



ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE UNA RED CELULAR 5G HACIENDO USO DE MMWAVE



Edwin Yesid Cerón Cerón
María Camila Vejarano Sandoval

Director: Mg. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas GRIAL
Popayán, Septiembre de 2018



ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD DE UNA RED CELULAR 5G HACIENDO USO DE MMWAVE



Trabajo de Grado presentado como requisito para obtener el título de Ingeniero en
Electrónica y Telecomunicaciones

Edwin Yesid Cerón Cerón
María Camila Vejarano Sandoval

Director: Mg. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca
Facultad de Ingeniería Electrónica y de Telecomunicaciones
Departamento de Telecomunicaciones
Grupo de Radio e Inalámbricas GRIAL
Popayán, Septiembre de 2018



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I. CONCEPTOS GENERALES.....	3
1.1 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVIL.....	3
1.3 SISTEMAS 5G.....	4
1.3.1 mmWave.....	6
1.3.2 Servicios y Casos de Uso.....	7
1.4 REQUERIMIENTOS DE UNA RED 5G.....	9
1.5 CARACTERÍSTICAS A NIVEL FÍSICO DE LA RED CELULAR 5G.....	12
1.5.1 Interfaz Radio.....	12
1.5.2 Técnicas de Acceso.....	13
1.5.3 Formas de Onda.....	16
1.5.4 Esquemas de Modulación.....	18
1.5.5 Codificación de Canal.....	19
1.6 ESCENARIOS TÍPICOS DE IMPLEMENTACIÓN.....	22
1.7 MODELO DE CANAL Y MODELOS DE PÉRDIDAS.....	23
1.7.1 Modelo de Canal.....	23
1.7.2 Modelos de Pérdidas.....	23
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE DESARROLLO.....	27
2.1 INTRODUCCIÓN.....	27
2.2 ANALISIS DE REQUERIMIENTOS.....	27
2.2.1 Requerimientos Funcionales.....	28
2.2.2 Requerimientos no Funcionales.....	28
2.3 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN.....	28
2.3.1 Winprop.....	28
2.3.2 NYUSIM.....	28
2.4 DISEÑO.....	30
2.4.1 Definición de los Escenarios de Simulación para un Sistema 5G.....	30
2.4.2 Definición del Modelo de Pérdidas de Propagación.....	34



2.4.3	Definición del Modelo de Sistema.....	37
2.4.4	Creación y Ubicación de los UEs - gNB	38
2.4.5	Distancias entre UEs y gNBs.....	39
2.4.6	Pérdidas del Sistema.....	39
2.4.7	Potencias del Sistema	44
2.4.8	Métricas de Desempeño.....	46
2.5	IMPLEMENTACIÓN	50
2.5.1	Diagrama de Flujo de Simulación.....	50
CAPÍTULO III. EXPERIMENTACIÓN.....		53
3.1	INTRODUCCIÓN	53
3.2	CONDICIONES INICIALES DE ESTUDIO.....	53
3.3	CASO DE ESTUDIO 1	54
3.3.1	Análisis de Probabilidad de Servicio.....	54
3.3.2	Análisis de SINR.....	56
3.4	CASO DE ESTUDIO 2	65
3.4.1	Análisis Probabilidad de Servicio.....	65
3.4.2	Análisis de Pérdidas	66
3.5	CASO DE ESTUDIO 3	69
3.5.1	Análisis de Probabilidad de Servicio.....	70
3.5.2	Análisis de <i>Throughput</i>	70
CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....		81
4.1	INTRODUCCIÓN	81
4.2	CONCLUSIONES.....	81
4.3	TRABAJOS FUTUROS	82
BIBLIOGRAFÍA.....		84



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Visión general de los servicios 5G.	5
Figura 1.2 Línea de tiempo de normalización de 5G.	6
Figura 1.3 Espectro de ondas milimétricas (mmWave).	7
Figura 1.4 Principales servicios 5G y sus casos de uso.....	8
Figura 1.5 Entidades de la interfaz radio.....	13
Figura 1.6 OFDMA vs NOMA.....	14
Figura 1.7 MUSA.....	15
Figura 1.8 Esquema transmisor y receptor CP-OFDM.....	17
Figura 1.9 Esquema de modulación FQAM.....	19
Figura 2.1 Diagrama de metodología RUP.	27
Figura 2.2 GUI principal del simulador NYU-SIM.	29
Figura 2.3 Escenario UMi SC.....	31
Figura 2.4 Escenario UMi OS.....	32
Figura 2.5 Escenario UMa.....	33
Figura 2.6 Escenario RMa.....	34
Figura 2.7 Modelos de pérdidas ABG y CI en escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa.....	36
Figura 2.8 Modelo general del sistema..	37
Figura 2.9 Patrón de radiación antena del gNB.....	39
Figura 2.10 Interferencia de gNB con un UE.....	45
Figura 2.11 Modulación M-QAM con tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 3/4.	47
Figura 2.12 Diagrama de flujo de simulación.	52
Figura 3.1 Casos de estudio.....	53
Figura 3.2 CDF SINR UMi SC en función de la potencia..	57
Figura 3.3 Diagrama de cobertura escenario UMi SC en función de SINR.	58
Figura 3. 4 CDF SINR UMi OS en función de la potencia.	59
Figura 3.5 Diagrama de cobertura escenario UMi OS en función de SINR.....	60
Figura 3.6 CDF SINR UMa en función de la potencia..	61
Figura 3.7 Diagrama de cobertura escenario UMa en función de SINR.....	62
Figura 3.8 CDF SINR RMa en función de la potencia..	63
Figura 3.9 Diagrama de cobertura escenario UMa en función de SINR.....	64
Figura 3.10 CDF Pérdidas totales por UMi SC en función de la frecuencia.	67
Figura 3.11 CDF de pérdidas totales UMi OS y UMa en función de la frecuencia.68	
Figura 3.12 CDF de Throughput UMi SC en función del número de UEs.	71
Figura 3.13 CDF de Throughput de UE - UMi SC.	72
Figura 3.14 pdf throughput UMi SC.....	73



Figura 3.15 CDF Throughput UMi OS.....	74
Figura 3.16 CDF de Throughput de UE - UMi OS.....	75
Figura 3.17 pdf de throughput UMi SC.....	76
Figura 3.18 CDF de Throughput UMa en función del número de UEs.....	76
Figura 3.19 CDF de Throughput de UE - UMa.....	78
Figura 3.20 pdf de throughput de celda UMa.....	79



LISTA DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparación de las técnicas de acceso..	16
Tabla 1.2 Estudios interfaz radio en redes 5G..	21
Tabla 1.3 Parámetros del modelo CI y ABG.....	25
Tabla 2.1 Comparación modelos de pérdidas ABG y CI..	35
Tabla 2.2 Parámetros del modelo CI.....	41
Tabla 2.3 Relación de SINR, CQI y MCS.....	48
Tabla 3.1 Probabilidad de servicio en función de la potencia.....	55
Tabla 3.2 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en UMi SC.....	57
Tabla 3.3 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en UMi OS.....	60
Tabla 3.4 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en UMa.....	62
Tabla 3. 5 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en RMa.....	64
Tabla 3. 6 Probabilidad de servicio en función de la frecuencia.....	65
Tabla 3.7 Probabilidad de servicio en función del número de UEs.	70
Tabla 3.8 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de UE - UMi SC.	72
Tabla 3.9 Probabilidad de modulaciones en función de UEs - UMi OS.....	74
Tabla 3.10 Probabilidad de modulaciones en función de UE - UMa.	77



LISTA DE ACRÓNIMOS

1G	<i>First Generation</i> , Primera Generación
2G	<i>Second Generation</i> , Segunda Generación.
3G	<i>Third Generation</i> , Tercera Generación.
3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i> , Proyecto de Cooperación de Tercera Generación.
4G	<i>Fourth Generation</i> , Cuarta Generación.
5G	<i>Fifth Generation</i> , Quinta Generación.
ABG	<i>Alpha – Beta – Gamma</i> .
AFB	<i>Analysis Filter Bank</i> , Banco de Filtros de Análisis.
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i> , Sistema de Telefonía Móvil Avanzada.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BLER	<i>Block Error Rate</i> , Tasa de Error de Bloque.
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base.
CAPEX	<i>Capital Expenditures</i> , Gastos de Capital
CI	<i>Close - In</i> .
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulativa.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
CP-OFDM	<i>Cyclic Prefix - Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Prefijo Cíclico - Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i> , Indicador de Calidad del Canal.
DL	<i>Down Link</i> , Enlace Descendente.
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> , Transformada Discreta de Fourier.
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> , Tasa de Datos Mejorada para la Evolución de GSM.
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i> , Banda Ancha Móvil Mejorada.
FBMC	<i>Filter Bank Multi-Carrier</i> , Banco de Filtros Multiportadora.
FDMA	<i>Frequency Division Multiplexing Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier.
FSK	<i>Frequency Shift Keying</i> , Modulación por Desplazamiento de Frecuencia.
FSPL	<i>Free Space Path Loss</i> , Pérdidas de Trayecto de Espacio Libre.



