mediante canales lógicos. Las funciones correspondientes son realizadas mediante las entidades de RLC, configuradas en base a tres modos de transmisión de datos:

- **Modo Transparente (TM):** Se encarga de la transmisión y recepción del PDU de manera directa a la subcapa MAC, por lo que no se agregan encabezados RLC, este modo es indicado para tráfico de voz.
- **Modo no reconocido (UM):** Manifiesta un servicio de datos en una sola dirección, en donde se incluyen la entrega en secuencia de los datos y detección de duplicados. Se añaden cabeceras RLC, apropiado para tráfico de streaming.
- **Modo reconocido (AM):** Presenta funciones de mensajería unificada, adecuado para tráfico TCP, entregando un servicio fiable (retransmisión en el caso que el PDU se pierda en operaciones de capas inferiores)

○ **Medium Access Control (MAC)**

El control de acceso al medio, detallada en el TS 36.321 del 3GPP, mediante canales de transporte realiza la conexión a la capa física y por medio de canales lógicos a la capa RLC mantiene las funciones de:

- Corrección de errores mediante métodos HARQ (Hybrid ARQ), es decir, si los datos recibidos presentan un error, el receptor los almacena y se solicita la retransmisión.

- Programación en el eNB para manejar adecuadamente las prioridades de los canales lógicos del UE.
- Multiplexación y demultiplexación de las unidades de paquetes MAC y relleno en el caso de que el PDU no se encuentre totalmente cargada con sus datos.

o **Capa Física**

Mediante la capa física se brinda el servicio de transporte de datos a la subcapa MAC, mediante canales de transporte, y se encuentra basado en las técnicas antes mencionadas OFDM (descendente) y SC-FDMA (ascendente).

- **Estructura de trama LTE**

Para el sistema LTE se consideran dos tipos de trama: Para sistemas que utilizan duplexado por división de frecuencia (Tipo 1) y para sistemas que utilizan duplexado por división de tiempo (Tipo 2)

Estructura 1

En este tipo de estructura, se divide en tramas de 10ms, la distribución de una trama se presenta en la figura 9, cada una de las tramas se subdivide en 20 slots o ranuras temporales cada una con duración de 0,5ms. Al hacer referencia al conjunto de dos slots (1ms) se define la unidad básica de recursos.

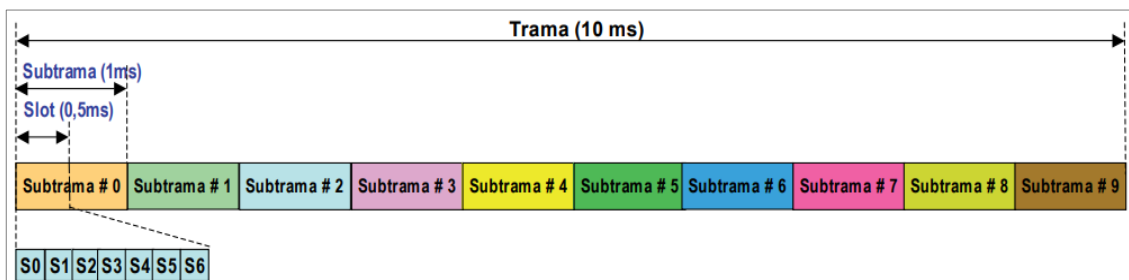


Figura 9. Estructura trama tipo 1
Fuente: (Ramón et al., 2010)

Para cada uno de los slots es posible transmitir 6 o 7 símbolos con una duración de 66,7us, considerando el prefijo cíclico se presenta dos intervalos de tiempo. Cuando se transmiten 6 símbolos se tiene una duración de 16,67 us y para la transmisión de 7 símbolos una duración de 4,7us. Adicionalmente, mediante un PRB los usuarios se pueden localizar en subportadoras determinadas en un tiempo específico de forma dinámica (sheduler). (Ramón et al., 2010)

Estructura 2

En base al modo TDD la estructura es más flexible y similar a la anterior, variando únicamente en la subdivisión de 10 subtramas (1ms) y la agregación de 3 campos adicionales como se observa en la figura 10, una subtrama especial que se adiciona a las subtramas de enlace ascendente y descendente.

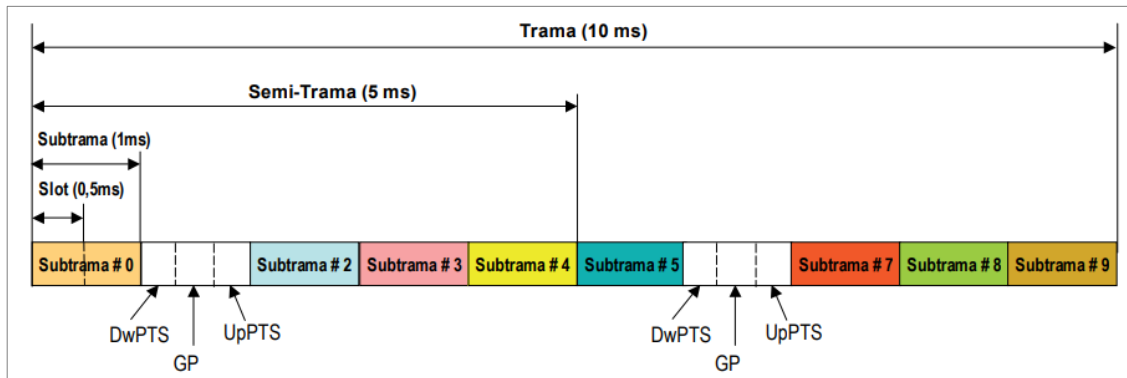


Figura 10. Estructura trama tipo 2
Fuente: (Ramón et al., 2010)

- **DwPTS:** La longitud mínima de este campo es de 1 símbolo OFDM, permite que el sistema opere dentro del modo TDD.
- **UpPTS:** Longitud de 2 símbolos OFDM, para transmisión del preámbulo de acceso aleatorio.
- **GP:** No posee una longitud fija, es decir depende de los campos anteriores: DwPTS y UpPTS, se considera como un periodo de guarda.

- Recursos físicos

En el segmento de interfaz aire, el eNB asigna al terminal móvil un mínimo elemento de información conocido como bloque de recursos físicos o PRB (*Physical Resource Block*), en donde los canales físicos y señales físicas se mapean para su posterior envío mediante las técnicas OFDMA y SC-FDMA, el bloque se encuentra conformado por recursos de tiempo y frecuencia.

De acuerdo al tipo de prefijo cíclico, ya sea este normal o extendido, el PRB puede contar con un número de subportadoras determinado, indicadas en las tablas siguientes (5 y 6), conjuntamente con el número de símbolos OFDM, se obtienen las respectivas configuraciones para la formación de la matriz de recursos.

Tabla 5. Configuración: Matriz de recursos Slot en DL

| Configuración | | N_{BW}^{RB} (Subportadoras) | N_{Symb}^{DL} (Símbolos) | |
|---------------------------|---------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------|
| | | | Estructura tipo 1 | Estructura tipo 2 |
| Prefijo Cíclico Normal | $\Delta f = 15KHz$ | 12 | 7 | 8 |
| Prefijo Cíclico Extendido | $\Delta f = 15KHz$ | 12 | 6 | 9 |
| | $\Delta f = 7,5KHz$ | 24 | 3 | 4 |

Fuente: Elaboración propia

En base a la tabla 5, se observa en la figura 11 la matriz de Recursos para el enlace descendente, en este caso de 7x12 con cada uno de los elementos que lo conforman.

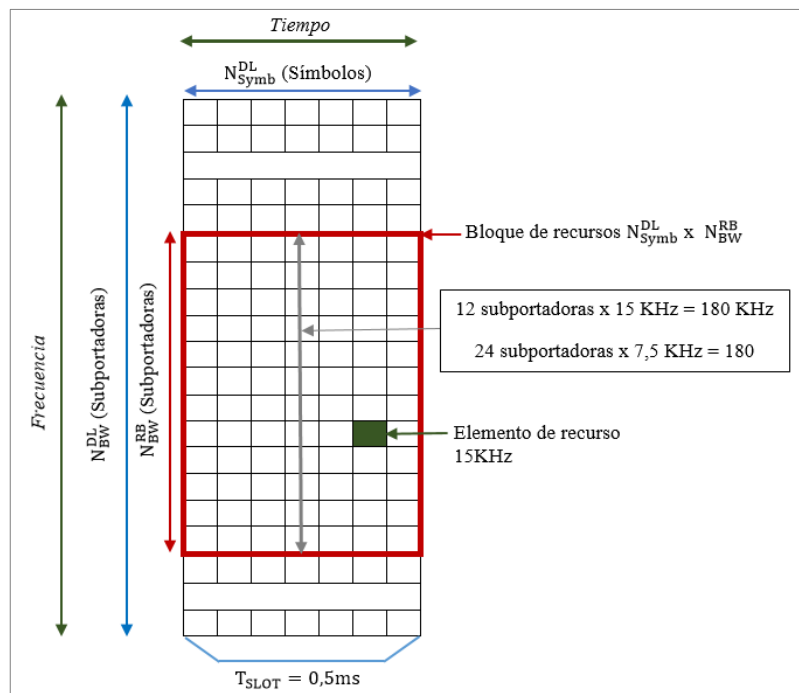


Figura 11. Matriz de Recursos de un Slot en DL

Fuente: Elaboración propia

Del mismo modo para en enlace ascendente, la matriz de recursos viene dada por los valores que se observan en la tabla 6.

Tabla 6. Configuración: Matriz de recursos Slot en UL

| Configuración | | N_{BW}^{RB} (Subportadoras) | N_{Symb}^{UL} (Símbolos) | |
|---------------------------|--------------------|----------------------------------|----------------------------|-------------------|
| | | | Estructura tipo 1 | Estructura tipo 2 |
| Prefijo Cíclico Normal | $\Delta f = 15KHz$ | 12 | 7 | 8 |
| Prefijo Cíclico Extendido | $\Delta f = 15KHz$ | 12 | 6 | 9 |

Fuente: Elaboración propia

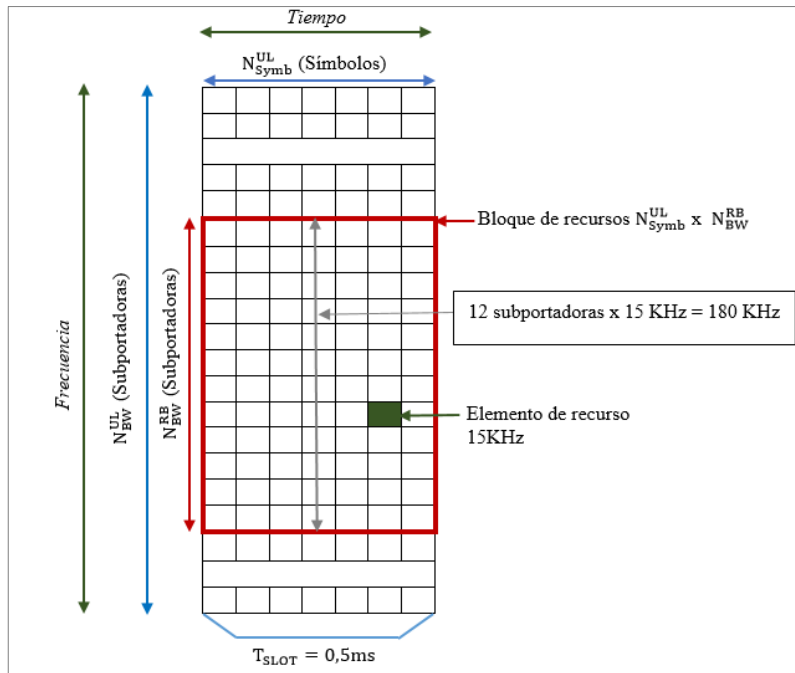


Figura 12. Matriz de Recursos de un Slot en UL
Fuente: Elaboración propia

Dependiendo los valores de canalización disponibles que se observan en la tabla 7 se presenta el número total de bloques que tendrá el sistema.

Tabla 7. Número de PRB y subportadoras dependiendo canalización

| Canalización | 1.4MHz | 3MHz | 5MHz | 10MHz | 15MHz | 20MHz |
|----------------------------------|--------|------|------|-------|-------|-------|
| Número de PRB | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| Subportadoras disponibles | 73 | 181 | 301 | 601 | 901 | 1201 |

Fuente: (Ramón et al., 2010)

Al conocer normalmente las 12 subportadoras, se considera adicional una subportadora central (DC), esta no es utilizada en la transmisión, pero facilita mecanismos de ajuste y sincronización, esta es la razón por la cual en la tabla 7 se presenta una subportadora adicional en cada una de las canalizaciones, teniendo como ejemplo:

$$\text{PRB } 6 \times 12 \text{ subportadoras} = 72 + 1 \text{ subportadora central} = 73 \text{ subportadoras disponibles}$$

De esta manera, los bloques de recursos cumplen con el proceso de repartir el ancho de banda de manera inteligente, considerando las condiciones del canal de cada usuario, lo que se conocería como *frequency dependent scheduling*, la misma que al ejemplificarla en la distribución de bloques del escenario de la figura 13, se puede detallar; 4 usuarios

conectados, cada uno se encuentra utilizando diferentes servicios (UE1 y UE3: llamadas de voz, UE2 y UE4: tráfico de datos). Como se observa, para el usuario 1 el tráfico de voz permanece constante, sin embargo, para el usuario 3 que utiliza el mismo servicio se encuentra afectado por desvanecimientos en frecuencia. De manera análoga para los usuarios 2 y 4 al tratarse de datos refleja tráfico más elevado, para el usuario 4 también existe un desvanecimiento, sin embargo, cada usuario no afecta ni interfiere con el canal de otros usuarios, aprovechando la parte del espectro correspondiente.

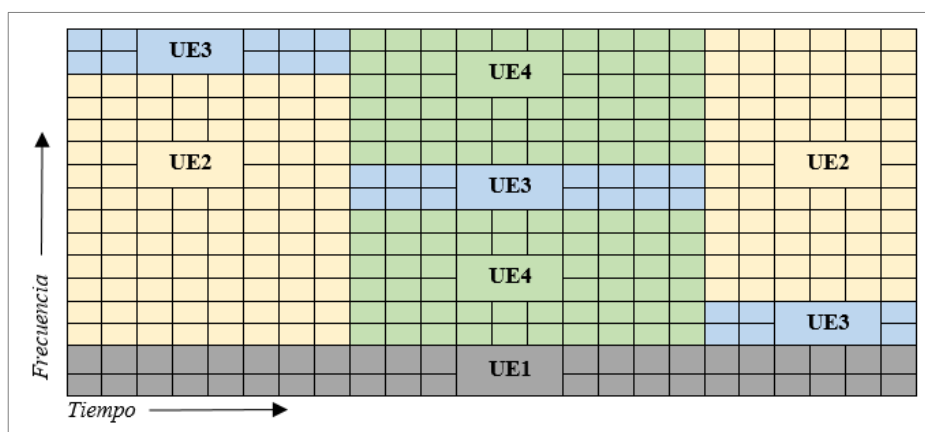


Figura 13. Distribución de condiciones de canal en OFDMA, SC-FDMA

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que conocido los recursos físicos se describen las señales y canales físicos que serán distribuidos mediante OFDMA y SC-FDMA.

o **Enlace descendente**

Para el enlace descendente, en el apartado siguiente (tablas 8 y 9) se presentan las principales características de los tipos de señales físicas y canales físicos necesarios para el transporte de información desde el eNB hacia los usuarios.

Tabla 8. Señales Físicas enlace descendente

| Señales Físicas | |
|--|---|
| Señales de referencia (RS) | <ul style="list-style-type: none"> • Obtener medidas de calidad • Estimar respuesta impulsional del canal • Implementar mecanismos de búsqueda de celda y sincronización |
| Señales de sincronización (SCH) | <ul style="list-style-type: none"> • P-SCH (Primary SCH), sincronización temporal a nivel subtrama • S-SCH (Secondary SHC), sincronización temporal a nivel de trama |

Fuente: (UIT, 2020)

Tabla 9. Canales Físicos enlace descendente

| Canales Físicos | |
|--|--|
| PDSCH (Canal físico compartido) | <ul style="list-style-type: none">• Transmisión de servicios: Datos de plano usuario y plano de control |
| PMCH (Canal físico multidifusión) | <ul style="list-style-type: none">• Transmisión de difusión del plano de usuario y control durante subtramas MBSFN (Difusión multimedios por una red mono frecuencia). |
| PDCCH (Canal físico de control) | <ul style="list-style-type: none">• Transmisión de información de control, recursos, formato de transporte, información sobre HARQ (Solicitud de repetición automática híbrida). |
| MPDCCH (Canal físico de control MTC) | <ul style="list-style-type: none">• Transmisión de información de control tomando en cuenta en base a la relación al ancho de banda reducida y modo de ampliación de cobertura. |
| PBCH (Canal físico de difusión) | <ul style="list-style-type: none">• Transporta células e información específica del sistema. |
| PCFICH (Canal físico del indicador de formato de control) | <ul style="list-style-type: none">• Indica al equipo de usuario el formato de control de subtrama actual |
| PHICH (Canal físico indicador de ARQ híbrida) | <ul style="list-style-type: none">• Transporta información ACK (Acuse de recibo positivo) / NAK (Acuse de recibo negativo) recibidas por el eNB |

Fuente: (UIT, 2020)

○ **Enlace ascendente**

De manera similar para el enlace ascendente se presenta tipos de señales físicas y canales físicos en las tablas 10 y 11.

Tabla 10. Señales Físicas enlace ascendente

| Señales Físicas | |
|-----------------------------------|---|
| Señales de referencia (RS) | <ul style="list-style-type: none">• Estimación de la respuesta al impulso del canal, DM-RS• Sondeo de la calidad del canal de transmisión, SRS |

Fuente: (UIT, 2020)

Tabla 11. Canales Físicos enlace ascendente

| Canales Físicos | |
|---|--|
| PRACH (Canal físico de acceso aleatorio) | <ul style="list-style-type: none">• Transporta preámbulo para la activación del acceso aleatorio en el eNB |

| | |
|--|--|
| PUSCH (Canal físico compartido) | • Transportan datos de usuario e información de control |
| PUCCH (Canal físico de control) | • Transporta información de control, peticiones de asignación de recursos, calidad del canal |

Fuente: (UIT, 2020)

✓ **Plano de control**

Se encarga de controlar la transferencia de datos, hace referencia a los protocolos que son necesarios para la gestión y operación de la interfaz S1-MME, mediante esta interfaz el eNB se puede comunicar con la entidad MME de la red troncal. Al plano de control se integra la capa 3 donde se encuentra los protocolos NAS (Non Access Stratum) y RRC (Radio Resource Control)

- NAS: Capa superior del plano de control, realizan el transporte y señalización directa entre el UE y el MME. El contenido de la capa NAS es invisible para el eNB, por lo tanto, no se involucra en las funciones de la capa.
- RRC: Encargada del control del uso de recursos de radio, establece las portadoras de radio y configura las capas inferiores (gestión de conexiones, señalización, datos entre eNB y UE)

Las capas inferiores que se observan en la figura 14 cumplen las mismas funciones que las del plano de usuario, puesto que son los mismos protocolos de capa 1 y 2.

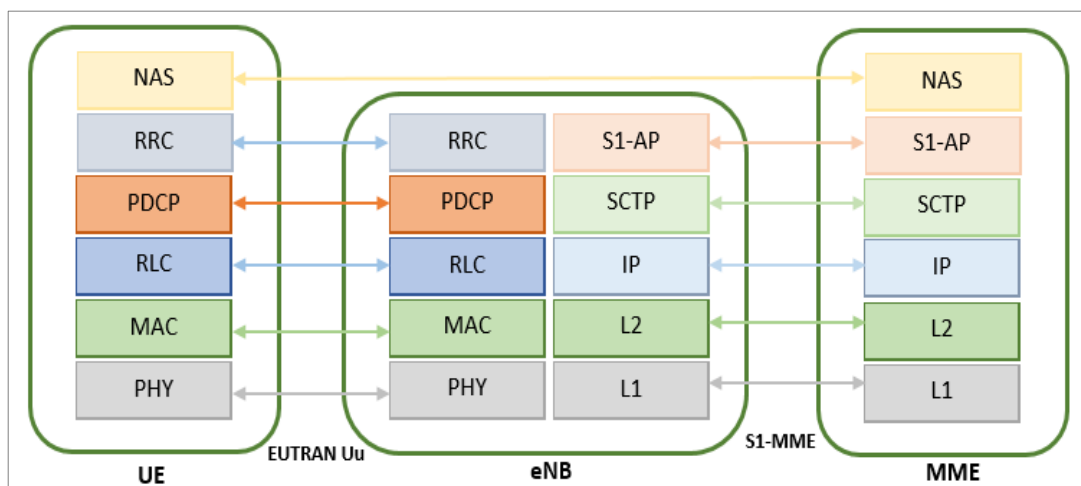


Figura 14. Protocolos del plano de control

Fuente: Elaboración propia.

4.1.4.1 LTE Advanced (Long Term Evolution-Advanced)

Como parte de la evolución de 4G, LTE-A se manifiesta como la tecnología de radio estandarizada por 3GPP incluida a partir del Release 10-12, buscando mejorar 3 principales áreas:

- *Velocidades de transmisión de datos pico y promedio:* Asentar un sistema con velocidades Downlink de 1Gbps y Uplink 500Mbps. (Kottkamp et al., n.d.)
- *Eficiencia espectral:* Eficiencia de 30bps/Hz Downlink y de 15bps/Hz para Uplink. (Kottkamp et al., n.d.)
- *Latencia:* Para un plano de control un tiempo inferior a 50ms desde el modo inactivo al modo conectado incluyendo el establecimiento del plano de usuario. (Kottkamp et al., n.d.)

- **Formación del Haz**

Permite el control de la dirección y enfoque de la potencia de transmisión hacia un único usuario para disminuir la interferencia con otros usuarios. Este proceso se lleva a cabo mediante el producto de la señal transmitida por los coeficientes que permiten ajustar parámetros como la magnitud y la fase de cada una de las antenas. Para garantizar una transmisión adecuada, el transmisor debe conocer la ubicación en la que se encuentra el receptor. (Becvar et al., n.d.)

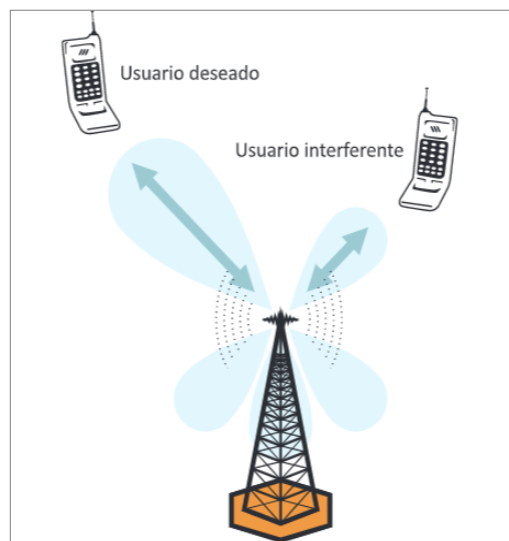


Figura 15. Principio de formación de Haz
Fuente: (Becvar et al., n.d.)

- **Transmisión con múltiples antenas**

Para una mayor tasa de bits y creación de canales paralelos se realiza la transmisión y recepción mediante el empleo de más de una antena, presentando dos posibles maneras:

- ✓ Implementación de múltiples antenas en un solo lado (transmisor o receptor), denotándolo como SIMO (*Single Input/Multiple Output*) o a su vez como MISO (*Multiple Input/Single Output*).
- ✓ Implementación de múltiples antenas en transmisión y recepción conocida como MIMO (*Multiple Input/Multiple Output*).

En base a lo mencionado es posible implementar hasta 4 y 8 antenas por cada lado, considerando el apartado anterior de la formación de haz debido a que las transmisiones se encuentran desplegadas en los mismos recursos de tiempo/frecuencia. (Calle & Jiménez, n.d.)

- **Agregación de portadora**

Para su operación, LTE-A requiere de un ancho de banda más amplio llegando a los 100MHz. En comparación con el Release 8 de LTE con un ancho de banda de 20MHz, y el uso de un único componente de portadora (*CC-Component Carrier*), LTE-A usa la agregación de portadora de hasta cinco CCs para obtener el ancho de banda necesario para la transmisión.

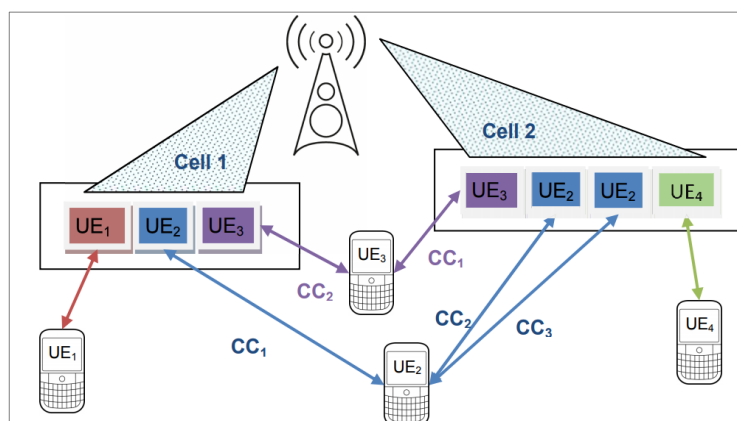


Figura 16. Agregación de portadoras

Fuente: (Kottkamp et al., n.d.)

La agregación de portadora en LET-A soporta una variedad de arreglos de distintos CCs, incluyendo CCs del mismo o de diferentes anchos de banda, adyacentes o no adyacentes en la misma o en diferentes bandas de frecuencia (Calle & Jiménez, n.d.)

- **Relaying**

Tanto como LTE y LTE-A son tecnologías que presentan los mismos elementos: equipo de usuario, red de acceso (E-UTRAN), red de core (EPC), y de los servicios brindados a través de IMS. Sin embargo, en la red de acceso de LTE-A se adiciona un nuevo elemento: Relay Node (RNs), cuyas funciones son parecidas a las del eNB para incrementar la cobertura, capacidad y rendimiento.

Los RNs permiten complementar macroceldas, procesando la señal recibida antes de reenviarla, en este proceso, los UE se comunican con un nodo de retransmisión (RN) y este a la vez se comunica con un eNB (Kottkamp et al., n.d.) como se indica en la figura 17.

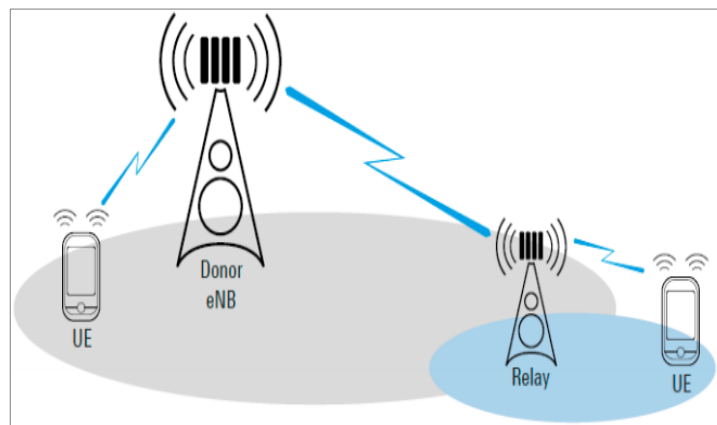


Figura 17. Relays Node
Fuente: (Kottkamp et al., n.d.)

4.1.4.2 LTE Advanced Pro

LTE se ha convertido en una de las tecnologías de mayor acogida, atendiendo a millones de usuarios, con la evolución a LTE-A facilitaron el intercambio de información con mayores velocidades, sin embargo, conforme el transcurso del tiempo se presentan nuevos desafíos dando paso al desarrollo de LTE-Advanced Pro como una siguiente versión de LTE para la cuarta generación.

LTE Advanced Pro se encuentra especificado en el Release 13-14 de 3GPP, ofreciendo eficiencia y mayor capacidad de la red, agregan hasta 32 CCs, la tabla 12 resume los valores de velocidades que ofrecen las últimas versiones LTE.

Tabla 12. *Velocidades pico LTE-A/LTE-A-Pro*

| Velocidades pico enlace descendente | | | | | |
|--|----------------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Tecnología | Máx. CC | SISO | MIMO 2x2 | MIMO 4x4 | MIMO 8x8 |
| LTE-A | 5 (100Mhz) | 504 Mbps | ~1 Gbps | ~2 Gbps | ~4 Gbps |
| LTE-A-Pro | 32(640MHz) | ~3.2Gbps | ~6,5 Gbps | ~13 Gbps | ~26 Gbps |

Fuente: (Pérez, 2019)

Versiones como LTE-A y LTE-Pro son la misma tecnología, las etiquetas agregadas resaltan principalmente la relación entre Releases que se encuentran especificados en 3GPP. La evolución de las redes 4G LTE continúan siendo el pilar fundamental de las redes celulares, esto por ser una de las tecnologías en donde se concentran posteriormente las nuevas redes de siguiente generación 5G.

4.2 Quinta generación (5G-NR)

A partir de 2G se ve un cambio importante de telefonía analógica a digital. Avanzando hasta 4G se han generado una serie de tecnologías con el fin de brindar a los usuarios mayores anchos de banda y menor latencia, sin duda una evolución rápida y continua en las comunicaciones móviles, un gran conjunto de características y mejoras adicionales conlleva hacia el desarrollo de nueva tecnología móvil conocida como 5G NR (5G New Radio)

La UIT durante las últimas décadas ha desempeñado un papel importante en el planteamiento de requisitos para el avance de la industria de banda ancha inalámbrica. Desde IMT-2000 para tecnologías de 3G hacia especificaciones de IMT-Avanzadas para 4G, permanece en desarrollo de manera similar para el impulso de la quinta generación teniendo a IMT-2020.

Para 5G se establece dos fases, la primera se presenta en el Release 15 de 3GPP, empezando a finales de 2017, denominándola como 5G NSA (Arquitectura No Autónoma) la misma que aprovecha la infraestructura de 4G, y una segunda fase dispuesta en el Release 16 conocida como 5G SA (Arquitectura Autónoma), que conecta la radio 5G a una red central 5G, sin ninguna interacción con el núcleo 4G, esta fase comienza a inicios de 2018 finalizando en 2019, presentando un conjunto de estándares completos hacia IMT-2020.

4.2.1 Escenarios de Uso de IMT 2020

Para IMT-2020 se prevé la ampliación de capacidades y soporte de diferentes escenarios de uso y aplicaciones, presentando los 3 escenarios siguientes:

4.2.1.1 Banda ancha móvil mejorada (eMBB)

La demanda del escenario aborda usos centrados en el acceso de contenidos multimedia, servicios, datos y nuevas áreas de aplicación para mejoramiento del rendimiento y experiencias de usuario. Adicionalmente casos como: cobertura de área amplia y puntos de acceso.

Los puntos de acceso representan zonas con alta densidad de usuarios, por lo tanto, se necesita gran capacidad de tráfico, pero los requisitos de movilidad son bajos, y las velocidades de datos de los usuarios son mayores que en los entornos de área amplia. (5G Americas, 2017)

En el caso de cobertura de área amplia se desea una cobertura sin fisuras con una movilidad entre el rango medio-alto, con tasas de datos de usuarios superiores a la existente, sin embargo, el requisito de velocidad de datos puede ser menor en comparación con los entornos de puntos de acceso. (5G Americas, 2017)

4.2.1.2 Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC)

Se presenta un tipo de comunicaciones con requisitos más estrictos en cuanto a capacidades (rendimiento, latencia y disponibilidad). Entre algunos ejemplos de aplicación se encuentran: automatización de distribución de una red inteligente, control de procesos de fabricación/producción, conducción autónoma, cirugías médicas a distancia incluso seguridad en el transporte. (5G Americas, 2017)

4.2.1.3 Comunicaciones masivas tipo maquina (mMTC)

Comunicaciones encaminadas hacia el caso de uso caracterizado en la conexión de un número elevado de dispositivos sin sobrecargar a la red. A pesar que los dispositivos suelen transmitir un volumen de datos relativamente bajo, estos no son sensibles al retraso. La comunicación pretende aportar conectividad empleando software y hardware con requerimientos bajos así como dispositivos de bajo costo con baterías de larga duración. (5G Americas, 2017)

4.2.2 *Arquitectura 5G*

Mediante 5G, se lleva a cabo una importante transformación en las telecomunicaciones, una generación completamente nueva para la conexión de millones de dispositivos, sin embargo, el procedimiento hacia 5G no ocurre de manera lineal, presenta un proceso de desarrollo en base a la estructura. En base a las definiciones de 3GPP se tiene como punto de partida una arquitectura No Autónoma hasta llegar al desarrollo de una arquitectura Autónoma.

4.2.2.1 5G NSA (Non-StandAlone).

Como uno de los primeros pasos para el despliegue de nuevas redes, 5G NSA propone en el Release 15 dos tipos de representaciones: una representación del punto de referencia y una representación basada en el servicio o SBA (*Service Based Architecture*), siendo esta última la considerada como indicada para ser utilizada a futuro. (Pérez, 2019, p 13)

5G NSA continúa aprovechando la infraestructura de 4G, esto es, con el núcleo EPC como máster, la definición de una nueva red central conocida como 5G Next Generation Core (NGC) y una estación de radio base conocida como Next Generation NB o gNB / gNodeB.

NSA en la red troncal puede compartir recursos de 4G EPC o con 5G NGC, y para el acceso a radio con 4G eNB o 5G gNB funcionando de manera conjunta, permitiendo que el usuario tenga la conexión con ambas tecnologías.

La interacción entre las funciones de red se pueden presentar de dos maneras:

- Funciones de red dentro del plano de control 5G (NG-CP)
- Funciones de red que se conectan al plano de control 5G desde la red RAN

Existen 12 opciones de arquitectura para el despliegue de 5G, que se encuentran en las especificaciones de 3GPP, de las cuales se consideran únicamente las que se presentan en la figura. 18 (opciones: 2, 3, 3A, 4, 4A, 7, 7A). En lo referente a la opción 1 esta es considerada como la arquitectura utilizada para LTE mientras que las opciones 5, 6, 8 y 8A se consideran improbables (Pérez, 2019), por lo tanto, no se visualizan en la imagen. El objetivo de las opciones de arquitectura se basa en desarrollar completamente la tecnología para posteriormente migrar hacia una red 5G SA.

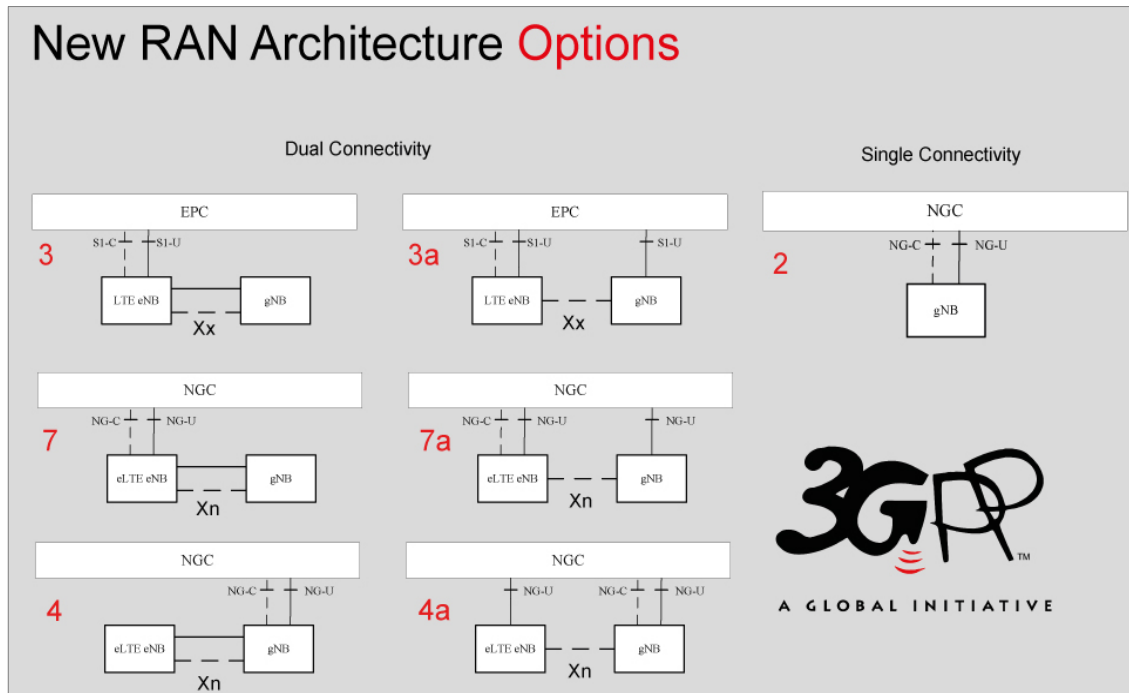


Figura 18. Opciones de arquitectura 5G
Fuente: (3GPP, 2017)

La opción 3 NSA, representa una de las arquitecturas con más acogida debido a que permite el despliegue de 5G en base a los recursos de 4G, en donde el eNB de LTE funciona como el nodo maestro y gNB como secundario, el UE se conecta al eNB y luego se encarga de realizar la solicitud de petición de conexión al gNB. Estableciendo las interfaces:

- **S1-U:** Interfaz entre eNB y EPC específicamente con el S-GW (*Serving Gateway*), se encarga de gestionar el tráfico para que exista conexión, enruta los paquetes de datos del usuario.
- **S1-C:** Interfaz empleada entre eNB y EPC, conjuntamente con el MME (Mobility Management Entity), se encarga del control: procesos de autenticación, autorización, señalización, movilidad, posición, etc.
- **X2:** Interfaz que comunica el eNB con gNB con datos de control y de usuario.

Para la opción 3 existen dos modos de configuración: 3 y 3A.

En el modo 3, gNB se comunica con EPC mediante eNB por medio de la interfaz X2 cumpliendo la función de transporte para el plano de control y de usuario. Mientras que para el modo 3A, gNB se comunica directamente con EPC por medio de la interfaz S1-U

para el plano de usuario, y para el plano de control se conecta al eNB por medio de la interfaz X2. (Riaño, 2020)

De manera similar para las opciones 4 y 4A, el eNB se comunica con gNB y este a su vez es conectado al NGC mediante las interfaces NG-C y NG-U (Opción 4), o se comunica directamente eNB con NGC mediante la interfaz NG-U (Opción 4A).

Finalmente, en las opciones 7 y 7A, gNB se comunica con eNB para llegar hacia NGC mediante las interfaces NG-C y NG-U (Opción 7), o se comunica directamente gNB con NGC mediante la interfaz NG-U (Opción 7A).

4.2.2.2 5G SA (StandAlone).

Anteriormente para una arquitectura de 4G, como parte de la red troncal se tenía el EPC, permitiendo la convergencia usando el protocolo de Internet, en el caso de 5G se encuentra NGC.

En la red de acceso se cuenta con New RAN reemplazando a E-UTRAN y con ello, la estación de radio base gNB, manejando las comunicaciones con el UE utilizando la interfaz aire 5G New radio.

En base a la figura 18 para la opción 2, se presenta una conectividad simple o modo independiente, en donde claramente gNB es conectado al NGC, para el plano de control y usuario (Interfaces NG-C y NG-U).

Para una arquitectura autónoma se presenta una comunicación por medio de una red puramente 5G, aprovechando especialmente tecnologías como SDN y NFV para la creación de segmentos de red más optimizados y poder desarrollar el potencial de 5G. (Pérez, 2019)

Para 5G surgen mayores expectativas y un nuevo enfoque para el futuro de la red. La demanda se presenta en una forma escalable, no solamente en dispositivos personales, sino también en diversas tecnologías como M2M o el mismo IoT, los cuales ocasionan un aumento de datos. Esto conlleva al incremento en la demanda de capacidad, tasa de datos y cobertura. Las redes IP asociadas deben evolucionar para obtener redes más óptimas y rentables con el fin de facilitar la evolución de 5G.