FQAM	<i>Frequency and Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación por Amplitud en Cuadratura y Frecuencia.
GFDM	<i>Generalized Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Generalizada.
gNB	<i>Next Generation Node B</i> , Siguiente Generación de Nodos B.
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , Servicio General de Radio Paquetes.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.
ICI	<i>Inter Cell Interference</i> , Interferencia Inter Celda.
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i> , Transformada Discreta de Fourier Inversa.
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier Inversa.
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> , Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos.
IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications</i> , Sistema Internacional de Telecomunicaciones Móviles 2020.
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas.
IP	<i>Internet Protocol</i> , Protocolo de Internet.
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i> , Interferencia Inter Simbólica.
ITU	<i>International Telecommunications Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
ITU-R	<i>International Telecommunications Union Radiocommunications Sector</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones Sector de Radiocomunicaciones.
LOS	<i>Line of Sight</i> , Línea de Vista.
LTE	<i>Long-Term Evolution</i> , Evolución a Largo Término.
METIS-II	<i>Mobile and Wireless Communications Enablers for Twenty-Twenty Information Society-II</i> , Habilitadores de Comunicaciones Móviles e Inalámbricas para la Sociedad de la Información II Veinte-Veinte.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiples Entradas Múltiples Salidas.
mmWAVE	<i>Millimeter Wave</i> , Ondas Milimétricas.
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications</i> , Comunicaciones Masivas Tipo Máquina.
MS	<i>Mobile Station</i> , Estación Móvil.
MUSA	<i>Multi-User Shared Access</i> , Acceso Compartido Multiusuario.
NLOS	<i>Non Line of Sight</i> , Sin Línea de Vista.
NOMA	<i>Non Orthogonal Multiple Access</i> , Acceso Múltiple No Ortogonal.
NYU	<i>New York University</i> , Universidad de Nueva York.



NYUSIM	<i>New York University Simulator</i> , Simulador de la Universidad de Nueva York.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales.
OPEX	<i>Operating Expese</i> , Gastos de Operación.
OQAM	<i>Offset Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud en Cuadratura Desplazada.
OS	<i>Open Square</i> , Áreas Abiertas.
PAPR	<i>Peak to Average Power Ratio</i> , Relación de Potencia Pico a Promedio.
PDMA	<i>Pattern Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Patrones.
PLE	<i>Path Loss Exponent</i> , Exponente de Pérdidas de Trayecto.
PPN	<i>PolyPhase Network</i> , Red Poli-Fase.
PS	<i>Packet Switching</i> , Conmutación de Paquetes.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud en Cuadratura.
QoS	<i>Quality of Service</i> , Calidad de Servicio.
RAN	<i>Network Acces Radio</i> , Red de Acceso Radio.
RB	<i>Block Resource</i> , Bloque de Recursos.
RMa	<i>Rural Macrocell</i> , Macrocela Rural.
RSMA	<i>Resource Spread Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Dispersión de Recursos.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Racional Unificado.
SC	<i>Street Canyon</i> .
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia de Portadora Única.
SC-RSMA	<i>Single Carrier Resource Spread Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Dispersión de Recursos con Portadora Única.
SCMA	<i>Sparse Code Multiple Access</i> , Acceso Múltiple de Código Disperso.
SER	<i>Symbol Error Rate</i> , Tasa de Error de Símbolo.
SIC	<i>Successive Interference Cancellation</i> , Cancelación Sucesiva de Interferencia.
SMS	<i>Short Message Service</i> , Servicio de Mensajes Cortos.
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TRxP	<i>Transmission Reception Points</i> , Puntos de Transmisión Recepción.
UE	<i>User Equipment</i> , Equipo de Usuario.



UFMC	<i>Universal Filtered Multi-Carrier</i> , Multiportadora de Filtrado Universal.
UL	<i>Up Link</i> , Enlace Ascendente.
UMa	<i>Urban Macrocell</i> , Macrocela Urbana.
UMi	<i>Urban Microcell</i> , Microcela Urbana.
uMTC	<i>Ultra Reliable Machine Type Communications</i> , Comunicaciones de Tipo Máquina Ultra Confiables.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.
URLLC	<i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communications</i> , Comunicaciones Ultra Fiables y de Baja Latencia.
VoIP	<i>Voice IP</i> , Voz sobre IP.
WOLA-OFDM	<i>Weighted Overlap and Add Based OFDM</i> , Superposición Ponderada y Adición Basada en OFDM.
xMBB	<i>Extreme Mobile Broadband</i> , Banda Ancha Móvil Extrema.



INTRODUCCIÓN.

Las redes de comunicaciones móviles junto con el flujo de información están en constante crecimiento, sus principales problemas o retos radican en transmitir mayor información en la red, soportar más usuarios, incrementar la eficiencia espectral, disminuir la latencia, ofrecer calidad en los servicios y disminuir el consumo de energía, tanto en la Estación Base (BS, *Base Station*) como en el Equipo de Usuario (UE, *User Equipment*). El uso de Ondas Milimétricas (mmWave, *Millimeter Wave*), esquemas de modulación, formas de onda, técnicas de acceso, conformación de haz, sistemas de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), control de potencia y codificación, aportan en el cumplimiento de los objetivos en las comunicaciones inalámbricas de Quinta Generación (5G, *Five Generation*). Todo lo anterior se debe implementar sin elevar significativamente los costos tanto de Capital (CAPEX, *Capital Expenditures*) como de operación (OPEX, *Operating Expense*), utilizando la infraestructura de las redes existentes [1], [2].

En el presente trabajo de grado se analiza la capacidad¹ de una red 5G haciendo uso de mmWave. Este documento está compuesto por 4 capítulos. En el primer capítulo se describe la evolución de los sistemas de comunicación móvil, los requerimientos y generalidades de una red celular 5G, los escenarios de implementación y los modelos de pérdidas de propagación propuestos para 5G. El segundo capítulo contiene la metodología para el diseño e implementación de un modelo de simulación para el análisis de capacidad. En el tercer capítulo se realiza el análisis de capacidad en los escenarios Microceldas Urbanas (UMi, *Urban Microcell*), Macrocelas Urbanas (UMa, *Urban Macrocell*) y Macrocela Rural (RMa, *Rural Macrocell*) variando la frecuencia, la potencia y el número de usuarios. Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones y los trabajos futuros.

¹ Capacidad entendida como el número de usuarios atendidos por una red y la velocidad total de transporte de información conocido como *Throughput*.





CAPÍTULO I.

CONCEPTOS GENERALES

1.1 EVOLUCIÓN DE LOS SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVIL

La Primera Generación (1G, *First Generation*) de los sistemas de comunicación móvil fue caracterizada por ser analógica, dedicada especialmente a prestar el servicio de voz por medio de Conmutación de Circuitos (CS, *Circuit Switching*). El estándar destacado en esta generación fue el Sistema de Telefonía Móvil Avanzada (AMPS, *Advanced Mobile Phone System*), y la técnica de acceso empleada fue Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*), con una velocidad de transmisión de datos entre 1 Kbps y 2,4 Kbps [3]–[5].

La Segunda Generación (2G, *Second Generation*) surgió con el fin de mejorar las características de 1G para brindar mejores servicios como transmisión de datos, voz digital, mensajes de texto o Servicio de Mensajes Cortos (SMS, *Short Message Service*), *roaming* internacional y llamada en espera. El estándar empleado en esta generación fue el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*). En esta generación, las técnicas de acceso empleadas fueron Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) y Acceso Múltiple por División de Código IS-95 (CDMA, *Code Division Multiple Access*), haciendo uso de la tecnología digital a una velocidad de transmisión de datos entre 14,4 Kbps y 64 Kbps, al igual que en 1G, la comunicación se estableció por CS [3][6].

Las necesidades de los usuarios fueron creciendo en un corto tiempo, por lo tanto, se implementó la red 2.5G, generación que establece la comunicación por medio de Conmutación de Paquetes (PS, *Packet Switching*), haciendo uso de los estándares de Servicio General de Radio Paquetes (GPRS, *General Packet Radio Service*) y Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución del GSM (EDGE, *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), con velocidades de transmisión de 115 Kbps y 384 Kbps respectivamente. Algunos de los servicios ofrecidos son: SMS, acceso a correo electrónico y todos los servicios de generaciones anteriores [5].



La Tercera Generación (3G, *Third Generation*) se implementó con el objetivo de incrementar la capacidad. Las principales tecnologías de 3G fueron: CDMA 2000 basado en CDMA IS-95 y el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) basado en GSM, prestando los servicios de acceso a internet de alta velocidad, acceso fijo e inalámbrico a internet, telemedicina, servicios multimedia, servicios de localización y correo electrónico [4], [5], [7].

A inicios del año 2010 se implementó la Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*) de sistemas de comunicaciones móviles, con el objetivo de incrementar la capacidad de la red móvil, mejorar Calidad de Servicio (QoS, *Quality of Service*), disminuir la latencia y extender la seguridad de la red. Además, para brindar estos servicios a bajo costo, 4G está basada en el Protocolo de Internet (IP, *Internet Protocol*) con la implementación del estándar Evolución a Largo Término (LTE, *Long-Term Evolution*) alcanzando una velocidad de transmisión de datos de 300 Mbps en el Enlace Descendente (DL, *Down Link*).

LTE hace uso de la técnica de transmisión Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para el DL y Acceso Múltiple por División de Frecuencias de Portadora Única (SC-FDMA, *Single Carrier Frequency Division Multiple Access*) basado en la técnica de Acceso Múltiple por División de Frecuencias Ortogonales (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) para el Enlace Ascendente (UL, *Up Link*) [3] - [7].

La creciente demanda de tráfico de datos, en las redes inalámbricas de 4G junto con las exigencias por parte de los usuarios, respecto a calidad, capacidad, cobertura y latencia, impulsan al diseño de un nuevo sistema de comunicación móvil denominado 5G.

1.3 SISTEMAS 5G

La red 5G, al igual que LTE, tiene como objetivo mejorar la calidad de los servicios, incrementar la capacidad de la red y disminuir la latencia soportando servicios en tiempo real.

Los sistemas de 5G deben diseñarse para soportar la demanda generada por los UEs, al hacer uso de servicios como Voz sobre IP (VoIP, *Voice IP*), realidad aumentada, realidad virtual, video llamadas, *streaming* y juegos en tiempo real con muy baja latencia, además de la demanda que generan los dispositivos electrónicos



y sensores que hacen parte del Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*) personas y dispositivos conectados en cualquier lugar y en cualquier momento, conducción autónoma de vehículos, monitoreo de redes de sensores, entre otros.

En la Figura 1.1 se tiene una visión general de los servicios que serán soportados en 5G.

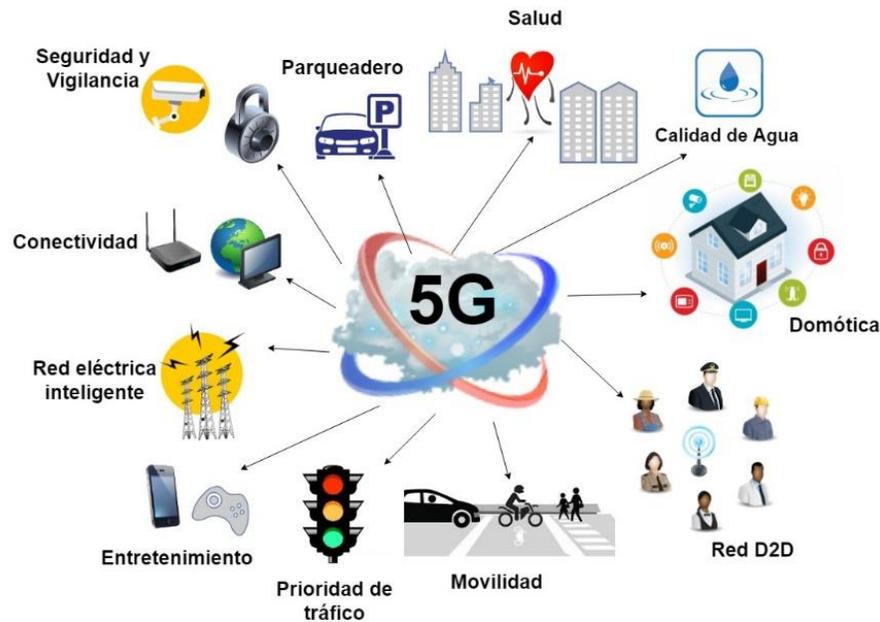


Figura 1.1 Visión general de los servicios 5G. Fuente por Autor

Las organizaciones de estandarización internacional como la Unión Internacional de Telecomunicaciones Sector de Radiocomunicaciones (ITU-R, *International Telecommunication Union Radiocommunication Sector*) y el Proyecto de Cooperación de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) trabajan para mejorar las características de la red 5G, con el fin de proporcionar servicios seguros, fiables, de buena calidad y garantizar un conjunto de normas de comunicación móvil 5G aplicables a nivel mundial.

En la Figura 1.2 se observa la línea de tiempo de normalización de los diferentes organismos de estandarización y grupos de trabajo sobre 5G. El proyecto Internacional de Telecomunicaciones Móviles 2020 (IMT-2020, *International Mobile Telecommunication*) de la ITU-R está dividido en tres etapas, según la Figura 1.2 en la línea de la ITU. La primera, se encarga de los requerimientos mínimos técnicos de la red 5G; la segunda fase, se encarga de estudiar las tecnologías candidatas para interfaz radio 5G según los requerimientos de la anterior fase; y la tercera fase, busca estandarizar la red 5G con los requerimientos y tecnologías necesarias para su implementación.



El organismo 3GPP ha estructurado el plan de tiempo de estandarización 5G para obtener los objetivos en tres fases consecutivas de acuerdo a la Figura 1.2 en la línea 3GPP, estos tramos deben ser compartidos con otros organismos de normalización de modo que 5G pueda desarrollarse en el periodo previsto, 2016 - 2019 y su plena implementación en el año 2020.

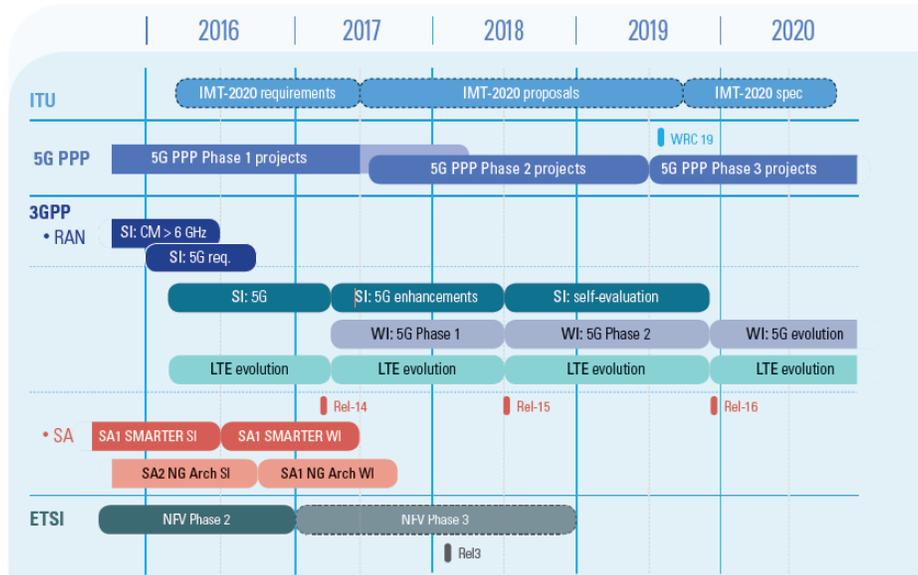


Figura 1.2 Línea de tiempo de normalización de 5G. Tomada de [8]

1.3.1 mmWave

La nueva red 5G necesita incrementar su capacidad, para lo cual es necesario un mayor ancho de banda. mmWave ofrece anchos de banda de hasta 1 GHz, por esto es la banda de frecuencias de estudio para implementar en redes 5G. Se conoce como mmWave al espectro de frecuencias comprendidas entre 30 GHz y 300 GHz de acuerdo a la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunications Union*), su longitud de onda está en el rango de 1 mm a 10 mm [9].

El uso de mmWave dificulta la implementación y desarrollo de algunos componentes electrónicos del sistema, debido a que las pérdidas se incrementan al emplear frecuencias en el orden de las decenas de GHz, además, la difracción y otro tipo de pérdidas reducen la cobertura del sistema [10].

En la Figura 1.3 se presenta el espectro propuesto para el despliegue de las redes 5G, mmWave está comprendido entre los 24 GHz y los 100 GHz, además se



incluyen frecuencias inferiores a 6 GHz según publicación en [11] y estudios por universidades y empresas [12].

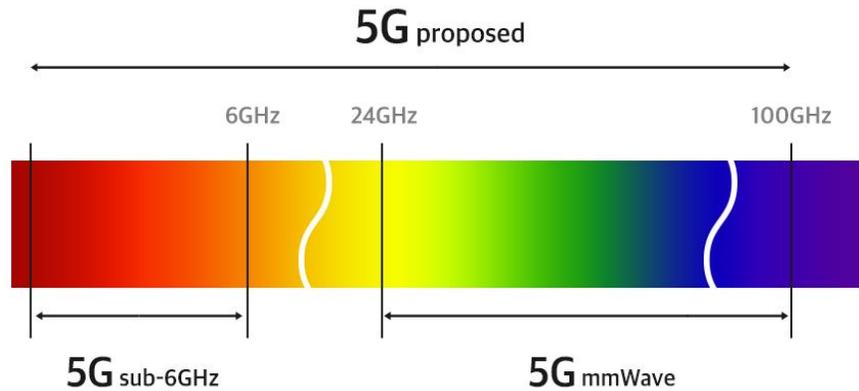


Figura 1.3 Espectro de ondas milimétricas (mmWave). Tomada de [11]

1.3.2 Servicios y Casos de Uso

En este apartado se hablará de los servicios y casos de uso considerados por el proyecto Habilitadores de Comunicaciones Móviles e inalámbricas para la Sociedad de la Información II Veinte-Veinte (METIS II, *Mobile and wireless communications Enablers for Twenty-twenty Information Society-II*) del grupo 5GPPP. En el documento [13] se consideran los principales tipos de servicios para 5G: Banda Ancha Móvil Extrema (xMBB, *Extreme Mobile Broadband*), Comunicaciones Masivas Tipo Maquina (mMTC, *Massive Machine Type Communications*) y Comunicaciones de Tipo Máquina Ultra Confiables (uMTC, *Ultra Reliable Machine Type Communications*); además se mencionan los casos de uso para los que se está diseñando la Red de Acceso Radio (RAN, *Network Acces Radio*) que se pueden observar en la Figura 1.4.

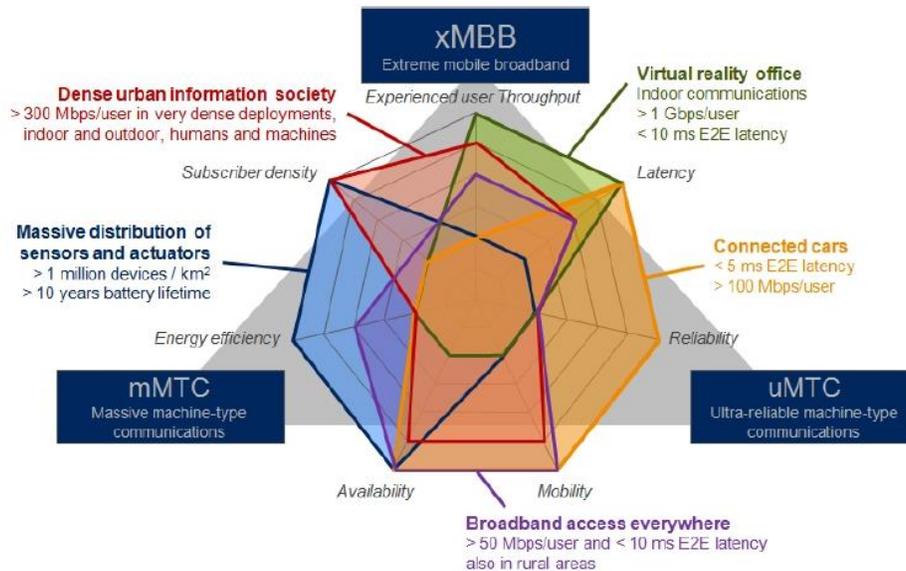


Figura 1.4 Principales servicios 5G y sus casos de uso. Tomada de [13]

Los tipos de servicio planteados por METIS II son: xMBB, mMTC y uMTC, a continuación, se realiza una breve descripción.

xMBB: velocidades de datos extremadamente altas y comunicación de baja latencia en algunas áreas, acceso confiable de banda ancha en áreas con gran densidad de usuarios.

mMTC: cobertura y penetración en interiores. Requiere conectividad inalámbrica para un gran número de dispositivos y conectividad escalable por celda.

uMTC: comunicaciones ultra confiables de baja latencia, relacionadas con comunicaciones de vehículos a cualquier otro dispositivo (V2X), servicio empleado en aplicaciones de control industrial y redes eléctricas inteligentes.