- **SDN (Redes Definidas por Software)**

Forma parte de una de las arquitecturas que están diseñadas para que las redes sean más ágiles, rentables y escalables, el objetivo es desacoplar físicamente el plano de control (software) con el de datos (hardware), para obtener una gestión de red directamente programable y permitir inteligencia en la red. Al separar los planos, los dispositivos de red son más sencillos debido a que el control se implementa en forma centralizada desde un punto de vista lógico.

El plano de datos es manejado por dispositivos de red (switches) mientras que el de control es ejecutado en un servidor controlador, el cual es el encargado de implementar la lógica de la red. SDN procura simplificar operaciones de la red debido a que en la actualidad se requiere un mayor número de servicios en la infraestructura existente, de esta forma se optimiza los recursos por lo que todas las decisiones e inteligencia requerida se manejan en el controlador. En una arquitectura SDN se puede distinguir las siguientes capas:

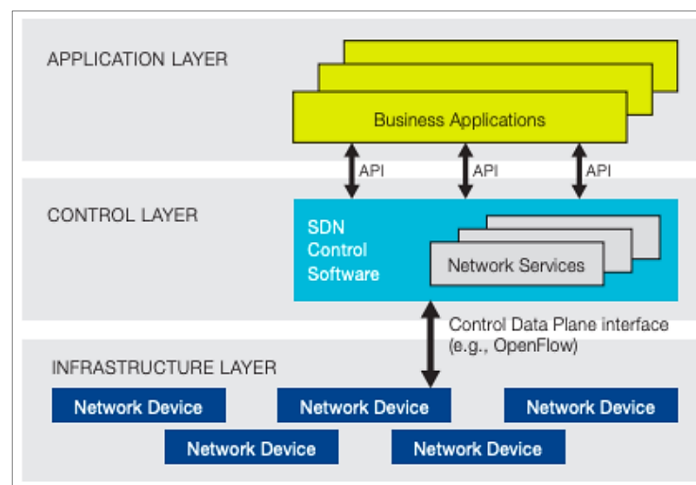


Figura 19. Arquitectura SDN

Fuente: (Riaño, 2020)

- ✓ **Aplicación:** Proporciona un enrutamiento adaptativo, realiza mantenimientos a la red en tiempo real sin interrupciones, genera seguridad, virtualización de la red, comunican los requisitos de acceso a la capa de control mediante una API (*Application Programming Interfaces*). (Riaño, 2020)
- ✓ **Control:** Gestiona las capas de infraestructura y aplicación, es el componente principal debido que contiene los servicios de red y control. (Riaño, 2020)

- ✓ **Infraestructura:** Hardware de la red, en ella se encuentran las aplicaciones como el núcleo de red, switches, routers, estaciones base. (Riaño, 2020)

En la figura 19 se observa la separación de los planos de control y datos, uno de los medios para la interconexión de estos planos se presenta por medio de protocolos, siendo OpenFlow uno de los más utilizados para este fin. El objetivo principal es la comunicación de los dos planos en una arquitectura SDN a través de un canal seguro, permitiendo una integración más rápida y fácil de nuevos dispositivos. De esta manera para 5G, SDN permitirá que la red controle el flujo de datos, mejorando el tráfico de servidor a servidor, así como la mejora de la congestión de la red disminuyendo la latencia.

- **NFV (Virtualización de funciones de Red)**

Considerada como parte importante en la transformación de la red, por medio del procesamiento del tráfico de red con funciones de virtualización e interconexión, posibilita la obtención de servicios en diferentes ubicaciones, para hacer de una red eficiente al optimizar los recursos (Riaño, 2020). El objetivo se presenta en base a las funciones de red de los dispositivos dedicados que son transferidas a servidores virtuales, permitiendo agregar múltiples funciones de red en un mismo servidor físico.

Entre algunas de las ventajas que se presentan en 5G están: control, conectividad, calidad de servicio, mayor escalabilidad, eficiencia, rendimiento, baja latencia, reducción de consumo de energía, todo esto de manera virtual, permitiendo reducir principalmente costos elevados en el hardware de la red.

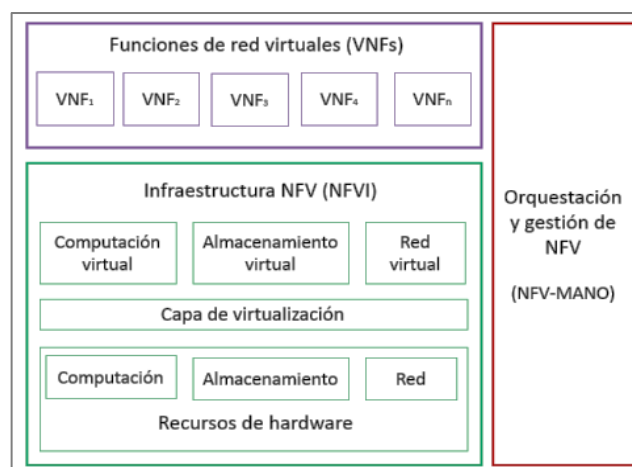


Figura 20. Arquitectura NFV
Fuente: (ETSI, 2013)

Referente a la arquitectura, NFV cuenta con 3 componentes generales:

- ✓ Funciones de redes virtuales (VNF): Aplicaciones de software implementadas mediante máquinas virtuales. Administrada por un sistema de gestión de elementos (EMS), siendo este responsable de la creación, monitoreo, configuración y seguridad de la VNF.
- ✓ Infraestructura NFV: Conjunto de hardware y software que componen el ambiente NFV
- ✓ Marco de administración y organización de la red (MANO): Responsable de la gestión de las VNF e infraestructura, mantenimiento de repositorios de datos, puntos de referencia e interfaces para el intercambio de información entre los componentes que conforman un servicio

Para 5G, NFV representa independencia, creando múltiples redes en el mismo hardware. Un equilibrio de carga y asignación de recursos de manera dinámica según la necesidad. Proporciona escalabilidad rápida sin afectar el rendimiento, además de facilitar un aislamiento entre redes, es decir, el mal funcionamiento de uno no afectará al resto de la red.

De esta manera, tanto como NFV y SDN se presentan como futuro de las redes móviles. NFV con elementos virtualizados, mientras que SDN ofrece gestión de la red a las distintas funciones de red virtuales. (Mrozowski, 2020)

5 METODOLOGÍA

El presente trabajo de titulación se desarrolla en base al empleo gradual de diferentes métodos; partiendo en la investigación para su posterior análisis de la información e interpretación.

Método científico: Mediante este método se reunió la información necesaria en distintas fuentes bibliográficas como; libros, artículos científicos y documentos oficiales de organizaciones internacionales de Telecomunicaciones, obteniendo conocimientos previos y relevantes para el posterior desarrollo de contenidos a lo largo de los capítulos de base teórica.

Método deductivo: Tomando como base las investigaciones previas, se inicia con las observaciones y estudio de los aspectos iniciales y claves que se requieren para el desarrollo de 5G, así como de las principales tecnologías que son aplicadas en la interfaz aire:

- Codificación de canal
- Esquemas de Modulación
- Técnicas de Acceso múltiple
- Sistemas de antenas
- Tecnología emergente basada en radio cognitiva

Las cuales permitirán extraer puntos específicos de los diferentes esquemas en base a sus características y requisitos para obtener una óptima comunicación.

Método Inductivo: Como parte de uno de los métodos fundamentales, se inicia desde un escenario específico hacia uno general, permitiendo establecer comparaciones y obtener las similitudes ante los esquemas que se describen y que, de manera conjunta forman parte del desarrollo de los procesos de transmisión y recepción en las comunicaciones móviles de 5G.

Para el desarrollo de los contenidos se toma como punto de partida el conjunto determinado de altas frecuencias, las mismas que por su longitud de onda se definen como mmWave, estableciéndose como base para que se desarrollen el resto de los esquemas y tecnologías. Por lo tanto, para una evaluación de canales que faciliten la propagación y

operación a grandes frecuencias, se toma como parte de los materiales el uso del Software NYUSIM, el misma que implementa una interfaz gráfica de usuario para la representación del canal y evaluarlos en los 4 tipos de escenarios posibles para 5G.

Para llevar a cabo la representación gráfica mediante NYUSIM se utiliza un computador marca Toshiba con procesador i7 de quinta generación con velocidad de 2.40GHz, y memoria RAM de 12GB, en donde se procede a instalar la versión 3.0



Figura 21. Ventana de Inicio NYUSIM (Versión 3.0)

Fuente: Elaboración propia

Adicionalmente, como parte de los materiales se utiliza los documentos que se encuentran en la página oficial del 3GPP, realizando el análisis en base a las especificaciones técnicas del Release 16, la misma que en la actualidad representa la última versión para 5G que ha sido finalizada (2020).

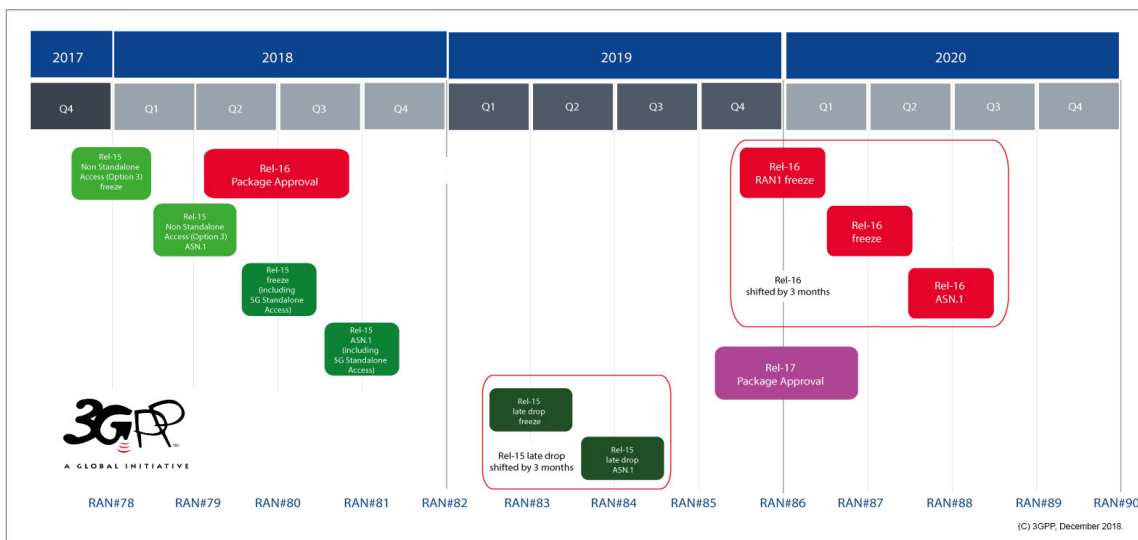


Figura 22. Línea de tiempo, avances Releases 3GPP

Fuente: (3GPP, 2020)

El empleo de métodos y materiales mencionados se desarrollan mediante la descripción y especificación de cada una de las técnicas que actualmente ya se encuentran puestas en marcha, así como de las posibles tecnologías que revelan y prometen ser buenas candidatas para una implementación posterior, esto en base al desarrollo de los dos capítulos a continuación.

CAPÍTULO 2

5.1 ASPECTOS CLAVES PARA EL DESARROLLO DE 5G

El continuo crecimiento en la demanda de servicios en las comunicaciones móviles ha motivado la búsqueda de soluciones más eficientes. Conforme las tecnologías evolucionan en cada generación, aspectos como velocidades o la calidad de los servicios requieren de tecnologías y características más sofisticadas para su logro. Al dirigirse hacia el desarrollo de 5G, se encuentra un enfoque para construir más inteligencia en las redes y cumplir aquellas características necesarias para satisfacer la demanda, mediante la introducción de nuevos parámetros que se desarrollan a lo largo del documento.

5.1.1 Ondas milimétricas

Uno de los recursos naturales que cumple los requisitos más importantes para el desarrollo de las Telecomunicaciones es el espectro radioeléctrico, reuniendo un conjunto de frecuencias para la prestación de diversos servicios de comunicaciones inalámbricas, esto se traduce como la atribución de bandas específicas o de segmentos bien definidos para garantizar un medio que ofrezca el acceso a la información.

La frecuencia (f), a partir de la velocidad que viajan las ondas (c), se relaciona su longitud de onda (λ), esto representa una distancia importante a partir de la cual las señales se repiten ($c = f * \lambda$), y con ello uno de los parámetros que definen a la quinta generación.

El conjunto de frecuencias extremadamente altas (*EHF*, siglas en inglés) formada por el rango de 30 a 300GHz, corresponden a valores de longitudes de onda definidos entre 1 a 10 mm, denominándolas como bandas milimétricas o conocidas también como mmWave, requisito inicial para el despliegue de 5G.

En base a la gran demanda de servicios y las altas expectativas para una siguiente generación, las frecuencias utilizadas actualmente llegan a ser poco eficaces y su continuidad no permitirían otorgar la capacidad necesaria para 5G (de hasta 1000 veces mayor a la actual). Entonces, al utilizar un espectro más amplio, existe más la posibilidad de tener más frecuencias libres que permitan cubrir las necesidades previstas. Entre los aspectos que se plantean para el uso de bandas milimétricas se encuentra principalmente el de descongestionar zonas en donde existe alto consumo, es decir, en donde se originan numerosas cantidades de datos.

Al referirse a las bandas milimétricas se presenta la gran cantidad de espectro necesario para el crecimiento apropiado de las redes, se puede tener en consideración que alrededor de unos 10 o 20 años más adelante existe la posibilidad que, por cada ser humano conectado, detrás de éste puedan existir alrededor de 20 dispositivos adicionales conectados (móviles, tabletas, ordenadores entre otros), aumentando considerablemente la demanda, razón determinante para llevar a cabo su empleo.

A partir de la banda EHF es posible incluir frecuencias por debajo del rango mencionado para el despliegue de 5G (*SHF*- Frecuencias Súper Altas, incluso *UHF* Frecuencias Ultra Altas), es decir, una subdivisión con frecuencias menores en donde se pueden considerar los rangos de:

- Frecuencias bajas: Inferiores a 1 GHz
- Frecuencias Medias: Rango entre 1GHz – 6GHz
- Frecuencias Altas: Superiores a 6 GHz

Comenzando por las bandas que están por debajo de 1GHz, se hace referencia a la prestación de servicios como es el caso del Internet de las Cosas o IoT, al ser menor el valor de la frecuencia, proporcionalmente la longitud de onda será mayor, permitiendo ampliar la cobertura, especialmente en las zonas de mayor movilidad y extensión, sin embargo, la capacidad de estas bandas no es la suficiente. Para un siguiente rango se encuentran las de 1 a 6 GHz, sinónimo de nivel intermedio en donde tanto la capacidad y la cobertura se mantienen en niveles iguales, puede ser considerado como uno de los pasos iniciales para el despliegue de 5G. Finalmente, el nivel superior con frecuencias por encima de los 6 GHz, cuenta con un amplio grado de capacidad, siendo indispensables para facilitar servicios con grandes anchos de banda, a su vez cumplir con los escenarios

de uso mencionados anteriormente (mMTC, eMBB, URLLC), sin embargo, en aspectos como las distancias de cobertura suelen ser relativamente cortas, lo que conlleva a la necesidad de contar con redes de mayor densidad.

Resumiendo de manera gráfica (figura 23) lo antes mencionado se presenta una comparación representando el nivel de los parámetros de cobertura y capacidad considerando los tres rangos de frecuencia.

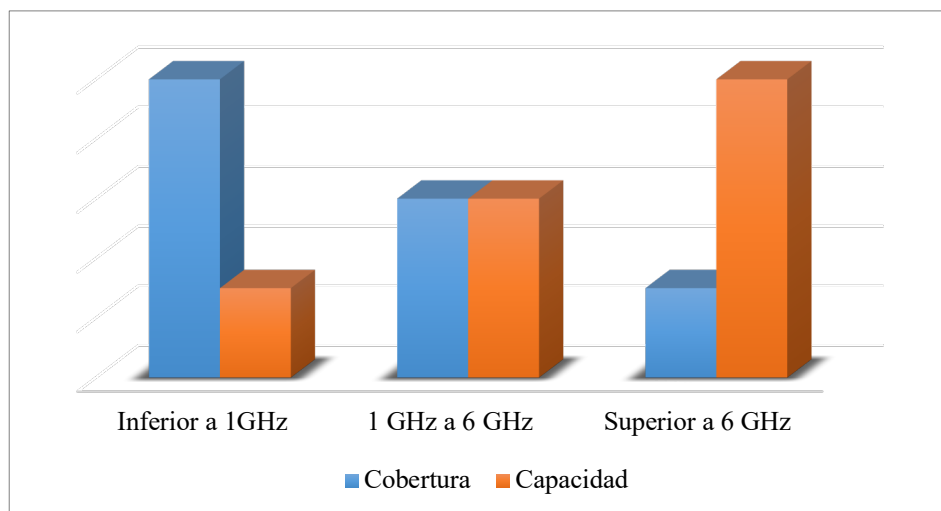


Figura 23. Representación de Cobertura y Capacidad según rango de frecuencia
Fuente: Elaboración propia

Recalcando para el último rango, las frecuencias superiores a 6GHz conlleva hacia un reto importante, al emplear altas frecuencias claramente se pueden presentar mayores pérdidas debido que las ondas cubren menores distancias y por ende son más susceptibles, disminuyendo la capacidad de traspasar obstáculos como es el caso de edificaciones, árboles, etc. Por tal razón se han realizado diferentes estudios ajustados hacia el empleo de ondas milimétricas, esto basado en una descripción general de modelos de canales que pueden ser utilizados en 5G.

5.1.2 Bandas de frecuencia

Entre los objetivos de 3GPP de establecer las especificaciones correspondientes para cada una de las generaciones de comunicaciones móviles, a partir del 2018 proporciona una lista detallada de las bandas necesarias para la operación de 5G NR. En base a las especificaciones del Release 16 con denominación: TS 38.104 V16.7.0 (2021-03), utilizada para el siguiente apartado, se detalla los rangos de frecuencias definidos como

FR1 y FR2, considerando la posibilidad que para futuros lanzamientos se puedan añadir o aumentar el número de bandas a las que se presentan a continuación.

Tabla 13. *Rango de frecuencias designado por 3GPP (Release 16)*

| Designación | Rango de Frecuencia (MHz) |
|--------------------|----------------------------------|
| FR1 | 410 – 7125 |
| FR2 | 24250 – 52600 |

Fuente: (3GPP, 2021)

Las bandas de operación NR tanto para FR1 y FR2 para los enlaces ascendente y descendente se encuentran definidas en las tablas 14 y 15. Asimismo, partiendo de los dos modos de duplexación mencionados en el capítulo anterior: FDD y TDD se incluye adicionalmente el modo SDL el cual representa un enlace ascendente suplementario.

Tabla 14. *Rangos de frecuencias NR- FR1*

| Banda de operación NR | Banda operativa enlace ascendente (MHz) | Banda operativa enlace descendente (MHz) | Modo dúplex |
|------------------------------|--|---|--------------------|
| n1 | 1920 -1980 | 2110 – 2170 | FDD |
| n2 | 1850 – 1910 | 1930 – 1990 | FDD |
| n3 | 1710 – 1785 | 1805 – 1880 | FDD |
| n5 | 824 – 849 | 869 – 894 | FDD |
| n7 | 2500 – 2570 | 2620 – 2690 | FDD |
| n8 | 880 – 915 | 925 – 960 | FDD |
| n12 | 699 – 716 | 729 – 746 | FDD |
| n14 | 788 – 798 | 758 – 768 | FDD |
| n18 | 815 – 830 | 860 – 875 | FDD |
| n20 | 832 – 862 | 791 – 821 | FDD |
| n25 | 1850 – 1915 | 1930 – 1995 | FDD |
| n26 | 814 – 849 | 859 – 894 | FDD |
| n28 | 703 – 748 | 758 – 803 | FDD |
| n29 | N/A * | 717 – 803 | SDL |
| n30 | 2305 – 2315 | 2350 – 2360 | FDD |
| n34 | 2010 – 2025 | 2010 – 2025 | TDD |
| n38 | 2570 – 2620 | 2570 – 2620 | TDD |
| n39 | 1880 – 1920 | 1880 – 1920 | TDD |

| | | | |
|-----|---------------|---------------|-----|
| n40 | 2300 – 2400 | 2300 – 2400 | TDD |
| n41 | 2496 – 2690 | 2496 – 2690 | TDD |
| n48 | 3550 – 3700 | 3550 – 3700 | TDD |
| n50 | 1432 – 1517 | 1432 – 1517 | TDD |
| n51 | 1427 – 1432 | 1427 – 1432 | TDD |
| n53 | 2483.5 – 2495 | 2483.5 – 2495 | TDD |
| n65 | 1920 – 2010 | 2110 – 2200 | FDD |
| n66 | 1710 – 1780 | 2110 – 2200 | FDD |
| n70 | 1695 – 1710 | 1995 – 2020 | FDD |
| n71 | 663 – 698 | 617 – 652 | FDD |
| n74 | 1427 – 1470 | 1475 – 1518 | FDD |
| n75 | N/A * | 1432 – 1517 | SDL |
| n76 | N/A * | 1427 – 1432 | SDL |
| n77 | 3300 – 4200 | 3300 – 4200 | TDD |
| n78 | 3300 – 3800 | 3300 – 3800 | TDD |
| n79 | 4400 – 5000 | 4400 – 5000 | TDD |
| n80 | 1710 – 1785 | N/A * | SUL |
| n81 | 880 – 915 | N/A * | SUL |
| n82 | 832 – 862 | N/A * | SUL |
| n83 | 703 – 748 | N/A * | SUL |
| n84 | 1920 – 1980 | N/A * | SUL |
| n86 | 1710 – 1780 | N/A * | SUL |
| n89 | 824 – 849 | N/A * | SUL |
| n90 | 2496 – 2690 | 2496 – 2690 | TDD |

* Valor no disponible.

Fuente: (3GPP, 2021)

Tabla 15. Rangos de frecuencias NR en FR2

| Banda de operación NR | Banda operativa Enlace ascendente / descendente (MHz) | Modo dúplex |
|-----------------------|---|-------------|
| n257 | 26500 – 29500 | TDD |
| n258 | 24250 – 27500 | TDD |
| n259 | 39500 – 43500 | TDD |
| n260 | 37000 – 40000 | TDD |
| n261 | 27500 – 28350 | TDD |

Fuente: (3GPP, 2021)

De esta manera, al incrementar los valores de frecuencia de acuerdo a los rangos presentados en las tablas 14 y 15 frente a generaciones anteriores, se pueden evidenciar distintos puntos favorables destacando principalmente:

- Las bandas utilizadas actualmente son más concurridas, por lo tanto, los distintos dispositivos son capaces de ocasionar interferencia, al manejar mayores frecuencias la mayor parte del espectro se encontrará libre, solucionando problemas de congestión.
- Velocidades superiores, esto en torno al uso del ancho de banda, aumentando la cantidad de datos que pueden ser transmitidos.
- Menor latencia, al ser la distancia uno de los factores que intervienen para su incremento, al presentar mayores frecuencias se cubre distancias más cortas, generando respuestas inmediatas.
- Conexión más estable a múltiples dispositivos, esto es, sin alterar la velocidad de conexión.

De igual manera se puede señalar algunas de las desventajas, entre las más predominantes se encuentran:

- Elevadas frecuencias son equivalentes a obtener una menor longitud de onda, por lo tanto, se presentará una baja propagación, con ello, la comunicación será más susceptible a pérdidas causadas por obstáculos como árboles, edificios, etc.
- Las distancias de enlace son menores, por lo tanto, requerirá de una cantidad superior de transmisores para cubrir con las áreas actuales, conllevando a posibles costos altos de implementación.

5.1.3 Modelos de canal 5G

Para los nuevos rangos de frecuencia, es fundamental el análisis de modelos de canal que faciliten la propagación y operación con elevadas frecuencias, a su vez ofrecer una comunicación con mínimos errores entre los dispositivos terminales de usuario.

Particularmente un conjunto de fenómenos como la reflexión, difracción, absorción, refracción pueden afectar la propagación de las ondas electromagnéticas en el medio, en especial para las ondas milimétricas que, considerando su longitud de onda reducida, la propagación es únicamente para unos cortos metros, razón por la que se pueden presentar

la obstrucción con mayor facilidad por parte de cualquier tipo de objeto físico, englobando los fenómenos mencionados. Todo el entorno de propagación física conlleva a una descripción y análisis de canales.

En la actualidad existen diversos proyectos de investigación que están centrados en la modelación del canal 5G, algunos de ellos son:

- **3GPP:** Con un amplio estudio sobre el modelo de canal específicamente para frecuencias de 0.5 a 100GHz, detallado en el reporte técnico TR 38.901 V16.1.0.
- **5GCM:** Representa un importante taller internacional sobre 5G, conectividad y movilidad, establece el informe técnico (Versión 2.3) sobre el modelo de canal 5G para bandas de frecuencia de hasta 100 GHz. (5GCM, 2016).
- **MiWEBA:** Conforman un proyecto de investigación en la Evolución de ondas milimétricas para backhaul y acceso, especificado en el paquete de trabajo D5.1 (Modelado y caracterización de canales) para enlaces de comunicación de ondas milimétricas de 60 GHz.(MiWEBA, 2014)
- **METIS 2020:** Pertenece a los habilitadores de comunicaciones móviles e inalámbricas para la sociedad de Información 2020, representa un proyecto europeo en la búsqueda de las bases de 5G especialmente los requisitos del modelo de canal, basado en dos factores (entorno y perspectiva del usuario, tecnología para proporcionar servicios al usuario final) (Vuokko et al., 2015). El proyecto establece en el D1.4 su modelo de canal, definiendo bandas de frecuencia hasta los 86 GHz.
- **COST 2100:** Basado en el modelo de canal estocástico GSCM (*Geometry Based Stochastic Channel*), posee un enfoque flexible, cuyas frecuencias aplicables al proyecto no se encuentran especificadas.
- **NYU Wireless:** Con enfoque en las comunicaciones inalámbricas especialmente en 5GmmWave, NYU representa un centro de investigación con objetivos definidos a modelos de canales estadísticos espaciales y temporales, para frecuencias entre 0.5 a 100 GHz.

Como base de un modelo de canal, se debe tener en cuenta la flexibilidad para cumplir con todos los requisitos 5G, incluyendo los diferentes escenarios en los que se puedan desarrollar, escenarios que se analiza posteriormente. En función de los modelos

mencionados, los que se consideran más populares para canales mmWave se encuentran: 3GPP y NYU Wireless.

5.1.4 Modelos de propagación para 5G

Para generaciones anteriores, se han desarrollado diferentes modelos de propagación, cada una con distintos enfoques y técnicas. Entre los modelos clásicos se conocen; Okumura-Hata, Longley Rice, Walfisch Bertoni, Cost 231, entre otros, los cuales proporcionan diferentes procedimientos para el cálculo de pérdidas de propagación. Del mismo modo, para 5G presenta nuevos modelos para la representación de las características propias de esta generación.

Una de las maneras para llevar a cabo la evaluación del desempeño de los sistemas es mediante el análisis de los modelos de pérdidas en el trayecto (PL), en donde se consideran parámetros como frecuencias, distancias y escenarios/entornos para la obtención de los valores correspondientes. Para 5G, se presenta a continuación tres de los modelos en la que se basan la mayoría de proyectos de investigación de 3GPP y NYU Wireless.

5.1.4.1 Modelo CI (Close-In)

Representa un modelo de distancia con referencia de espacio libre, es decir, para este modelo se toma como antecedente la conocida ecuación de Friss, utilizada para el cálculo de pérdidas de trayectoria en un espacio libre, cuando en su trayecto de propagación no se presentan obstrucciones, considera parámetros como frecuencia, distancia, longitud de onda.

Para el desarrollo del modelo de pérdidas en el trayecto se toma condiciones de los escenarios más reales introduciendo un nuevo parámetro (exponente de pérdidas) que permite la descripción de la señal mientras esta se propaga por un canal, para un ambiente en las que se encuentre con línea de vista el modelo se puede representar como:

$$PL(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi f}{c}\right) + 10n \log\left(\frac{d}{1m}\right) + X_{\sigma} \quad (2)$$

Donde:

n: Exponente de pérdidas en el trayecto ó PLE

f (Hz): Frecuencia portadora

c (m): Velocidad de la luz

d (m): Distancia existente entre el transmisor y receptor

X_σ (dB): Shadow fading (desvanecimiento de sombras)

5.1.4.2 Modelo CIF

Un siguiente modelo se presenta como una extensión del modelo CI, en este caso, utilizando un PLE que depende de la frecuencia. Para este modelo las pérdidas en el trayecto se representan mediante la expresión:

$$PL(dB) = 20 \log\left(\frac{4\pi f}{c}\right) + 10n \left(1 + b \left(\frac{f - f_0}{f_0}\right)\right) \log\left(\frac{d}{1m}\right) + X_\sigma \quad (3)$$

Donde:

f (Hz): Frecuencia portadora

c (m): Velocidad de la luz

n: Exponente de pérdidas en el trayecto

b: Parámetro de optimización de pendiente

d (m): Distancia existente entre el transmisor y receptor

X_σ (dB): Desvanecimiento de sombras

f_0 (Hz): Frecuencia de referencia fija (centro de todas las frecuencias), la cual está caracterizada como la suma de diferentes frecuencias de acuerdo a la expresión:

$$f_0 = \left(\frac{\sum_{K=1}^K f_K N_K}{\sum_{K=1}^K N_K}\right) \quad (4)$$

En este caso:

K: Cantidad de frecuencias en las que se hicieron las mediciones.

N_K : Número de puntos en las que se representa el PL en una k-ésima frecuencia (f_K)

Para este modelo, el valor de PL aumenta a medida que la frecuencia aumenta, a su vez, cuando $b = 0$ o la frecuencia portadora es igual a la de referencia fija, el modelo CIF se reduce al modelo CI.

5.1.4.3 Modelo ABG (Alfa-Beta-Gama)

El modelo implementa 3 factores adicionales para el cálculo, siendo: Alfa, Beta y Gamma las indicadas para presentar las pérdidas de trayecto para condiciones en las que no existe línea de vista (NLOS). Desarrollando la siguiente expresión:

$$PL(dB) = 10 \alpha \log(d) + \beta + 10\gamma \log(f) + X_{\sigma} \quad (5)$$

Donde:

α : Incremento del PL (debido a la distancia)

β (dB): Desplazamiento flotante

γ (GHz): Variación del PL

d (m): Distancia existente entre el transmisor y receptor

X_{σ} (dB): Shadow fading

5.1.5 Escenarios de ondas milimétricas

Como otra de las características que forman parte para la modelación del canal se ve necesaria la identificación de los escenarios de aplicación, entre los cuales se presentan:

5.1.5.1 Microcelda urbana (UMi)

Principalmente es necesario tener en consideración que una microcelda representa la cercanía o proximidad hacia los equipos terminales del usuario con la finalidad de aumentar la cobertura, y a su vez, la velocidad de los datos que se encuentran concentrados en determinados lugares, proporcionando mayor eficiencia en los dispositivos.

Al representar cercanía hacia los usuarios, la altura y ubicación de las estaciones bases se contempla como unos de los factores necesarios para la descripción y definición del escenario, entonces, un escenario propicio para una microcelda tipo urbana se presenta cuando la estación base se encuentra por debajo del nivel de edificios circundantes. Se incluyen diferentes zonas de la ciudad, en donde existe mayor densidad poblacional. El área o zonas cubierta por las microceldas está entre los 50 a 100m.

5.1.5.2 Macrocela urbana (UMa)

Tomando en cuenta el mismo tipo de asentamiento urbano y un conjunto de varias microceldas, se llega hacia la definición de macrocela, en la que se representa principalmente por un rango más amplio en cobertura. De manera análoga al escenario anterior, al cubrir rangos aproximados de 500m es necesario que influyan parámetros como la altura, entonces para este escenario se desarrolla cuando la altura de la estación base se encuentra por encima de los edificios circundantes, la figura 24 muestra una forma de representación de los dos escenarios urbanos descritos.

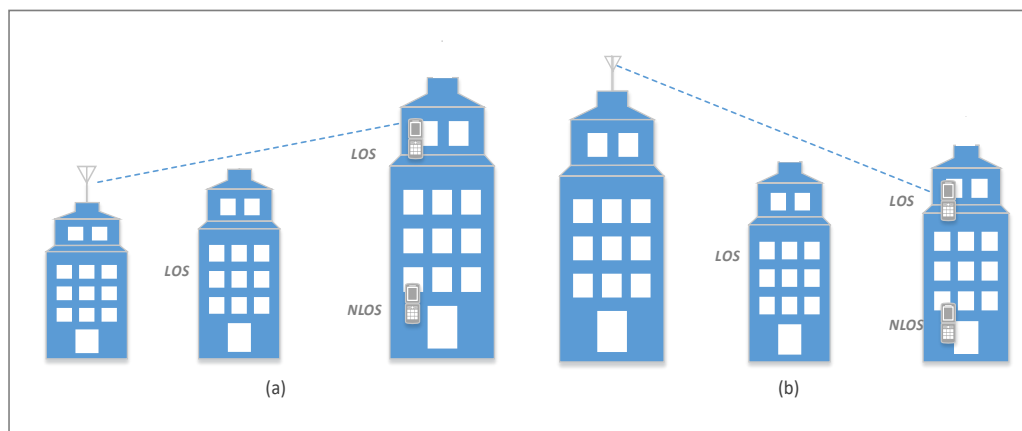


Figura 24. Escenarios ondas milimétricas
(a) Escenario UMi, (b) Escenario UMa
Fuente: Elaboración propia

5.1.5.3 Macrocela rural (RMa)

Para zonas rurales, las investigaciones realizadas han sido en menor proporción, debido a que, al hacer referencia a estos sectores particularmente por sus ubicaciones geográficas se encuentran más alejados, lo que conlleva a que sea más complicado el despliegue de nuevas tecnologías, sumando la falta de infraestructura que existe. Sin embargo, se han optado por modelos que puedan evidenciar un posible entorno rural ubicando las macroceldas mencionadas en el punto anterior, esto por la gran cobertura que estarían ofreciendo y la necesidad de cubrir mayores superficies.

5.1.5.4 Punto de acceso interior (InH)

Además de los entornos externos ya mencionados, InH representa aquellos escenarios que se desarrollan en el interior de edificios, esto puede incluir centros comerciales, oficinas entre otros, con el objetivo de cubrir áreas de corto alcance con rangos entre 5 a 50m.

5.1.6 Simulador mmWave

Teniendo en consideración los cuatro escenarios base mencionados en el apartado anterior, y demás contenidos desarrollados a lo largo del capítulo 2, se realiza la representación gráfica mediante el empleo del software NYUSIM (New York University Simulator), un simulador de código abierto basado en Matlab que proporciona respuestas de impulso de canal de banda ancha espacial y temporal realistas, permitiendo a su vez la representación con valores dentro de una amplia gama de frecuencias, propios para 5G.

En vista al papel que cumple el análisis de los modelos de canal, NYUSIM se toma como simulador base debido a que las configuraciones que en él se representan se tomaron a partir de valores del mundo real, siendo más eficiente el análisis de los parámetros que intervienen para la transmisión en la red de 5G, además de ser considerado pionero en los estudios asociados de mmWave. De manera general, el manejo y resultados que son proporcionados por el simulador se encuentran disponibles para uso público y son adecuados para el 3GPP y otros organismos estándar o en simulaciones académicas que sean requeridas.

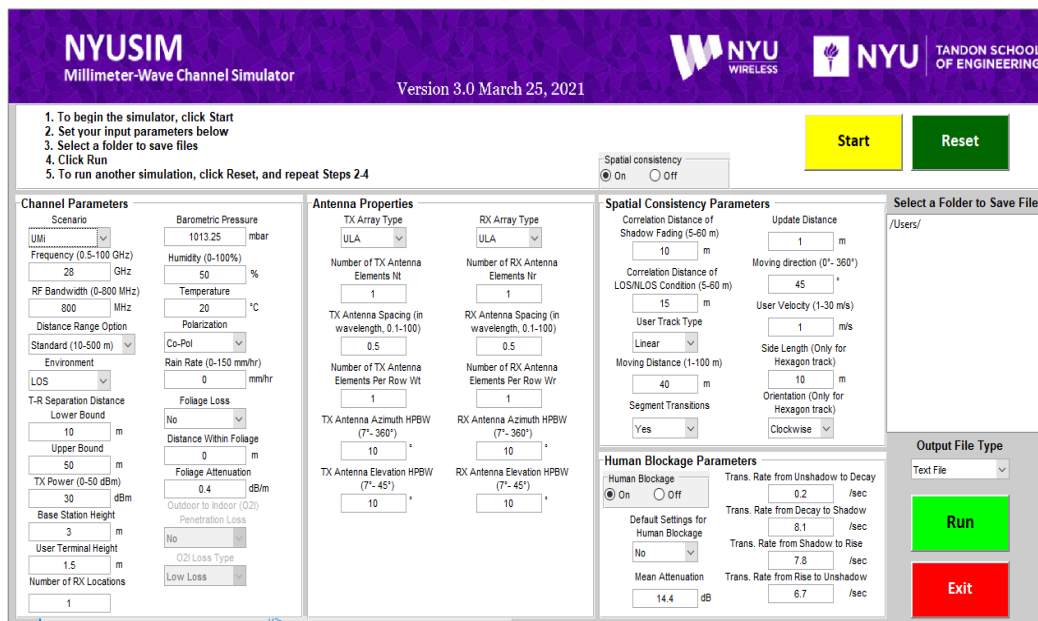


Figura 25. Software NYUSIM

Nota: Principales bloques que conforman simulador Nyusim, en la parte superior se especifica el procedimiento a seguir e iniciar la simulación.

Fuente: NYUSIM

CAPÍTULO 3

5.2 TECNOLOGÍAS APLICADAS EN LA INTERFAZ AIRE

A partir del análisis de uno de los requerimientos necesarios como base para el despliegue de las comunicaciones móviles 5G, surgen parámetros adicionales de investigación que permiten consolidar a 5G como una nueva revolución tecnológica no solamente en telefonía, sino en una amplia variedad de aplicaciones y áreas; medicina, comunicaciones máquina a máquina, realidad virtual, automatización, entretenimiento, entre otros.

En base a las características para una cuarta generación, mencionadas a lo largo del apartado 4.1.4, es visible que muchos de estos aspectos se utilizan como base para 5G, perfeccionando y aumentando las capacidades del sistema para obtener soluciones más eficientes y cómodas para el usuario. De este modo, mediante los elementos que conforman la arquitectura base de una red de comunicación móvil (figura 26), se puede identificar la interfaz aire o de radio, que representa uno de los parámetros importantes de análisis con cada una de las tecnologías que se llevan a cabo y hacen posible el desarrollo de todos los requisitos necesarios para una nueva red.

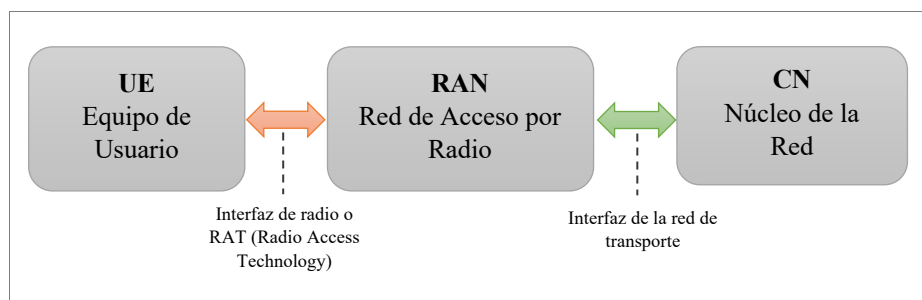


Figura 26. Estructura general de red

Fuente: Elaboración propia

Durante la presente sección se proporciona una visión caracterizada en todas las tecnologías propias que contiene la capa física, que combina los diversos procesos de forma de onda, modulación, codificación, acceso múltiple y uso de múltiples antenas, que forman parte de los requisitos del esquema de comunicaciones móviles de 5G.

5.2.1 Formas de onda candidatas para 5G

En base a una estructura y principales parámetros como la de OFDM, se evalúa diversos métodos que sean más flexibles y que permitan cumplir con los escenarios y objetivos de 5G, implementando más adelante tecnologías más eficientes según las exigencias de la generación. El trabajo y mejoramiento de parámetros como ortogonalidad o la

eliminación de interferencias entre símbolos, conllevan al desarrollo y estudio de formas de onda que prometen ser candidatas para las comunicaciones móviles 5G siendo: FBMC, UFMC y GFDM con más renombre.

5.2.1.1 FBMC (Filter Bank Multi Carrier)

FBMC se presenta como un OFDM evolucionado. La forma de trabajo es similar a la de OFDM, precisando la división del ancho de banda en subportadoras, sin embargo, se añade un proceso especial de filtrado (pasa banda) en cada una de las subportadoras tanto en el transmisor como en el receptor haciendo que se prescindiera del prefijo cíclico.

Haciendo referencia a la ortogonalidad, para OFDM se presenta este parámetro para cada una de las subportadoras, en el caso de FBMC existe una variación, la ortogonalidad se da únicamente para subportadoras adyacentes, con el fin de optimizar el ancho de banda. Asimismo, al ser el filtrado una de las características principales para FBMC, adicional se requiere el uso conjunto del proceso de modulación como O-QAM (Offset Quadrature Amplitude Modulation) para realizar la transmisión por separado y alternativamente en cada subportadora, por ende, la combinación del filtrado y O-QAM hacen que no se requiera de un prefijo cíclico para evitar la interferencia entre símbolos, proporcionando mayor eficiencia espectral.

En el proceso de transmisión, la señal de entrada $x(n)$ de alta velocidad es demultiplexada en N ramas, para después ser modulada por la misma o diferente constelación de señales, seguido de un proceso de muestreo, siendo los datos enviados hacia un conjunto de filtros de síntesis para producir la señal que será transmitida. El proceso de filtrado que se añade viene representado por la longitud: KN

Donde:

N = Numero de subportadoras

K = Factor de solapamiento

Para este último factor de solapamiento K , se presenta debido a que en FBMC cada símbolo se puede superponer con K símbolos vecinos en el dominio del tiempo, lo que conlleva al diseño del filtro en donde el máximo valor corresponda a las subportadoras que se desee filtrar y con el valor de 0 al resto de subportadoras, teniendo la expresión:

$$h(n) = \begin{cases} 1; n = 0 \\ 0; n \neq 0 \end{cases}$$

Mediante el filtro prototipo $h(n)$ se construye el banco de filtros que permite filtrar de manera individual a cada subportadora.

Mientras tanto, en la recepción se presenta el proceso inverso, en donde las N subportadoras pasan nuevamente hacia un banco de filtros de análisis, donde se procede la demodulación para producir la estimación de la señal original $x_r(n)$. Adicionalmente los símbolos propios en FBMC, pueden ser obtenidos de dos maneras; un procesamiento en frecuencia y otro en el dominio de tiempo, obteniendo respuestas similares para ambos procesos, difiriendo únicamente en la ubicación de la etapa del filtrado con respecto a la IDFT (Transformada de Fourier Discreta Inversa). De manera gráfica y como diferencia del espectro que presenta FBMC frente a OFDM, la figura 27, muestra para FBMC un ancho de banda más relluido con lóbulos laterales menores que en OFDM.

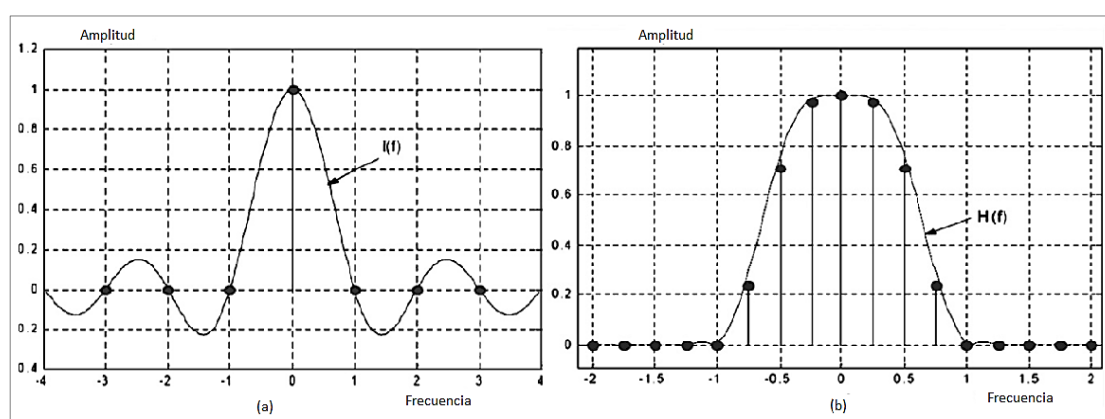


Figura 27. a) Espectro OFDM, b) Espectro FBMC

Fuente: (Ospina & Betancur, 2013)

De forma particular FBMC presenta un nivel mayor de complejidad que OFDM al incorporar un mayor procesamiento por el banco de filtros, cualidad que denota un diseño y construcción crucial en el sistema, sin dejar al lado, la posibilidad de una correcta localización de cada subportadoras y disminución interferencias entre símbolos y portadoras.

5.2.1.2 UFMC (Universal Filtered Multi-Carrier)

Como se lo observa en la figura 27, el espectro OFDM presenta lóbulos laterales altos los mismos que se encuentran fuera de banda y son los causantes de producir problemas de baja eficiencia espectral. De este modo, para cumplir con los objetivos de 5G se requiere

obligatoriamente entre sus capacidades, un sistema que permitan una mayor eficiencia en el uso del espectro. Conforme las ventajas que presenta el desarrollo de FBMC, y una manera alterna de trabajar contra las limitaciones que presentaba OFDM, se introduce UFMC como una nueva técnica multiportadora, que reúne las principales características de OFDM y FBMC, teniendo las ventajas de ortogonalidad y un banco de filtros respectivamente de cada uno.

El proceso básico de filtrado se realiza en base a un grupo de subportadoras, es decir, en este punto UFMC se encarga de dividir el total del ancho de banda en conjuntos de “ B ” sub bandas y cada una con un tamaño de “ Kb ” sub portadoras, realizando el proceso de filtrado común en cada uno de los grupos de manera independiente. Al filtrar a toda una sub banda se tendrá como consecuencia anchos de banda mayores y una respuesta al impulso menor, sobre todo reducir la longitud del filtro en comparación con FBMC, en la figura 28 se observa la comparación de la agrupación que realiza FBMC y UFMC para realizar el proceso de filtrado.

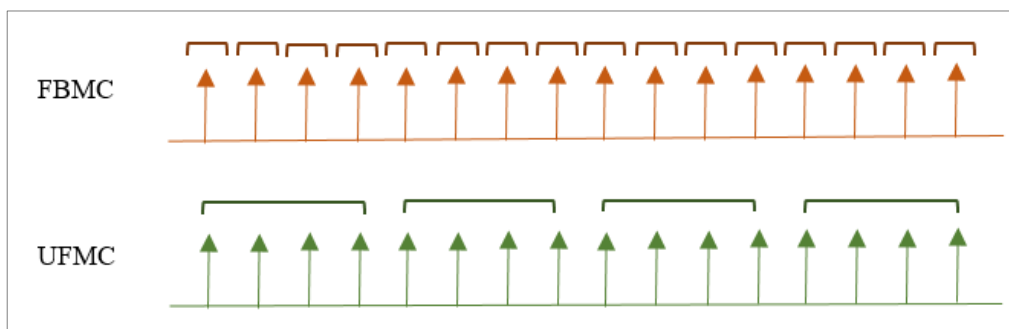


Figura 28. Comparación Filtrado

Fuente: Elaboración propia

Como UFMC representa el filtrado hacia un conjunto de subportadoras al agrupar un mayor número de subportadoras se puede obtener un menor procesamiento de la señal lo que reduciría el rendimiento de la transmisión. Sin embargo, al coexistir varios usuarios se produciría una menor interferencia entre ellos.

5.2.1.3 GFDM (Generalized Frequency Division Multiplexing)

Se establece un esquema flexible para 5G que permita explorar los espacios blancos del espectro radioeléctrico, es decir, permitiendo mayor espaciamiento espacial a diferencia de OFDM. Para el proceso de transmisión, las subportadoras ya no presentan

ortogonalidad, sin embargo, gracias al espaciamiento de frecuencia se podrán admitir mayores subportadoras lo que conlleva a una mayor eficiencia espectral.

Para obtener una correcta eficiencia espectral GFDM implementa la transmisión en base a un bloque bidimensional (tiempo y frecuencia) de múltiples símbolos por múltiples portadoras. Los bloques implementados son modulados mediante un banco de filtros por medio de la conformación de pulsos, desplazado mediante convolución circular en tiempo y frecuencia.

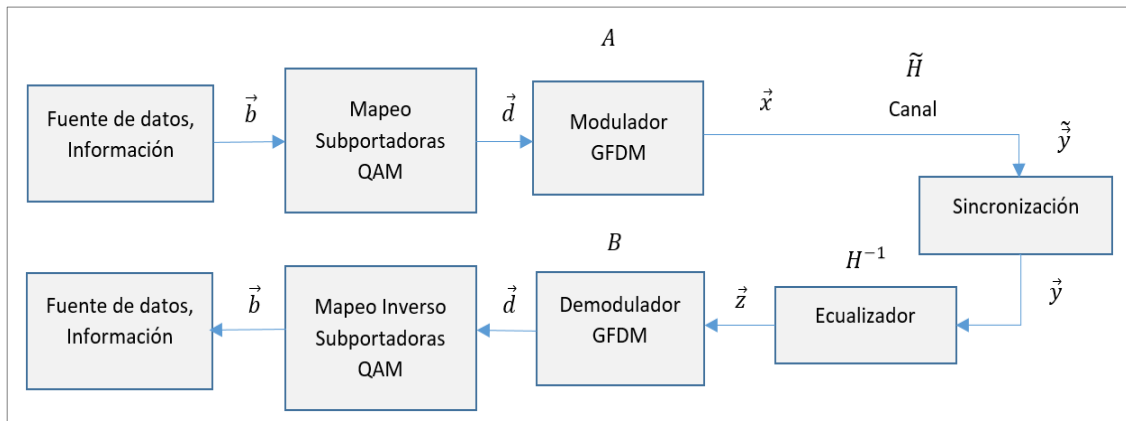


Figura 29. Proceso de transmisión/recepción GFDM

Fuente: Elaboración propia

El proceso general que realiza GFDM se visualiza en la figura 29 en donde los datos que entran en serie, se forman de manera paralela para luego ser codificados obteniendo una salida \vec{d} , el bloque GFDM (figura 30) recibe el vector de N elementos descomponiéndolo en:

- K subportadoras
- M sub-símbolos

El vector que resulta contiene todos los N elementos correspondientes al dato transmitido formando el bloque KM . Durante todo el proceso cada M sub-símbolos pasa por el banco de filtros el cual estará dado por la conformación de pulsos de cada dato.

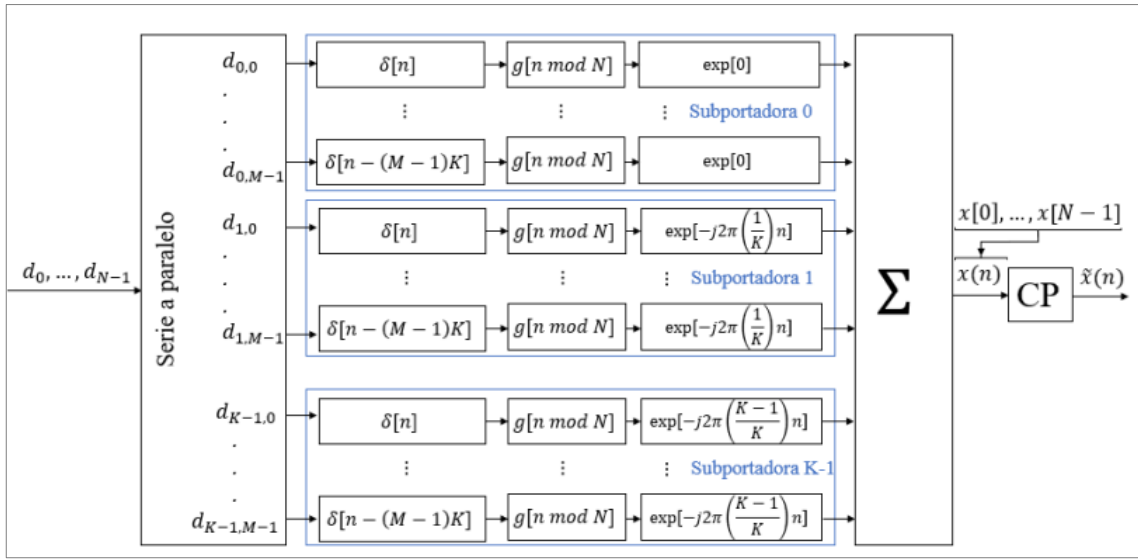


Figura 30. Diagrama de bloques GFDM
Fuente: (De los Ríos, 2018)

Cada sub-símbolo se sobremuestra consiguiendo que los datos que están cerca no intervengan en el filtrado, obteniendo a la salida \vec{x} muestras para ser posteriormente transmitidas por el canal, la misma que a su salida estará representada mediante:

$$\vec{y} = \tilde{H}\vec{x} + \vec{\omega} \quad (6)$$

Donde,

\vec{y} = Señal obtenida a la salida del canal.

\vec{x} = Salida GFDM obtenida

\tilde{H} = Matriz del canal modelo

$\vec{\omega}$ = Componente de ruido Gaussiano

Una vez obtenida la señal se realiza la sincronización reescribiendo: $\vec{y} = \tilde{H}\vec{x} + \vec{\omega}$ al seguir el proceso de ecualización en donde se modifica el nivel de frecuencias se aplica la demodulación obteniendo nuevamente la salida correspondiente a la matriz de recepción con dimensiones $KM \times KM$ recibiendo nuevamente los datos enviados en un inicio.

La formación de símbolos GFDM cubre la ventaja de tramas con una duración más flexible, excelente para aquellas aplicaciones que necesitan baja latencia, disminuyendo el tiempo de la comunicación.

5.2.2 Esquemas de Modulación para 5G

La demanda actual en redes de comunicaciones móviles orienta hacia investigaciones sobre todo en la capa física en la red celular 5G, por ende, junto con los métodos de multiplexación, se tienen los esquemas de modulación que permitirán establecer la cantidad de información que se va a transmitir.

De acuerdo al Release 16, en la especificación técnica TS 38.211 (canales físicos y modulación) se presentan varios tipos de modulaciones que son propuestas para 5G. Estas modulaciones se establecen principalmente mediante PSK y QAM como base (Modulación por desplazamiento de fase y modulación de amplitud en cuadratura respectivamente). Conforme a las recomendaciones de 3GPP en la tabla 16 se presenta los 5 esquemas de modulación comúnmente utilizados en 5G:

Tabla 16. Esquemas de modulación 5G

| Esquema modulación | Símbolos de modulación |
|--------------------|---|
| $\pi/2$ BPSK | $\mathbf{d}(i) = \frac{e^{j\frac{\pi}{2}(i \bmod 2)}}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(i)) + j(1 - 2b(i))]$ |
| QPSK | $\mathbf{d}(i) = \frac{1}{\sqrt{2}} [(1 - 2b(2i)) + j(1 - 2b(2i + 1))]$ |
| 16QAM | $\mathbf{d}(i) = \frac{1}{\sqrt{10}} \{(1 - 2b(4i))[2 - (1 - 2b(4i + 2))] + j(1 - 2b(4i + 1))[2 - (1 - 2b(4i + 3))]\}$ |
| 64QAM | $\mathbf{d}(i) = \frac{1}{\sqrt{42}} \{(1 - 2b(6i)) [4 - (1 - 2b(6i + 2))[2 - (1 - 2b(6i + 4))]] + j(1 - 2b(6i + 1)) [4 - (1 - 2b(6i + 3))[2 - (1 - 2b(6i + 5))]]\}$ |
| 256QAM | $\mathbf{d}(i) = \frac{1}{\sqrt{170}} \{(1 - 2b(8i)) [8 - (1 - 2b(8i + 2)) [4 - (1 - 2b(8i + 4)) [2 - (1 - 2b(8i + 6))]]] + j(1 - 2b(8i + 1)) [8 - (1 - 2b(8i + 3)) [4 - (1 - 2b(8i + 5)) [2 - (1 - 2b(8i + 7))]]]\}$ |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la tabla 16, los símbolos de modulación están definidos principalmente por: $b(i) = \text{Señal de entrada}$ y $d(i) = \text{Señal modulada}$, siendo su valor un numero complejo, esto siguiendo el orden de modulación (Tabla 17)

Tabla 17. Orden de modulación 5G

| Esquema modulación | Orden de modulación Q_m |
|--------------------|---------------------------|
| $\pi/2$ BPSK | 1 |
| QPSK | 2 |
| 16QAM | 4 |
| 64QAM | 6 |
| 256QAM | 8 |

Fuente: Elaboración propia

A fin de mejorar las prestaciones, cada uno de los esquemas de modulaciones se implementan en las redes celulares, dependiendo las necesidades del sistema o características que se desea llevar a cabo 5G.

Siguiendo el orden de modulación Q_m se tiene el esquema $\pi/2$ BPSK, para mejorar la cobertura celular de 5G. Se implementa tanto para el canal de datos y de control en la ruta de enlace ascendente. $\pi/2$ BPSK es generado a partir de la señal BPSK estándar, siendo el producto de la secuencia de símbolos con un fesor rotatorio con incrementos de fase por periodo de símbolo de $\pi/2$, posee una misma tasa de error de bit que BPSK, sin embargo, presenta un PAPR menor en comparación con otros esquemas lo que hace que sea la más indicada para la transmisión con canales no lineales, mejorando a su vez la eficiencia del amplificador de potencia en el terminal móvil a velocidad de datos más bajas.

Continuando con el orden de modulación (2), se involucra el empleo de QPSK el cual comprende de cuatro fases, siendo estas equidistantes entre sí. El esquema que representa este tipo de modulación significa un mejor uso del espectro al utilizar el doble de tasa de bits que la modulación BPSK.

Finalmente, de manera similar se fortalece el esquema QAM como otra técnica de modulación, cuyo fin se encuentra dentro de la eficiencia espectral y rendimiento, llevándose a cabo mediante 2 portadoras moduladas en amplitud que se encuentran desfasadas 90° o son ortogonales entre sí. Mediante el flujo de datos binarios los cuales son divididas en grupos de bits mediante 2^m son generados los N estados de modulación. En este tipo de modulación QAM se presenta de 16, 64 y 256, los cuales se encuentran establecidos por el 3GPP.

Frente a las características generales de las modulaciones implementadas se establece 256QAM como el esquema más empleado para los enlaces ascendente y descendente, añadiendo asimismo a $\pi/2$ BPSK para una señalización de control en enlaces ascendentes, incluyendo la distribución siguiente (de menor a mayor orden de modulación):

- Enlace descendente: QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
- Enlace ascendente: QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM para CP-OFDM mientras que BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM para DFT-S-OFDM

5.2.3 Codificación de canal 5G

Mediante las actualizaciones que han venido desarrollándose en cada una de las versiones publicadas por el 3GPP, a lo largo del Release 15-16 se sustituyen los códigos turbos y códigos convolucionales que se mantenían propiamente en 4G LTE, con los códigos polares para los canales de control y los códigos de comprobación de paridad de baja densidad (LDPC, *Low Density Parity Check Codes*) para los canales de datos, estos como los dos nuevos esquemas de codificación indicados para 5G, la motivación de la apertura a estos códigos se basa en la necesidad de incrementar el ancho de banda hasta unos 20Gbps, con respecto a generaciones anteriores.

En el siguiente apartado se detalla las bases iniciales del funcionamiento de los códigos polares y LPDC, siendo los principales para la implementación en 5G, las mismas se encuentran detalladas en las especificaciones técnicas TS 38.212 v16.7.0 del 3GPP.

5.2.3.1 Códigos Polares

Dentro del proceso de estandarización de 5G por parte del 3GPP, los códigos polares se han adoptado como parte del proceso de codificación de canal, esto tanto para el enlace ascendente y descendente para el escenario de eMBB, sin embargo, estos códigos también se mantienen como un esquema posible para el resto de escenarios (URLLC y mMTC). Los códigos están dirigidos para que sean de baja complejidad, pero al mismo tiempo puedan ofrecer un buen rendimiento en la corrección de errores de parámetros de código y canal.

Los códigos polares inicialmente fueron inventados por Erdal Arıkan (2008), considerando que mediante técnicas inteligentes se puede tomar un canal ruidoso a uno

sin ruido, o a su vez, canales extremadamente ruidosos en uno solo, da origen a la polarización de canal.

Se inicia con la descripción del modelo básico de canal, para ello, se utiliza un canal binario, discreto sin memoria (B-DMC, *Binary-input, Discrete, Memoryless Channels*) al que se lo definirá como W , representada en la figura 31, en donde X representará la entrada binaria discreta y Y la salida.

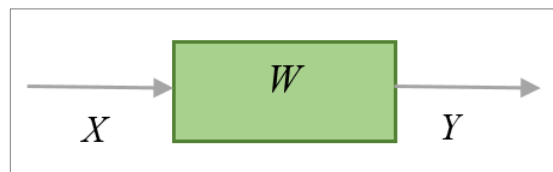


Figura 31. Canal Binario, Discreto sin memoria (B-DMC)

Fuente: Elaboración propia

Arikan al demostrar que los códigos polares alcanzan la capacidad de un canal simétrico (BSC), se construye el canal básico B-DMC W_2 como se observa en la figura 32, para alcanzar la capacidad simétrica $I(W)$ correspondiente, siendo esta la tasa más grande a la que se puede llegar, en otras palabras, la tasa más alta a la que se puede producir una comunicación confiable a través del canal W .

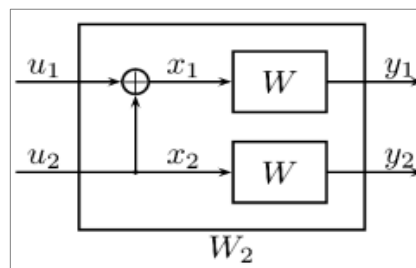


Figura 32. Representación de un canal básico W_2

Fuente: (Krasser, 2018)

Dentro de la polarización se aplican etapas de combinación y de separación de canales. En este proceso se da una transformación que produce N canales de bits independientes a partir de $N=2^n$ copias independientes de un canal W (B-DMC). El resultado obtenido son N canales divididos o polarizados para transmitir un solo bit. Adicionalmente, cuando N es muy grande, los canales presentan capacidades máximas o nulas, es decir, la capacidad tiende a un valor de 1 (canales silenciosos) o hacia el valor de 0 (canales ruidosos).

Los procesos de polarización se visualizan en la figura 33, en donde se trabaja mediante la operación or-exclusiva (XOR) las cuales están representadas por el símbolo \oplus . Por

otra parte, los bloques R_N representan el Reverse-Shuffle o permutación que separa los bits de índices pares de los impares para reagruparlos en orden.

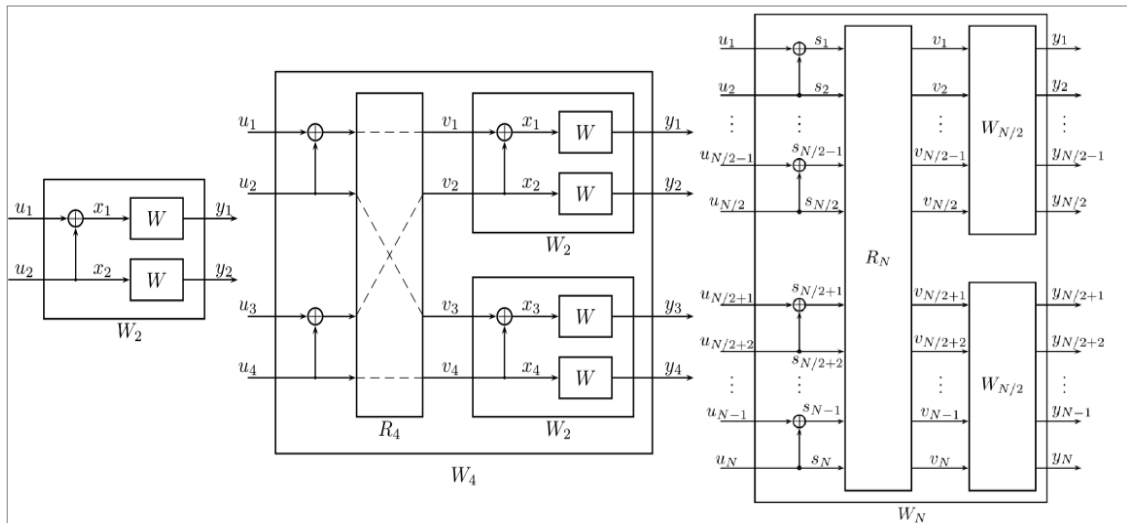


Figura 33. Canales de código polar W_N
Fuente: (Krasser, 2018)

De esta manera la polarización permite obtener canales que sean capaces, por lo tanto, es necesario conocer cuáles son estos canales para enviar la información. Para poder operar adecuadamente sobre un mensaje se debe seguir un proceso conocido como construcción del código polar, para ello, se distinguen 3 parámetros:

- N : Cantidad de bits del mensaje codificado
- K : Cantidad de bits del mensaje sin codificar
- F : $N - K$, Canales menos capaces o frozen bits

Con los bits ordenados debidamente se puede obtener el mensaje en la que se incluye los frozen bits. Es así, que este mensaje es el que se dispone a la entrada del codificador.

• Codificación

Durante el proceso de codificación se considera la multiplicación vectorial $x = u * G$, donde:

- ✓ u = Mensaje sin codificar (vector fila con K elementos)
- ✓ G = Matriz generadora (matriz de $K \times N$ elementos)
- ✓ x = Mensaje codificado (Vector dila con N elementos)

Como proceso fundamental se define la operación conocida como producto Kronecker y denotada con el símbolo \oplus . Si F es una matriz de dimensión M x N y B una matriz P x Q el producto Kronecker de F \oplus B es la matriz:

$$F \oplus B = \begin{bmatrix} f_{11}B & \dots & f_{1n}B \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ f_{m1}B & \dots & f_{mn}B \end{bmatrix}$$

La matriz F es el denominado núcleo o Kernel polar

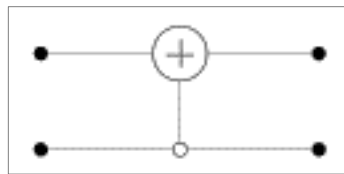


Figura 34. Representación gráfica Kernel Polar
Fuente: (Krasser, 2018)

En donde la n-ésima potencia Kronecker para todo $n \geq 1$ es definida como $F^{\oplus n}$. La matriz generadora es la matriz cuadrada $G = F^{\oplus n} * B$. B es el operador que realiza la permutación reordenando los bits en función de su índice, siendo su empleo importante para estimar los bits de u en orden natural. 5G realiza secuencia binaria de entrada $u = [u_0, u_1, \dots, u_{N-1}]$. En base a esto se puede observar gráficamente el codificador polar para el caso de N=8.

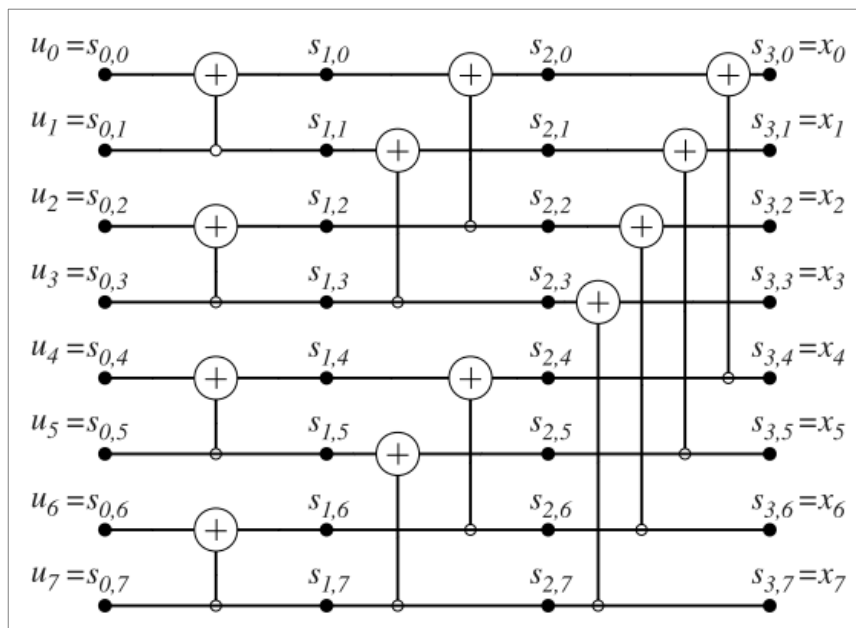


Figura 35. Codificación polar N=8
Fuente: (Krasser, 2018)

- **Decodificación**

Luego de pasar por el proceso de modulación y ser transmitido por el canal, el mensaje (X) llega al receptor, y, siguiendo el mismo proceso de manera inversa, es nuevamente demodulado y entregado al decodificador siendo este el mensaje Y, en este punto el decodificador polar debe estimar los N bits del mensaje original u que se encuentran ordenados. Para ello se aplica el algoritmo de cancelación sucesiva (SCD), en donde se pueden obtener las estimaciones \hat{u}_i de los bits del mensaje original. Al haber aplicado la permutación en el proceso de codificación, se comienza por \hat{u}_0 terminando por \hat{u}_{N-1} , para ello utiliza la regla de decisión:

$$\hat{u}_i \begin{cases} 0, & \text{si } i \in F \\ 0, & \text{si } \frac{P_r(y, \hat{u}_0^{i-1} | u_1 = 0)}{P_r(y, \hat{u}_0^{i-1} | u_1 = 1)} > 1 \\ 1, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Siguiendo la regla de decisión anterior si $P_r(y, \hat{u}_0^{i-1} | u_1 = b)$, es decir, $b \in \{0,1\}$, representa la probabilidad de haber recibido y .

5.2.3.2 Códigos de paridad de baja densidad

LDPC se basan específicamente en códigos correctores de errores, tipo FEC (*Forward Error Correction*), los cuales se establecen mediante reglas de paridad en bloques de grandes datos.

El objetivo esencial de LDPC es proteger la información que se va a transmitir de todas las pérdidas posibles que se pueden producir en el canal y a su vez facilitar la recuperación en la parte de recepción. Es así, que el bloque LDPC estaría establecido como se observa en la figura 36, en donde en la parte transmisora se generan los datos de protección que se basan en información redundante, es decir, que se añade a la información original. Y que al final en caso de errores es posible reconstruirla o recuperar la información original. El bloque básicamente posee un tamaño de N_{LDPC} bits y a su vez este está formado por dos sub-bloques, siendo estos la información (K_{LDPC}) y los bits de paridad ($N_{LDPC} - K_{LDPC}$)

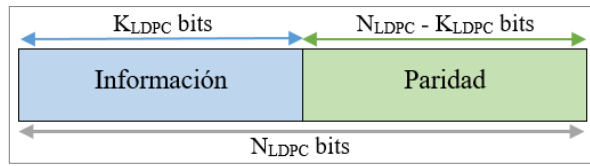


Figura 36. Bloque LDPC
Fuente: Elaboración Propia

Se considera que LDPC es un proceso aproximadamente lineal debido a que cada palabra codificada (c) puede obtenerse mediante el producto realizado entre el vector de la palabra original $u = u_0, u_1, \dots, u_{k-1}$ y la matriz generadora G con dimensiones $K_{LDPC} \times N_{LDPC}$. Asimismo, se puede conceptuar como sistemático debido a que cada palabra codificada que se obtiene es resultado de la agregación de información de paridad a la original.

$$c = u * G \quad (7)$$

Con ello, todos los bits de paridad se encuentran asociados a la ecuación de comprobación de paridad, produciendo la matriz generadora definida por:

$$G = [I][P] \quad (8)$$

Donde;

I = Matriz Identidad con dimensión $K_{LDPC} \times N_{LDPC}$

P = Sistema de ecuaciones de comprobación de paridad $K_{LDPC} \times (N_{LDPC} - K_{LDPC})$

De esta manera se define la matriz definida como H , la cual debe satisfacer la ecuación:

$$H * c^T = 0 \quad (9)$$

Siendo

$$H = [P^T][B] \quad (10)$$

De esta manera LDPC forma una matriz de comprobación de paridad dispersa H , y precisamente esta dispersión logra alcanzar una complejidad en la decodificación, lo que hace que sea una de las diferencias más grandes entre los códigos clásicos.

La matriz de paridad H es la parte esencial en el proceso de codificación, claramente al ser códigos binarios, los elementos que la conforman son 0 y 1.

Normalmente los códigos LDPC suelen representarse mediante un gráfico de Tanner en donde se sitúan los bits del bloque LDPC representando nodos variables y nodos de

comprobación. Teniendo el ejemplo para un caso de $N_{LDPC}=7$ y $N_{LDPC} - K_{LDPC}=3$, la matriz H podría ser conformada de la siguiente manera:

$$H = \begin{matrix} & V_0 & V_1 & V_2 & V_3 & V_4 & V_5 & V_6 \\ \begin{matrix} C_0 \\ C_1 \\ C_2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

En donde cada una de las columnas de la matriz H corresponden a un nodo variable (V), mientras que las filas al nodo de comprobación (C). Así mismo, los valores de 1 indican la conexión entre ambos nodos, que representado mediante el grafico de Tanner visualizaría conforme la figura 36:

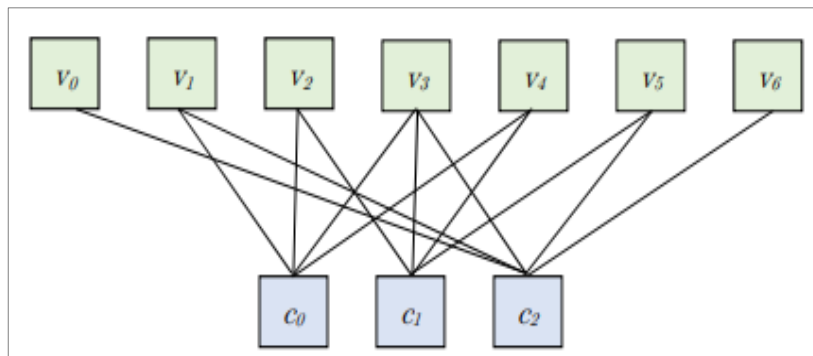


Figura 37. Gráfico de Tanner para códigos LDPC
Fuente: (Krasser, 2018)

Como se observa en la figura 37, los nodos “V” están interconectados entre sí de forma indirecta, esto quiere decir que se puede ir de un nodo a otro a través de los nodos “C”, de manera que se envían los mensajes entre los nodos hacen que sean de tipo interactivo hasta que se realice la comprobación de cada nodo.

De esta manera siguiendo con los objetivos que persigue 5G, dentro del plan de 3GPP en la última versión realizada da lugar el uso de los códigos LDPC. Para este caso es posible manejar matrices de paridad considerando dimensiones que sean notables para trabajar. Entonces, se toman como referencia dos matrices base BG1 y BG2 en donde se pueda representar una matriz de extensión $Z \times Z$.

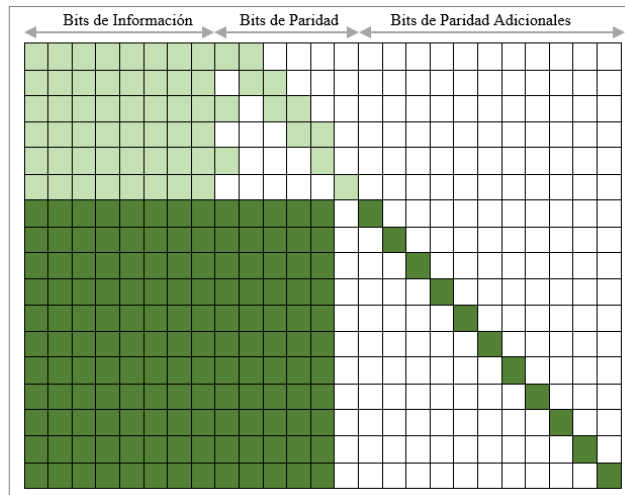


Figura 38. Estructura de matriz LDPC para 5G NR
Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura 38, se representa la matriz implementada en 5G, en la parte superior izquierda, la matriz permite definir valores altos de tasas de codificación, que pueden ir entre $2/3$ y $8/9$, a su vez se puede extender con bits de paridad adicionales, permitiendo tener más posibilidades de utilizar más bits en el caso que se lo requieran, aumentando nuevas filas y columnas,

5.2.4 Técnicas de Acceso múltiple 5G

5G enfrenta un nivel elevado de heterogeneidad referente a servicios y requerimientos, por lo tanto, el uso más eficiente y flexible del espectro electromagnético cumple uno de los mayores retos para incrementar la eficiencia espectral, siendo las técnicas de acceso múltiple capaces de mejorar y combinar los recursos de radio necesarios para satisfacer la calidad de los servicios y nuevas aplicaciones. En el apartado siguiente se analizan las propuestas utilizadas para interfaz radio más convenientes, definidas para 5G.

5.2.4.1 Fundamentos básicos OFDMA

Al dar inicio 4G LTE con la utilización de OFDMA, el método continúa desarrollándose para 5G. Como acceso múltiple por división de frecuencias ortogonales, basa principalmente sus funcionalidades en la combinación del sistema de multiplexación OFDM y de los accesos múltiples base TDMA y FDMA, permitiendo ser una técnica de acceso superior en comparación con las tecnologías de acceso tradicionales. Se adquirieron principales ventajas, encontrando una mayor escalabilidad y la capacidad para aprovechar la selectividad de frecuencias del canal que son requeridos para 5G.

La importancia de las técnicas de acceso múltiple radica principalmente en buscar que la mayoría de usuarios que se encuentren conectados a un mismo medio, tengan la posibilidad de transmitir y recibir la información compartiendo la capacidad que se encuentre disponible, entonces, en base a la multiplexación de los usuarios, que se lleva a cabo en la primera capa del sistema de comunicaciones (capa física), se provee una técnica favorable para cumplimiento de este fin.

Para la transmisión en los enlaces descendente y ascendente, 5G implementa OFDM con prefijo cíclico (CP-OFDM) y alternativamente se adiciona OFDM con pre procesado DFT (DFT-S-OFDM) para el enlace ascendente reemplazando a SC-FDMA que fue en el caso de 4G/LTE, este último proceso (DFT-S-OFDM) realiza un proceso previo de expansión mediante la transformada discreta de Fourier, es decir, se realiza el proceso de transformada de Fourier a los bits que van hacer transmitidos, sin dejar al lado aspectos como la ortogonalidad conjuntamente con el prefijo cíclico, características fundamentales para la tecnología.

Tanto canales físicos y señales físicas se logran localizar mediante las técnicas de acceso, esto mediante el segmento en la interfaz aire, para 5G, el gNB debe asignar el bloque de recursos físicos, el mismo que cuenta con dos estructuras: temporal y frecuencial.

Tomando como referencia la especificación técnica de la red de acceso por radio del Release 16 del 3GPP (TS 38.211 v16.6.0), los campos son expresados en unidades de tiempo. 5G mantiene la compatibilidad con LTE de 4G, con ello, las unidades de tiempo básicas de ambas tecnologías se relacionan entre sí, teniendo:

Unidad de tiempo básica para NR (T_c):

$$T_c = \frac{1}{\Delta f_{max} * N_f} \quad (11)$$

Donde:

$\Delta f_{max} = 480 \text{ KHz}$; Separación máxima entre subportadoras.

$N_f = 4096$; Número de trama del sistema (SFN)

Unidad de tiempo básica para LTE (T_s)

$$T_s = \frac{1}{\Delta f_{ref} * N_{f,ref}} \quad (12)$$

Donde:

$\Delta f_{ref} = 15\text{KHz}$; Separación entre subportadoras de referencia, LTE

$N_{f,ref} = 2048$; Número de trama del sistema de referencia, LTE

En base a T_c y T_s se puede establecer la relación que existe entre las unidades de tiempo básicas de NR y LTE teniendo como resultado la constante k con valor:

$$k = \frac{T_s}{T_c} = 64$$

Estructura Temporal

En base a la figura 39, se observa la trama total de 10ms utilizada para 5G la misma que se encuentra dividida en 10 subtramas numeradas de 0 a 9 con 1ms (dos semitramas con numeración de 0 a 4 y de 5 a 9), a su vez, cada una de las subtramas cuenta con 2^u slots en las que se alojan hasta 14 símbolos OFDMA, estos símbolos pueden ser de 3 tipos: “D” para enlace descendente, “U” para enlace ascendente y “X” flexible para asignar como ascendente o descendente.