Los casos de uso que se observan en los polígonos de la Figura 1.3, diferenciados por colores para 5G, se generan a partir de características y/o funcionalidades como eficiencia energética, disponibilidad, movilidad, confiabilidad, latencia, densidad de UEs y *throughput*. Los casos de uso más representativos son:

- **Sociedad de la información en un escenario urbano denso:** velocidad de transmisión de datos mayor a 300 Mbps/usuario en zonas o áreas con gran densidad de UEs, en escenarios *indoor* y *outdoor*, para comunicaciones entre personas y/o maquinas.



- **Oficina de realidad virtual:** comunicaciones *indoor*, velocidad de transmisión mayor a 1Gbps/usuario, latencia de extremo a extremo menor a 10 ms.
- **Vehículos conectados:** latencia de extremo a extremo menor a 5 ms, velocidad de transmisión de datos mayor a 100 Mbps/usuario.
- **Acceso de banda ancha en todas partes:** velocidad de transmisión mayor a 50 Mbps/usuario, latencia de extremo a extremo menor a 10 ms en zonas de baja densidad de UEs.
- **Distribución masiva de sensores y actuadores:** más de un millón de dispositivos por km² con una duración de la batería mayor a 10 años.

Los anteriores casos de uso estipulados por el proyecto METIS-II fueron publicados en el año 2016, con posibilidad de adaptación o cambios según evolución y estandarización de la arquitectura.

1.4 REQUERIMIENTOS DE UNA RED 5G

La ITU-R propone una serie de requerimientos base para los sistemas de comunicaciones móviles terrestre publicadas en febrero del 2017 en la recomendación R15-SG05-C-0040 [14]. Estos requerimientos están relacionados con el desempeño y características técnicas que se deben cumplir para IMT 2020. A continuación, se mencionan los requerimientos específicos que definen las redes 5G:

- **Velocidad máxima de transmisión de datos**

La velocidad máxima alcanzada en condiciones ideales para una Estación Móvil (MS, *Mobile Station*), está directamente relacionada con la eficiencia espectral y el ancho de banda. Los valores mínimos establecidos son 20 Gbps para DL y 10 Gbps para UL.

- **Eficiencia espectral máxima**

Velocidad máxima de transmisión de datos alcanzada en condiciones ideales por el ancho de banda del canal. Los valores mínimos establecidos son 30 bps/Hz para DL y 15 bps/Hz para UL.



- **Velocidad de transmisión de datos de usuario**

La velocidad de datos de usuario está definida por el 5% de la Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) del *throughput* de UE, definido como el número de bits recibidos correctamente por unidad de tiempo (s). Los valores objetivos en un escenario urbano con alta densidad de edificios son 100 Mbps para DL y 50 Mbps para UL.

Este requerimiento está definido para Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB, *Enhanced Mobile Broadband*).

- **Eficiencia espectral de usuario - Quinto percentil**

Está definido por el 5% de la CDF del *throughput* normalizado de usuario, definido como el número de bits recibido correctamente en un determinado tiempo dividido por el ancho de banda del canal [Bps/Hz].

Los valores mínimos para la eficiencia espectral del quinto percentil dependen del escenario y del enlace (UL-DL), *Indoor Hotspot* – eMBB para DL 0.3 bps/Hz, UL 0.21 bps/Hz; Urbano Denso – eMBB para DL 0.225 bps/Hz, UL 0.15 bps/Hz, Rural – eMBB para DL 0.12 bps/Hz, UL 0.045 bps/Hz.

- **Eficiencia espectral media**

Está definida por el desempeño de todos los UEs. Es el número de bits que se reciben correctamente en determinado tiempo, haciendo uso del ancho de banda disponible en una banda específica, teniendo en cuenta el número de Puntos de Transmisión Recepción (TRxP, *Transmission Reception Points*) existentes en la configuración de la red, las unidades de medida se definen como bps/Hz/TRxP.

Los valores mínimos para la eficiencia espectral del quinto percentil dependen del escenario y del enlace (UL-DL), *Indoor Hotspot* – eMBB para DL 9 bps/Hz/TRxP, UL 6.75 bps/Hz/TRxP; Urbano Denso – eMBB para DL 7.8 bps/Hz/TRxP, UL 5.4 bps/Hz/TRxP, Rural – eMBB para DL 3.3 bps/Hz/TRxP, UL 1.6 bps/Hz/TRxP.

- **Capacidad del tráfico por área**

Tráfico total recibido por área, sus unidades están definidas como Mbps/m², depende de la eficiencia espectral, el despliegue de red y ancho de banda, este



requisito se plantea con el objetivo de prueba en eMBB, el valor definido es de 10 Mbps/m² para DL *indoor* eMBB.

- **Latencia**

Para este requerimiento se tiene en cuenta dos tipos de latencia: la primera es la latencia del plano de usuario y la otra es la latencia del plano de control.

La latencia del plano de usuario está definida como el tiempo en milisegundos (ms) necesario para entregar un paquete a su destino, es decir el tiempo desde que la fuente envía hasta que el destino recibe, los valores mínimos establecidos para eMBB es de 4ms y para las Comunicaciones Ultra Fiables y de Baja Latencia (URLLC, *Ultra-Reliable and Low-Latency Communications*) es de 1ms.

La latencia del plano de control es el tiempo necesario para el paso del estado inactivo al estado activo o transferencia de datos, el valor mínimo requerido es de 20 ms.

- **Densidad de conexión**

Número de dispositivos que cumplen con una QoS específica por unidad de área. El valor mínimo estipulado es de 1.000.000 de dispositivos por Km².

Este requerimiento está definido para mMTC.

- **Eficiencia energética**

La eficiencia energética de red es la capacidad de la tecnología de interfaz radio para disminuir el consumo de energía de la red de acceso en comparación con la capacidad de tráfico generada. La eficiencia energética del dispositivo es la capacidad de la tecnología de interfaz radio para minimizar la energía consumida por el módem del dispositivo en relación con las características del tráfico.

Este requerimiento está definido para mMTC.

- **Confiabilidad**

Capacidad de transmitir bytes en un tiempo determinado con una alta probabilidad de éxito. El valor mínimo de confiabilidad establecido es de $1-10^{-5}$ para transmitir 32 bytes en 1 ms.



- **Movilidad**

Se define como la velocidad máxima [Km/h] que la MS puede alcanzar para alcanzar un QoS definido. Se especifican los siguientes valores según la velocidad, 0 Km/h estacionario, hasta 10 Km/h para peatón, desde 10 Km/h hasta 120 Km/h vehículos y desde 120 Km/h hasta 500 Km/h vehículos de alta velocidad.

Este requerimiento está definido para eMBB.

- **Tiempo de interrupción de la movilidad**

Tiempo mínimo soportado por el sistema en el cual un UE no puede intercambiar paquetes con ninguna BS; este requisito es evaluado en eMBB y URLLC, el valor mínimo establecido es de 0ms.

- **Ancho de banda**

Es el ancho de banda agregado máximo del sistema. El ancho de banda puede ser soportado por una o múltiples portadoras de radiofrecuencia. Es necesario al menos 100 MHz, sin embargo, la nueva tecnología de interfaz radio soportará hasta 1 GHz. Se considera que el ancho de banda debe ser escalable.

1.5 CARACTERÍSTICAS A NIVEL FÍSICO DE LA RED CELULAR 5G

1.5.1 Interfaz Radio

La interfaz radio hace parte fundamental de un sistema de telecomunicaciones móviles, es el conjunto de entidades funcionales y características de la red que permiten transmitir los paquetes de datos entre la Siguiete Generación de Nodos B (*gNB*, *Next Generation Node B*) y los UEs [15]. Está conformada por tres niveles: nivel físico, nivel de enlace de datos y nivel de red. Para este trabajo de grado, se tiene en cuenta las características y componentes del nivel físico, que se encarga de la trasmisión de datos. Las funciones principales de este nivel son: modulación, demodulación, transmisión, recepción, control de potencia y corrección de errores.

En la Figura 1.5 se observan las entidades funcionales como el transmisor y el receptor, que intervienen en la interfaz radio, además de los campos eléctricos



producidos por el transmisor deseado y campos interferentes de otras fuentes que transmiten en la misma frecuencia.