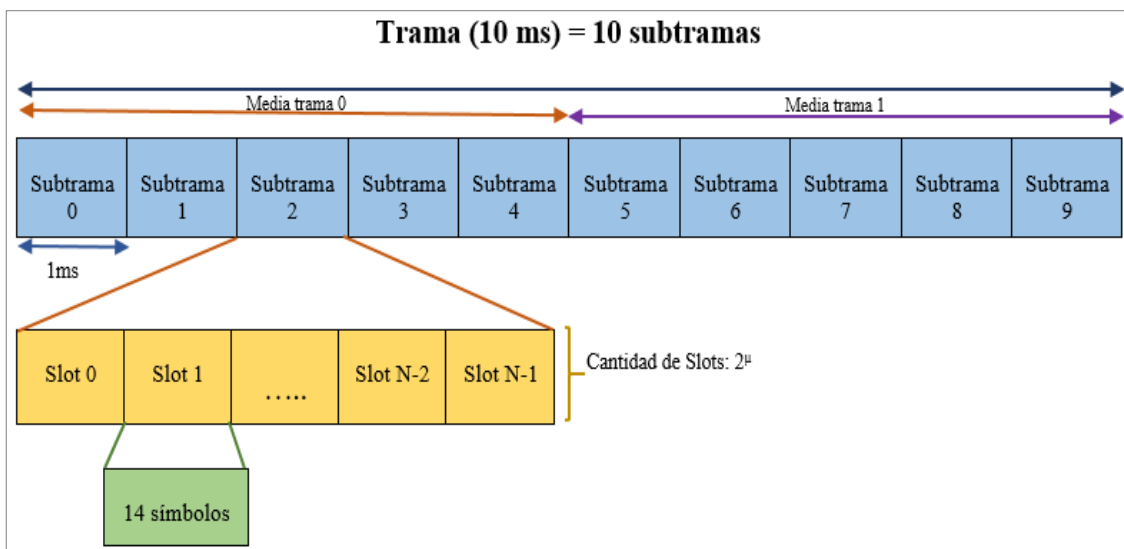


Figura 39. Estructura general de trama de radio

Fuente: Elaboración propia

A través del parámetro de configuración μ se establece el número de slots y por ende el número de símbolos que contendrá la subtrama:

$$N_{symb}^{subframe,\mu} = N_{symb}^{slot} * N_{slot}^{subframe,u} \quad (13)$$

Obteniendo el número de slots o intervalos por subtrama dado por:

$$N_{slot}^{subframe,u} = 2^\mu \quad (14)$$

Para cada uno de los slots obtenidos según la ecuación 12, se contarán con un número constante de símbolos que a su vez estará basado según el tipo de prefijo: normal o extendido:

$$N_{symb}^{slot} = 14 \text{ para CP normal}$$

$$N_{symb}^{slot} = 12 \text{ para CP extendido}$$

En la tabla 18 se visualizan los valores correspondientes para los dos tipos de prefijo cíclico (símbolos por slot, cantidad de slots total (x10 subtramas), cantidad de slots por subtrama).

Tabla 18. Valores determinados para CP normal y extendido

| Prefijo cíclico normal | | | |
|----------------------------------|-------------------|------------------------|---------------------------|
| μ | N_{symb}^{slot} | $N_{slot}^{trame,\mu}$ | $N_{slot}^{subtrame,\mu}$ |
| 0 | 14 | 10 | 1 |
| 1 | 14 | 20 | 2 |
| 2 | 14 | 40 | 4 |
| 3 | 14 | 80 | 8 |
| 4 | 14 | 160 | 16 |
| Prefijo cíclico extendido | | | |
| 2 | 12 | 40 | 4 |

Fuente: Elaboración propia, tomado de (3GPP, 2021)

En base al tiempo de 1 ms designado por subtrama, este se divide dependiendo la cantidad de slots que contenga y la separación entre subportadora, gráficamente se representa el slot de NR en la figura 40.

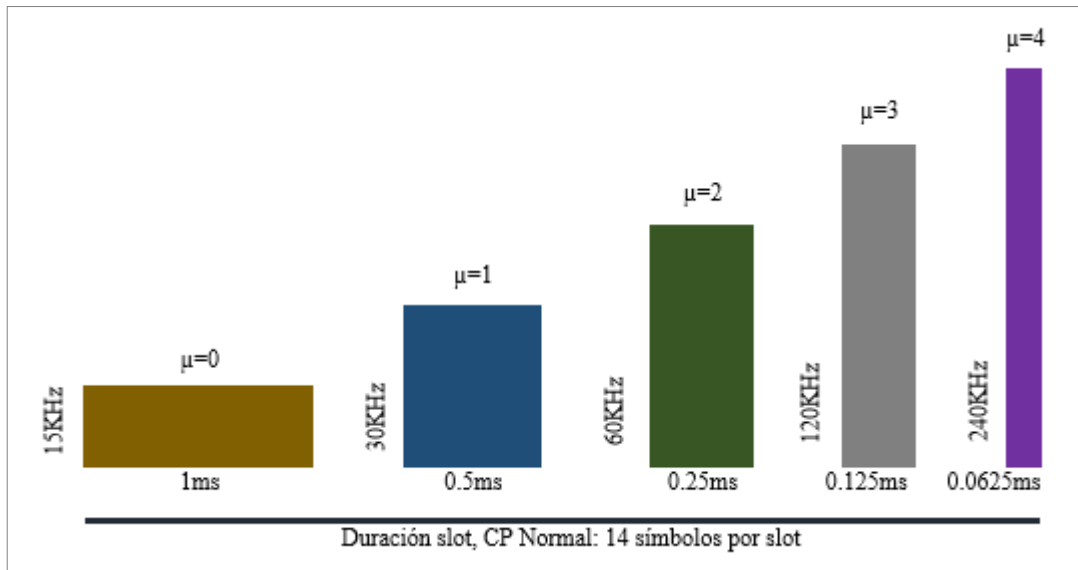


Figura 40. Representación de un slot de NR

Fuente: Elaboración propia

Estructura frecuencial

Partiendo con la segunda parte de estructura del bloque de recursos físicos se asignan numerologías de transmisión las cuales estarán definidas por el valor de μ como se observa en la tabla 19, en el que se considera el espaciado entre subportadoras y el CP.

Tabla 19. Numerologías definidas para μ

| μ | $\Delta f = 2^\mu * 15 [KHz]$ | Prefijo cíclico |
|-------|-------------------------------|-------------------|
| 0 | 15 | Normal |
| 1 | 30 | Normal |
| 2 | 60 | Normal, Extendido |
| 3 | 120 | Normal |
| 4 | 240 | Normal |

Fuente: Elaboración propia, tomado de (3GPP, 2021)

Para la implementación de OFDMA es necesario asignar subconjuntos de portadoras a cada usuario, para ello, una misma portadora puede ser capaz de cohabitar subportadoras con diferentes separaciones como se observa en la figura 41 (permitiendo cumplir con los escenarios de uso descritos en apartado 4.2.1 según lo requiera). Siendo esto una característica que diferencia de LTE, para 5G es posible que existan varios espaciamientos entre subportadoras (escalamiento), esta separación entre subportadoras va desde los 15KHz hasta 240KHz, visualizados en la tabla 19. Los valores en Δf se

presentan como múltiplos de 15 KHz con la finalidad de facilitar la transmisión en combinación de 4G y 5G.

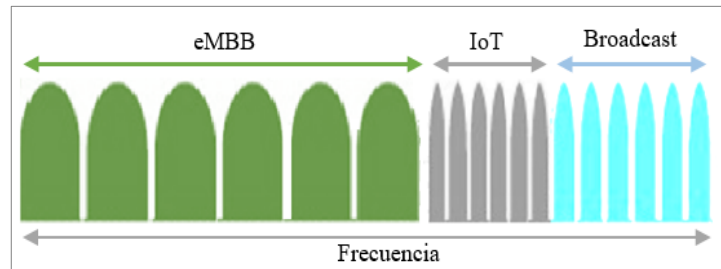


Figura 41. Diferentes espaciados entre subportadoras
Fuente: Elaboración propia

Una vez conociendo la separación entre subportadoras, para formar la estructura de la trama se combina las dimensiones tanto de tiempo y de frecuencia, obteniendo la duración de los símbolos y prefijos cíclicos, teniendo como referencia el tiempo útil del símbolo que viene dado por:

$$T_u = \frac{1}{15 * 2^\mu} (ms) \quad (15)$$

Subtrama con prefijo cíclico normal

Para la estructura de la subtrama con CP normal, la subtrama se divide en dos partes teniendo $7 * 2^\mu$ símbolos para cada parte. De este modo para la obtención de los valores de prefijo cíclico se tiene:

Como valor de prefijo cíclico para el primer símbolo (0) de cada una de las partes se tiene:

$$CP_0 = \left(\frac{9216}{2^\mu} + 1024 \right) T_c \quad (16)$$

Mientras que, para los símbolos restantes el prefijo tendrá un valor representado por la expresión:

$$CP_i = \frac{9216}{2^\mu} * T_c \quad (17)$$

Por otra parte, para obtener la duración de los símbolos se sigue la misma metodología teniendo para los primeros símbolos la duración total de:

$$t_0 = \left(\frac{140288}{2^\mu} + 1024 \right) * T_c \quad (18)$$

Y la duración de los símbolos restantes definida por:

$$t_i = \left(\frac{140288}{2^\mu} \right) * T_c \quad (19)$$

Resumiendo, y en base a las ecuaciones (16), (17), (18) y (19) la duración de los símbolos se presenta en la tabla 20.

Tabla 20. Duración de símbolos 5G

| μ | Prefijo cíclico | | Duración Total | |
|-------|-----------------|-----------|----------------|-----------|
| | Símbolo 0 | Símbolo i | Símbolo 0 | Símbolo i |
| 0 | 5,21 | 4,69 | 71,87 | 71,35 |
| 1 | 2,86 | 2,34 | 36,2 | 35,67 |
| 2 | 1,69 | 1,17 | 18,36 | 17,84 |
| 3 | 1,11 | 0,59 | 9,44 | 8,92 |
| 4 | 0,81 | 0,29 | 4,98 | 4,46 |

Fuente: Elaboración propia

Subtrama con prefijo cíclico extendido

Para una subtrama con CP extendido se considera 12 símbolos por intervalo y al ser aplicable únicamente para $\mu=2$, la duración del CP será la misma para todos los símbolos teniendo el valor de:

$$CP_{ext} = 8192 * T_c \quad (20)$$

Reemplazando en la ecuación 20 con la ecuación 11 se tiene:

$$CP_{ext} = 8192 * \left(\frac{1}{\Delta f_{max} * N_f} \right)$$

$$CP_{ext} = 8192 * \left(\frac{1}{480 \text{ KHz} * 4096} \right)$$

$$CP_{ext} = 4,2 \mu s$$

De la misma manera la duración total del símbolo reemplazando la ecuación 11 en 21:

$$T_{simb} = \left(\frac{131072}{2^\mu} \right) * T_c + CP_{ext} \quad (21)$$

$$T_{simb} = \left(\frac{131072}{2^\mu} \right) * \left(\frac{1}{\Delta f_{max} * N_f} \right) + CP_{ext}$$

$$T_{simb} = \left(\frac{131072}{2^2} \right) * \left(\frac{1}{480 \text{ KHz} * 4096} \right) + 4,2\mu s$$

$$T_{simb} = 20,83\mu s$$

Se resalta en el dominio de la frecuencia el punto de la posibilidad de cohabitar varias numerologías, es decir, con diferentes configuraciones de μ , permitiendo que el bloque o matriz de recursos de NR sea mucho más flexible.

5.2.4.2 Mejoras en la Interfaz Aire

Además de la propuesta que representa OFDMA como técnica de acceso múltiple, se considera una alternativa adicional, teniendo un escenario diferente:

- **Acceso múltiple No Ortogonal (NOMA)**

Las tecnologías de acceso se caracterizan principalmente por los esquemas tradicionales como FDMA, TDMA, CDMA y OFDMA, representando una opción favorable para obtener un rendimiento adecuado en el sistema. A diferencia de OFDMA, técnica totalmente ortogonal con el fin de que las señales no se traslapen entre sí, se presenta un esquema no ortogonal como una opción candidata para las comunicaciones móviles de quinta generación.

Debido al alto crecimiento en la demanda de servicios, los objetivos para mejorar la transferencia de datos y de obtener grandes capacidades continúan siendo el pilar fundamental, por tal razón se propone como un esquema meritorio el acceso múltiple no ortogonal o conocida también como multiplexación por división de capas (LDM), identificando nuevos principios para continuar la sostenibilidad de las tecnologías de acceso a radio.

Inicialmente por medio de esquemas ortogonales se proporcionan acceso centrado en el tiempo, frecuencia y código, sin embargo, en NOMA se proporciona un esquema totalmente distinto, en el que cada usuario tiene la posibilidad de operar en una misma banda en un mismo tiempo caracterizándose básicamente por los niveles de potencia, utilizando la cancelación de interferencia sucesiva (SIC).

Como descripción general; a diferencia de OFDMA que incluye una división de sus recursos de acuerdo a los usuarios, para un esquema NOMA cada usuario consigue utilizar todas las subportadoras, esta diferencia se visualiza en la figura 42, sin embargo, el proceso conlleva a la implementación de técnicas mucho más avanzadas para la detección en el receptor.

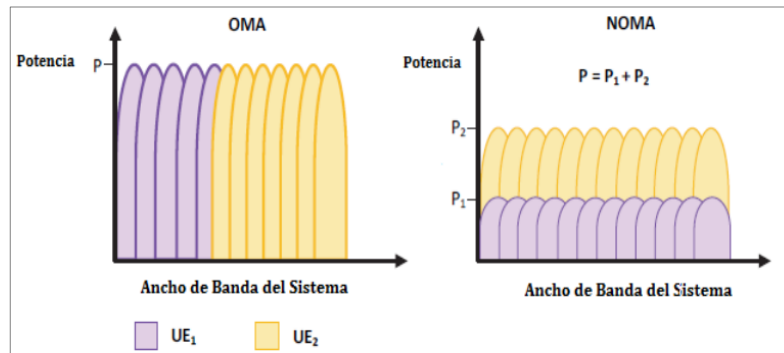


Figura 42. Asignación de recursos OFDMA vs NOMA
Fuente: (Matus, 2018)

Durante el proceso, para el lado del transmisor, las señales individuales de información se superponen una tras otra formando una sola forma de onda, y por su parte el receptor se encarga de realizar el proceso contrario, decodifica las señales hasta obtener la señal correspondiente de información, proceso que se manifiesta como la cancelación sucesiva de interferencias. Para llegar a la señal deseada, el receptor decodifica la señal más fuerte mientras tanto a las otras señales las considera como interferencias, entonces, la primera señal se resta del resto de la señal recibida, este proceso la realiza mientras encuentre la señal indicada, el buen funcionamiento de todo el proceso requiere de una correcta cancelación de las señales en cada una de las repeticiones, para ello, la función del transmisor se fundamenta en realizar una división precisa de la potencia entre todas las formas de onda y superponerlas. Esta superposición de las señales que son transmitidas viene representada por:

$$x = (\sqrt{P_1})x_1 + (\sqrt{P_2})x_2 \quad (22)$$

Donde:

x_1, x_2 = señales transmitidas

P_1, P_2 = potencia de señales

Teniendo en el receptor la señal recibida:

$$y_1 = h_i x + w_i \quad (23)$$

Donde:

h_i = coeficiente de canal entre el equipo de usuario y estación base

x = superposición de señales

w_i = ruido Gaussiano en el receptor

La división de potencia se puede distinguir para ambos enlaces; ascendentes y descendentes, teniendo:

Enlace descendente

El procedimiento en un enlace descendente, la acción de superponer las señales estará a cargo de la estación base, en donde cada equipo de usuario se encargará de realizar la decodificación o el proceso SIC para encontrar la señal correspondiente.

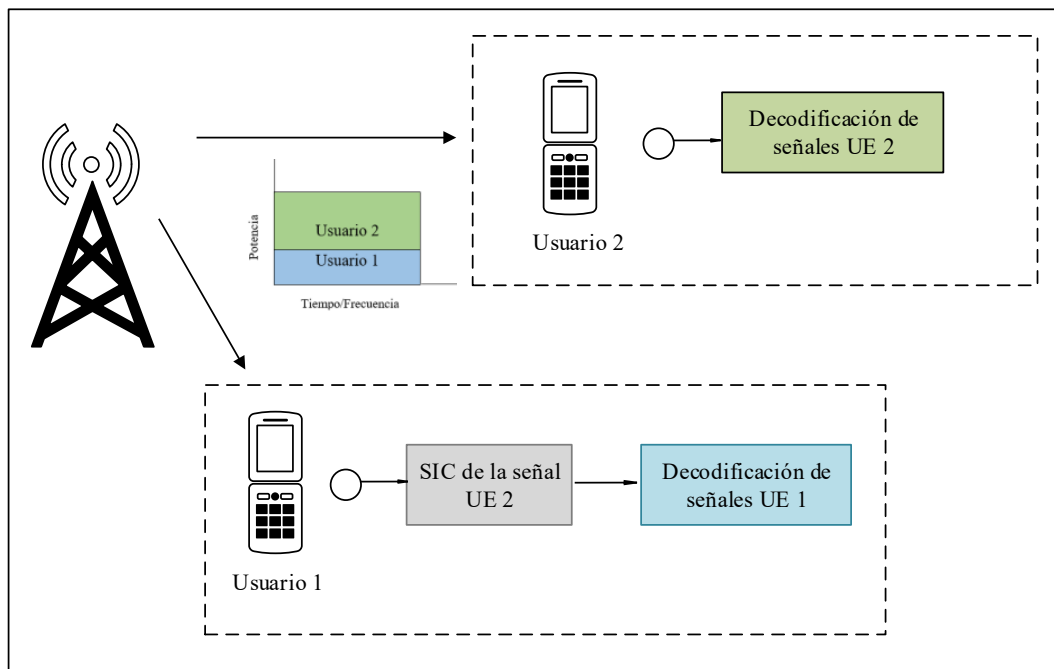


Figura 43. Enlace descendente NOMA

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, la prueba fundamental que debe enfrentar la estación base (gNB) es principalmente la asignación de potencia para cada señal, por ende, en base a una buena asignación el receptor (UE) podrá realizar una correcta SIC, entonces, es necesario que se realice una asignación dependiendo de la distancia que se encuentre el UE de la

estación base, así, mientras más alejado se encuentre el UE se asigna una mayor potencia, y viceversa, mientras más cerca se encuentre el UE de la estación menos potencia será asignada. Cada uno de los usuarios que estén conectados recibirán la misma señal y será el UE el encargado de realizar el proceso de SIC para acoger a la señal de información indicada, discriminando la señal que no le corresponde, para ello, cada UE trabajará primero con la señal más fuerte para luego restarla de la señal recibida como se observa en la figura 43.

Enlace ascendente

A diferencia del proceso anterior, para la implementación del enlace ascendente, el proceso de SIC lo ejecuta la estación base para distinguir las señales que provienen del usuario como lo indica la figura 44.

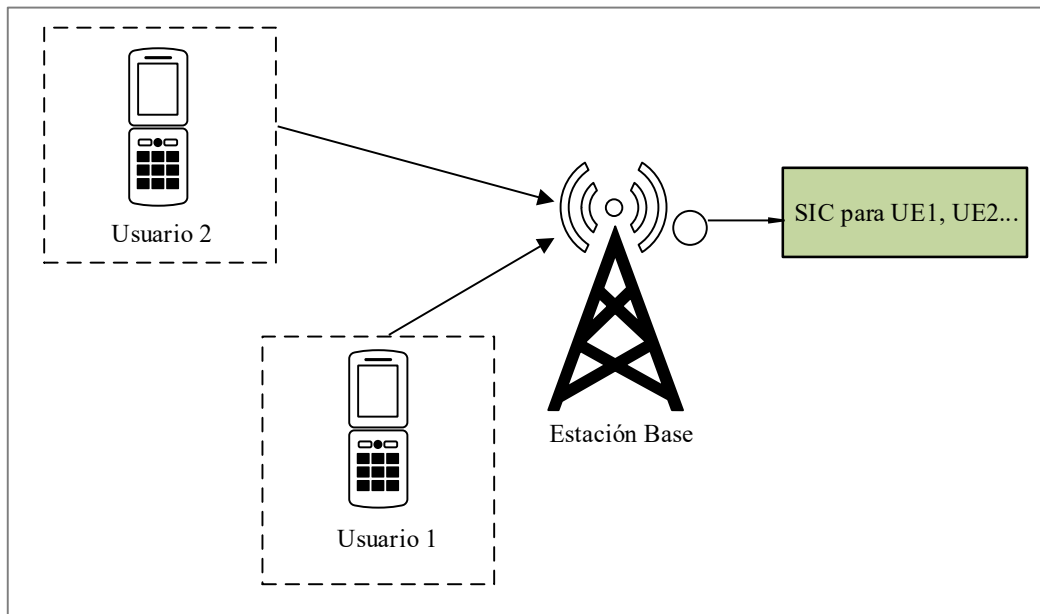


Figura 44. Enlace ascendente NOMA

Fuente: Elaboración propia

Los UE se encargan de transmitir hacia la estación base, para este proceso NOMA implementa OFDM con el fin de dividir el ancho de banda disponible en un conjunto de subportadoras (n), con su respectiva potencia de transmisión (p_k). Teniendo como referencia la ecuación de la capacidad de Shannon se establece la transferencia de datos para cada usuario, teniendo la siguiente expresión:

$$R_k = \sum_{n \in N} \log_2 \left\{ 1 + \frac{p_{k,n} h_{k,n}}{\sigma^2 + I_{k,n}} \right\} \text{ (bits/s/Hz)} \quad (24)$$

Donde:

$p_{k,n}$ = potencia de transmisión sobre la subportadora

$h_{k,n}$ = ganancia del canal del usuario sobre la subportadora

σ^2 = potencia de ruido por subportadora

$I_{k,n}$ = Interferencia producida sobre el usuario

Cada una de las señales que recibe la estación base son consideradas como deseadas. Cada usuario trasmite su propia señal de manera independiente. De manera similar al enlace descendente, esta vez la estación base será la encargada de decodificar la señal iniciando con la del usuario más cercano y finalizando con la decodificación de la señal del usuario que se encuentra más lejano.

5.2.3 Sistemas de antenas

Como parte fundamental para las comunicaciones móviles, se encuentran las tecnologías que permiten el acceso inalámbrico. Los conceptos a analizar en el presente apartado se desarrollan en torno al conjunto de antenas ubicadas en las estaciones base (gNB), necesarias para una comunicación simultánea hacia diversas terminales móviles (UE), conjuntamente con su modo de operación y características en torno a los haces producidos por las antenas.

5.2.3.1 Massive MIMO

Conforme a lo mencionado en el capítulo 1, a lo largo de las características desarrolladas en una cuarta generación, sobre todo para LTE-A se lleva a cabo la implementación de múltiples antenas tanto en transmisión como recepción, dando inicio los primeros usos con el término “MIMO”, de este modo, y en base a las frecuencias superiores necesarias para 5G, se da continuidad a la implementación de esta tecnología.

Actualmente en países que ya ha iniciado el despliegue de Massive MIMO para las comunicaciones de 5G han conseguido hasta la fecha la gestión de un volumen mucho mayor de datos, conllevando hacia un mejor rendimiento de la tecnología basado en la cantidad de tráfico que soporta. La forma en la que son asignados los datos, no es un parámetro que el usuario pueda controlar, pero si el volumen de datos que se desea enviar,

y esto dependerá de la cantidad de usuarios que estén conectados y como estos pueden ser distribuidos.

El tráfico de datos móviles se mantiene en constante crecimiento, siendo probable un crecimiento alrededor de un 25 a un 50% por año. Al utilizar los dispositivos, no únicamente se necesita altas velocidades para transmitir los datos, sino, otra de las principales razones se encuentra centrada en la frecuencia en las que se utilizan los dispositivos, y, por ende, todas las redes celulares deben evolucionar para permitir una administración hacia la demanda creciente de dispositivos. Es decir, las redes deben ser capaces de multiplexar los dispositivos para que puedan permanecer activos de manera simultánea.

El crecimiento del tráfico es exponencial, siendo necesaria la multiplexación de los dispositivos, conjuntamente con la implementación de un número mayor de estaciones base, con ello habrá la posibilidad de ofrecer el servicio a la cantidad necesaria y requerida de usuarios que pretenden alcanzar 5G, a su vez, mediante la formación de haces que va de la mano con Massive MIMO se conseguirá utilizar el espectro necesario dirigido únicamente hacia cada uno de estos dispositivos.

A medida que avanza cada generación se presentan diferentes retos y esquemas de comunicación para MIMO, en la actualidad (4G) los sistemas son capaces de implementar arreglos de antenas de hasta 8x8. De este modo, para 5G la propuesta se basa principalmente hacia el incremento de las antenas, pudiendo ser capaces de agrupar decenas y centenares de antenas en el transmisor y receptor, consiguiendo uno de los principales propósitos de 5G, mejorar la capacidad sobre los sistemas actuales.

- **Arquitectura**

Massive MIMO se encuentra especificado hacia el incremento de la eficiencia espectral de los sistemas de comunicaciones inalámbricos, mediante el uso de las múltiples señales que recorren simultáneamente a la misma frecuencia. Para la conformación del sistema, se encuentra la estación base (gNB) y cada uno de los equipos de usuario (UE).

Describiendo más allá a la estación que forma parte en 5G se pueden evidenciar ciertas características en comparación con la generación antecesora, en términos de hardware como se observa en la figura 45, 5G evoluciona de una arquitectura basada en la unidad

de banda base (BBU) hacia una arquitectura con una unidad distribuida (DU), centralizada (CU) y a una unidad de antena activa (AAU) en donde se integrarán el sistema RRH (*Remote Radio Head*) y antenas

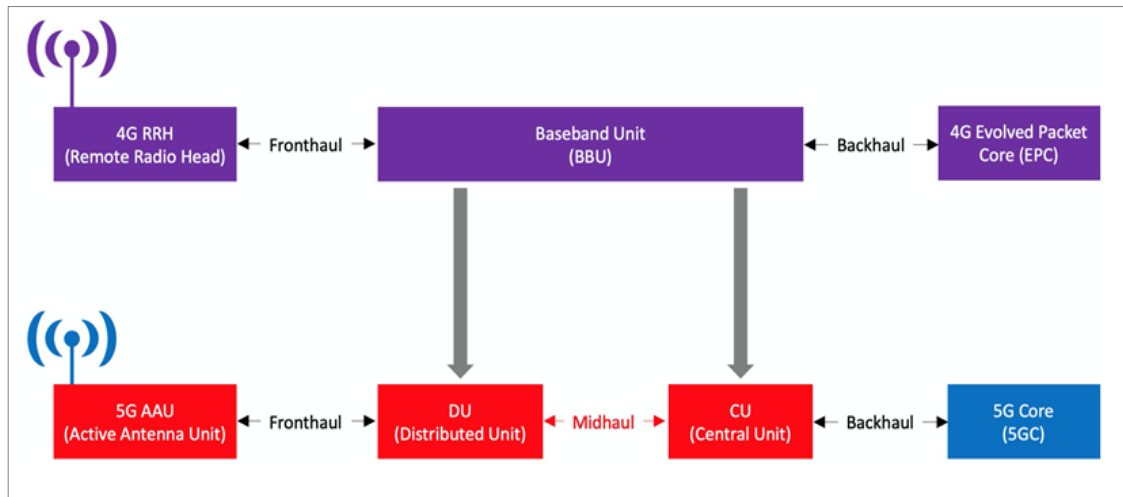


Figura 45. Arquitectura sistemas de radio 5G
Fuente: (Ciena, 2020)

Al implicar la utilización de un arreglo de antenas, Massive MIMO representa un punto importante para la transmisión. De acuerdo a mmWave mencionado en el capítulo 2, conforme a la longitud de onda pequeña que posee, la cobertura se ve limitada, sin embargo, favorece a la implementación de arreglos de antenas con un tamaño reducido en comparación a las actuales, pudiendo ser esto un punto a favor al beneficiar en la fabricación de las antenas con mejores ganancias tanto en la estación base como en la móvil (usuario). Asimismo, de acuerdo a la cobertura que ofrece, la red conformará celdas pequeñas para cubrir áreas específicas, siendo a su vez, relativamente favorable para el despliegue conjunto con 256 QAM.

De acuerdo con las herramientas y tecnologías con las que actualmente se cuenta, se puede expresar que resulta factible el ensamble de un número superior de elementos de antena, viendo esto reflejado en la reducción de costos y en el ahorro de energía, consolidando un perfil favorable para dar solución a las necesidades de 5G. Al combinar todo un arreglo de antenas con todo el procesamiento digital de las señales conjuntamente con una conformación de haces que permita el aprovechamiento total de potencia, se convierte en un sistema inteligente para la transmisión y recepción de señales/información.

5.2.3.2 3D Beamforming

En trabajo conjunto a Massive MIMO, para la transmisión de grandes velocidades de datos, el área de cobertura para la estación de 5G (gNB) debe ser más pequeña a que la utiliza 4G, siendo necesaria la prestación de servicios mediante el desarrollo de 3D Beamforming.

Inicialmente para las redes móviles actuales, los elementos de antena encontrados en las estaciones base, se encuentran ubicados a lo largo del eje horizontal, siendo conocido consecuentemente como 2DBF la formación de los haces y MIMO, ahora bien, considerando un ángulo de inclinación en la antena, se relaciona un dominio a lo largo del eje vertical dando inicio a la utilización de 3D Beamforming o 3DBF.

Al hablar de un haz, este hace referencia a la técnica basada en concentrar la señal o enfocarla hacia un dispositivo en particular, esto con el fin de entregar toda la potencia hacia dicho dispositivo en lugar de extenderla la señal hacia todas las direcciones, de este modo, agregando la formación del haz hacia un eje horizontal y a su vez vertical, da origen al diseño de 3DBF.

En base a la inclinación que puede tener la antena, esta también puede describir dos maneras de 3DBF, teniendo uno de tipo estático en el cual la antena se mantendrá en el gNB con un valor fijo de inclinación de acuerdo a valores que se establecen o configuran previamente, por otro lado, el tipo dinámico, el cual permitirá ser más flexible posibilitando la selección de diferentes tipos de ángulos, adaptándolos dependiendo a la ubicación de los usuarios.

3DBF representa una mayor ganancia en términos de capacidad sobre 2DBF, evitando la radiación de potencia producida a las celdas adyacentes. Al aplicar los haces de manera vertical las potencias pueden ser asignadas de manera individual, disminuyendo como consecuencia la interferencia entre posibles celdas.

Al visualizar ambas formas, se puede considerar que la aplicación del 3DBF dinámico posee una mejor aceptación al permitir dirigir la intensidad de la señal hacia los usuarios que lo requieran, esperando un mayor nivel en el rendimiento del sistema necesario para el despliegue de las comunicaciones móviles, es así que, al implementar mayor número

de antenas de manera inteligente en este caso Massive MIMO con 3DBF se puede mejorar las capacidades y rendimiento en la red por cada usuario.

5.2.4 Radio cognitiva

En la mayoría de países a nivel mundial para llevar a cabo aplicaciones o comunicaciones de manera inalámbrica se tiene presente la regulación del espectro por parte del Estado, mediante la asignación de manera fija de frecuencias, pudiendo ser estas asignadas a distintas instituciones o empresas, esto siguiendo los lineamientos y cuadro de atribución de bandas de frecuencia según lo planteado por la ITU. Algunas investigaciones realizadas por la FCC (*Federal Communications Commission*) establecen que gran parte del espectro está siendo utilizado de manera ineficiente, pudiendo presentarse los casos en el que ciertos rangos son utilizados en gran medida, mientras otros se mantienen sin uso o desocupado.

La radio cognitiva o CR (Cognitive radio) ha ido manteniendo la tarea de poner en marcha ciertas características importantes dentro de las comunicaciones inalámbricas, entre la más sobresaliente se puede encontrar la selección dinámica de frecuencia, o a su vez la identificación de métodos de modulación correcta y que pueda ser validada para su posterior análisis de la señal, lo que conlleva a involucrar a la CR como una de las tecnologías emergentes en especial para 5G para mejorar parámetros o limitantes que poseen las tecnologías actuales.

Con el crecimiento exponencial de la demanda, las redes inalámbricas van creciendo en popularidad, y con ello la necesidad de aumentar la eficiencia y la capacidad en las redes. Como tecnología emergente CR ha ido captando cada vez más la atención principalmente en aquella optimización del espectro, mediante la utilización adecuada de las bandas de frecuencia, eligiendo aquellas que no están saturadas o conocidos también como huecos espectrales (SO). Esto se consigue especialmente mediante el dispositivo CR de radiofrecuencia idóneo en la variación de los parámetros sujetos a la interacción con el entorno en el que se está operando y la identificación de canales disponibles.

Radio cognitiva en sí, no representa un término nuevo, todo lo contrario, por varios años ya se han realizado diferentes investigaciones en las que se han obtenido resultados favorables, pudiendo ser interpretado inicialmente como una ampliación de lo que se

conoce hoy en día como Radio Definido por Software, y conforme el paso de los años obtener un mayor crecimiento en las comunicaciones inalámbricas, aunque su difusión no sea tan pronunciada.

Conforme se han desarrollado los diferentes términos y conceptos a lo largo de los capítulos, el espectro radioeléctrico resulta ser uno de los recursos más valiosos en el desarrollo de las comunicaciones inalámbricas en general. En especial para 5G y futuras redes se requieren de mayor inteligencia para evitar las interferencias que se presentan sobre todo en las redes actuales.

Para una arquitectura adecuada en la conformación de radio cognitiva se pueden considerar dos redes:

- Red primaria
- Red secundaria (Radio Cognitiva)

En la red primaria, se estaría haciendo referencia a la red de comunicación 5G, con cada uno de los elementos correspondientes a su arquitectura (usuario principal, estación base) y los procesos de capa física operando dentro de las bandas de frecuencias establecidas para la red (licenciadas).

Por otra parte, se tiene la segunda red (CRN, red de acceso dinámico al espectro) correspondiente a la de radio cognitiva, que a diferencia de la red primaria esta no cuenta con ninguna licencia. La red es capaz de no depender de una infraestructura preexistente por lo que puede ser considerada como una red *ad hoc*, o a su vez, establecer el despliegue de una infraestructura de red. Para este último caso, la arquitectura está basada en los elementos de una red tradicional, contando con una estación base en este caso de tipo CR, los usuarios CR y un agente del espectro que se añade a la red con el propósito de realizar la distribución de los recursos de espectro hacia los diferentes componentes de la red, la conformación de esta nueva red se visualiza en la figura 46.

Es necesario el establecimiento de la comunicación de cada uno de los usuarios CR, presentándose 3 tipos concretos de acceso:

- Acceso CRN: En donde los usuarios secundarios (CR) establecen la comunicación directamente hacia su estación base CR, manteniendo en el rango de espectro con y sin licencia.

- Acceso Ad-hoc: Usuarios CR se pueden comunicar con otros usuarios CR mediante una conexión ad-hoc, considerando un mismo espectro sea licenciado o no licenciado
- Acceso Red principal: Escenario en el cual los usuarios CR pueden establecer comunicación hacia la estación principal (espectro con licencia)

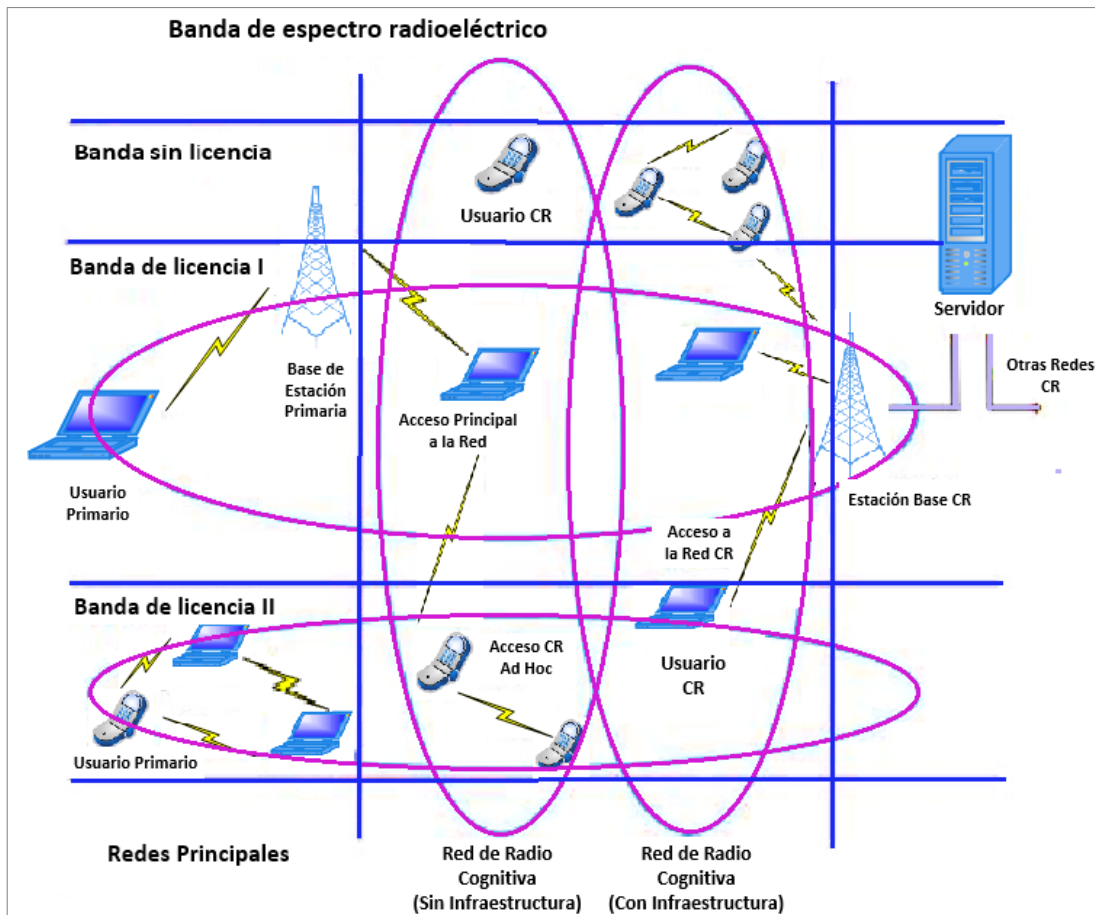


Figura 46. Red de Radio Cognitiva

Fuente: Elaboración propia

Es así que dentro de los requisitos de las CRNs siempre va a predominar la capacidad de detectar aquellos huecos espectrales por lo que esta tecnología siempre se mantendrá en constante monitoreo del espectro mediante técnicas de sensado, esto con el fin de no producir interferencias hacia los otros usuarios primarios que se encuentran presentes y en general no interferir a ningún canal que se encuentre ocupado.

5.2.5 Indicadores claves de rendimiento para 5G

Una vez examinadas cada una de las tecnologías que forman parte para el desarrollo e implementación de las comunicaciones móviles de 5G, se observa que las mismas recaen

en el cumplimiento de los KPIs (Key Performance Indicator) o indicadores claves de desempeño planteados para 5G.

En el grafico radial de la figura 47, se presenta los niveles promedios obtenidos por 4G con los parámetros que se espera conseguir con 5G.

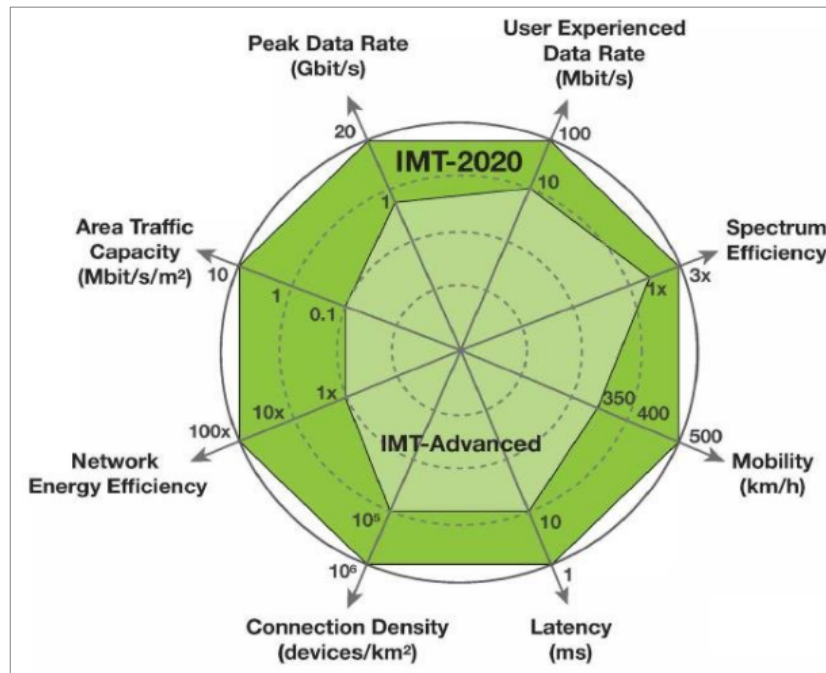


Figura 47. Indicadores claves de rendimiento 5G
Fuente: ITU-R WP5D, 2015

Cada uno de los objetivos de los KPIs se encuentran fundamentados en las tecnologías aplicadas en la interfaz aire antes desarrolladas. Basado en el informe técnico TR 38.913 del Release 16, se establecen los parámetros:

Tasa de datos máxima.

Suponiendo un escenario que no contenga errores, los bits de datos son asignados a un solo equipo de usuario, el objetivo para la transmisión en cada uno de los enlaces llega a ser de:

- Enlace descendente: 20Gbps
- Enlace ascendente 10Gbps

Eficiencia espectral máxima

Si bien es cierto las bandas de mayor frecuencia son capaces de otorgar un mayor ancho de banda, pero, proporcionarán una menor eficiencia espectral y viceversa con las bandas

de frecuencia menor, estas permitirán ofrecer una eficiencia espectral mayor, de este modo, los objetivos se encuentran establecidos en:

- Enlace descendente 30bps/Hz
- Enlace ascendente: 15bps/Hz

Ancho de banda

Al ser un parámetro cuantitativo no viene definido como tal con un valor exacto. Al representar al máximo valor que puede tener el sistema, este puede ser soportado por una o varias portadoras de Radio frecuencia. Los resultados que se obtengan para este parámetro se basan más en los estudios o diseños realizados de la RAN o dependiendo de los requisitos que se sujeten al IMT-2020

Latencia del plano de control

Al momento de cambiar o pasar de un estado a otro, dado el caso de un modo idle a uno activo se considera un tiempo recomendado de 10ms.

De manera adicional también pueden ser considerados para enlaces de comunicaciones satelitales, dependiendo las orbitas en las que se encuentran: para el caso de GEO y HEO el objetivo estará dentro de los 600ms, para la órbita MEO de 180ms y finalmente para los LEO un tiempo de 50ms.

Latencia del plano de usuario

Se relaciona el tiempo en que se entregará con éxito al usuario un paquete o mensaje (desde el punto de entrada a la de salida de la SDU “Service Data Unit”), en este punto considerando los 2 escenarios básicos de 5G mencionados en el capítulo 1 se tienen valores de latencia de:

Tabla 21. *Latencia del plano de usuario*

| Escenarios 5G | Latencia | |
|----------------------|-----------------|-----------|
| | UL | DL |
| URLLC | 0,5 ms | 0,5 ms |
| eMBB | 4 ms | 4 ms |

Fuente: Elaboración propia

En el caso de URLLC como se observa en la tabla 21 el valor de latencia debe ser lo suficientemente baja al poder ser utilizada como arquitectura de la tecnología de acceso de la red próxima generación, mientras tanto para eMBB se considera un valor más alto teniendo en consideración todos los retrasos que conlleva el escenario en la transferencia de paquetes.

Para la comunicación satelital al igual que en el plano de control, se mantienen los mismos valores de latencia para el plano de usuario, teniendo: para GEO 600ms, MEO 180ms y LEO 50ms.

Latencia para paquetes pequeños poco frecuentes

En la transmisión de aquellos paquetes o mensajes de la capa de aplicación que no son transmitidos con frecuencia, también es necesario mantener un valor de latencia considerable, siendo este de no mayor a 10 segundos específicamente para el enlace ascendente en paquetes de aplicación de 20 bytes.

Tiempo de interrupción de la movilidad

Indicador que corresponde al tiempo más corto que puede soportar el sistema, en el cual el usuario no podrá intercambiar paquetes con ninguna otra estación base, es decir, puede ser considerado también como un tiempo de transición de un proceso a otro, de este modo el tiempo que se tiene como objetivo es de 0ms. Tiempo que se refleja de manera evidente al querer un sistema en el que no se presente interrupciones en la ejecución de algún proceso. La exigencia de este parámetro puede verse no tan indispensable en aquellos entornos rurales en la que la prestación de servicios es considerada como bajo.

Fiabilidad

Mediante la evaluación de la probabilidad de éxito a lo largo de la transmisión considerando retardos o tiempo en que se demora entregar un paquete de datos, se desenvuelve un escenario URLLC para la transmisión de un paquete es $1-10^{-5}$ para 32 bytes con una latencia de 1ms específicamente en el plano de usuario.

Adicionalmente en parámetros de fiabilidad se puede mencionar también para una comunicación de Vehículo a todo mejorado (eV2X), como un caso desafiante en 5G

(dirigida hacia aplicaciones vehiculares con conducción totalmente autónoma) teniendo valores de fiabilidad de:

- $1-10^{-5}$ y latencia de 3-10 ms en plano de usuario para una comunicación directa de unos pocos metros
- $1-10^{-5}$ y latencia de 3-10 ms en plano de usuario cuando se transmite mediante la estación base.

Cobertura:

Uno de los indicadores que considera la pérdida máxima de acoplamiento (MaxCL) para ambos enlaces (UL, DL), esto es, entre el dispositivo y emplazamiento de la estación base (conectores de antena), para una velocidad de datos de 160bps, se establece como objetivo una cobertura de 164dB, esto siguiendo la línea y evaluación del presupuesto de enlace.

6 RESULTADOS

6.1 NYUSIM en el análisis de mmWave

Para la comprensión del comportamiento y capacidades del espectro mmWave en la presente sección se emplea la versión NYUSIM 3.0 la cual implementa un modelo de canal estadístico interior 3D para bandas milimétricas. Gracias a los estudios de NYU Wireless se puede representar el comportamiento de mmWave considerando los escenarios analizados (UMi, UMa, RMa y InH).

Al iniciar el simulador se presenta la interfaz principal, conformada por 4 bloques generales que serán detallados respectivamente con sus resultados:

- Parámetros del canal
- Propiedades de antena
- Parámetros para modelo con bloqueo humano
- Parámetros de consistencia espacial

El ajuste de los parámetros de entrada permite generar respuestas de manera rápida con tres tipos de opciones en los archivos de salida: archivo.txt, archivo.mat, archivos.txt y .mat

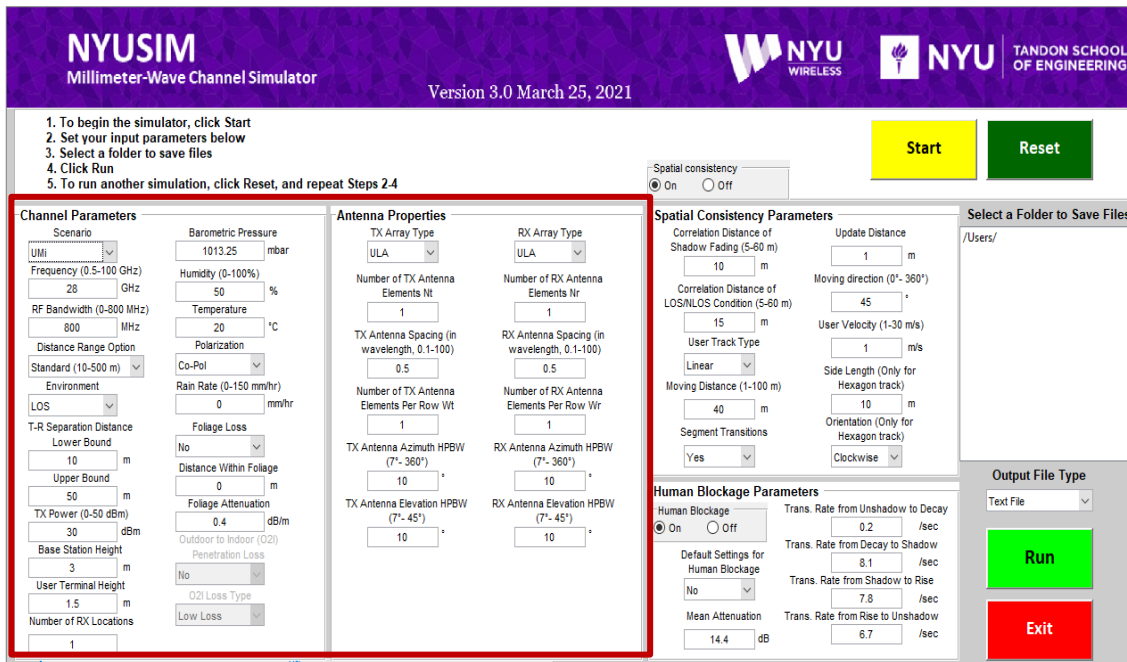


Figura 48. NYUSIM – Parámetros de canal y propiedades de antena

Fuente: Elaboración propia

Para el desarrollo y análisis de resultados, a continuación, se detalla cada uno de los valores utilizados en cada bloque, siguiendo las especificaciones técnicas del 3GPP.

- **Parámetros de canal**

Teniendo en cuenta las características que ofrece el software, se maneja los 4 escenarios mencionados en el apartado 5.1.5, (UMi, UMa, RMa y InH) los mismos que se definen más adelante mediante los valores del Release 16 y del medio.

En cuanto a las frecuencias, para un mejor desempeño en las comunicaciones móviles, 5G al desarrollarse en torno a las bandas milimétricas, el crecimiento y disponibilidad de servicios están siendo desarrollados actualmente en la banda de 28GHz (n257-3GPP, tabla 15), siendo este el valor de frecuencia empleado para la simulación para los entornos UMi, UMa e InH. Finalmente, para el escenario RMa, se emplea la frecuencia de 6GHz, recomendado en el TR 38.901 v16.0.0, para entornos rurales.

A partir de los requerimientos de un ancho de banda amplio y armonizado para admitir velocidades altas y mayor cantidad de tráfico, se emplea un valor de acuerdo a la frecuencia. De esta manera, para 28GHz el ancho de banda utilizada es de 800MHz, y para la frecuencia de 6GHz se emplea un ancho de banda de 100MHz, conforme a las necesidades y mediciones del mundo real.

El rango de distancia que cubrirán todos los parámetros detallados estarán de acuerdo al escenario utilizado, siendo: el estándar de 10-500 m y rango de interiores de 5-50m los empleados para la simulación.

Se cubre las situaciones para dos entornos: Con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS), este último debido a que la mayor parte del tiempo el usuario no se encuentra directamente visible con la estación base, siempre existirán obstáculos que dificulten la comunicación como paredes u otros materiales.

La distancia inferior y superior respectivamente que existe entre el transmisor y receptor, se detalla de acuerdo al rango escogido anteriormente, de esta forma, en base a la utilización del rango recomendado (10–500m), la distancia para el escenario UMi se trabaja con el valor de 100m. Para las macroceldas: urbana un valor de 200m y rural con 500m, para este último al ser el rango máximo propuesto. Finalmente, para InH al estar disponible únicamente la opción Indoor (5-50m) se toma una distancia de 10m. Estos

valores se contemplan tanto para los parámetros inferior y superior, para la obtención de resultados más precisos por lo que se utiliza una distancia puntual.

De acuerdo a los valores encontrados en el TR 38.901, la potencia de transmisión se denota conforme al escenario y valores de frecuencia utilizados, de esta manera, para los escenarios UMi y UMa cuya frecuencia es de 28 GHz se trabaja con un valor de 30 dBm. Para el escenario RMa al utilizar una frecuencia de 6GHz la potencia tiene un valor de 49dBm. Finalmente, para el escenario InH el valor de potencia es de 24dBm (para todas las frecuencias).

En lo referente a alturas para las estaciones base para cada uno de los escenarios es recomendado los siguientes valores; UMi=10m, UMa=25m, RMa= 35m e InH= 3m, mientras que la altura del equipo terminal se emplea la altura recomendada de 1,5m para los cuatro escenarios.

Para el número de ubicaciones de Rx se realiza la simulación para la visualización del transmisor en una sola ubicación específica, la cual viene dada en relación al parámetro “Límite inferior y superior de la distancia de separación T-R” ya detallado anteriormente.

En términos de polarización se presentan los casos de: Co-Pol (Copolarización) y X-Pol (Polarización cruzada). Para Co-Pol no se consideran pérdidas adicionales en el trayecto, debido a esto, es el tipo de polarización seleccionada para la simulación, por otra parte, para el caso de X-Pol se añade una pérdida de 25dB ocasionados por el desajuste de polarización.

En cuanto a parámetros de condición atmosférica se encuentra la presión barométrica, por medio de éste se evalúa la pérdida de trayectoria de propagación inducida por el peso del aire. El valor utilizado es de 1013,25 mbar (milibares), esto al ser el valor nominal de la presión sobre el nivel del mar. Asimismo, se encuentra la humedad relativa, la cual permite la evaluación de la pérdida de propagación inducida por vapor de agua en el aire. Este parámetro se representa mediante valores en porcentaje, por lo tanto, considerando que un ambiente es agradable cuando su humedad relativa se mantiene en un rango de 50 al 60 %, el valor empleado para la simulación es del 50% de humedad. Adicionalmente se tiene la temperatura, este parámetro es utilizado para la evaluación de la pérdida de trayectoria de propagación inducida por bruma/neblina, siendo 20°C el valor empleado.

Otro de los parámetros que también incluye el simulador es la tasa de lluvia, la cual indica la tasa en mm/hr (milímetros por hora) para la evaluación de las pérdidas en el trayecto que son ocasionadas por la lluvia, para este parámetro se considera una intensidad débil o nula con un valor de 0 mm/hr, al igual que las pérdidas por vegetación las cuales no son consideradas, viniendo por defecto un valor mínimo establecido de 0,4 dB/m.

Adicionalmente para los escenarios UMi, UMa y RMa se encuentran disponible el parámetro de pérdidas de penetración de exterior a interior (O2I) en el que se puede seleccionar si el equipo de usuario se encuentra en el interior o exterior de un edificio, a su vez, de acuerdo a la selección se elige el tipo de pérdida O2I (altas o bajas pérdidas). Para este último parámetro no se consideran las pérdidas O2I, debido a que formarían parte de un escenario específico con los elementos del mundo real en el que se considerarían pérdidas altas o bajas de acuerdo a los materiales como vidrio, hormigón, madera o de acuerdo de los elementos que conforman la estructura o edificación.

Cada uno de los valores a utilizar se resumen para cada escenario en la tabla 22.

Tabla 22. *Valores definidos para los parámetros de canal*

| Parámetros | Escenarios | | | |
|---|-------------------|-----|---------------|-----|
| | UMi | UMa | RMa | InH |
| Frecuencia (GHz) | 28 | 28 | 6 | 28 |
| Ancho de Banda (MHz) | 800 | 800 | 100 | 800 |
| Distancia (m) | Standard (10-500) | | Indoor (5-50) | |
| Entorno | LOS/NLOS | | | |
| Límite inferior Separación entre Tx y Rx (m) | 100 | 200 | 500 | 10 |
| Límite superior Separación entre Tx y Rx (m) | 100 | 200 | 500 | 10 |
| Potencia Tx (dBm) | 30 | 30 | 49 | 24 |
| Altura estación base (m) | 10 | 25 | 35 | 3 |
| Altura terminal de usuario (m) | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 |

| | | | | |
|---|---------|---------|---------|-----------|
| Numero de ubicaciones de Rx | 1 | 1 | 1 | 1 |
| Presión barométrica (mbar) | 1013,25 | 1013,25 | 1013,25 | 1013,25 |
| Humedad (%) | 50 | 50 | 50 | 50 |
| Temperatura (°C) | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Polarización | Co-Pol | Co-Pol | Co-Pol | Co-Pol |
| Índice de precipitación (mm/hr) | 0 | 0 | 0 | No aplica |
| Pérdidas por vegetación | No | No | No | No aplica |
| Distancia dentro de vegetación | 0 | 0 | 0 | No aplica |
| Atenuación por vegetación | 0 | 0 | 0 | No aplica |
| Pérdidas de penetración de exterior a interior (O2I) | No | No | No | No aplica |
| Tipo de pérdida O2I | Bajo | Bajo | Bajo | No aplica |

Fuente: Elaboración propia

- **Parámetros de antena**

Considerando el segundo bloque de la figura 48: “Parámetros de antena”, se emplea los datos siguientes:

En cuanto al Tipo de antena, siguiendo las cláusulas que constan en el modelado de antena de 5G, para los escenarios: UMi, UMa e InH al utilizar frecuencias de banda alta (28GHz) se considera la antena modelada por un arreglo de antena rectangular uniforme (URA), en donde cada elemento de antena se coloca en dirección vertical y horizontal, siendo estas más versátiles proporcionando patrones mucho más simétricos. Con el uso de este arreglo se puede ubicar el haz principal de la antena en cualquier punto. Por otro parte, para el escenario RMa al utilizar una frecuencia en la banda media (6GHz), se opta por emplear el arreglo de antena lineal uniforme (ULA), debido a que su estructura es más

simple, en donde los elementos están dispuestos de manera de línea recta con la misma magnitud, además de ser la más recomendada para los escenarios rurales.

Para reducir la cantidad de emplazamientos se considera el empleo de situaciones MIMO 2x2, estableciendo de esta manera 2 elementos de antena (N), con un elemento por fila (W) tanto para Tx y Rx, con una separación típica de $0,5\lambda$, representando un array básico para la simulación. De la misma manera por simplicidad se considera el uso de los mismos anchos de haz, fijando la apertura del haz en un azimut y elevación de 10° para cada escenario.

Tabla 23. Valores definidos para bloque de propiedades de antena

| Parámetros | Valores |
|---|---------------|
| Tipo de antena para Tx y Rx | URA / ULA |
| Número de elementos de antena de Tx y Rx (Nt, Nr) | 2 |
| Espaciamiento entre antenas de Tx/Rx | $0,5 \lambda$ |
| Número de elementos de antena Tx y Rx por fila (Wt, Wr) | 1 |
| Azimut de la antena Tx y Rx HPBW | 10° |
| Elevación de la antena Tx y Rx HPBW | 10° |

Fuente: Elaboración propia

- **Parámetros para bloque de consistencia espacial**

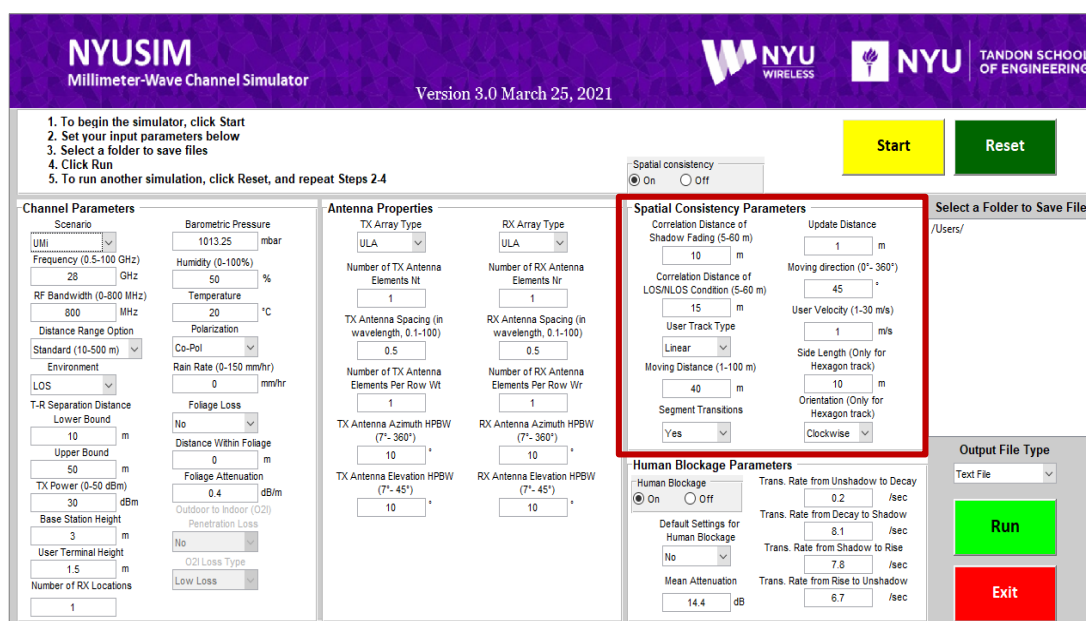


Figura 49. NYUSIM – Parámetros bloque de consistencia espacial

Fuente: Elaboración propia

El presente bloque representa una evolución continua y más realista del canal a lo largo de la trayectoria que sigue el equipo de usuario dentro de un área local. Se simula las respuestas de impulso del canal correlacionadas espacialmente cuando el UE se mueve en área local o cuando varias UE están estrechamente espaciadas. Para utilizar este bloque se requieren de los parámetros de gran escala (LSP, Large-Scale Parameters), como el desvanecimiento de sombra, las condiciones LOS/NLOS, generando parámetros como ángulos, potencia, retardo y fase de cada componente multi trayectoria (MPC, MultiPath Components). El bloque implementa un enfoque basado en la geometría, utilizando múltiples superficies de reflexión para actualizar la información angular especialmente correlacionada y variable en el tiempo.

Entre los valores utilizados, se presenta inicialmente la distancia de correlación del desvanecimiento de la sombra, este desvanecimiento puede ser causado por interferencia entre dos o más componentes multitrayecto, siendo el valor de 10m el utilizado para su efecto. Dentro de esta distancia los LSP, se consideran correlacionados espacialmente durante el movimiento del UE. Dado el caso, si el UE se mueve más allá de la distancia de correlación, los LSP, se consideran independientes y se generan aleatoriamente de nuevo en función de distribuciones probabilísticas predefinidas, es decir, se iniciará un nuevo canal conjuntamente con las respuestas de impulso del canal (CIR, Channel Impulse Responses) de forma independiente.

Otro de los parámetros a gran escala que se considera es la condición LOS/NLOS, en consecuencia, la distancia de correlación para esta condición se denota en 15m. Se generan valores LOS/NLOS potencialmente correlacionados.

Para el tipo de pista del UE, se toma como base la opción hexagonal al acercarse más a la trayectoria real que puede tomar el usuario, conjuntamente con la distancia de 40 m como la longitud de la trayectoria recorrida por el UE. Además, se considera una distancia de actualización de 1m, es decir, el intervalo entre dos instancias del canal, (distancias muy pequeñas no es recomendable debido al costo desde el punto de vista computacional). En cuanto a la dirección de desplazamiento del UE se lo denota con un valor de 45° representando visualmente mejor la dirección del usuario.

Adicionalmente se considera parámetros como la velocidad del UE, para este punto, se evalúa con una velocidad de 1m/s, que representaría un valor cercano típico del caminar

de una persona. La velocidad del UE junto a la distancia de actualización, determina el tiempo de actualización que es el intervalo de tiempo entre dos CIR consecutivos. En cuestión de la longitud aproximada que tendría el lado de la pista del hexágono es el valor de 10 m por defecto. Finalmente, la orientación del hexágono se elige en el sentido de las agujas del reloj por facilidad.

Tabla 24. Valores definidos para bloque de consistencia espacial

| Parámetros | Valores |
|---|-----------------|
| Distancia de correlación del desvanecimiento de la sombra | 10m |
| Distancia de correlación de condición LOS/NLOS | 15m |
| Tipo de pista UT | Hexagonal |
| Distancia trayectoria | 40m |
| Transiciones de segmentos | Si |
| Distancia de actualización | 1m |
| Dirección de movimiento | 45° |
| Velocidad UT | 1m/s |
| Longitud del lado de la pista | 10m |
| Orientación | Sentido horario |

Fuente: Elaboración propia

- **Parámetros para modelo con bloqueo humano**

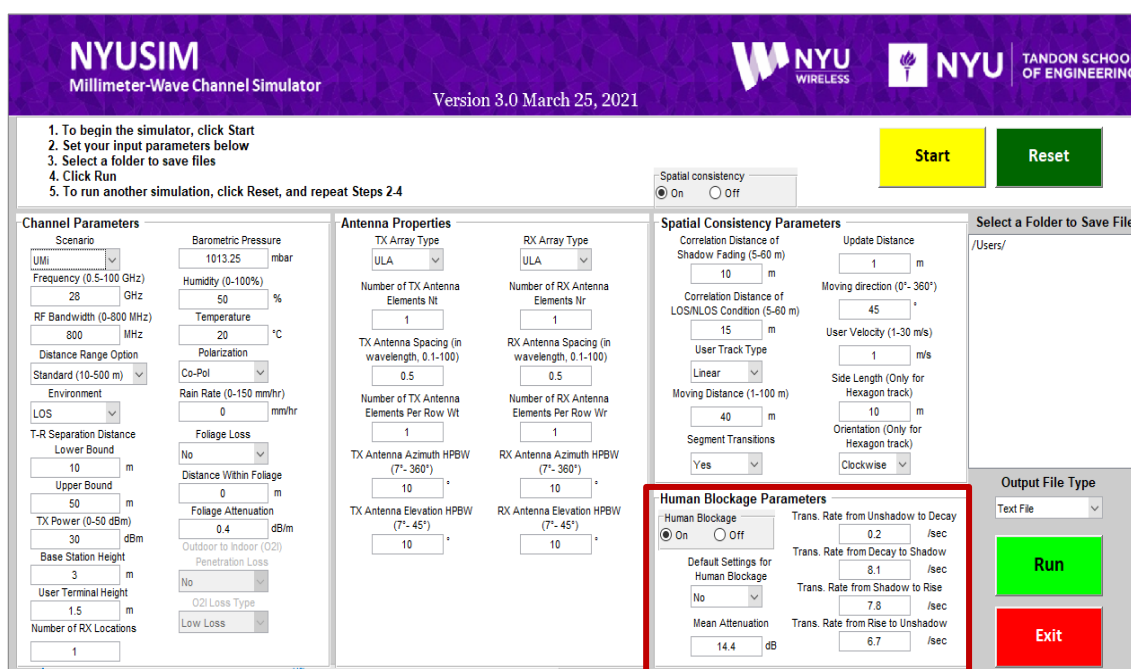


Figura 50. NYUSIM – Parámetros para bloqueo humano

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, el cuarto bloque permite representar la pérdida por sombra de bloqueo humano, es decir, facilita la observación de la pérdida cuando una persona se encuentra cerca del teléfono móvil (UE) pudiendo este intervenir en el enlace de comunicación. Por lo general el bloqueo humano provoca una pérdida de sombra temporal, la misma que puede durar varios milisegundos.

Para este proceso el simulador incrementa el uso del modelo de Markov, con el fin de representar de manera más realista las pérdidas que son causadas por bloqueo humano, para ello, se puede diferenciar 4 etapas o estados: Sin sombra, Decaimiento, Con sombra y Aumento, los cuales representan un valor de atenuación media de 14,4dB.

Considerando las cuatro etapas de bloqueo humano, el simulador permite describir la aproximación lineal hacia cada una de los estados, teniendo en cuenta el ángulo del azimut HPBW, descrito en el bloque anterior (Parámetros de antena). De esta manera el paso de un estado a otro viene determinado por las siguientes expresiones:

- Transición del estado sin sombra al estado de decaimiento:

$$\lambda_{decay} = 0,2 \left(\frac{1}{seg} \right) \quad (25)$$

- Transición del estado de decaimiento al estado de sombra

$$\lambda_{shadow} = 0,065 * HPBW + 7,425 \left(\frac{1}{seg} \right) \quad (26)$$

- Transición del estado de sombra al estado de aumento

$$\lambda_{rise} = 0,05 * HPBW + 7,35 \left(\frac{1}{seg} \right) \quad (27)$$

- Transición del estado de aumento al estado de sin sombra

$$\lambda_{unshadow} = 6,7 \left(\frac{1}{seg} \right) \quad (28)$$

Al reemplazar el valor del ángulo (10°) en las etapas λ_{shadow} , λ_{rise} , los cuatro estados para la simulación quedan definidos de acuerdo a la tabla 25.

Tabla 25. *Valores definidos para modelo con bloqueo humano*

| Parámetros | Valores |
|--------------------------------------|----------------|
| Transición: Sin sombra – Decaimiento | 0,2 / seg |
| Transición: Decaimiento – Sombra | 8,1 / seg |
| Transición: Sombra – Aumento | 7,8 / seg |
| Transición: Aumento – Sin Sombra | 6,7 / seg |

Fuente: Elaboración propia

En base a los valores presentados para cada bloque, se ingresan en cada uno de los escenarios disponibles del simulador. A partir de los datos ingresados, en una primera parte, al ejecutar la simulación (3 bloques conjuntos: Parámetros de Canal, Propiedades de Antena y Bloqueo Humano), NYUSIM retorna seis ventanas que representan los siguientes puntos:

- Espectro de potencia tridimensional AOD (Ángulo de salida)
- Espectro de potencia tridimensional AOA (Ángulo de llegada)
- Perfil de retardo de potencia (PDP) omnidireccional
- PDP direccional con mayor potencia
- PDP a pequeña escala
- Pérdida de la trayectoria omnidireccional y direccional

De la misma manera, para la ejecución del bloque de consistencia espacial, se obtienen 5 representaciones:

- Mapa de intensidad del desvanecimiento por sombra (SF) espacialmente correlacionado
- Mapa de condición LOS/NLOS espacialmente correlacionados
- Pista del terminal de usuario (UT) en el mapa de desvanecimiento de sombra
- Evolución del perfil de retardo de potencia (PDP) omnidireccional
- Evolución del perfil de retardo de potencia (PDP) direccional con mayor potencia

En la presente sección se analiza los resultados de la simulación para cada escenario disponible y considerando los dos entornos LOS y NLOS se obtiene:

6.1.1 Escenario: Microcelda urbana

| Channel Parameters | Antenna Properties | Spatial Consistency Parameters |
|---|---|---|
| Scenario UMi Frequency (0.5-100 GHz) 28 GHz RF Bandwidth (0-800 MHz) 800 MHz Distance Range Option Standard (10-500 m) Environment LOS T-R Separation Distance Lower Bound 100 m Upper Bound 100 m TX Power (0-50 dBm) 30 dBm Base Station Height 10 m User Terminal Height 1.5 m Number of RX Locations 1 | Barometric Pressure 1013.25 mbar Humidity (0-100%) 50 % Temperature 20 °C Polarization Co-Pol Rain Rate (0-150 mm/hr) 0 mm/hr Foliage Loss No Distance Within Foliage 0 m Foliage Attenuation 0.4 dB/m Outdoor to Indoor (O2I) Penetration Loss No O2I Loss Type Low Loss | TX Array Type URA Number of TX Antenna Elements Nt 2 TX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100) 0.5 Number of TX Antenna Elements Per Row Wt 1 TX Antenna Azimuth HPBW (7°-360°) 10 ° TX Antenna Elevation HPBW (7°-45°) 10 ° |
| RX Array Type URA Number of RX Antenna Elements Nr 2 RX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100) 0.5 Number of RX Antenna Elements Per Row Wr 1 RX Antenna Azimuth HPBW (7°-360°) 10 ° RX Antenna Elevation HPBW (7°-45°) 10 ° | Spatial Consistency Parameters Correlation Distance of Shadow Fading (5-60 m) 10 m Update Distance 1 m Correlation Distance of LOS/NLOS Condition (5-60 m) 15 m Moving direction (0°-360°) 45 ° User Track Type Hexagon User Velocity (1-30 m/s) 1 m/s Moving Distance (1-100 m) 40 m Side Length (Only for Hexagon track) 10 m Segment Transitions Yes Orientation (Only for Hexagon track) Clockwise | Human Blockage Parameters Human Blockage <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off Trans. Rate from Unshadow to Decay 0.2 /sec Default Settings for Human Blockage No Trans. Rate from Decay to Shadow 8.1 /sec Mean Attenuation 14.4 dB Trans. Rate from Shadow to Rise 7.8 /sec Trans. Rate from Rise to Unshadow 6.7 /sec |

Figura 51. Parámetros ingresados para escenario UMi

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Entorno: LOS**

En un primer escenario en condiciones en línea de vista, entre las características que se ejecutan son los espectros de potencia AOD y AOA correspondientes a los ángulos de salida y llegada respectivamente, que forman cada uno de los componentes multitrayecto, como se observa en la figura 52. Adicionalmente, la potencia mínima que puede ser recibida para las diferentes componentes, de acuerdo a los rangos de colores en la representación, para este caso la mínima se encuentra en -100dBm.

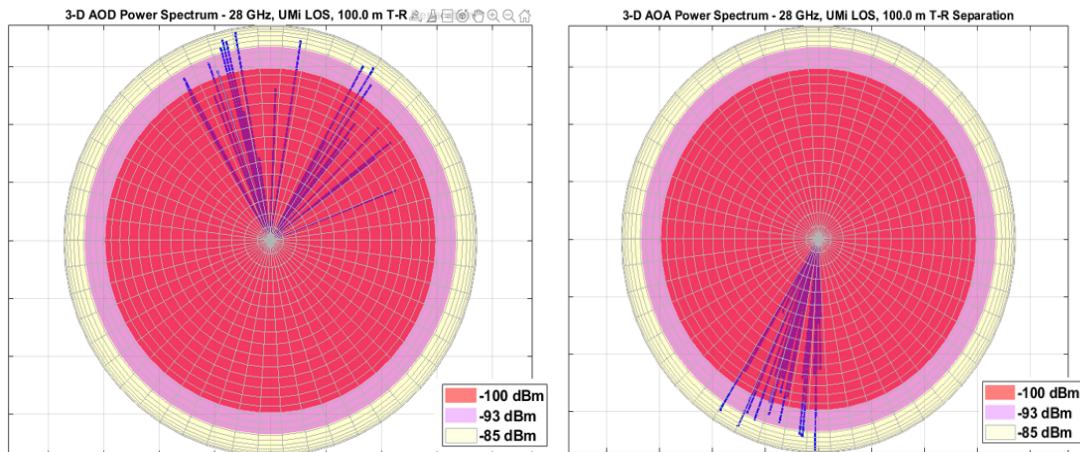


Figura 52. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMi-LOS

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En una siguiente ventana se obtiene el perfil de retardo de potencia omnidireccional (PDP) como lo indica la figura 53, en donde se visualizan los parámetros definidos

inicialmente como: frecuencia, escenario, condición y distancia. En la gráfica obtenida se observa un clúster de tiempo, conformado por los componentes multitrayecto con amplitudes exponencialmente decrecientes, en donde se destaca el nivel de potencia omnidireccional recibida de $-78,7\text{dBm}$, en conjunto con el valor RMS de la dispersión del retardo de $17,9\text{ns}$. Finalmente, la pérdida de trayectoria a gran escala con un valor de $108,7\text{dB}$, todo esto para un PLE (exponente de pérdida de trayectoria “n”) de $2,4$. Este último valor se debe tener en cuenta que depende de la frecuencia y de las características físicas inherentes al camino.

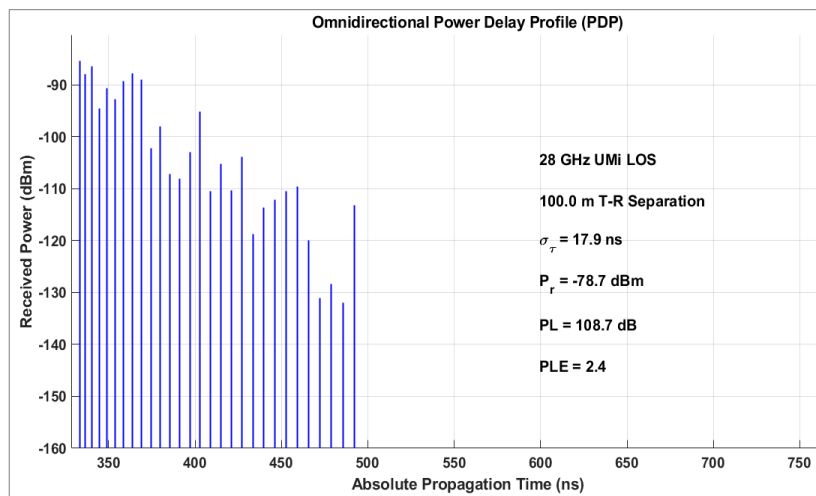


Figura 53. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMi-LOS

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la figura 54 se indica el perfil de retardo de potencia direccional de mayor potencia, esto al ser básicamente las antenas direccionales las utilizadas de manera realista para una comunicación utilizando mmWave. Para la obtención de este perfil el simulador busca la mejor señal después de haber obtenido el PDP omnidireccional, de modo que encuentra el mejor ángulo de apuntamiento de las antenas de Tx y Rx que proporcione la mayor potencia recibida, en este caso con el valor de $-36,1\text{dBm}$. Adicionalmente, se obtiene la pérdida de trayectoria a gran escala de $115,3\text{dB}$. La dispersión del retardo de $2,9\text{ns}$ para un PLE de $2,7$.

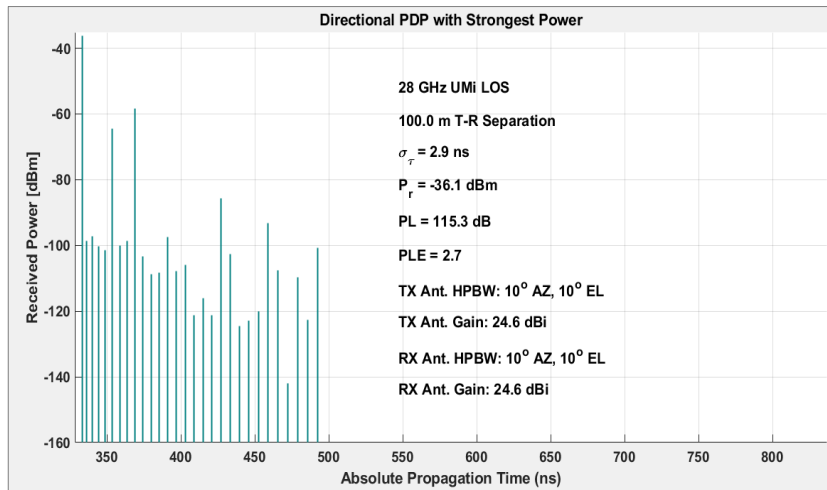


Figura 54. PDP direccional con mayor potencia, UMi-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la figura 55 se extrae el mismo perfil de retardo de potencia omnidireccional de la figura 53 presentado a menor escala, esto para una visualización del espaciamiento en términos de longitud de onda (0.5), así como el número de elementos de antena utilizados en este caso $N_r=2$.