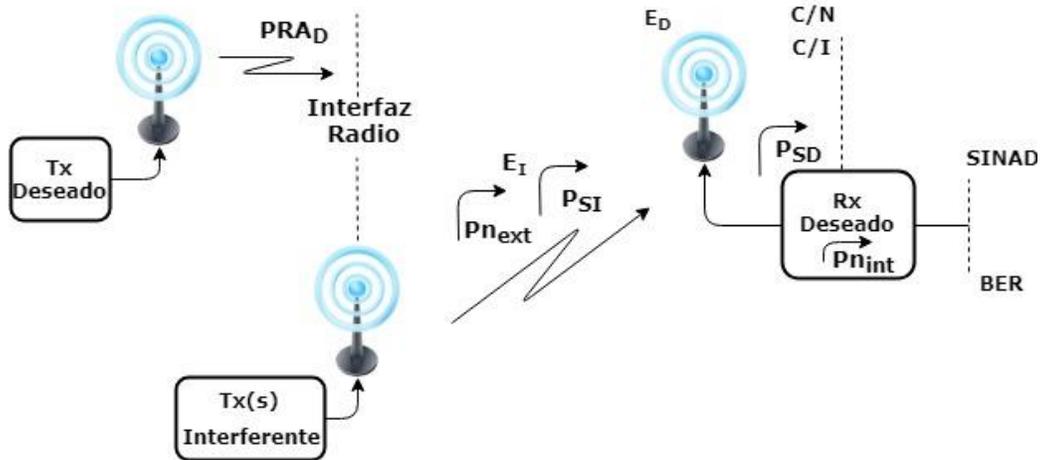


Figura 1.5 Entidades de la interfaz radio. Tomada y Adaptada de [16]

La interfaz radio debe contar con algunas características como: asegurar el uso eficiente del espectro, permitir operación multicanal, facilitar itinerancia de los terminales de UEs, tener una tasa mínima de paquetes perdidos o con errores y presentar latencia mínima. Para cumplir con ese tipo de características se debe tener en cuenta: las técnicas de acceso, la forma de onda, esquemas de modulación y codificación del canal.

1.5.2 Técnicas de Acceso

La técnica de acceso es la forma como dos o más estaciones comparten un mismo medio de transmisión dentro de un sistema de comunicaciones móviles. Existen dos tipos de acceso: el primero, conocido como acceso aleatorio se caracteriza porque las terminales compiten por el canal y sufren colisiones; y el segundo, llamado acceso múltiple, ya que varios usuarios pueden hacer uso de un recurso común en forma organizada y sin causar interferencias entre sí.

En la técnica de acceso múltiple el usuario puede transmitir en el dominio del tiempo, frecuencia, potencia o código. Estudios realizados [14] - [19] proponen algunas técnicas de acceso candidatas para ser implementadas en las redes de 5G, entre estas se encuentran:

- SC-FDMA.
- OFDMA.



- Acceso Múltiple por Dispersión de Recursos con Portadora Única (SC-RSMA, *Single Carrier Resource Spread Multiple Access*).
- Acceso Múltiple por Dispersión de Recursos (RSMA, *Resource Spread Multiple Access*).
- Acceso Compartido Multiusuario (MUSA, *Multi-User Shared Access*).
- Acceso Múltiple No Ortogonal (NOMA, *Non-Orthogonal Multiple Access*).
- Acceso Múltiple por División de Patrones (PDMA, *Pattern Division Multiple Access*).
- Acceso Múltiple de Código Disperso (SCMA, *Sparse Code Multiple Access*).

Las técnicas de acceso más exploradas y con mayor probabilidad de implementación se describen a continuación:

A. NOMA

Técnica de acceso múltiple no ortogonal, que superpone a múltiples usuarios en el dominio de la potencia, compartiendo recursos en tiempo y frecuencia. Utiliza un receptor de Cancelación Sucesiva de Interferencia (SIC, *Successive Interference Cancellation*) con el fin de disminuir la interferencia de los UEs que transmiten en la misma frecuencia de manera simultánea, la potencia que necesita cada usuario para acceder a la red depende de su ubicación, al superponer usuarios e implementar SIC en DL mejora el *throughput* en un 30% [23].

En la Figura 1.6 se observa la diferencia entre OFDMA y NOMA respecto a su distribución en el dominio de la frecuencia, en NOMA se pueden superponer varios terminales mientras que en OFDMA no. La frecuencia hace referencia a un conjunto de subportadoras asignadas a un usuario.

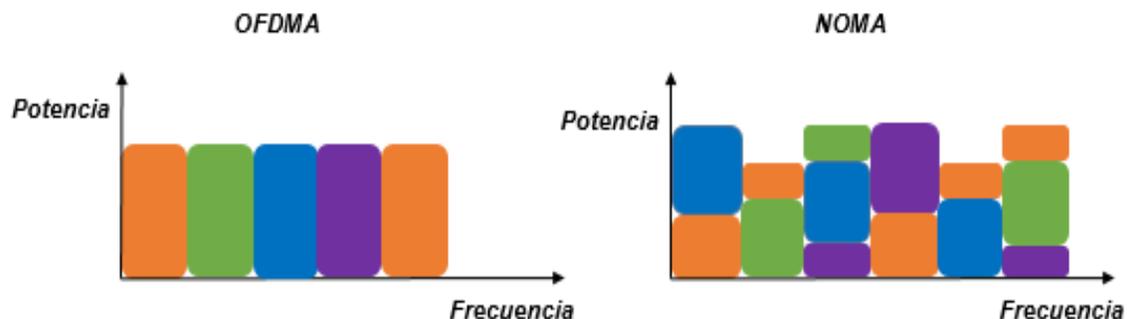


Figura 1.6 OFDMA vs NOMA. Tomada y Adaptada de [23]



B. MUSA

Técnica de acceso múltiple no ortogonal que emplea secuencias de propagación y receptor avanzado SIC. Los datos de múltiples UEs se transmiten por secuencias de propagación haciendo uso del mismo recurso radio, luego se superpone la dispersión de cada UE para ser transmitido y finalmente utiliza un receptor SIC para demodular y recuperar los datos de cada UE [24]. Las principales características de esta técnica de acceso son: baja Tasa de Error de Bloque (BLER, *Block Error Rate*), mayor eficiencia espectral, mejor desempeño del sistema [19] y acceso a múltiples UEs. No es la más usada debido a la interferencia entre UEs y la Relación de Potencia Pico a Promedio (PAPR, *Peak to Average Power Ratio*) alta [25].

En la Figura 1.7 se observa el procesamiento del transmisor y receptor en DL empleando MUSA, los símbolos de cada usuario se transmiten por una secuencia de propagación, haciendo uso del mismo recurso, tanto en frecuencia como en tiempo. Múltiples secuencias de propagación forman un grupo, donde cada usuario puede elegir una al azar y puede usar diferentes secuencias de propagación para transmitir diferentes símbolos.

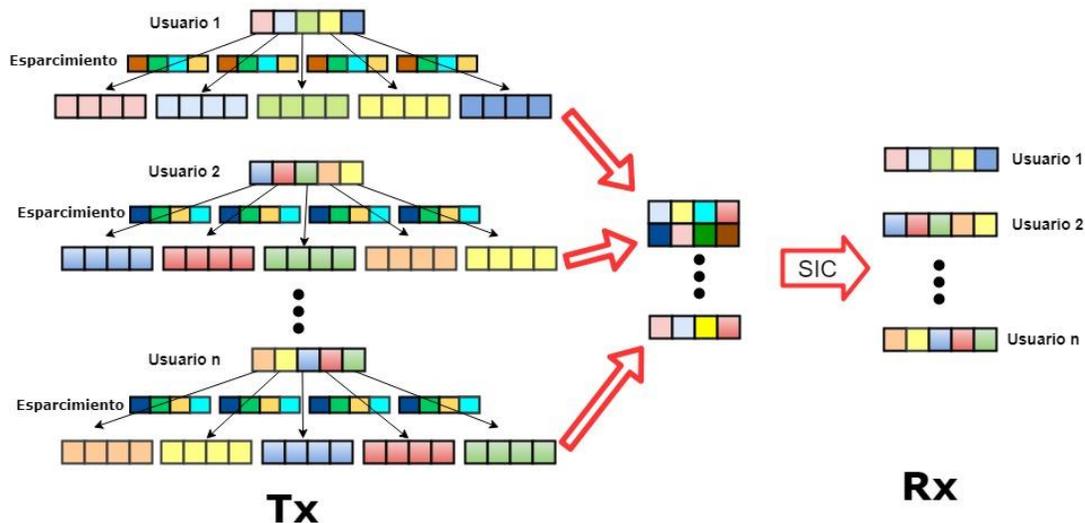


Figura 1.7 MUSA. Tomada y Adaptada de [26].



En la Tabla 1.1 se hace un resumen de las ventajas y desventajas de las técnicas de acceso mencionadas previamente.

TÉCNICAS DE ACCESO MÚLTIPLE	VENTAJAS	DESVENTAJAS
NOMA	Mejora la eficiencia espectral Mejora el desempeño de DL al implementar SIC	La técnica de acceso en el dominio de la potencia está en la etapa de investigación para mmWave.
MUSA	Presenta baja BLER. Soporta el acceso de múltiples usuarios. Mejora la eficiencia espectral.	Aumenta la interferencia entre usuarios. Presenta alta PAPR

Tabla 1.1 Comparación de las técnicas de acceso. Tomada de [24].

1.5.3 Formas de Onda

Actualmente se adelantan estudios [27]–[36] respecto a las formas de onda que se puede emplear en 5G, se desea utilizar un filtro de conformación de pulso diferente al OFDM tradicional, que reduzca las emisiones fuera de banda y mejore la eficiencia espectral.

Como resultado de los estudios respecto a la forma de onda, OFDM es la tecnología base para las redes 5G. A continuación, se nombran las formas de onda basadas en OFDM candidatas para 5G:

- C.** Prefijo Cíclico OFDM (CP-OFDM, *Cyclic Prefix- Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).
- D.** Superposición Ponderada y Adición basada en OFDM (WOLA-OFDM, *Weighted Overlap and Add Based OFDM*).
- E.** Multiportadora de Filtrado Universal (UFMC, *Universal Filtered MultiCarrier*).
- F.** Banco de Filtros Multiportadora (FBMC, *Filter Bank MultiCarrier*).
- G.** Multiplexación por División de Frecuencias Generalizadas (GFDM, *Generalized Frequency Division Multiplexing*).