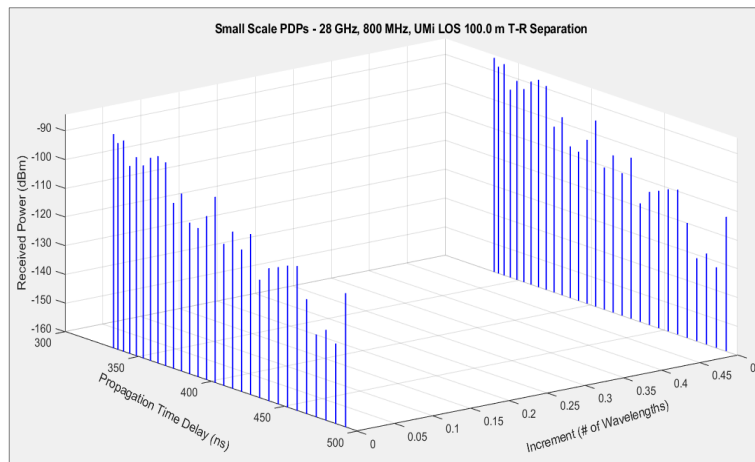


Figura 55. PDP pequeña escala, UMi-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para evaluar las pérdidas que se presentan de acuerdo a la distancia ingresada, se extrae la ventana de dispersión de pérdidas de trayectoria, esto generada tras n ejecuciones continuas de simulación con los mismos valores de entrada. En la ventana se pueden visualizar las pérdidas de trayectoria a gran escala PL, valores del exponente de pérdida PLE y la desviación estándar del desvanecimiento de sombra σ , esto usando el método del error cuadrático medio mínimo (MMSE), que representa una estimación en función de pérdidas.

En la figura 56, se refleja las pérdidas tanto en el trayecto omnidireccional, direccional, y en la dirección con la mayor potencia recibida en todo el rango de distancia. Evidenciando claramente la degradación de potencia recibida cuando viaja desde la terminal transmisora hacia la terminal receptora, esto debido a la presencia de factores atmosféricos, en donde, conforme aumenta la distancia, las pérdidas obtenidas serán mayores.

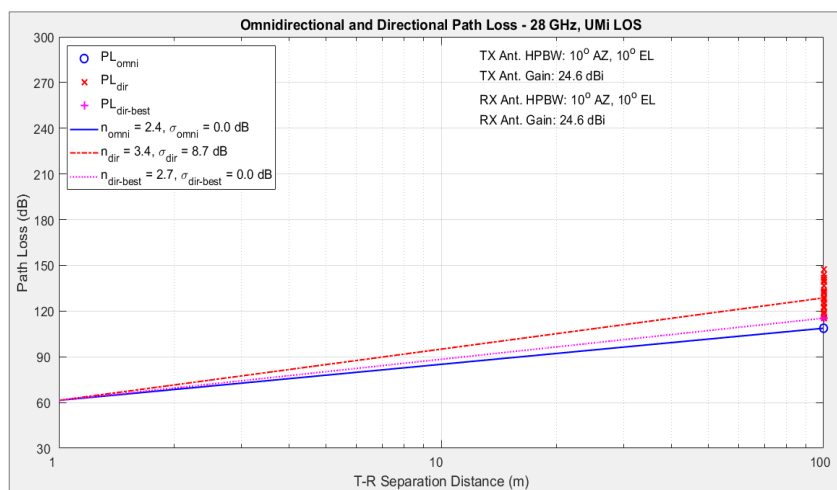


Figura 56. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMi-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

• **Entorno: NLOS**

Para un entorno sin línea de vista, no se satisfacen las condiciones de visibilidad directa Tx-Rx, en consecuencia, la señal se propaga por medio de fenómenos de reflexión, difracción y dispersión, presentando diferentes amplitudes dando origen a la propagación multi trayectoria. Como se observa en la figura 57, tanto para AOD y AOA, los niveles de potencia se reducen, siendo el valor de -134dBm obtenido para microcelda urbana.

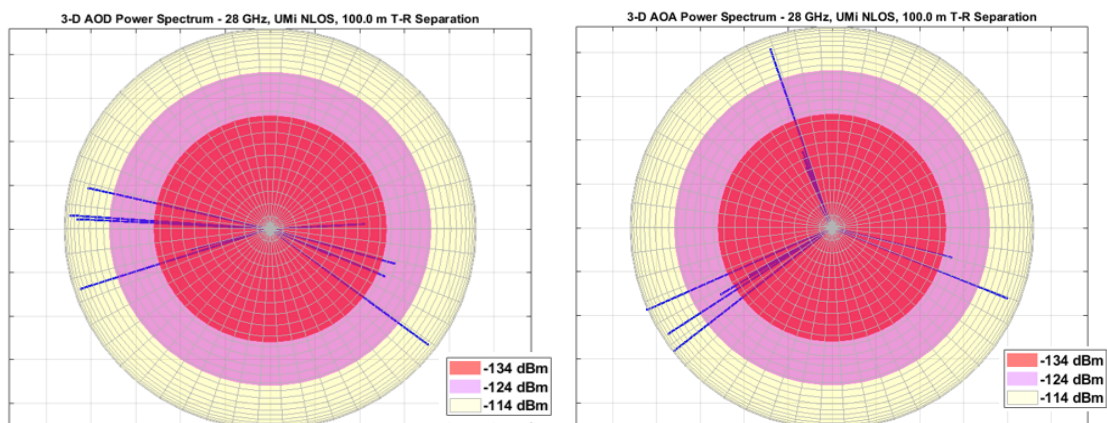


Figura 57. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMi-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En el PDP, el nivel de potencia omnidireccional recibida disminuye en relación al entorno LOS, teniendo un valor de -108,2 dBm, un valor de dispersión de retardo en 11,4ns. Al considerar entornos sin línea de vista y añadiendo el modelo de bloqueo humano, las condiciones físicas influyen para un PLE de 3,8 y un incremento de pérdida de trayectoria de 138,2dB.

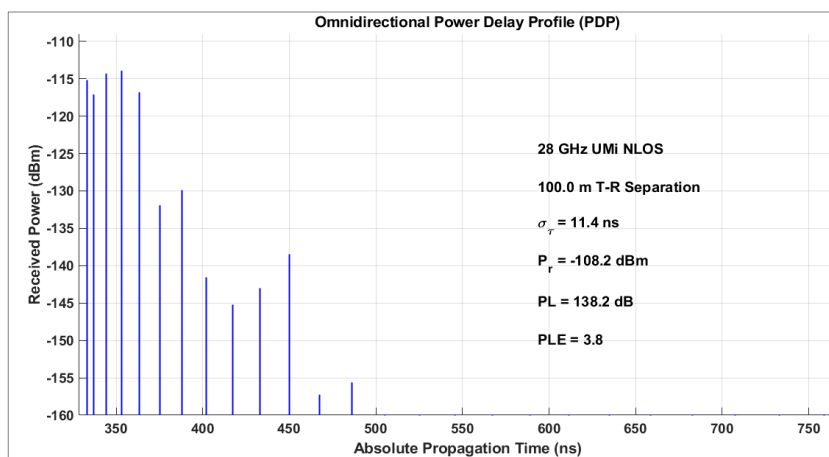


Figura 58. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMi-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el PDP direccional con mayor potencia se tiene un PLE de 4,1 con una pérdida de trayectoria de 114dB y una dispersión de retardo de 0,1ns. El valor de mayor potencia recibida es de -64,8dBm que se reduce notablemente en relación al entorno LOS.

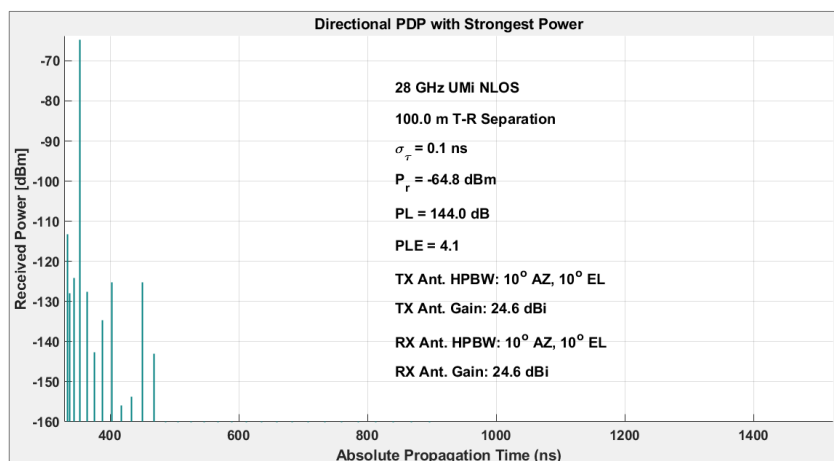


Figura 59. PDP direccional con mayor potencia, UMi-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la representación a menor escala, se visualiza de forma similar el PDP omnidireccional con el espaciamiento de $0,5 \lambda$ y dos elementos de antena utilizados.

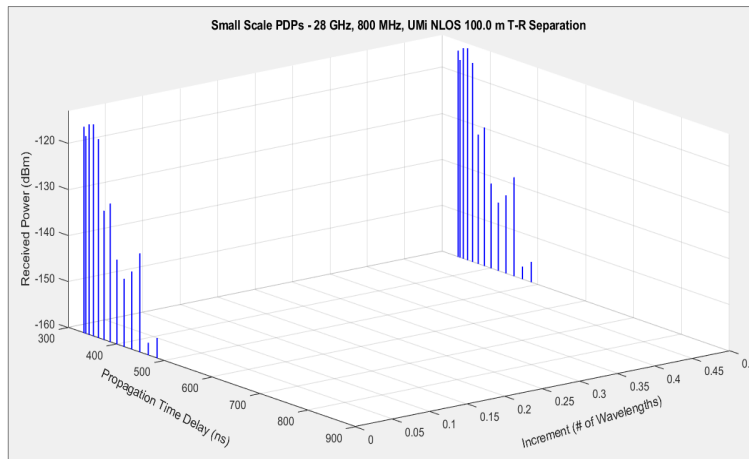


Figura 60. PDP pequeña escala, UMi-NLOS

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En cuanto a la dispersión de pérdidas de trayectoria se define en una distancia de 100m. Para la trayectoria omnidireccional una pérdida de 138,2dB, en el caso de la direccional de 159,5dB y finalmente para la dirección con la mayor potencia recibida se verifica en 144dB. La potencia al disminuir exponencialmente con la distancia, permite una predicción de la intensidad de la señal y el alcance de la celda.

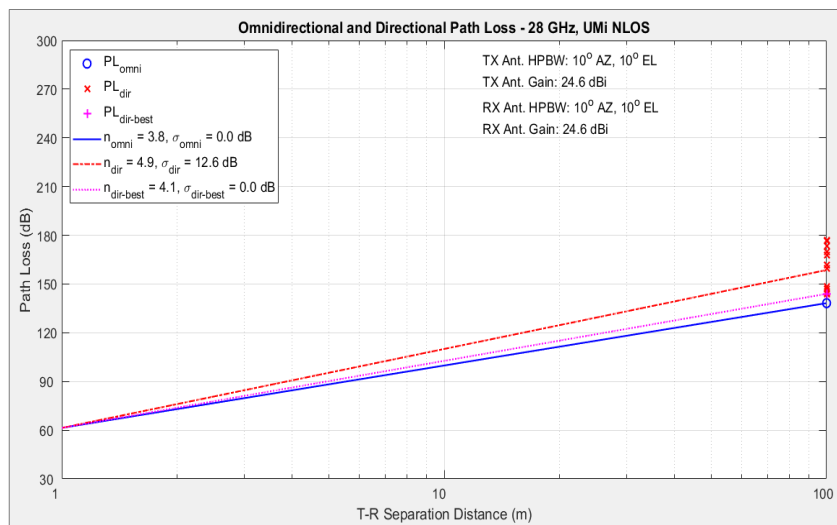


Figura 61. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMi-NLOS

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Consistencia espacial**

Para este procedimiento se asume que el UT viaja hacia una ruta específica y genera una respuesta de impulso de canal correlacionada y consecutiva, es decir, para puntos sucesivos de la trayectoria.

En la ejecución se generan 5 ventanas con fines visuales, en la figura 62 se inicia con el mapa de intensidad de desvanecimiento de sombra (SF) correlacionado en un área de 50x200, donde se observa espacialmente la ubicación de la estación base y del UT, así como la trayectoria o pista que realiza. Entre la información básica se encuentra: la frecuencia, entorno, separación Tx–Rx, desviación estándar del desvanecimiento por sombra (σ_{SF}), distancia del desplazamiento y velocidad del UT establecida inicialmente. El SF varía de -10 dB a 10dB siendo la disminución de la potencia recibida, estas pérdidas en dB representan una variable aleatoria con distribución normal.

Puntualizando los puntos que se visualizan para la condición SF, estos se generan mediante un mapa de cuadrícula bidimensional para contener los valores correlacionados espacialmente en el área simulada. Para la SF se modela como una variable aleatoria log-normal con media cero y desviación estándar de 4dB.

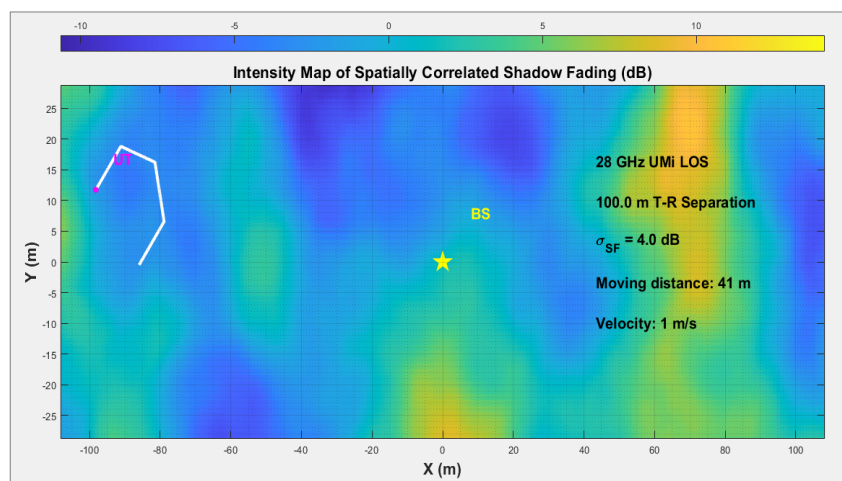


Figura 62. Mapa de intensidad de desvanecimiento por sombra, UMi
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para la figura 63 se extrae el mapa de manera similar, pero para condiciones LOS/NLOS correlacionada espacialmente. El mapa se inicializa asignando una variable aleatoria en cada cuadrícula, creando un filtro exponencial bidimensional, para este escenario se muestra especialmente la prevalencia de la condición NLOS, en donde todas las ubicaciones en el área experimentarán la misma propagación.

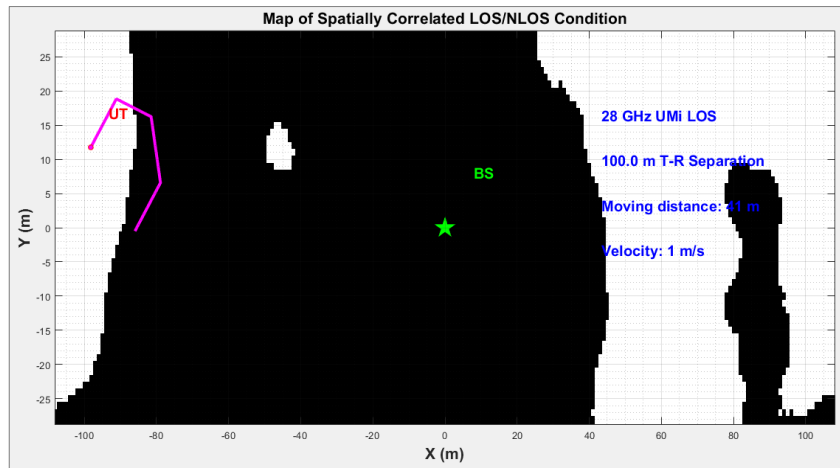


Figura 63. Mapa de condición LOS/NLOS correlacionados espacialmente, UMi
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

De acuerdo al mapa presentado en la figura 62, se extrae en una vista más amplia la ubicación relativa del UT con respecto a la estación base. Se visualiza la pista a lo largo de la cual se desplaza el UT en un sentido horario y distancia recorrida (figura 64).

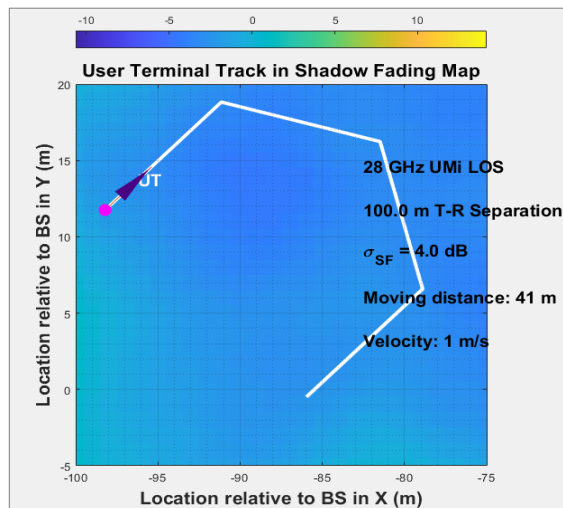


Figura 64. Dirección y distancia de pista de usuario, UMi
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

De manera similar a las representaciones de los bloques anteriores, en los resultados de consistencia espacial se obtienen las PDP omnidireccionales (figura 65), pero esta vez de manera consecutiva con actualización cada 1m a lo largo de la trayectoria que sigue el usuario en este caso los 41m, visualizando principalmente la variación de potencia recibida que se encontraría entre un rango de -90 a -70 dBm aproximadamente.

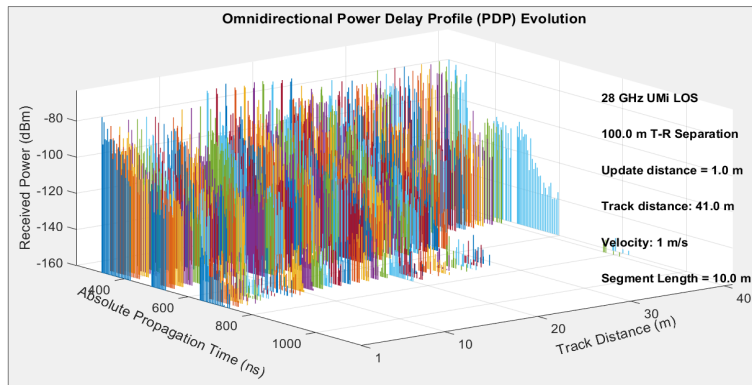


Figura 65. PDP omnidireccionales consecutivas a lo largo de trayectoria del usuario, UMi
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Simultáneamente para las PDP direccionales con la mayor potencia recibida, siendo estas ahora consecutivas siguiendo la trayectoria del usuario, visualizando un rango aproximado entre -80 a -40 dBm.

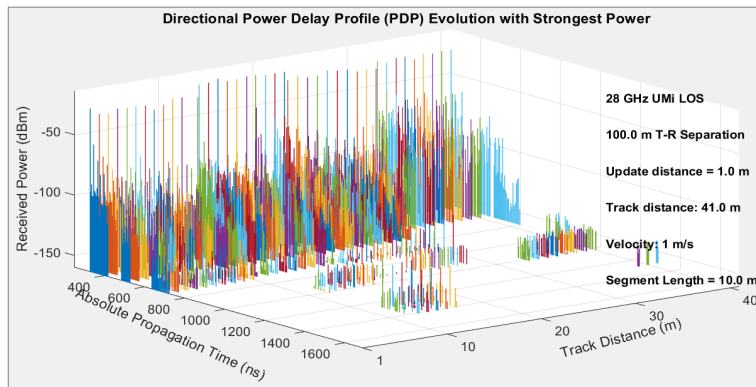


Figura 66. PDP direccionales consecutivas con mayor potencia a lo largo de trayectoria del usuario, UMi
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

6.1.2 Escenario: Macrocelda urbana

| Channel Parameters | Antenna Properties | Spatial Consistency Parameters | Human Blockage Parameters |
|---|--|---|---|
| Scenario: UMa Frequency (0.5-100 GHz): 28 GHz RF Bandwidth (0-800 MHz): 800 MHz Distance Range Option: Standard (10-500 m) Environment: LOS T-R Separation Distance Lower Bound: 200 m Upper Bound: 200 m TX Power (0-50 dBm): 30 dBm Base Station Height: 25 m User Terminal Height: 1.5 m Number of RX Locations: 1 | Barometric Pressure: 1013.25 mbar Humidity (0-100%): 50 % Temperature: 20 °C Polarization: Co-Pol Rain Rate (0-150 mm/hr): 0 mm/hr Foliage Loss: No Distance Within Foliage: 0 m Foliage Attenuation: 0.4 dB/m Outdoor to Indoor (O2I) Penetration Loss: No O2I Loss Type: Low Loss | TX Array Type: URA Number of TX Antenna Elements Nt: 2 TX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5 Number of TX Antenna Elements Per Row Wt: 1 TX Antenna Azimuth HPBW (7°- 360°): 10 ° TX Antenna Elevation HPBW (7°- 45°): 10 ° | RX Array Type: URA Number of RX Antenna Elements Nr: 2 RX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5 Number of RX Antenna Elements Per Row Wr: 1 RX Antenna Azimuth HPBW (7°- 360°): 10 ° RX Antenna Elevation HPBW (7°- 45°): 10 ° |
| Correlation Distance of Shadow Fading (5-60 m): 10 m Correlation Distance of LOS/NLOS Condition (5-60 m): 15 m User Track Type: Hexagon Moving Distance (1-100 m): 40 m Segment Transitions: Yes | Update Distance: 1 m Moving direction (0°- 360°): 45 ° User Velocity (1-30 m/s): 1 m/s Side Length (Only for Hexagon track): 10 m Orientation (Only for Hexagon track): Clockwise | Human Blockage: <input checked="" type="radio"/> On <input type="radio"/> Off Default Settings for Human Blockage: No Mean Attenuation: 14.4 dB | Trans. Rate from Unshadow to Decay: 0.2 /sec Trans. Rate from Decay to Shadow: 8.1 /sec Trans. Rate from Shadow to Rise: 7.8 /sec Trans. Rate from Rise to Unshadow: 6.7 /sec |

Figura 67. Parámetros ingresados para escenario UMa
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Entorno: LOS**

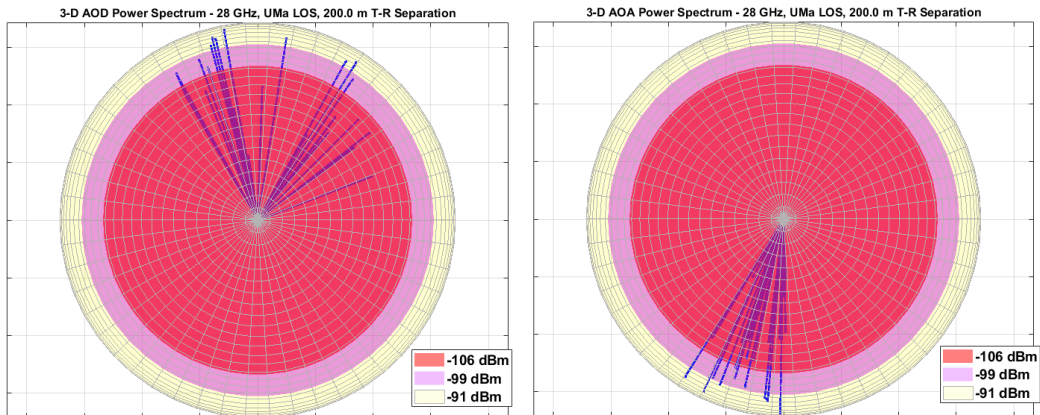


Figura 68. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En un segundo escenario en condiciones en línea de vista, entre las características que se destaca debido a la macrocelda es el incremento de la distancia, siendo 200 m la utilizada para su ejecución. La figura 68 presenta los espectros de potencia AOD y AOA que forman cada uno de los componentes multitrayecto, para este escenario, la potencia mínima que puede ser recibida se presenta en -106dBm.

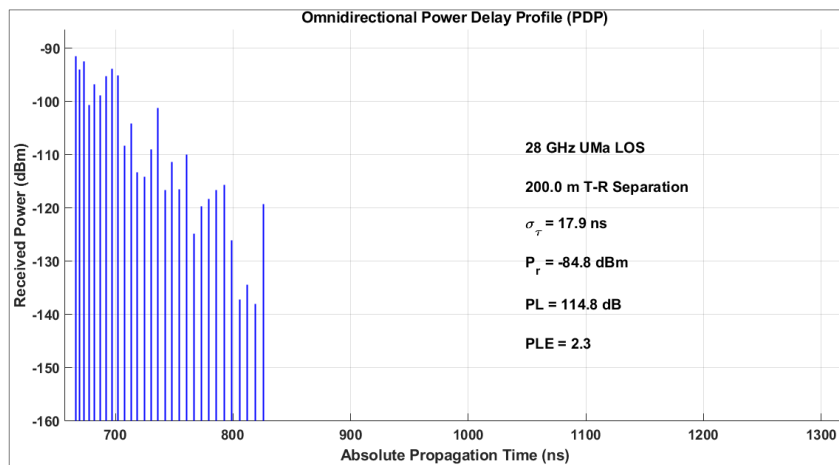


Figura 69. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En el perfil de la figura 69, se observa de igual forma un clúster de tiempo, conformado por los componentes multitrayecto, destacando el nivel de potencia omnidireccional recibida de -84,8dBm con un valor RMS de dispersión del retardo de 17.9ns. Finalmente, la pérdida de trayectoria a gran escala sube a un valor de 114,8dB, todo esto para un PLE de 2,3.

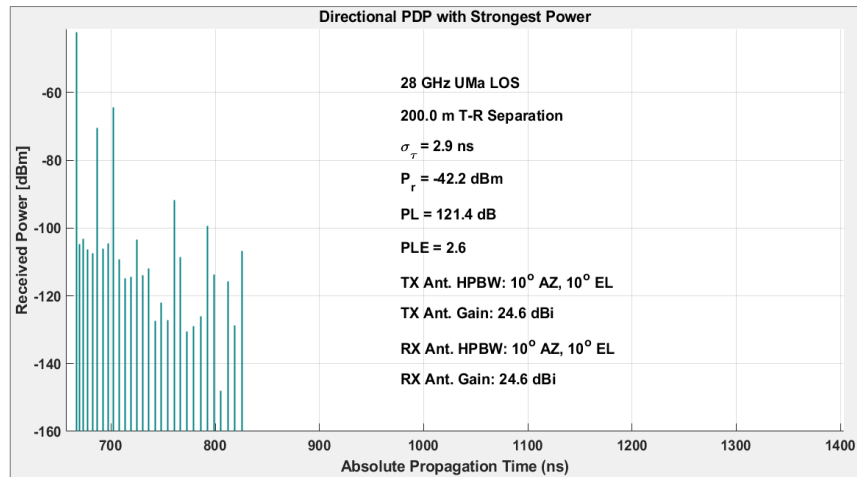


Figura 70. PDP direccional con mayor potencia, UMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el perfil de retardo de potencia direccional de mayor potencia, el comportamiento presentado es similar, la mejor señal proporcionada presenta una mayor potencia con -42,2dBm, una pérdida de trayectoria a gran escala de 121,4dB, dispersión del retardo de 2,9ns para un PLE de 2,6 de acuerdo a la frecuencia.

En la representación a menor escala, se visualiza de forma similar el PDP omnidireccional con el espaciamiento de $0,5 \lambda$ y dos elementos de antena utilizados

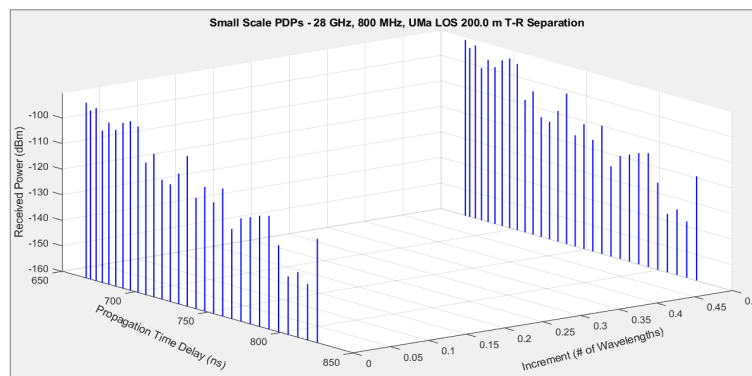


Figura 71. PDP pequeña escala, UMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la evaluación de las pérdidas de acuerdo a la distancia ingresada de 200m, la ventana de dispersión de pérdidas de trayectoria tras las n ejecuciones continuas refleja las pérdidas de 114,8dB para el trayecto omnidireccional, 121,4dB para el direccional. Se evidencia al incrementar significativamente la distancia en comparación con 100m, la degradación de la potencia recibida es superior.

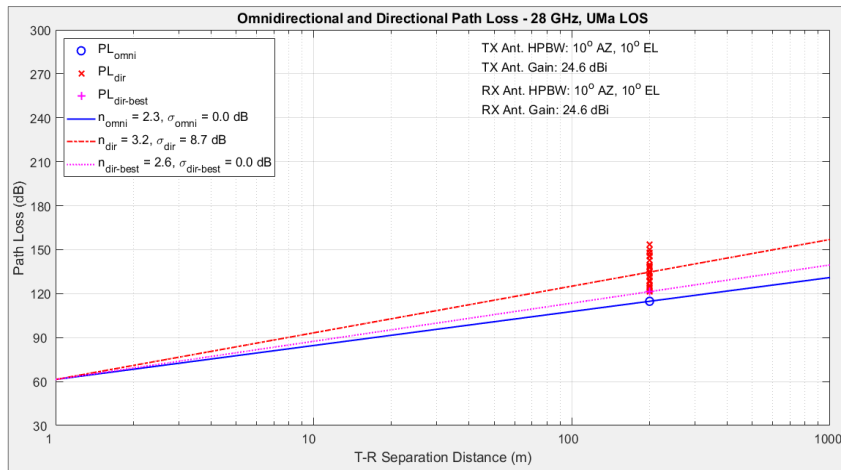


Figura 72. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMa LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Entorno: NLOS**

Para un entorno NLOS, se visualiza una propagación multi trayectoria. Para AOD y AOA el nivel mínimo de potencia recibida se reduce a -137dBm, esto considerando la distancia superior para macrocelda urbana en 200m y factores adicionales propias de un estado sin línea de vista.

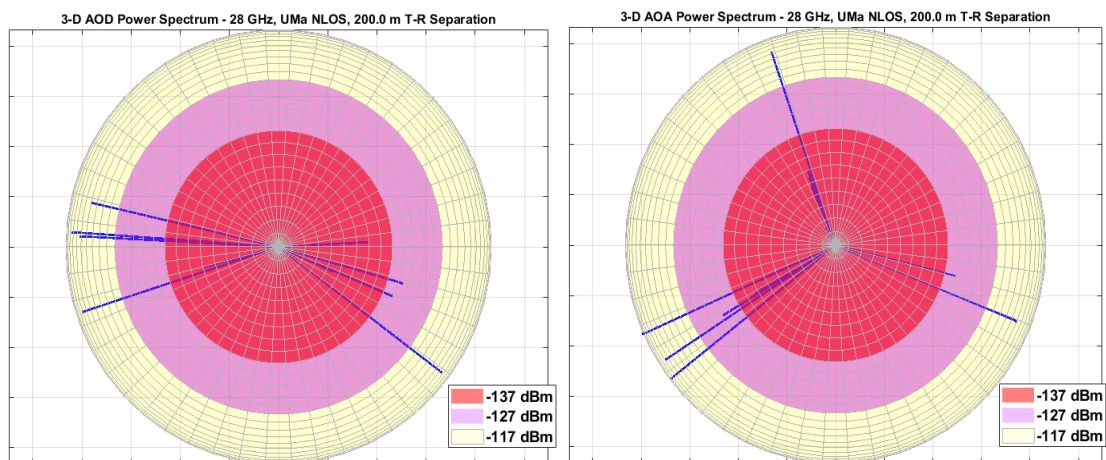


Figura 73. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, UMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En el PDP, el nivel de potencia omnidireccional recibida disminuye en relación al entorno LOS, teniendo un valor de -111dBm, un valor de dispersión de retardo en 11,4ns. Al considerar entornos sin línea de vista las condiciones físicas influyen para un PLE de 3,5 con un incremento de pérdida de trayectoria de 141dB.

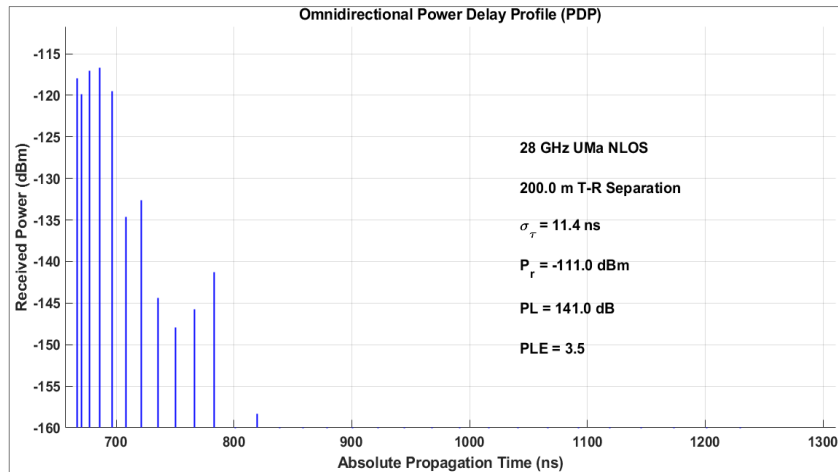


Figura 74. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, UMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el PDP direccional con mayor potencia se tiene un PLE superior de 3,7 obteniendo una pérdida de trayectoria de 146,7dB, y una dispersión de retardo de 0.1ns. El valor de mayor potencia recibida es de -67.5dBm que se reduce notablemente en relación al entorno LOS.

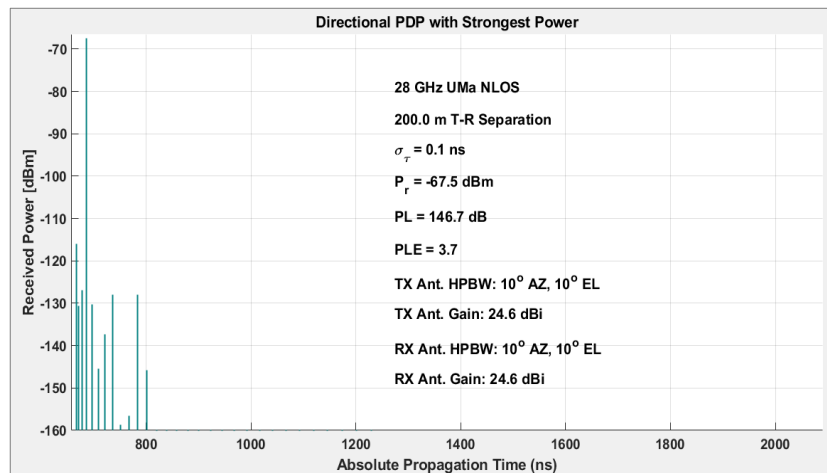


Figura 75. PDP direccional con mayor potencia, UMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la figura 76 se extrae el perfil de retardo de potencia omnidireccional a menor escala, para una visualización del espaciamiento en términos de longitud de onda (0.5), así como el número de elementos de antena utilizados, $N_r=2$

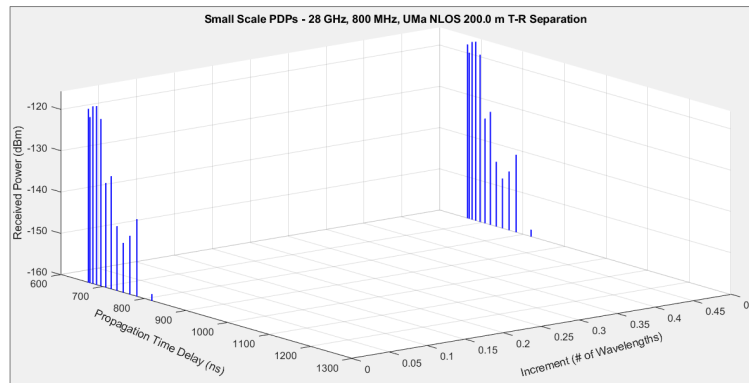


Figura 76. PDP pequeña escala, UMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la dispersión de pérdidas de trayectoria definida para la distancia en 200m, la trayectoria omnidireccional posee una pérdida de 141dB, en el caso de la direccional de 159,8dB y finalmente para la dirección con la mayor potencia recibida se verifica en 146,7dB. La potencia al disminuir exponencialmente con la distancia, permite una predicción de la intensidad de la señal y el alcance de la celda.

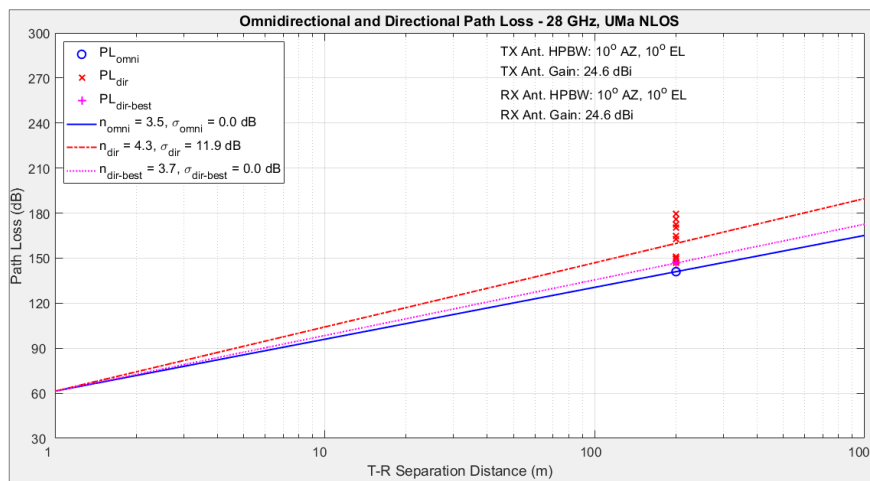


Figura 77. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, UMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Consistencia espacial**

El mapa de intensidad de desvanecimiento de sombra correlacionado se presenta en un área de 200x300, donde se observa espacialmente la ubicación de la estación base, del UT y la trayectoria o pista que realiza. Mediante el mapa de cuadrícula bidimensional generado, para el escenario de macrocelda y distancia establecida se puede ver una mayor variación del desvanecimiento por sombra. Para áreas urbanas edificadas el desvanecimiento puede ser causado debido a que, en este escenario la altura de las antenas

de los UT está por muy debajo de la altura de las estructuras circundantes con menos probabilidad de línea de vista.

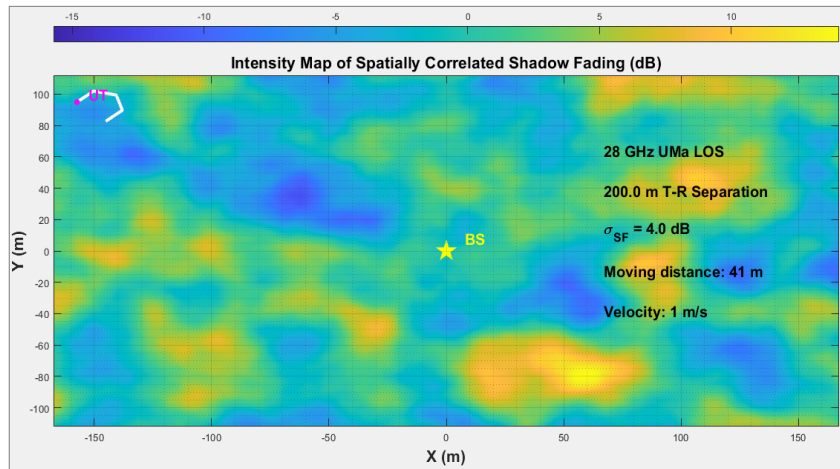


Figura 78. Mapa de intensidad de desvanecimiento por sombra, UMa
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para condiciones LOS/NLOS correlacionada espacialmente. El mapa se inicializa asignando una variable aleatoria en cada cuadrícula, para este escenario se muestra una mayor variación de ambas condiciones.