A continuación, se describe la forma de onda CP-OFDM que es la base de las formas de onda candidatas para 5G:



- **CP-OFDM**

La forma de onda CP-OFDM consiste en poner las primeras muestras de cada símbolo OFDM al final del símbolo para reducir la Interferencia Inter Simbólica (ISI, *Inter Symbol Interference*) de tal forma que, si el tiempo de duración del prefijo cíclico es más grande que la dispersión de retardo, el prefijo lo absorberá [37] evitando la ISI.

Los principales beneficios del CP-OFDM son la subcanalización eficiente para el acceso múltiple de banda ancha, brinda cobertura en canales de desvanecimiento por múltiples trayectos y soporte de procesamiento MIMO.

En la Figura 1.8 se muestra el proceso de modulación y demodulación, se observan los bloques donde se aplica la Transformada Discreta de Fourier Inversa (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) en el modulador y la Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*) en el demodulador.

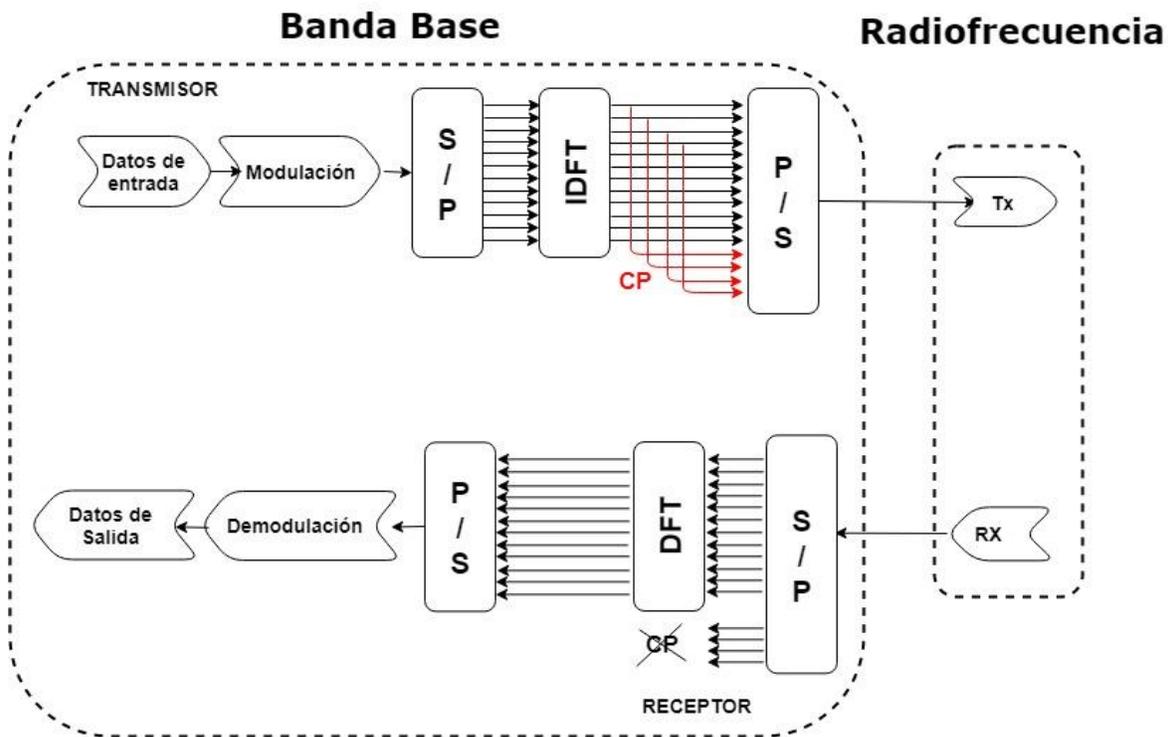


Figura 1.8 Esquema transmisor y receptor CP-OFDM.
Tomada y Adaptada de [37]



1.5.4 Esquemas de Modulación

Los esquemas de modulación son técnicas de procesamiento de señales que se emplean para mejorar las características de la señal de información sobre la portadora, protegiendo la señal en el canal respecto a ruido e interferencia.

Se han realizado estudios [17], [27], [28], [30], [31], [38], [39] respecto a las técnicas de modulación que pueden ser empleadas en redes de 5G, tales como Modulación por Amplitud en Cuadratura y Frecuencia (FQAM, *Frequency and Quadrature Amplitude Modulation*), Modulación de Amplitud en Cuadratura Desplazada (OQAM, *Offset Quadrature Amplitude Modulation*) y sus combinaciones con las diferentes forma de onda empleadas para 5G.

A continuación, se mencionan las principales características de los dos esquemas de modulación más utilizados en los estudios de 5G.

- **FQAM**

FQAM es un esquema de modulación que limita el número de usuarios que pueden asignarles los recursos de frecuencia, cada recurso puede ser utilizado sólo por un usuario. Esta es una combinación de Modulación por Desplazamiento de Frecuencia (FSK, *Frequency Shift Keying*) y Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*). En la Figura 1.9 se muestra que cada símbolo de FSK está conformado por una constelación de la modulación QAM con el fin de realizar la trasmisión [38].

Los símbolos FQAM se procesan con una Transformada Rápida de Fourier Inversa (IFFT, *Inverse Fast Fourier Transform*), luego se agrega un CP a la salida IFFT produciendo un símbolo QAM para ser transmitido por cada gNB. Estos símbolos QAM pasan por canales con desvanecimiento respectivos desde cada gNB hasta el UE finalmente el receptor retira el CP y realiza la Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) para recibir la información [39].

FQAM mejora el desempeño del usuario en el borde de la celda donde la interferencia es el factor limitante al usar algunas de las subportadoras de frecuencia disponibles [17].

La velocidad de transmisión de un usuario que se encuentra en el borde de celda e implementa FQAM es más alta que la de un usuario que usa QAM, esto se debe a que se reduce la Interferencia Inter Celda (ICI, *Inter-Cell Interference*) [39].

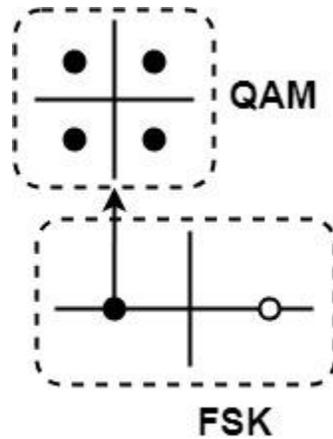


Figura 1.9 Esquema de modulación FQAM. Fuente por Autor basada en [39].

- **OQAM**

El esquema de modulación en cuadratura desplazada presenta menor ISI e ICI que CP-OFDM y no hace uso del CP, cancela la interferencia en el receptor ignorando la parte del símbolo recibido que no lleva información [28].

OQAM es una técnica de modulación que se complementa con diferentes formas de onda como GFDM, FBMC y OFDM. Según los estudios [17][28], se muestra que la aplicación de OQAM a un sistema con la forma de onda GFDM mejora el desempeño de GFDM convencional. El diseño de GFDM/OQAM presenta una mayor eficiencia espectral y Tasa de Error de Símbolo (SER, *Symbol Error Rate*) que un GFDM tradicional.

1.5.5 Codificación de Canal

- **Turbo códigos**

Los turbo códigos son códigos robustos de control de errores que se puede obtener mediante la concatenación de dos o más códigos convolucionales en paralelo [40].

Los resultados del análisis realizado en [40], enfocado en el estudio de la forma de onda OFDM con turbo códigos, muestran una ganancia de codificación con menor BER, ofreciendo así, una mayor velocidad de transmisión de datos.

La ventaja de los turbo códigos sobre los códigos convolucionales es la mejora del desempeño y la eficiencia espectral del esquema propuesto sobre IEEE 802.11a.



En la Tabla 1.2 se relacionan los estudios que han realizado diferentes empresas y grupos de trabajo respecto a la interfaz radio de una red 5G, teniendo en cuenta específicamente la forma de onda, modulación, técnica de acceso entre otras características que hacen parte de la configuración del canal. Los datos fueron analizados y tomados de los artículos [41]–[48] y publicados por las empresas y grupos de trabajo.

EMPRESA / GRUPO	FORMA DE ONDA	MODULACIÓN	TECNICA DE ACCESO	ESTUDIOS VARIOS
VODAFONE	GFDM			
METIS 2020	FBMC, UFMC	OQAM	SCMA NOMA	FBMC-OQAM
UNIVERSITIES	FBMC, GFDM, W-OFDM, WOLA, LAPPED-OFDM	OQAM	NOMA SCMA MUSA PDMA	GFDM-OQAM WCP-COQAM FBMC-OQAM
METIS II	FBMC	FQAM		Turbo códigos
SAMSUNG	FBMC	QAM, NFQAM FQAM, FSK, 4QAM, 4FSK, 16FQAM	OMA	QAM-FBMC FQAM-FBMC FQAM-OFDMA QPSK-SCFDMA QPSK-OFDMA OMA-QAM OMA-FQAM TURBO CODE LDPC (low density parity check)
NOKIA	UF-OFDM, OFDM		NOMA	FDD, TDD
TELEFONICA	FBMC UF-OFDM		NOMA SCMA	TDD
HUAWEI	FILTERED-OFDM	16QAM, 64QAM	SCMA	Códigos polares Turbo códigos Full Duplex mmWave
LENOVO	FBMC, GFDM UFMC	BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDMA/ SC-FDMA	
CHINA ACADEMY OF TELECOMMUNICATION TECHNOLOGY		16QAM, QPSK	PDMA (Pattern Division Multiple Access)	FDD, TDD
ERICSSON	OFDM			FDD, TDD
QUALCOM	OFDM, SC-FDM		RSMA	CP-OFDM+OFDMA SC-OFDM+SC-FDMA



				CP-OFDM/SC-OFDM
MITSUBISHI ELECTRIC	DFT-S-OFDM	QPSK	OFDMA SC-FDMA	
ALCATEL-LUCENT SHANGHAI BELL	OFDM, CP-OFDM, F-OFDM		SC-FDMA	
KYOCERA			SDMA/SPATIAL ICIC WITH MIMO Masivo	TDD
KT	DFT-OFDM, OFDM			
ZTE	FBMC			
MOBILE	FBMC, UFMC			
<i>Cohere technologies</i>	OFDM, FBMC, UFMC	QAM		
INTERDIGITAL	FBMC, GFDM, UFMC		NOMA SDMA	
VERIZON		QPSK, 16QAM, 64QAM	LDPC	Tasa de codificación 1/3, Turbo Códigos
<i>National Instruments</i>	GFDM		NOMA	
SONY	OFDM		NOMA	
CATR	FBMC, UFMC,			
NTT DOCOMO	CP-OFDM, FBMC		SCMA, MUSA, PDMA, NOMA	
5G AMERICAS	OFDM, CP-OFDM, DFT-S-OFDM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	OMA	Códigos Polares, LDPC
SHARP CORPORATION	FBMC, CP-OFDM		OMA, NOMA	

Tabla 1.2 Estudios interfaz radio en redes 5G. Fuente por Autor.

De la Tabla 1.2 se concluye que CP-OFDM es la forma de onda más estudiada por empresas y grupos de trabajo, al igual que las modulaciones QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM. Considerando los estudios previamente mencionados se elige CP-OFDM como forma de onda y esquemas de modulación M-QAM como características del sistema para el desarrollo del presente trabajo de grado.



1.6 ESCENARIOS TÍPICOS DE IMPLEMENTACIÓN

El proyecto METIS en su primera fase considera cinco tipos de escenarios que se nombran a continuación [49]:

- **Extremadamente rápido:** alta velocidad.
- **Buen servicio en multitud:** proporciona ancho de banda para zonas con alta densidad de usuarios.
- **Comunicación Ubicua:** soporte de múltiples dispositivos.
- **Mejor experiencia en seguimiento:** movilidad.
- **Conexiones confiables en tiempo real:** fiabilidad y latencia mínimas.

Teniendo en cuenta los anteriores escenarios y ciertos casos de uso que hacen parte de 5G como oficinas, estadios, eventos en espacios abiertos, centros comerciales, comunicaciones de emergencia, entre otros, se mencionan los escenarios más relevantes para eMBB en el momento de definir el modelo de canal para 5G [50][12].

- **UMi:** se consideran Calles Estrechadas con efecto de guía de onda (SC, *Street Canyon*) con alta densidad de edificios y parques, plazas o Áreas Abiertas (OS, *Open Square*). Se diferencia entre los enlaces *outdoor to outdoor* (O2O) y *outdoor to indoor* (O2I) debido a las pérdidas considerables por penetración en los escenarios *indoor*.
- **UMa:** espacios suburbanos/rurales con baja densidad de usuarios, O2O y O2I.
- **Indoor (InH, Indoor Hotspot):** oficinas abiertas y cerradas, locales de centros comerciales, salones, pasillos y demás lugares que tengan cobertura considerando femtoceldas.



1.7 MODELO DE CANAL Y MODELOS DE PÉRDIDAS

1.7.1 Modelo de Canal

La configuración del modelo de canal es fundamental en una comunicación inalámbrica porque modela el efecto del medio de transmisión en la señal con información. El objetivo de un sistema de comunicación es enviar información con el mínimo de errores entre dos equipos terminales de usuario. Diferentes, empresas como Nokia, Qualcomm, Samsung, Huawei, entre otras, se han dedicado al estudio de la implementación de 5G y proponen algunos parámetros que se deben tener en cuenta en bandas de hasta 100 GHz [12].

El nuevo modelo de canal debe estar basado en las Recomendaciones Técnicas (TR, *Technical Recommendation*) [3GPP TR36.873][3GPP TR38.900][51][52] con flexibilidad a satisfacer requisitos de los diferentes escenarios que se tienen en cuenta en 5G, debe ser adecuado para la implementación en herramientas de simulación de redes radio, además de transmitir en bandas de hasta 100 GHz con anchos de banda de hasta 1 GHz, soportar diferentes tipos de arreglos de antenas (lineales, planos, cilíndricos y esféricos) con alta directividad, considerando movilidad hasta 350 Km/h.

1.7.2 Modelos de Pérdidas

Los modelos de pérdidas de propagación basados en mediciones experimentales, candidatos para 5G son: *Close In* (CI) y Alfa-Beta-Gama (ABG, *Alpha Beta Gamma*) según estudios [12], [50], [53]–[56].

- **Modelo CI**

Modelo de pérdidas de propagación dependiente de una distancia de referencia física de 1 m. Este modelo puede ser implementado en los modelos de 3GPP existentes, simplemente reemplazando una constante flotante no física con una variable dependiente de la frecuencia.

El modelo CI está dado por la Ecuación (1.1).

$$PL^{CI}(f, d)[dB] = FSPL(f, 1m) + 10n \log_{10}(d) + X_{\sigma}^{CI}, \quad (1.1)$$



donde n es el Exponente de Pérdidas de Trayecto (PLE, *Path Loss Exponent*), d es la distancia de separación entre el transmisor y el receptor en metros, X_{σ}^{CI} corresponde a la desviación estándar en dB, FSPL ($f, 1 m$) denota la pérdida de trayecto en espacio libre en dB a una distancia de separación entre transmisor y receptor de 1 m y f la frecuencia portadora en GHz. FSPL está definida según la Ecuación (1.2).

$$FSPL(f, 1 m)[dB] = 20 \log_{10} \left(\frac{4\pi f}{c} \right), \quad (1.2)$$

donde c es la velocidad de la luz.

Según los estudios realizados en [56], CI tiene intrínsecamente una dependencia de frecuencia incorporada en el valor de pérdida de trayecto de espacio libre de 1 metro, y tiene solo un parámetro por optimizar n (PLE), también conocido como exponente de pérdidas. El modelo de CI se puede aplicar a través de una amplia gama de frecuencias, el valor de n es estable en un amplio rango de frecuencias y depende del escenario de implementación.

- **Modelo ABG**

Modelo de pérdidas de propagación con tres coeficientes que representan la dependencia de la pérdida de trayecto en distancia, frecuencia y un valor de desplazamiento optimizado en dB. El modelo ABG también se aplica en una amplia gama de frecuencias, pero debe tenerse en cuenta que los parámetros varían e implica mayores cálculos matemáticos [56].

El modelo ABG está dado por la Ecuación (1.3).

$$PL^{ABG}(f, d)[dB] = 10\alpha \log_{10} \left(\frac{d}{1m} \right) + \beta + 10\gamma \log_{10} \left(\frac{f}{1GHz} \right) + X_{\sigma}^{ABG}, \quad (1.3)$$

donde $PL^{ABG}(f, d)$ denota la pérdida de trayecto en dB, α y γ son coeficientes que muestran la dependencia en función de la distancia y la frecuencia respectivamente, β es el valor de compensación optimizado, d es la distancia de separación entre transmisor y receptor tomada en metros, f es la frecuencia portadora en GHz, y X_{σ}^{ABG} es la desviación estándar que describe las variaciones de señal, α , β , γ y X_{σ}^{ABG} dependen del escenario [53], [54], [56].

En la Tabla 1.3 se muestran los parámetros α , β , γ y n referenciados en la propuesta de modelo de canal [12] y estudio sobre modelos de pérdidas [56] para los modelos de pérdidas ABG y CI respectivamente, en los escenarios, UMi SC, UMi OS y UMa.



Escenario	Parámetros Modelo CI	Parámetros Modelo ABG
UMa – LOS	$n = 2,0$ $\sigma = 4,1$ dB	$\alpha = 2,8$ $\beta = 11,4$ $\gamma = 2,3$ $\sigma = 4,1$ dB
UMa – NLOS	$n = 3,0$ $\sigma = 6,8$ dB	$\alpha = 3,4$ $\beta = 19,2$ $\gamma = 2,3$ $\sigma = 6,5$ dB
UMi <i>Street Canyon</i> LOS	$n = 2,1$ $\sigma = 3,76$ dB	$\alpha = 2$ $\beta = 31,4$ $\gamma = 2,1$ $\sigma = 2,9$ dB
UMi <i>Street Canyon</i> NLOS	$n = 3,17$ $\sigma = 8,09$ dB	$\alpha = 3,53$ $\beta = 22,4$ $\gamma = 2,13$ $\sigma = 7,82$ dB
UMi <i>Open Square</i> LOS	$n = 1,85$ $\sigma = 4,2$ dB	$\alpha = 2,6$ $\beta = 24$ $\gamma = 1,6$ $\sigma = 4$ dB
UMi <i>Open Square</i> NLOS	$n = 2,89$ $\sigma = 7,1$ dB	$\alpha = 4,14$ $\beta = 3,66$ $\gamma = 2,43$ $\sigma = 7,0$ dB
RMa LOS	$n = 2,16$ $\sigma = 1,7$ dB	$\alpha = 2,8$ $\beta = 11,4$ $\gamma = 2,3$ $\sigma = 4,1$ dB
RMa NLOS	$n = 2,75$ $\sigma = 6,7$ dB	$\alpha = 3,4$ $\beta = 19,2$ $\gamma = 2,3$ $\sigma = 6,5$ dB

Tabla 1.3 Parámetros del modelo CI y ABG. Tomada de [12][53][54]



CAPÍTULO II. METODOLOGÍA DE DESARROLLO

2.1 INTRODUCCIÓN

La metodología del Proceso Unificado de Rational (RUP, *Rational Unified Process*) es un proceso de desarrollo iterativo e incremental, compuesto por cuatro etapas: (análisis de requerimientos, diseño, implementación y pruebas como se observa en la Figura 2.1), que se retroalimenta, partiendo de una abstracción sencilla de los elementos del proyecto hasta su conclusión con los componentes más complejos [58].