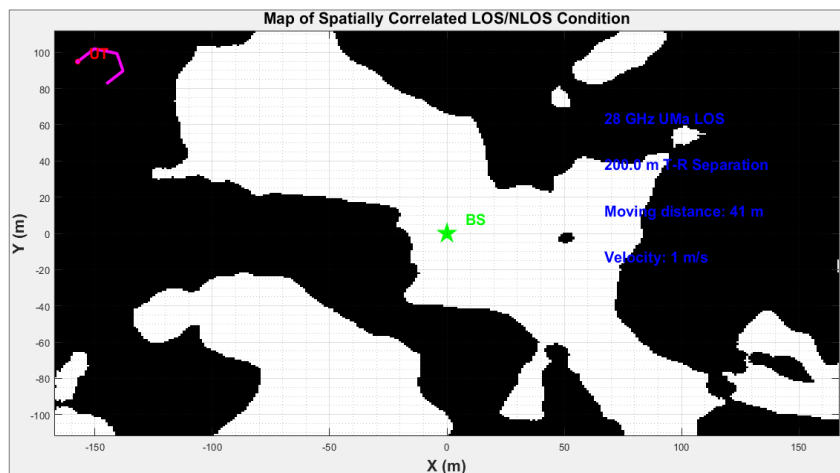


Figura 79. Mapa de condición LOS/NLOS correlacionados espacialmente, UMa
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

De igual manera en la figura 80, se extrae una vista más amplia la ubicación relativa del UT con respecto a la estación base. La pista a lo largo de la cual se desplaza el UT se mantiene en un sentido horario y distancia recorrida.

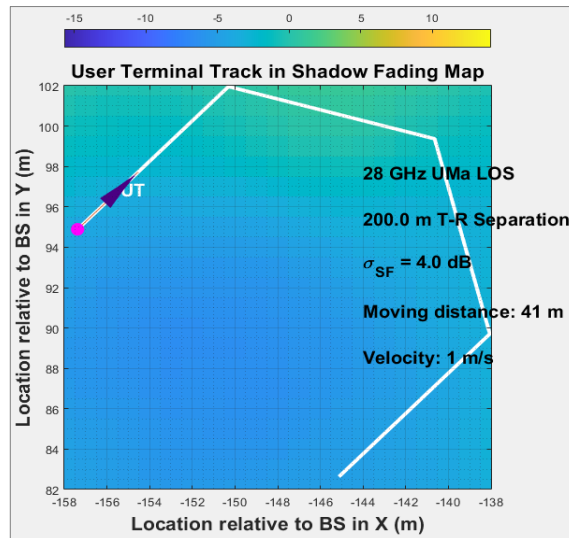


Figura 80. Dirección y distancia de pista del usuario, UMa
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la representación del PDP omnidireccional consecutiva se mantiene la actualización cada 1m, a lo largo de una trayectoria, para este escenario la variación de potencia recibida se encuentra en un rango aproximado de -100 a -80dBm.

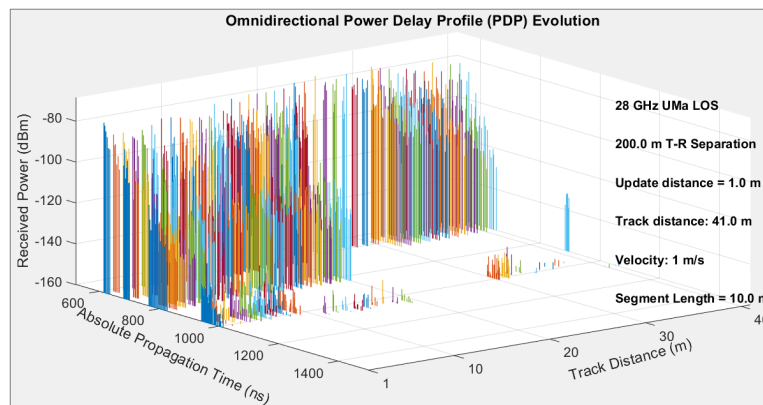


Figura 81. PDP omnidireccionales consecutivas a lo largo de trayectoria del usuario, UMa
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

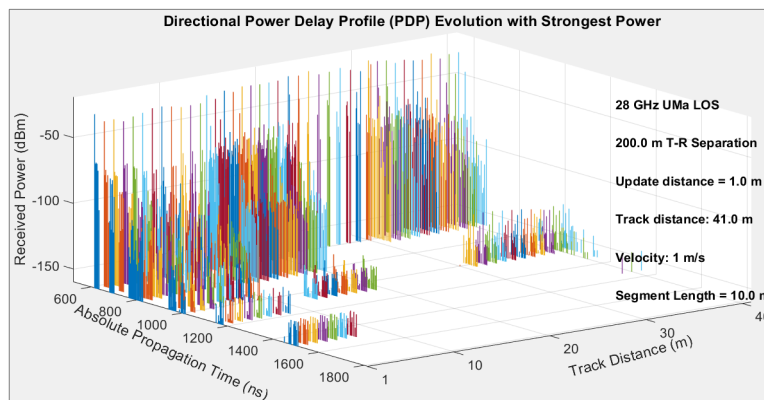


Figura 82. PDP direccionales consecutivas con mayor potencia a lo largo de trayectoria del usuario, UMa
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En el caso del PDP direccional (figura 82) con mayor potencia recibida, al ser consecutivas y siguiendo la trayectoria del usuario, con 200 m de separación del Tx-Rx se presenta entre un rango -80 a -40 dBm de potencia recibida.

6.1.3 Escenario: Macrocela rural

| Channel Parameters | Antenna Properties | Spatial Consistency Parameters |
|--|--|---|
| Scenario: RMa Frequency (0.5-100 GHz): 6 GHz RF Bandwidth (0-800 MHz): 100 MHz Distance Range Option: Standard (10-500 m) Environment: LOS T-R Separation Distance Lower Bound: 500 m Upper Bound: 500 m TX Power (0-50 dBm): 49 dBm Base Station Height: 35 m User Terminal Height: 1.5 m Number of RX Locations: 1 | Barometric Pressure: 1013.25 mbar Humidity (0-100%): 50 % Temperature: 20 °C Polarization: Co-Pol Rain Rate (0-150 mm/hr): 0 mm/hr Foliage Loss: No Distance Within Foliage: 0 m Foliage Attenuation: 0.4 dB/m Outdoor to Indoor (O2I) Penetration Loss: No O2I Loss Type: Low Loss | TX Array Type: ULA Number of TX Antenna Elements Nt: 2 TX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5 Number of TX Antenna Elements Per Row Wt: 1 TX Antenna Azimuth HPBW (7°- 360°): 10 ° TX Antenna Elevation HPBW (7°- 45°): 10 ° |
| | RX Array Type: ULA Number of RX Antenna Elements Nr: 2 RX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5 Number of RX Antenna Elements Per Row Wr: 1 RX Antenna Azimuth HPBW (7°- 360°): 10 ° RX Antenna Elevation HPBW (7°- 45°): 10 ° | Correlation Distance of Shadow Fading (5-60 m): 10 m Update Distance: 1 m Correlation Distance of LOS/NLOS Condition (5-60 m): 15 m Moving direction (0°- 360°): 45 ° User Track Type: Hexagon User Velocity (1-30 m/s): 1 m/s Moving Distance (1-100 m): 40 m Side Length (Only for Hexagon track): 10 m Orientation (Only for Hexagon track): Clockwise Segment Transitions: Yes |
| | | Human Blockage Parameters Human Blockage: <input checked="" type="radio"/> On Default Settings for Human Blockage: Yes Mean Attenuation: 14.4 dB Trans. Rate from Unshadowed to Decay: 0.2 /sec Trans. Rate from Decay to Shadow: 8.1 /sec Trans. Rate from Shadow to Rise: 7.8 /sec Trans. Rate from Rise to Unshadowed: 6.7 /sec |

Figura 83. Parámetros ingresados para escenario RMa

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Entorno: LOS**

Para un escenario RMa, dadas las recomendaciones del Release 16, determina una frecuencia inferior, en consecuencia, el establecimiento de una mayor distancia (500m). tanto en los espectros para AOD y AOA se visualiza un solo lóbulo espacial que representa la dirección de llegada principal del clúster temporal. La potencia mínima que puede ser recibida se presenta en -79dBm.

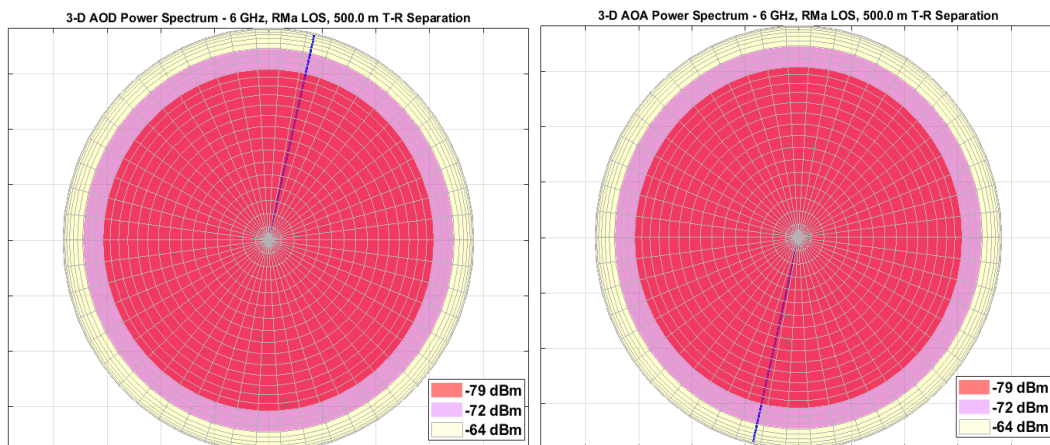


Figura 84. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, RMa-LOS

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En el perfil PDP omnidireccional de la figura 85 al presentarse un único componente multitrayecto, el valor de dispersión de retardo es de 0ns. El nivel de potencia recibida es de -64,5dBm y una pérdida de trayectoria de 113,5dB, esto para un PLE de 2,4 para un escenario rural.

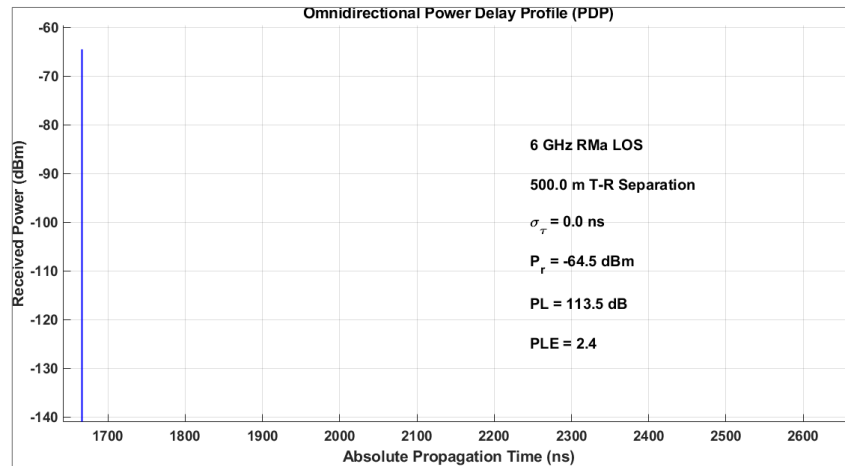


Figura 85. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, RMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el perfil de retardo de potencia direccional, la mayor potencia recibida se establece en un valor de -15,3dBm, un retardo de 0ns al ser un único clúster temporal. Adicionalmente, se obtiene la pérdida de trayectoria a gran escala de 113,5dB, para un mismo valor de PLE de 2,4

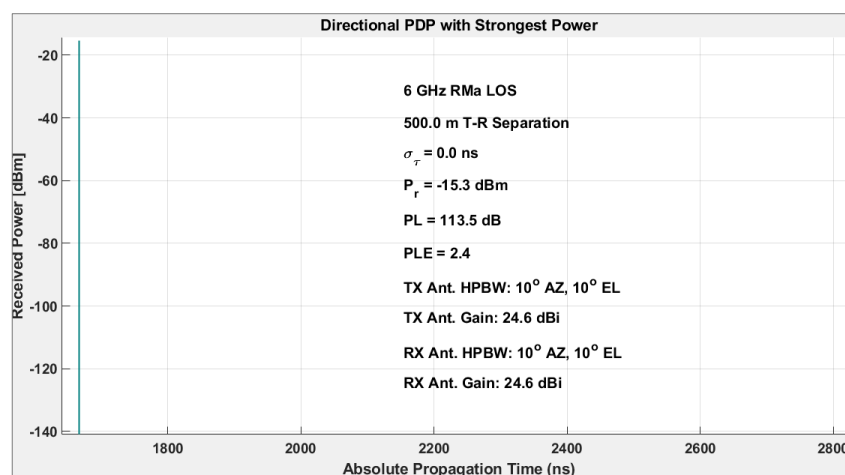


Figura 86. PDP direccional con mayor potencia, RMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la representación a menor escala (figura 87), se observa el PDP omnidireccional con espaciamiento de $0,5 \lambda$ y dos elementos de antena utilizados.

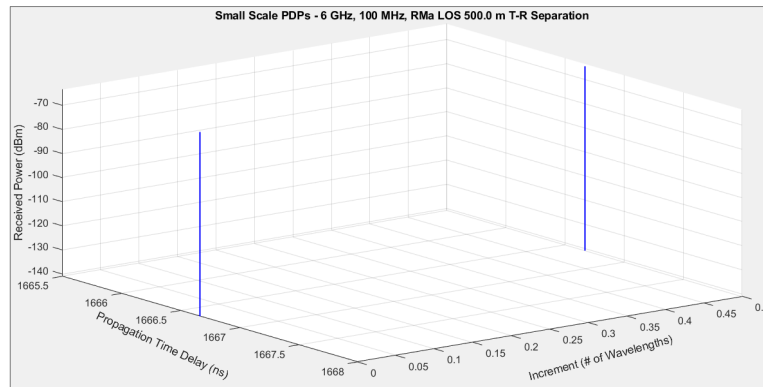


Figura 87. PDP pequeña escala, RMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la dispersión de pérdidas de trayectoria de la figura 88 se muestra para la distancia de 500m. En este escenario al encontrarse un único clúster temporal, las pérdidas de trayectoria se definen en un único punto, siendo 113,479dB permitiendo fácilmente una predicción de la intensidad de la señal y el alcance de la celda.

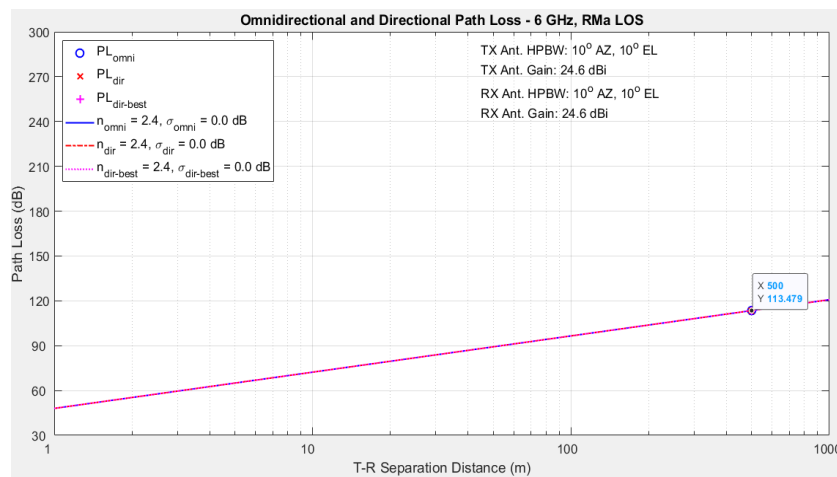


Figura 88. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, RMa-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Entorno: NLOS**

De acuerdo a los parámetros de entrada definidos, los espectros para AOD y AOA de la figura 89 se presentan en un solo lóbulo espacial con una única llegada del clúster temporal. La potencia mínima recibida en presencia de las condiciones atmosféricas y bloqueo humano disminuye a -114dBm.

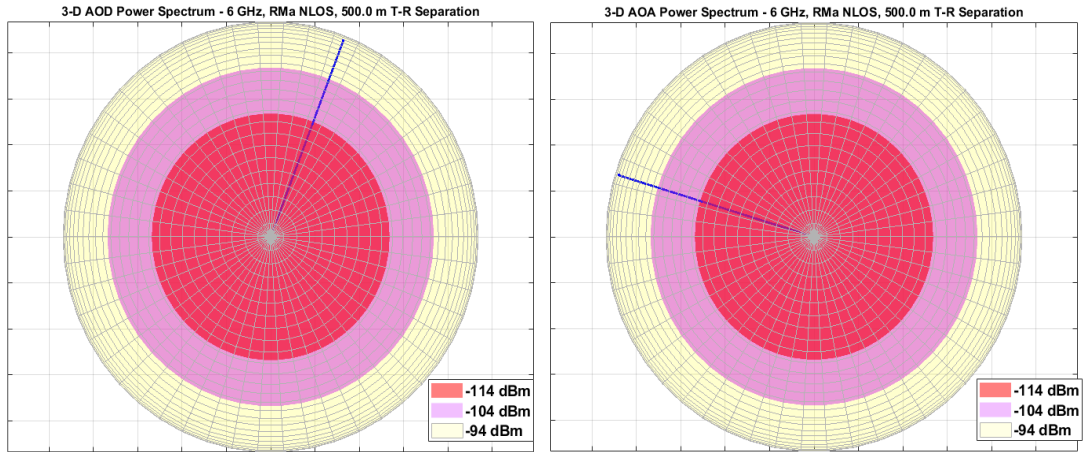


Figura 89. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, RMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En cuanto al perfil PDP omnidireccional, la pérdida de trayectoria se incrementan en 143,2dB. Para un escenario rural sin linea de vista junto con el parámetro de bloqueo humano disponible, se define un exponente PLE de 3,5 obteniendo un nivel potencia recibida de -94,2 dBm con 0ns de dispersión de retardo.

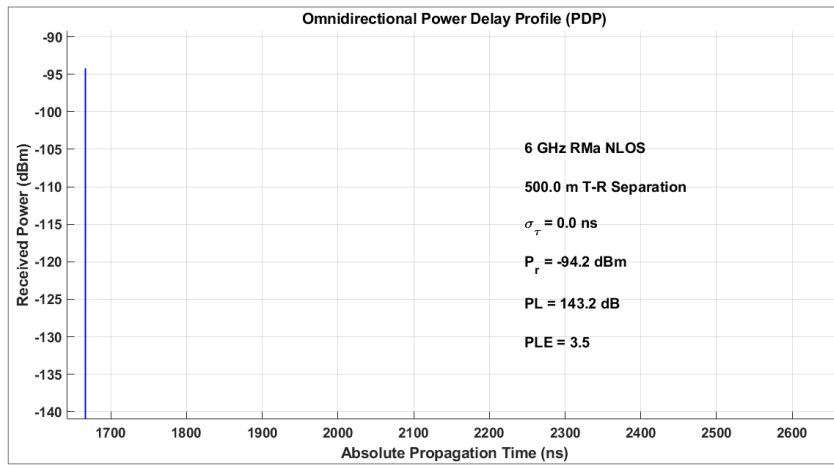


Figura 90. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, RMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

El perfil de retardo de potencia direccional NLOS, la mayor potencia recibida se establece en un valor de -44,9dBm, un retardo de 0ns. Adicionalmente, una pérdida de trayectoria a gran escala de 143,2dB, para un mismo valor de PLE de 3,5.

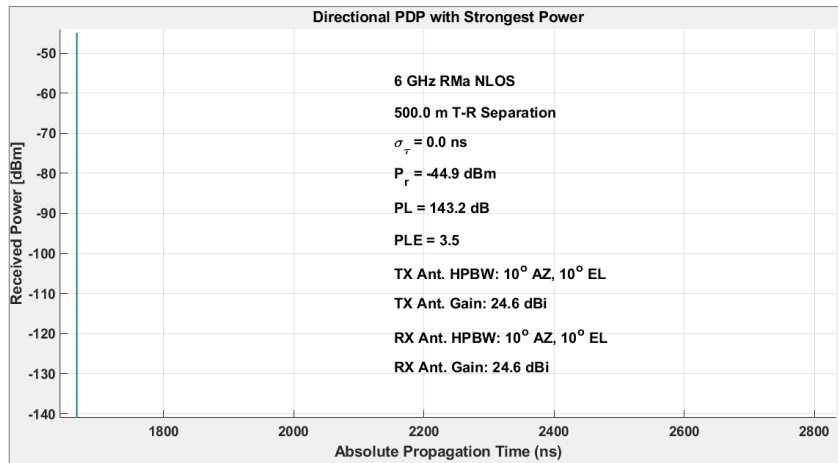


Figura 91. PDP direccional con mayor potencia, RMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la representación a menor escala, se observa el PDP omnidireccional con un único componente, con espaciamento de $0,5 \lambda$ para los dos elementos de antena establecidos.

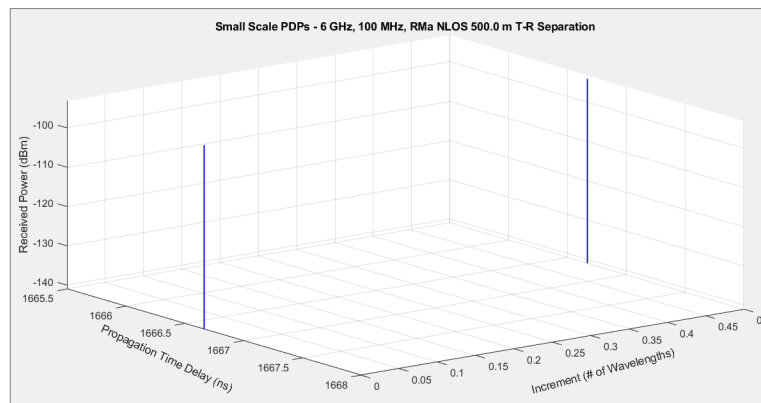


Figura 92. PDP pequeña escala, RMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el entorno NLOS, de acuerdo a la frecuencia menor utilizada se puede cubrir mayores distancias, se extrae la dispersión de pérdidas de trayectoria para una distancia de 500m, esto con el fin de obtener valores máximos en pérdidas en un punto remoto del equipo de usuario con relación a la estación base. Se obtiene un valor de 143,161dB para todos los casos, esto al presentar un solo componente multitrayecto, facilitando la predicción de la intensidad de la señal.

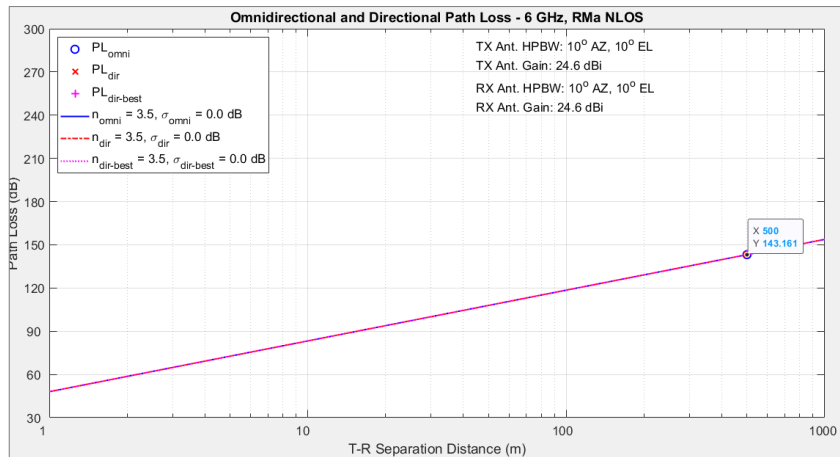


Figura 93. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, RMa-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Consistencia espacial**

En base a las pruebas reales realizadas para el desarrollo de Nyusim dentro de un entorno urbano, el bloque de consistencia espacial se encuentra únicamente disponible para los escenarios UMi y UMA. Por lo tanto, para la ejecución del presente escenario rural, este bloque permanece desactivado.

6.1.4 Escenario: Punto de Acceso Interior

| Channel Parameters | Antenna Properties | Spatial Consistency Parameters |
|--|---|--|
| Scenario: InH Frequency (0.5-150 GHz): 28 GHz RF Bandwidth (0-800 MHz): 800 MHz Distance Range Option: Indoor (5-50 m) Environment: LOS T-R Separation Distance Lower Bound: 10 m Upper Bound: 10 m TX Power (0-50 dBm): 24 dBm Base Station Height: 3 m User Terminal Height: 1.5 m Number of RX Locations: 1 | TX Array Type: URA Number of TX Antenna Elements Nt: 2 TX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5 Number of TX Antenna Elements Per Row Wt: 1 TX Antenna Azimuth HPBW (7°-360°): 10° TX Antenna Elevation HPBW (7°-45°): 10° | Correlation Distance of Shadow Fading (5-60 m): 10 m Correlation Distance of LOS/NLOS Condition (5-60 m): 15 m Moving Distance (1-100 m): 40 m Segment Transitions: Yes |
| Barometric Pressure: 1013.25 mbar Humidity (0-100%): 50 % Temperature: 20 °C Polarization: Co-Pol Rain Rate (0-150 mm/hr): 0 mm/hr Foliage Loss: No Distance Within Foliage: 0 m Foliage Attenuation: 0.4 dB/m Outdoor to Indoor (O2I) Penetration Loss: No O2I Loss Type: Low Loss | RX Array Type: URA Number of RX Antenna Elements Nr: 2 RX Antenna Spacing (in wavelength, 0.1-100): 0.5 Number of RX Antenna Elements Per Row Wr: 1 RX Antenna Azimuth HPBW (7°-360°): 10° RX Antenna Elevation HPBW (7°-45°): 10° | Update Distance: 1 m Moving direction (0°-360°): 45° User Velocity (1-30 m/s): 1 m/s Side Length (Only for Hexagon track): 10 m Orientation (Only for Hexagon track): Clockwise |
| | | Human Blockage Parameters Human Blockage: <input checked="" type="radio"/> On Default Settings for Human Blockage: Yes Mean Attenuation: 14.4 dB Trans. Rate from Unshadow to Decay: 0.2 /sec Trans. Rate from Decay to Shadow: 8.1 /sec Trans. Rate from Shadow to Rise: 7.8 /sec Trans. Rate from Rise to Unshadow: 6.7 /sec |

Figura 94. Parámetros ingresados para escenario InH
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Entorno: LOS**

En el escenario InH, la frecuencia es de 28GHz, se extrae los espectros de potencia AOD y AOA, los componentes multirayecto se agrupan principalmente en dos lóbulos espaciales en AOD y en un lóbulo para AOA, los cuales representan un pequeño rango

de ángulos desde donde se transmite o llega la energía. La potencia mínima que puede ser recibida para este escenario es de -71dBm, para este caso, además de la corta distancia (10m) al ser en entornos interiores, no se agregan pérdidas adicionales. En consecuencia, el nivel de potencia recibida mejora significativamente, observando un rango calificado como excelente para la comunicación

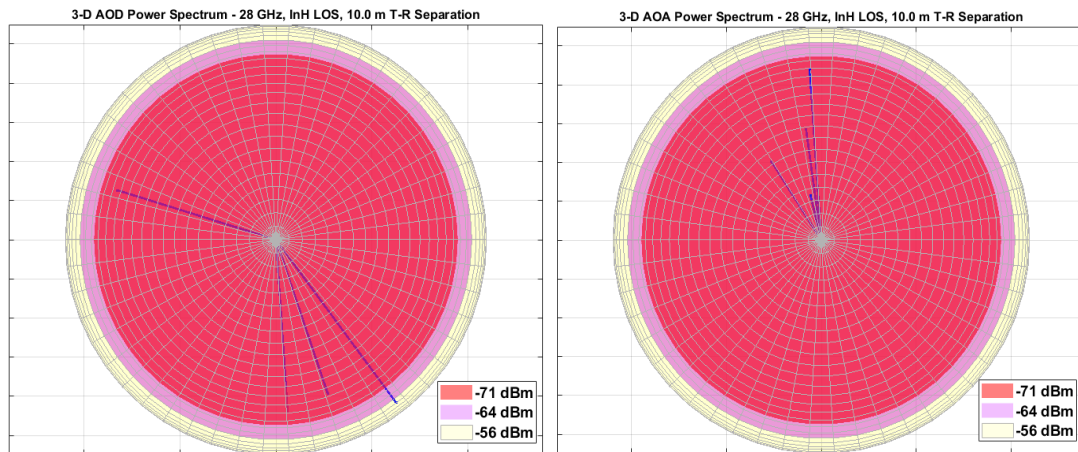


Figura 95. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, InH-LOS

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En el perfil PDP omnidireccional de la figura 96 se presenta un total de 4 componentes multitrayecto, este valor es igual significativo en comparación con los escenarios urbanos debido a que no existen mayores obstáculos o elementos difractantes. El valor de dispersión de retardo es de 6,1ns con un nivel de potencia recibida de -54,9dBm y una pérdida de trayectoria de 78,9dB esto para un PLE de 1,7 en un escenario interior.

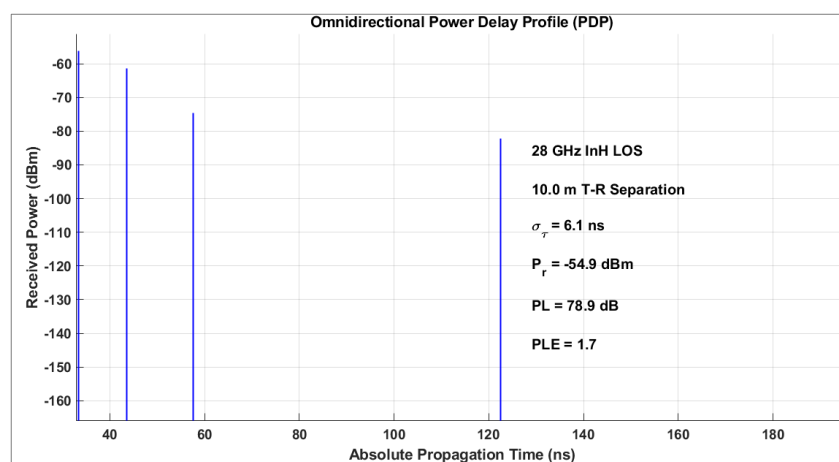


Figura 96. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, InH-LOS

Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el perfil de retardo de potencia direccional (figura 97) se tiene un escenario similar, la mayor potencia recibida se establece en un valor de $-6,9\text{dBm}$, un retardo de 0ns . Adicionalmente, se obtiene la pérdida de trayectoria a gran escala de $80,1\text{dB}$, para un PLE de $1,9$.

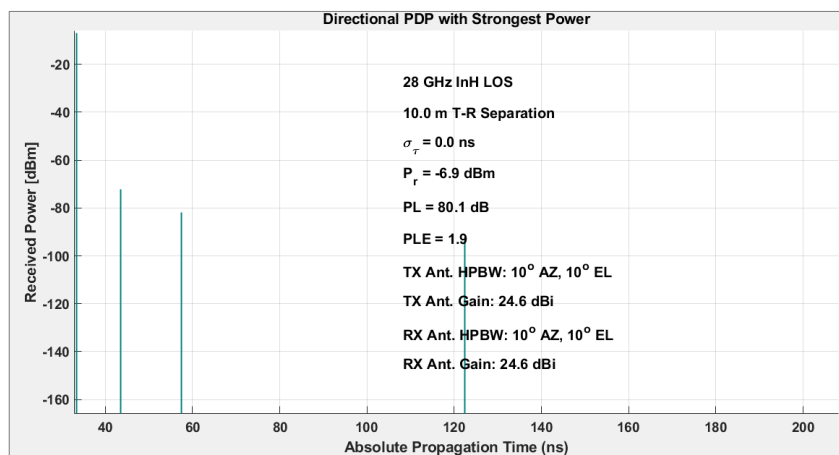


Figura 97. PDP direccional con mayor potencia, InH-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la representación a menor escala, se observa el PDP omnidireccional con los 4 componentes multitrayecto, con el espaciamiento de antena de $0,5 \lambda$ para los elementos de antena utilizados.

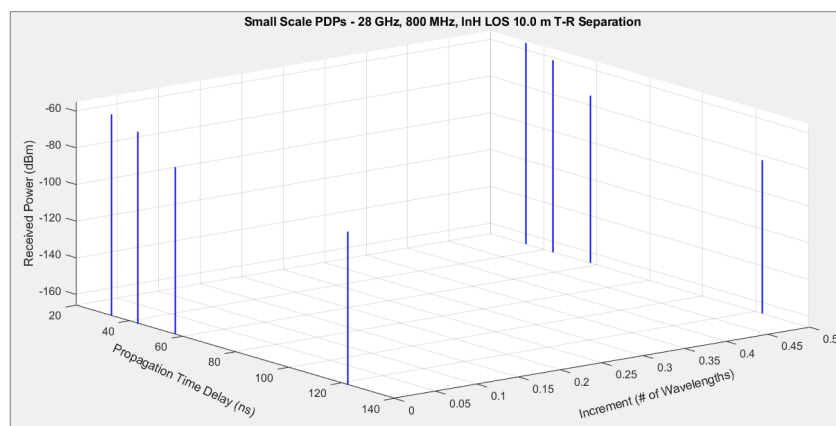


Figura 98. PDP pequeña escala, InH-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la dispersión de pérdidas de trayectoria con una distancia de 10m se define para la trayectoria omnidireccional una pérdida de $78,9\text{dB}$, en el caso de la direccional de $92,53\text{dB}$ y finalmente para la dirección con la mayor potencia recibida se verifica en $80,1\text{dB}$ que permiten extraer los niveles de potencia que sean aceptables para este escenario.

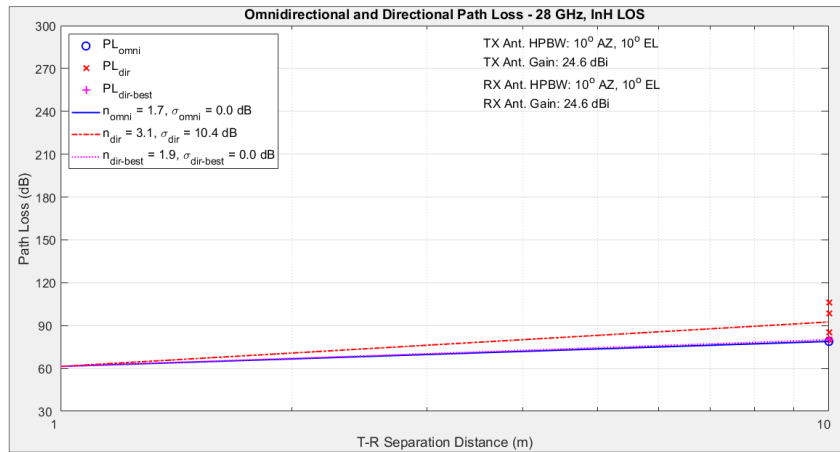


Figura 99. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, InH-LOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

- **Entorno: NLOS**

Siguiendo con los mismos parámetros de entrada, para un entorno sin línea de vista en los espectros para AOD y AOA se obtienen mayor cantidad de componentes multitrayecto, debido al tipo de entorno, con posibilidad de presentar mayores obstáculos en el interior, esto basado adicionalmente en el modelo de bloqueo humano, se obtiene una potencia recibida mínima de -104dBm.

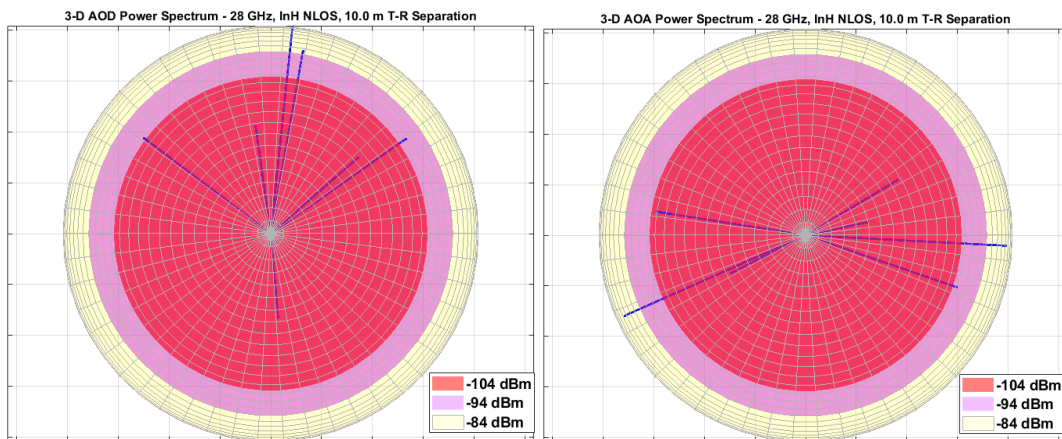


Figura 100. Espectro de potencia 3D: AOD y AOA, InH-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el perfil PDP omnidireccional se presenta un aumento de componentes multitrayecto, presentando un valor de 7 componentes, con valor de dispersión de retardo superior de 11,9ns. El nivel de potencia recibida disminuye a un valor de -82,4dBm y una pérdida de trayectoria superior de 106,4dB, para exponente PLE de 4,5.

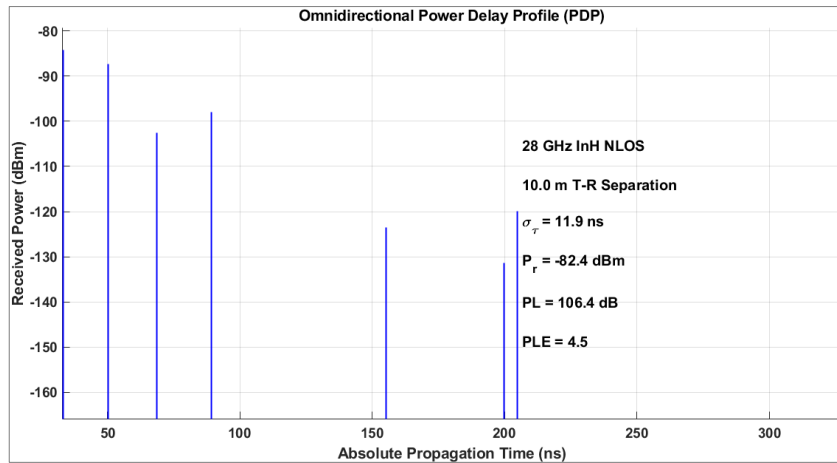


Figura 101. Perfil de retardo de potencia omnidireccional, InH-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

Para el perfil de retardo de potencia direccional de la figura 102, se tiene un escenario similar, la mayor potencia recibida se establece en un valor de -35dBm, un retardo de 0ns. Adicionalmente, se obtiene la pérdida de trayectoria a gran escala de 108,2dB y un PLE de 4,7.

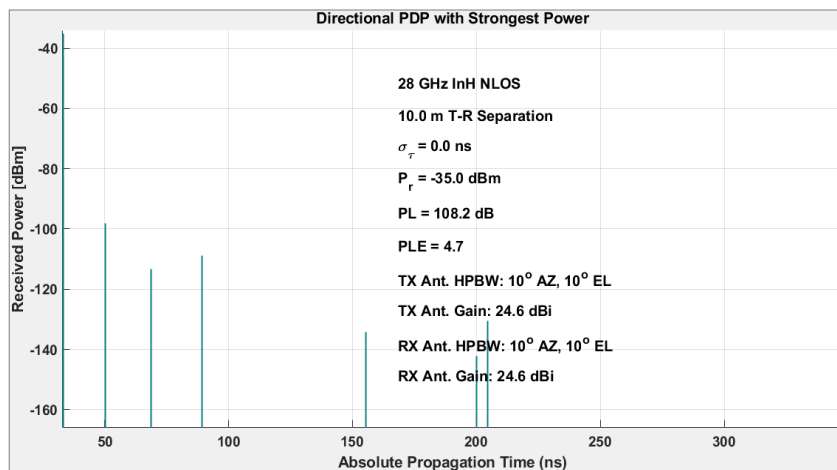


Figura 102. PDP direccional con mayor potencia, InH-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En la representación a menor escala, se extrae el PDP omnidireccional con los 7 componentes multitrayecto representados con dos elementos de antena utilizados con espaciamiento de antena de $0,5 \lambda$.

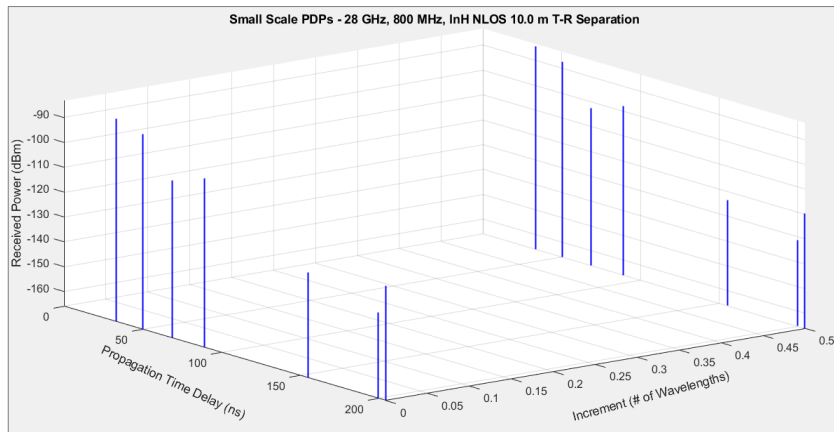


Figura 103. PDP pequeña escala, InH-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

La dispersión de pérdida de trayectoria describe claramente que la potencia recibida disminuye exponencialmente con la distancia. Para una distancia de 10m la trayectoria omnidireccional posee una pérdida de 106,4dB, en el caso de la direccional de 130,5dB y finalmente para la dirección con la mayor potencia recibida se verifica en 108,2dB para facilitar la predicción de la intensidad de la señal recibida.

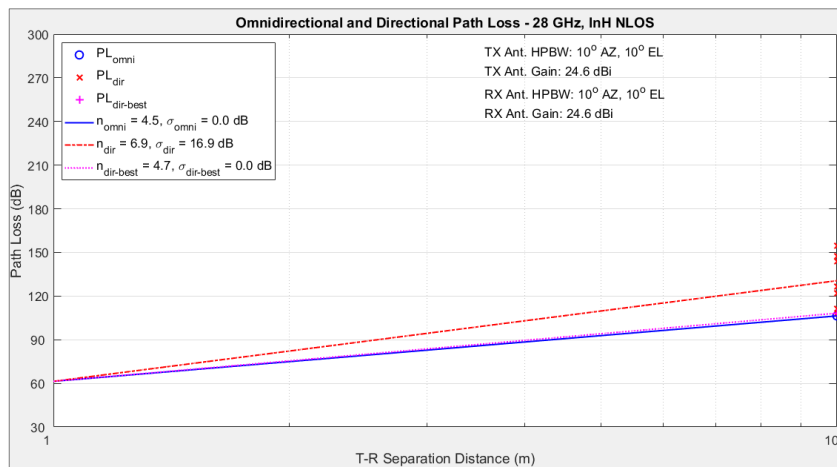


Figura 104. Pérdida de trayectoria Omnidireccional y Direccional, InH-NLOS
Fuente: Elaboración propia. NYUSIM

En base a las gráficas obtenidas, los valores de pérdidas de trayectoria a gran escala PL son necesarias para el desarrollo del modelo CI, que permiten evaluar el nivel de potencia recibida del sistema de comunicación, por lo tanto, se resume los niveles de PL y Pr, esto como uno de los parámetros necesarios para analizar el comportamiento del canal para ondas milimétricas.

De cada uno de los escenarios se extraen los valores del perfil omnidireccional, en donde se incluye de manera general todas las direcciones y sentidos en las que se puede realizar la transmisión. Obteniendo los siguientes datos:

Tabla 26. *Pérdidas de trayectoria y potencia recibida NYUSIM*

| Escenarios | LOS | | NLOS | |
|------------|--------|----------|--------|----------|
| | PL(dB) | Pr (dBm) | PL(dB) | Pr (dBm) |
| UMi | 108,7 | -78,7 | 138,2 | -108,2 |
| UMa | 114,8 | -84,8 | 141 | -111 |
| RMa | 113,5 | -64,5 | 143,2 | -94,2 |
| InH | 78,9 | -54,9 | 106,4 | -82,4 |

Fuente: Elaboración propia

Considerando los factores atmosféricos como lluvia, presión barométrica, temperatura, humedad, incluyendo el bloque de modelo de bloqueo humano y demás elementos posibles del medio, pueden afectar la propagación de las señales. A través de la simulación y acorde a una distancia que se ajusta para cada escenario, para un entorno NLOS se representa entre el 22 y 35 % de incremento del valor de pérdidas en relación a los valores obtenidos en el entorno LOS.

Al ser las ondas milimétricas uno de los factores iniciales para el desarrollo de 5G, una de las características que más predomina es la distancia, conforme a los valores obtenidos en NLOS, se evidencia de forma ascendente los valores de pérdidas dependiendo la distancia que cubren los escenarios. Iniciando desde un entorno interior donde la distancia es relativamente corta, avanzando hacia un entorno de microcelda (más cercano a los UT), para finalmente continuar hacia las macroceldas cubriendo distancias superiores.

En cuestión a las pérdidas, estas se presentan especialmente en las macroceldas, en donde se comprueba que a mayores distancias las pérdidas serán mayores. En el caso de la macrocelda urbana se presenta un escenario que se desarrolla en ambientes de mayor densidad poblacional, por lo tanto, existe mayor probabilidad de obstáculos incluyendo el modelo de bloqueo humano que ocasionen estas pérdidas. Por otra parte, en un escenario rural RMa los obstáculos presentados son similares, factores como vegetación, situación geográfica e incluso la misma extensión, reducen la calidad de la señal recibida. Sin embargo, al utilizar una frecuencia menor, en comparación al resto de escenarios, pese a una distancia superior (500m), las pérdidas obtenidas se ajustan en relación a las

pérdidas de una macrocelda urbana, obteniendo valores aceptables que permitan obtener un nivel de potencia adecuado.

En torno a lo descrito, los modelos de canal representan una alternativa para determinar la atenuación que puede sufrir una señal, prediciendo las pérdidas de trayecto en base a un entorno específico de desarrollo. Por su parte, al analizar los parámetros a lo largo del capítulo 2 confirman que las ondas milimétricas forman parte de uno de los aspectos claves para el despliegue de 5G, como uno de los medios de propagación para obtener mayores anchos de banda e incrementar la capacidad del sistema de comunicación.

Mediante el modelo del canal, una vez obtenidos los valores de pérdidas, se obtienen los niveles de potencia recibidas. Se consideran diferentes rangos para establecer o calificar el nivel de cobertura, de esta manera se tiene:

Tabla 27. *Pérdidas de trayectoria y potencia recibida NYUSIM*

| Escenario | LOS | | NLOS | |
|------------|----------|------------|----------|----------------|
| | Pr (dBm) | Valoración | Pr (dBm) | Valoración |
| UMi | -78,7 | Muy Buena | -108,2 | Baja cobertura |
| UMa | -84,8 | Muy Buena | -111 | Baja cobertura |
| RMa | -64,5 | Excelente | -94,2 | Buena |
| InH | -54,9 | Excelente | -82,4 | Muy buena |

Fuente: Elaboración propia

Se puntualiza, que los niveles de potencia obtenidos se desarrollaron para largas distancias, propios para cada escenario. Esto con el fin de obtener valores hasta un punto máximo de alejamiento del usuario de la estación base. Por lo tanto, representa que hasta para un punto remoto, en el caso de un entorno LOS, las señales recibidas serán óptimas. Para el caso de NLOS, los entornos UMi y UMa bajan el nivel de potencia, además de verse afectado por los obstáculos y elementos del medio, la misma frecuencia alta, afirma que no podrá recorrer largas distancias. Este no es el caso para RMa (menor frecuencia), que, a pesar de estar en un punto máximo, el nivel de potencia aun es aceptable.

En consecuencia, a partir de los valores obtenidos, para distancias menores o cercanas a la estación base, la señal representaría niveles aún más favorables, obteniendo uno de los objetivos a los que quiere llegar 5G.

6.2 Interpretación de las Formas de Onda

Conforme evolucionaron las técnicas de multiplexación, partiendo especialmente desde OFDM implementada en 4G, se atribuye un empleo especial en las nuevas técnicas cuyas mejoras se representan en un banco de filtros, esto debido a que las formas actuales no son capaces de adherir las diferentes aplicaciones que presenta 5G. En base a las tres técnicas desarrolladas, se puede evidenciar la aportación de diversas ventajas, no solo a 5G, sino a generaciones posteriores que tendrán como visión de seguir perfeccionando el sistema actual.

Teniendo como base a OFDM, las nuevas formas de onda presentan cualidades fundamentales, y mediante el desarrollo y análisis de los principales parámetros que las caracterizan, vistas en el apartado 5.2.1 se puede obtener:

Iniciando con FBMC, como técnica básica se puede traducir entre ventajas e inconvenientes, mediante sus características al no transmitir varias veces los mismos símbolos esto sin duda se interpreta a una mayor eficiencia en la transmisión, sin embargo, la inserción de subportadoras piloto se vuelve más compleja en relación a OFDM.

En cuanto a indicadores del mejor uso del ancho de banda que presenta FBMC se evidencia claramente el uso eficiente en la banda de frecuencia correspondiente para los múltiples usuarios que se encuentran conectados y una mínima interferencia entre ellos, sin embargo, en trabajo conjunto de escenarios MIMO (característico en 5G) se perdería flexibilidad, viendo la necesidad de incluir elementos adicionales en el receptor para evitar la interferencia producida por multitrayecto.

Al continuar con la segunda técnica, UFMC se puede considerar como otra forma de onda que evoluciona a partir de OFDM, sin duda, acopla características base de FBMC y OFDM. Entonces, también se mantiene hacia una mayor eficiencia espectral, pero al perder cierto porcentaje de ortogonalidad hace que UFMC no sea indicado para transmisiones con tasas elevadas e indicadas para transmisiones en ráfagas cortas.

Finalmente, se presenta GFDM que, debido a la flexibilidad que presenta a la hora de formar los parámetros de diseño incluyendo el bloque (M y K) se puede ajustar fácilmente hacia distintas aplicaciones, a su vez dependiendo el número de usuarios se puede dividir

la banda disponible para adaptarse al escenario más adecuado, según la estructura y datos generales que representen ofreciendo mejores prestaciones. De esta manera, GFDM se traduce a otorgar mayor flexibilidad en entornos multiusuario para ambos dominios (tiempo, frecuencia), que a pesar de que presente un diseño más complejo, las ventajas que en mayor proporción presenta frente a los otros candidatos hacen que sea la forma de onda más adecuada y ser entre las técnicas más involucradas en las investigaciones que pueden ser parte de la implementación de 5G.

6.3 Visión de esquemas de modulación actuales y futuros

Los 5 esquemas de modulación del Release 16 de 3GPP (finalizado 2020), que se establecieron para 5G se encuentran determinados hasta una modulación de 256 QAM, sin embargo, en una versión anterior (Release 15, TR 36.783) concretamente para 4G LTE en el enlace descendente ya se inicia con estudios para la incorporación del esquema de 1024 QAM. Técnicamente y considerando que 5G trabaja con el propósito de proporcionar una conectividad ubicua y de altas velocidad de datos, se puede estimar que el esquema candidato de 1024QAM sea el idóneo a implementar, no obstante, hay que considerar parámetros adicionales como; la existencia de niveles altos de ruido, ya sea esto por causas de instalaciones de antenas, conectores o demás parámetros de los quipos de radio es difícil manejar órdenes superiores de QAM, tal razón puede ser un factor limitante en el despliegue de 5G incluso se mantienen de manera lejana para 4G/LTE según los proveedores actuales de servicios.

Como una de exigencias que planea 5G se encuentra el uso eficiente del espectro radioeléctrico siendo este limitado, se pretende igualmente que este sea incluso hasta 3 veces más a lo que se propuso inicialmente en 4G/LTE, y en base a lo que se encuentra definido en el Release 16, el esquema de 256 QAM se puede declarar hasta el momento como un práctico potenciador de la eficiencia espectral que se requiere para cumplir con estas exigencias.

Actualmente se encuentra abierta la fase de actualización que sea aceptable a nivel mundial. El Release 17 (programado finalizar en el 2022) o incluso futuras versiones deja la posibilidad abierta del estudio e implementación de manera estable al esquema de orden superior 1024QAM, cuyo significado estará centrado sin duda a la transmisión de más

velocidad de datos (bits/s) por un Hz(Hertz) de espectro, dejando un esquema previsible a ser adoptados por las diferentes clases de UE futuras.

6.4 Codificación de canal propuestas para 5G

De acuerdo al reporte técnico 38.912, los dos tipos de codificación analizados para 5G, deben admitir principalmente flexibilidad en el tamaño de bloque. Por consiguiente, para los códigos polares, se especifica la longitud máxima del mensaje codificado, considerando eMBB el escenario de uso para esta codificación.

Tabla 28. Longitud máxima para códigos polares

| Tamaño máximo del mensaje codificado con códigos polares | |
|---|----------------------|
| Enlace descendente | $N_{max,DCI} = 512$ |
| Enlace ascendente | $N_{max,UCI} = 1024$ |

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, LDPC representa un esquema flexible de codificación para todos los tamaños de bloque. Particularmente 5G ha sido diseñado para abarcar aplicaciones de numerosos tipos, por ende, las codificaciones deben ser compatibles a nivel de tamaños de los bloques. Además de cumplir con los requerimientos en anchos de banda de tal forma que se adapten a los code rates indicados para su efecto.

Al definir 3GPP las dos matrices base BG1 y BG2 como fue definido en el apartado 5.2.3 se puede generar matrices con extensión $Z \times Z$.

Entonces, para cada una de las matrices se definen una longitud de paquete específica, los cuales se detallan en la tabla 29.

Tabla 29. Características códigos LDPC 5G

| | BG1 | BG2 |
|-----------------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| Tamaño del bloque | $500 \leq K_{LDPC} \leq 8448$ | $40 \leq K_{LDPC} \leq 2560$ |
| Code rate | $1/3 \leq R \leq 8/9$ | $1/5 \leq R \leq 2/3$ |
| Dimensiones de matriz base | 46 x 68 | 42 x 52 |

| | |
|---------------------------------|--|
| Extensión / Valores de Z | 2-3-4-5-6-7-8-9-10-11-12-13-14-15-16-18-20-22-24- 26-28-30-32-36-40-44-48-52-56-60-64-72-80-88-96- 104-112-120-128-144-160-176-192-208-224-240-256- 288-320-352-384 |
|---------------------------------|--|

Fuente: Elaboración propia

6.5 Exploración hacia los sistemas de antenas futuros

Según las especificaciones del 3GPP, todo el sistema en conjunto sigue siendo una de las áreas activas de investigación y estandarización, en este caso a partir de LTE-A se comienza a evidenciar las primeras formas de haces, así como también parámetros adicionales; como elevación específica de los UE o incluso la identificación de la multidimensión quedando como tecnologías prometedoras al momento de aumentar parámetros de eficiencia espectral y capacidades.

Al introducir el estudio sobre el área de modelos tridimensionales, se avanza hacia la observación sobre FD-MIMO (Full Dimensión Mimo) explorando principalmente los primeros grados de libertad proporcionados por un número de antenas, permitiendo enfocar en cualquier lugar de los espacios 3D, esto es, tanto en dirección horizontal como vertical.

Actualmente para lo que representa 5G, no existe una especificación técnica a detalle como tal por parte del 3GPP, sin embargo, se pueden examinar la metodología implementada en el informe técnico TR 36.873 en donde se puede evidenciar principalmente:

- Bases de la formación
- Elevación de haces
- Modelado
- Polarización de antenas,

Las mismas que son propias para las redes LTE actuales, describiendo la forma básica de FD-MIMO de manera de matriz rectangular. Sin embargo, estas características ejercen básicamente para 5G el punto inicial o de partida, es decir, para esta nueva generación se contaría con una misma matriz básica diferenciada únicamente por el tamaño de la matriz,

esto a consecuencia de la disminución de la longitud de onda que se expresa en rangos de cobertura inferior.

6.6 Radio cognitiva como tecnología emergente para 5G

Detrás de CR existe una gran cantidad de parámetros y procedimientos conjuntos para lograr sus propósitos, sin embargo, uno de los enfoques se encuentra basado especialmente hacia el futuro de las comunicaciones móviles con mayor perspectiva en 5G. Como en la mayoría de sistemas se busca siempre una integración o interoperabilidad de los sistemas, una de las propuestas es sin duda la combinación o trabajo conjunto de CR y de 5G, apoyado de cada uno de sus atributos.

Esencialmente la idea base para la implementación conjunta se toma considerando los elementos terminales de 5G, siendo estas ahora de tipo CR, sin olvidar el soporte para las diversas aplicaciones voz, datos, etc., que conlleva. Una vez adoptada la terminal 5G siguiendo los algoritmos necesarios de asignación de espectro, de manera inteligente esta estará en la capacidad de elegir la red inalámbrica más conveniente, esto de forma conjunta a un módulo reconfigurable en el que le permita al terminal cambiar de una multiplexación OFDM que normalmente utiliza 5G hacia una DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) y protocolos de acceso adicionales.

En la actualidad resulta de cierta forma complejo el establecimiento inicial de redes móviles sobre todo de quinta generación, esto por diversos inconvenientes propios de cada país, que envuelven factores económicos, sociales o políticos. Sin embargo, desde la perspectiva de los cambios en el sistema de comunicación en base a una tecnología ya existente como es el caso de Radio Cognitiva especialmente como una red ad-hoc, se puede abrir más las expectativas de lograr una interconexión superior. Siendo reflejado hacia los usuarios la obtención de mejores desempeños al explotar al máximo el espectro sin interferir con otros servicios.

Con el desarrollo de generaciones anteriores ya se ha presenciado la habilidad que poseen los terminales móviles de ofrecer distintos servicios multimedia, internet, etc., es decir, estos terminales tienen la capacidad de integrar nuevos servicios que permitan acceder a nuevas funcionalidades, entonces, en este nuevo paradigma se puede considerar factible también la actualización de los terminales específicamente para 5G, en donde se otorgue

la capacidad de operar en un rango más amplio del espectro modificando de manera dinámica parámetros tradicionales.

En este escenario, se ve la oportunidad indudablemente de mejorar la situación de las redes mediante CR, esto al enfocarse únicamente en los terminales de usuario que puedan llevar a cabo un procesamiento y acondicionamiento previo de las señales de radio para que sean percibidas en la antena de los dispositivos móviles. Todos los subsistemas deberían estar dotados de alta programabilidad y reconfigurabilidad en que se vea reflejado los esfuerzos conjuntos de los proveedores de servicios de Telecomunicaciones, teniendo siempre como meta el resultado de disminuir problemas de congestión y de solapamiento en las bandas de frecuencia.

6.7 Impacto de tecnologías para la interface de radio en el cumplimiento de KPIs en 5G

Los principales indicadores mencionados, reflejan evidentemente a los objetivos a los que se quiere llegar para que 5G se pueda establecer como una red estable y favorable para sus usuarios. La preocupación del impacto de las tecnologías distingue un escenario factible. La red 5G sin duda inicia su investigación y evolución desde hace ya un par de años, con la estandarización y culminación del Release 16 se puede establecer que se cumple con los parámetros establecidos en IMT-2020.

Principalmente con las tecnologías desarrolladas:

- mmWave
- Modulación
- Codificación
- Acceso múltiple
- Sistema de antenas

Ciertamente el grupo de tecnologías aplicadas en la interfaz de radio influyen directamente en la mejora de los elementos de capa física de la red para aprovechar y lograr los indicadores claves de rendimiento. Mediante el uso de cada una de las tecnologías analizadas será el punto de partida para alcanzar los objetivos de la red. De esta manera, se inicia el camino mediante el empleo clave de frecuencias superiores (mmWave), considerando a primeros rasgos un futuro crecimiento exponencial de

usuarios conectados, se da respuesta con un rango de transmisión mayor, en donde se podrán cumplir con los 3 escenarios básicos de uso IMT-2020 (eMBB, URLLC y mMTC), se obtiene su relación con el KPI *Anchos de banda*, al ser un parámetro cuantitativo y definido hacia el rango específico de frecuencia con el que se esté trabajando.

Continuando con los esquemas de modulación, al ser la más predominante hasta el momento la de 256 QAM, esta se fortalece al establecer la cantidad de información que va ser transmitida añadiendo factores de rendimiento y niveles mucho más altos de eficiencia espectral. Con este último parámetro también se añaden conjuntamente las técnicas de acceso múltiple como base OFDMA, estableciendo el camino hacia la flexibilidad en el entorno del espectro radioeléctrico influyendo en este caso sobre el KPI *Eficiencia espectral máxima*. Por otra parte, al ser característico el parámetro de prefijo cíclico e incluir intervalos de tiempo recaen básicamente hacia los indicadores de *menor latencia*.

Otra de las tecnologías desarrolladas que intervienen en el proceso para alcanzar los indicadores es sin duda, la codificación, ambos procesos previstos para 5G tienen la finalidad de corregir los errores que son producidos por el canal de comunicación, al sumar esfuerzos para su desarrollo, claramente se estará obteniendo los indicadores esperados en términos de *calidad de servicio, capacidad eficiente y velocidades de datos superiores*. Además de ser códigos más sofisticados en comparación con los de 3G y 4G.

De manera similar a la evolución de cada una de las generaciones de comunicaciones móviles, efectivamente, el incremento y desarrollo de cada una de las tecnologías, aportan dentro de la red con los mecanismos necesarios para cumplir con los requerimientos establecidos por el 3GPP ampliando cada una de las competencias que son requeridas para 5G.

7. DISCUSIÓN

El desarrollo del presente trabajo de investigación se desarrolló con el objetivo de analizar las distintas tecnologías aplicadas en la interfaz aire que permiten que 5G se encuentre entre una de las redes más predominantes en la actualidad a nivel mundial. Como bien se describen en el sinnúmero de documentos y especificaciones técnicas de 3GPP, son una serie de pruebas que se vienen desarrollando desde hace varios años atrás para el establecimiento de los requisitos necesarios en el cumplimiento y evolución de la red.

Claramente para un despliegue masivo de 5G como recurso inicial se debe contar con los rangos de frecuencia superior. Actualmente, como en el caso de Ecuador estos rangos se encuentran atribuidas a distintos servicios especificados en el plan de frecuencias, para una adecuada gestión del espectro, por lo tanto, como primer paso para adoptar las redes de 5G se deben establecer nuevos reglamentos nacionales e internacionales que se ajusten a una buena administración del mismo, sin embargo, se pueden ver limitados frente a un costo excesivo para su atribución, esto en relación a los porcentajes que se generan por otros ingresos, convirtiéndose en cierto punto menos llamativo para las operadoras del país. En torno a un escenario posiblemente no tan favorecedor también se destaca la posibilidad de una Ley reformada de Telecomunicaciones que tenga como fin cambiar radicalmente las formas de inversión en el sector de Telecomunicaciones, en donde la administración encargada no reciba recursos económicos por el uso del espectro siendo la condición que las operadoras puedan reinvertir en el nuevo modelo que ofrece 5G, siendo una forma habilitadora precisamente para el requisito inicial de estas redes.

Como en todo proceso de evolución, además de las tecnologías principales o que ya están establecidas, es también factible observar la presencia de un conjunto de tecnologías adicionales que aún se mantienen en investigación pero que prometen igual o superiores ventajas a las ya están establecidas, ya sea para el trabajo conjunto o mejoramiento de las existentes. No es cuestión de competencia entre una y otra tecnología, sino de contar con una perspectiva más amplia a la hora de implementarla en el sistema. En el caso de implementación de cualquier red, las posibilidades de cada país son diferentes a la hora de ponerla en ejecución, además de aspirar a cumplir los objetivos, las tecnologías también se verán limitadas principalmente por factores económicos o políticos. Entonces, según los recursos con los que se cuenten se pondrán en marcha la implementación de la

red, es ahí en donde se mantiene una visión u oportunidades más grandes de recurrir a esquemas adicionales que, básicamente proporcionarán comportamientos similares a las tradicionales.

8. CONCLUSIONES

- A lo largo de las generaciones desarrolladas desde la primera aparición de 1G hasta las redes de 4G, se han encaminado en torno al uso de un mismo rango de menores frecuencias, esto se puede ver reflejado en un problema mayor, debido a que todos los días, existen millones de equipos de telefonía celular conectados que utilizan las mismas bandas, conllevando a una posible saturación del mismo. Sin embargo, para las redes 5G se emplean bandas de frecuencias que en su mayoría están desocupadas, siendo las bandas milimétricas uno de los principales protagonistas, pese a ello, aunque la distancia que estas bandas ofrezcan sea menor, es indispensable la preparación de los proveedores de telecomunicaciones asumir los nuevos retos, en términos de investigación y principalmente en costos para el despliegue de infraestructura que permita contar con los equipos necesarios para llevar a cabo las tecnologías que en ella se despliegan, prevaleciendo una transformación a nivel social, político y económico.
- Mediante el empleo de NYUSIM versión 3.0 se estableció una forma de comprender el comportamiento de las ondas milimétricas, contando con una herramienta más precisa para interpretar parámetros del canal, así como pérdidas en la trayectoria, retardos y niveles de potencia, siguiendo los datos recomendados por el 3GPP para cada uno de los escenarios. El uso de canales mmWave provoca un problema de propagación, presentando en cada escenario distintas cantidades de componentes multitrayecto, debido a que estos canales sufren mayores pérdidas a altas frecuencias. El modelo de canal para mmWave representa resultados de pérdidas proporcionales especialmente a las distancias que cubren, presentado mayores pérdidas en las macroceldas urbana y rural. En esta última, gracias a la frecuencia media utilizada las pérdidas se mantienen acordes a las que posee una urbana, pese a las propias distancias superiores en la que se desenvuelve.
- Debido a la gran demanda de servicios y expectativas existentes para 5G, las frecuencias utilizadas actualmente llegan a ser poco eficientes. Al utilizar un rango más amplio, se crea la posibilidad de tener más frecuencias libres que

permitan cubrir las necesidades previstas. Mediante el modelado de canal, en términos de potencia recibida, al realizar la simulación para grandes distancias, permitieron identificar los valores de potencia mínima que se puede recibir, obteniendo un rango desde -54,9 a -78,7dBm con una valoración excelente – muy buena, en entornos LOS. Para entornos NLOS, se obtiene una elevación entre el 22 al 35% de pérdidas en relación a los valores LOS, debido a los múltiples obstáculos con los que se encuentra; condiciones atmosféricas, bloqueo humano. Por lo tanto, a partir de los valores obtenidos, para distancias menores conlleva a la señal a presentar niveles óptimos a lo que quiere llegar 5G.

- El trabajo conjunto de las tecnologías aplicadas; esquemas de modulación, codificación, acceso múltiple y formas de onda fomentan al cumplimiento de los indicadores de rendimiento, particularmente a los que se encuentran establecidos en el Release 16. De esta manera, en técnicas de acceso múltiple, OFDMA permanece como una de las favoritas. A pesar de NOMA adaptarse a los requerimientos de 5G, existe poca compatibilidad con los sistemas actuales, debido a que requiere una mayor potencia computacional, esto haciendo referencia a la asignación de potencia en tiempo real y algoritmos para SIC. En torno a las modulaciones, 256QAM representa un gran potenciador de eficiencia espectral actual, sin embargo, se espera que en futuras versiones se vean reflejados hacia el uso de 1024 QAM dirigido principalmente al incremento de la velocidad de datos y ancho de banda superior.
- Como futura forma de onda, al explorar espacios blancos del espectro radioeléctrico, se mantiene gran expectativa en la implementación de GFDM, al presentar mayor flexibilidad para ofrecer mayores prestaciones ajustándose fácilmente a las aplicaciones requeridas en 5G. Gracias al espaciamiento de frecuencia, se admite mayor cantidad de subportadoras y estas al no presentar ortogonalidad permite conseguir una mayor eficiencia espectral.
- El análisis de la codificación de canal permitió esclarecer las razones de elección de códigos LDPC y polares para 5G NR, representando una parte crucial en los

sistemas de comunicación móvil. LDPC como esquema para los canales de datos mientras que los códigos polares para los canales de control. Los códigos polares por su parte, fomentan grandes ventajas con un mejor rendimiento y latencia relativamente baja. Los códigos LDPC logran un excelente equilibrio entre complejidad y rendimiento, permitiendo dos tipos de tamaño de bloque BG1 y BG2, para altas y bajas velocidades de código respectivamente. De manera que se presenta mayor rendimiento en comparación a los códigos turbo de LTE.

- Mediante la radio cognitiva, al facilitar la selección y un intercambio dinámico de frecuencia, fomenta una tecnología emergente para 5G, al tener como objetivo lograr comunicaciones inalámbricas fiables y eficaces, la idea base se desarrolla en torno a los elementos terminales de 5G, pero esta vez de tipo CR, siguiendo los algoritmos de asignación de espectro, elige de manera inteligente la red inalámbrica. Como tecnología emergente permite cubrir las altas demandas de velocidad que requieren las redes, aprovechando al máximo y de manera eficiente los recursos.
- Massive MIMO como otra de las tecnologías habilitadoras para la comunicación de 5G, representa su importancia en el incremento de la eficiencia espectral y energética esto en contraste a tecnologías MIMO tradicional, de ahí el uso de sistemas inteligentes que logren la integración de todo el sistema junto con las bandas milimétricas requeridas, al ser sistemas inteligentes las señales recibidas serán combinadas para mejorar el rendimiento de la comunicación produciendo haces de radiación únicamente en la dirección en la que se encuentra el usuario, esto en contraposición a las estaciones base actuales las cuales utilizan antenas omnidireccionales, las mismas que conllevan a un mayor desperdicio de potencia hacia áreas que no son requeridas y siendo más allá los principales causantes de interferencias entre estaciones base vecinas.
- Teniendo como referencia a las redes que se están desarrollando de 5G y su implementación a lo largo de aproximadamente 58 países. El Ecuador también ya ha iniciado este proceso, mediante tres estaciones fijas de 5G, como escenarios

experimentales previos al despliegue masivo. Desde el punto de vista actual sobre todo el económico, se puede considerar que el país no se encuentra en condiciones favorables o preparado para esta implementación, de manera clara se observa que aún no se ha logrado en su totalidad el despliegue de la red actual 4G, en distintos sectores no necesariamente rurales, pero que si evidencian aún la existencia de analfabetismo digital. Entonces, se observa aún muchos desafíos que son necesarios superar en la que se pueda contar primeramente con una infraestructura indicada para con las redes actuales (4G), para dar paso a una verdadera transformación digital.

9. RECOMENDACIONES

- Al realizar un documento basado principalmente en el análisis y sobre todo de las redes que actualmente están en pleno desarrollo, es importante considerar una investigación detallada de fuentes actuales y confiables, es probable que muchas de las bibliografías interpreten los términos que se utilizan de diferentes maneras, provocando la elaboración de conceptos y contenidos erróneos. Documentos técnicos como los que se encuentran en el sitio oficial de 3GPP, representan herramientas básicas para las especificaciones de 5G.
- Al utilizar herramientas de software como es el caso de Nyusim es importante identificar cada uno de los parámetros para una correcta asignación de valores en cada escenario disponible, y los procesos que se pueden simular en la herramienta. En el caso especial de Nyusim se pueden representar mediante 4 bloques: canal, antena, consistencia espacial y bloqueo humano. Al ejecutar cualquiera de estos procesos, el simulador arroja 3 tipos de archivos por lo que es conveniente identificar los datos obtenidos de acuerdo a las gráficas obtenidas, que ayuden a interpretar los resultados del proceso de interés.
- Para futuros estudios y en base a la utilización de mmWave, se puede ampliar una investigación enfocada a los reglamentos o normativas que son necesarias para el despliegue de 5G. Debido a que, en la mayoría de países, los principales procesos de adjudicación, gestión y regulación para un correcto acceso depende del Gobierno, en la que pueda evaluarse la situación local, tomando en cuenta aspectos sociales, económicos y políticos.

10. BIBLIOGRAFÍA

- 3GPP. (2017). *First 5G NR Specs Approved*. https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/1929-nsa_nr_5g
- 3GPP. (2020). *Release 16*. <https://www.3gpp.org/release-16>
- 3GPP. (2021, March). *NR; Base Station (BS) radio transmission and reception (3GPP TS 38.104 version 16.7.0 Release 16)*. Portal 3GPP.
<https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3202>
- 5G Americas. (2017). *Wireless Technology Evolution Towards 5G: 3GPP Release 13 to Release 15 and beyond*.
- 5GCM. (2016). *White paper on “5G Channel Model for bands up to 100 GHz.”*
<http://www.5gworkshops.com/5gcm.html>
- Barreno, D., Carrión, D., & Mejía, I. (2016). Evolución de la tecnología móvil. Camino a 5G. *Revista Contribuciones a Las Ciencias Sociales.*, 4–8.
<http://www.eumed.net/rev/cccss/2016/04/5G.html>
- Becvar, Z., Mach, P., & Pravda, I. (n.d.). *Redes móviles*.
- Calle, C., & Jiménez, M. S. (n.d.). *Estudio y Análisis Técnico Comparativo entre las Tecnologías LTE y LTE Advanced*.
- Ciena. (2020, June 3). *Las redes 5G midhaul en primer plano*.
https://www.ciena.com.mx/insights/articles/spotlight-on-5g-midhaul-networks_es_LA.html
- De los Ríos, B. (2018). *Estudio de formas de onda candidatas para comunicaciones 5G: Generación y análisis de señal GFDM*. Universidad de Sevilla.
- Díaz, S. I. (2006). *Estudio de Expansión Celular con Tecnología CDMA2000 en la*

- banda 450MHz en las Zonas Rurales del Ecuador*. Escuela Politécnica del Ejército.
- Dudás, I. (2004). Mobile data services in 2.5G Mobile Networks. *Innovation Dynamics in Mobile Communications*, 12–16. <http://www.tml.hut.fi/Studies/T-109.551/2004/Proceedings.pdf>
- Espín, D. F., & Maldonado, E. F. (2008). *Diseño de un sistema de telemetría basado en transmisores de corriente y tecnología celular GSM, para el monitoreo y prevención de fugas en una sección del poliducto Transecuatoriano*. Escuela Politécnica Nacional.
- ETSI. (2013). Network Functions Virtualisation (NFV); Architectural Framework . *ETSI GS NFV 002 VI.1.1*, 10. http://portal.etsi.org/chaircor/ETSI_support.asp
- Fernández, D., Cárdenas, A. M., & Marín, A. (1997). Telefonía Móvil Celular Sistemas AMPS y TACS estudio comparativo. *Revista Facultad de Ingeniería*, 9–11.
- Gámez, O., Perdomo, R., Hidalgo, L., Escalona, L., & Romero, R. (2005). Telefonía móvil celular: Origen, evolución, perspectivas. *Ciencias Holguín*, XI(1), 1–8. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181517913002>
- Gawas, A. U. (2015). An Overview on Evolution of Mobile Wireless Communication Networks: 1G-6G. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 3(5). <http://www.ijritcc.org>
- Inga, E. M. (2010). *La Telefonía Móvil de Cuarta generación y Long Term Evolution*. 3–12. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=505554807002>
- Jaramillo, M. (n.d.). *Implementación de Red Móvil con Tecnología 4G LTE*.
- Karim, M. R., & Sarraf, M. (2002). *W-CDMA and cdma2000 for 3G Mobile Networks*. <https://doi.org/10.1036/0071409564>

- Kottkamp, M., Roessler, A., & Schlien, J. (n.d.). *LTE-Advanced Technology Introduction*.
- Krasser, F. (2018). *Implementación en FPGA de códigos polares para corrección de errores en comunicaciones digitales* [Universidad Nacional de Mar del Plata].
<http://rinfi.fi.mdp.edu.ar/xmlui/bitstream/handle/123456789/252/FKkrasser-TFG-IQ-2018-.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kukushkin, A. (2018). Third Generation Network (3G), UMTS. In *Introduction to Mobile Network Engineering* (pp. 121–172). John Wiley & Sons Ltd.
<https://doi.org/10.1002/9781119484196.ch9>
- Lara Tapia, J. C. (2006). *Conceptos básicos de telefonía celular*.
- Matus, I. (2018). “Análisis y evaluación de desempeño de un esquema coordinado NOMA-OMA para redes celulares 5G.” Instituto Politécnico Nacional.
- MiWEBA. (2014, June). *Channel Modeling and Characterization (Deliverables D5.1)*.
<https://www.miweba.eu/#Start>
- Mrozowski, A. (2020). *Implementación del núcleo de red LTE/5G virtualizado*.
Universidad Politécnica de Valencia.
- Ospina-Martínez, E., & Betancur Agudelo, L. (2013). FBMC, una opción para un uso óptimo del espectro electromagnético. *Revista En Telecomunicaciones e Informática*, 3(5), 49. <http://arxiv.org/abs/1001.3365>
- Pandya, R. (1999). *Mobile and Personal Communication Services and Systems*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/0471723118>
- Pérez, S. (2019). *El sistema de comunicaciones móviles de próxima generación 5G y su caso de uso IoT*.
- Ramón, A., Bernardo, F., Casadevall, F., Ferrús, R., Pérez, J., & Sallent, O. (2010).

- LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles* (Fundación Vodagone España (ed.)).
- Riaño, D. R. (2020). *Implementación de un Prototipo de Estación Base 5G mediante la Transmisión con USRPs*.
- Robledo, C. (2007). *Introducción a la Telefonía Celular* [Instituto Politécnico Nacional]. <http://tesis.ipn.mx:8080/xmlui/handle/123456789/6895>
- Sánchez, A. D., & Toapanta, M. R. (2010). *Análisis Técnico-Económico y Desarrollo de un Prototipo sobre la gestión de recursos y calidad de servicio en los Sistemas Móviles de Tercera Generación (3G)* [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. <http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/3396/T-PUCE-3572.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Sharma, P. (2013). International Journal of Computer Science and Mobile Computing Evolution of Mobile Wireless Communication Networks-1G to 5G as well as Future Prospective of Next Generation Communication Network. In *IJCSMC* (Vol. 2, Issue 8). www.ijcsmc.com
- Tapia, R. (2020). “*Diseño de capacidad y cobertura en tecnología 4G LTE banda de 700 Mhz, en el nodo del cerro Maldonado para una empresa de telefonía móvil celular.*” Universidad Técnica del Norte.
- UIT. (2020). *RECOMENDACIÓN UIT-R M.2012-4 - Especificaciones detalladas de las interfaces radioeléctricas terrenales de las telecomunicaciones móviles internacionales-avanzadas (IMT-Avanzadas)*. <http://www.itu.int/publ/R-REC/es>
- Vaca, G. N. (2005). “*Análisis de las tecnologías inalámbricas móviles 3G de banda ancha con acceso a internet y servicios móviles.*” Universidad Técnica de Ambato.
- Vargas, C., López, W., & Da Rocha, C. (2007). *Sistemas de Comunicación Inalámbrica*

MIMO - OFDM. 3(4).

http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1683-07892007000200009

Vuokko, N., Aki, K., Antti, R., Leszek, R., Tetsuro, I., Jan, J., Jonas, M., Jaakko, V., Juha, M., Katsuyuki, H., Veikko, H., Juha, Y., Nobutaka, O., Katsutoshi, K., Pekka, K., Tommi, J., Aki, H., Richard, W., & Michael, P. (2015). *Deliverable D1.4 METIS Channel Models*.

Zhunio Cifuentes, J. P. (2008). *Estudio de factibilidad para la implementación de una red GSM/GPRS en la red de telefonía móvil celular en el Ecuador* [Quito :EPN,2008.]. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/11938>

Zuñiga, L. (2013). *Telefonía celular, desde sus inicios hasta la actualidad*. Universidad Autónoma del Estado de México.

11. ANEXOS

Anexo 1: Certificado de Traducción

English Speak Up Center


Nosotros "*English Speak Up Center*"

CERTIFICAMOS que

La traducción del documento adjunto solicitado por el señor **DAYANNA STEFANIA GUADALIMA GUADALIMA** con cédula de ciudadanía número **1150320107** cuyo tema de investigación se titula: "**Estudio y Análisis de las tecnologías aplicadas en la interfaz aire de las comunicaciones móviles de 5G**", ha sido realizada por el Centro Particular de Enseñanza de Idiomas "*English Speak Up Center*".

Esta es una traducción textual del documento adjunto, y el traductor es competente para realizar traducciones.

Loja, 1 de abril de 2022


Mg. Sc. Elizabeth Sánchez Burneo

DIRECTORA ACADÉMICA

DIRECCION: SUCRE 207-46 ENTRE AZUAY Y MIGUEL

TELF: 2565842 - 0995263264