Las fases de análisis de requerimientos, diseño, implementación y pruebas del presente trabajo de grado se desarrollan con la metodología RUP.

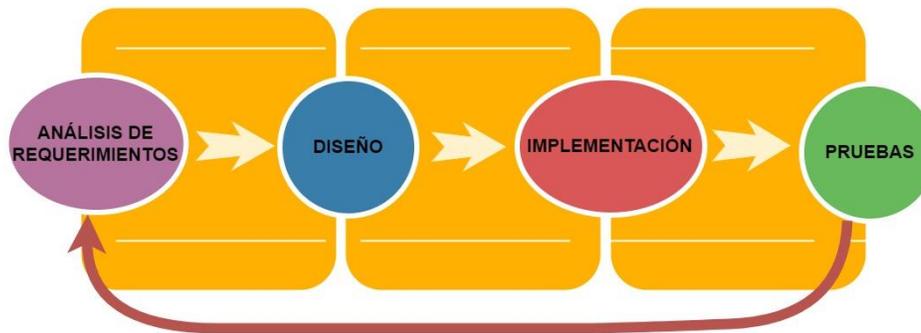


Figura 2.1 Diagrama de metodología RUP. Tomada y Adaptada de [58].

2.2 ANALISIS DE REQUERIMIENTOS

A continuación, se presentan el análisis de requerimientos estipulados para las fases de análisis, diseño, implementación y pruebas del trabajo de grado titulado “Análisis de la capacidad de una red celular 5G haciendo uso de mmWave”.



2.2.1 Requerimientos Funcionales

- Definir características del sistema y escenarios de simulación (UMi, UMa y RMa).
- Comparar resultados modelos de pérdidas de propagación.
- Definir el modelo del sistema a nivel físico.
- Calcular *throughput* celda y probabilidad de servicio de celda.

2.2.2 Requerimientos no Funcionales

- Simulación ejecutable en equipos compatibles con la versión de Matlab 2017.
- El sistema debe generar resultados confiables.
- El desarrollo del código fuente debe ser sencillo y entendible.

2.3 HERRAMIENTA DE SIMULACIÓN

En esta sección se describen las herramientas que hacen simulaciones en mmWaves.

2.3.1 Winprop

Es un software licenciado que incluye modelos de propagación de ondas para diferentes escenarios basados en trazado de rayos y simuladores de planificación de red para varias interfaces aéreas, ofrece la posibilidad de modelar redes de sensores inalámbricos con diferentes tipos de nodos

2.3.2 NYUSIM

El simulador realiza simulaciones, generando muestras de respuestas de impulso de canal (CIR) a distancias de separación específicas entre el transmisor y el receptor, el número de muestras y el rango de distancia deben ser especificadas por los usuarios.

NYUSIM proporciona una representación precisa de las respuestas de impulso de canal reales en tiempo y espacio, así como niveles de señal realistas que se midieron, y puede utilizarse para soportar la capa física real y simulaciones de capa de enlace como las realizadas en [15], [20]–[22].



Se necesitan 30 parámetros de entrada en el simulador de canal, que se agrupan en dos categorías principales: Parámetros del canal y Propiedades de la antena, como se muestra en la GUI en la Figura 2.2.

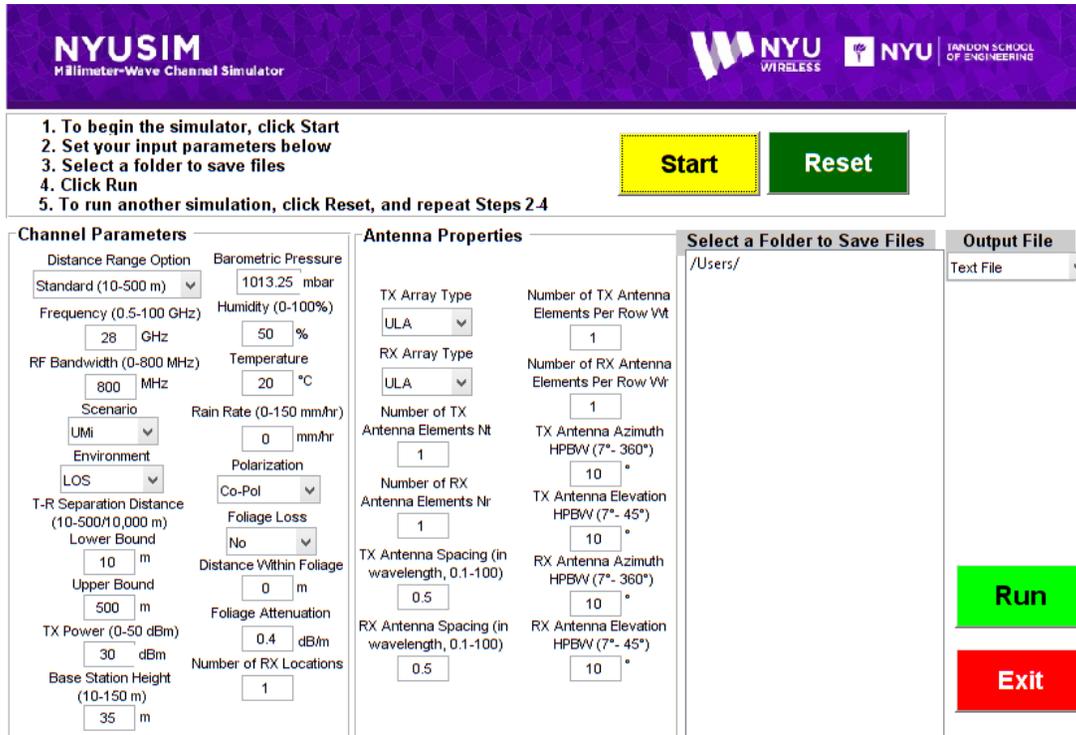


Figura 2.2 GUI principal del simulador NYU-SIM. Tomada de [68]

Los parámetros de mayor importancia para el desarrollo del presente trabajo de grado según el simulador NYU-SIM son:

- Distancia entre el transmisor y el receptor: 10 a 10.000 m
- Frecuencia: 0.5 - 100 GHz
- Ancho de banda del sistema: 0 - 800 MHz
- Escenarios de simulación: UMi, UMa y RMa
- Entornos: LOS y NLOS
- Potencia de transmisión: 0 – 50 dBm

El software de simulación NYU-SIM se escogió como base para el desarrollo del presente trabajo de grado debido a las siguientes características:

- ✓ Software libre.
- ✓ Código fuente disponible en Matlab.
- ✓ Implementación de modelo de pérdidas CI en mmWave.
- ✓ Pionero en estudios de mmWave.



- ✓ *Toolbox* de Comunicaciones en Matlab.

Matlab es un software que permite efectuar operaciones lógicas y matemáticas con reconocimiento a nivel internacional en la comunidad investigativa y científica. Se elige esta herramienta puesto que la Universidad del Cauca cuenta con licencia, además, el código fuente de NYU-SIM está basado en esta herramienta.

2.4 DISEÑO

En esta fase se definen las características, parámetros y consideraciones que se tienen en cuenta para el análisis de capacidad de una red celular 5G haciendo uso de mmWave. Primero se hace la definición de los escenarios de implementación, luego se comparan los modelos ABG y CI para elegir el modelo de pérdidas en la simulación a nivel de sistema, además, se realiza la definición general del sistema con sus características y finalmente se hacen los diagramas de flujo que especifican los procesos a desarrollar con el objetivo de cumplir los requerimientos previamente mencionados.

2.4.1 Definición de los Escenarios de Simulación para un Sistema 5G

Se consideran los cuatro escenarios de simulación más estudiados en mmWave: UMi SC, UMi OS, UMa y también se tiene en cuenta RMa referenciados en las recomendaciones [TR 39.900][52], [TR 38.913][59], la propuesta de modelo de canal [12] y estudios de pérdidas de propagación [50], [53]–[55].

A continuación, se describen las principales características de cada uno de los escenarios, definidas por el autor basadas en las recomendaciones [52][59].

A. Escenario UMi (*Street Canyon – Open Square*)

Para este escenario se consideran dos tipos: *Street Canyon* (SC) y *Open Square* (OS). Sus principales características se describen a continuación:

- ✓ Distribución uniforme entre calles y edificios.
- ✓ Dimensión de edificios: SC 45 m \times 30 m y OS 40 m \times 26 m.
- ✓ El ancho de las calles: SC 10 m y OS 20 m.
- ✓ Dimensión de los escenarios: SC 100 m \times 200 m, OS 266 m \times 200 m.
- ✓ El escenario OS se caracteriza por tener una plaza abierta en medio de los edificios como se observa en la Figura 2.6.



- ✓ gNB ubicado en las esquinas de los edificios (bordes, techos, terrazas) a una altura aproximada de 20 m.
- ✓ Altura de UE aproximadamente de 1,5 m.
- ✓ Radio de celdas hexagonales menor a 100 m según [52], [59].
- ✓ UEs delimitados en el área de la celda con una distribución uniforme y aleatoria por sector.
- ✓ Las comunicaciones O2O se establecen con usuarios ubicados en calles y las comunicaciones O2I se establecen con usuarios ubicados dentro de los edificios del escenario.

Teniendo en cuenta las dimensiones del escenario, el radio de las celdas hexagonales y las distancias entre los edificios o plazas que hay en el escenario, se define por geometría el número de celdas de cada escenario, para SC se consideran dos celdas de 40 m cada una y para OS cuatro celdas de 46 m cada una.

En la Figura 2.3 y Figura 2.4 se observan los planos estructurados para los escenarios SC y OS respectivamente.

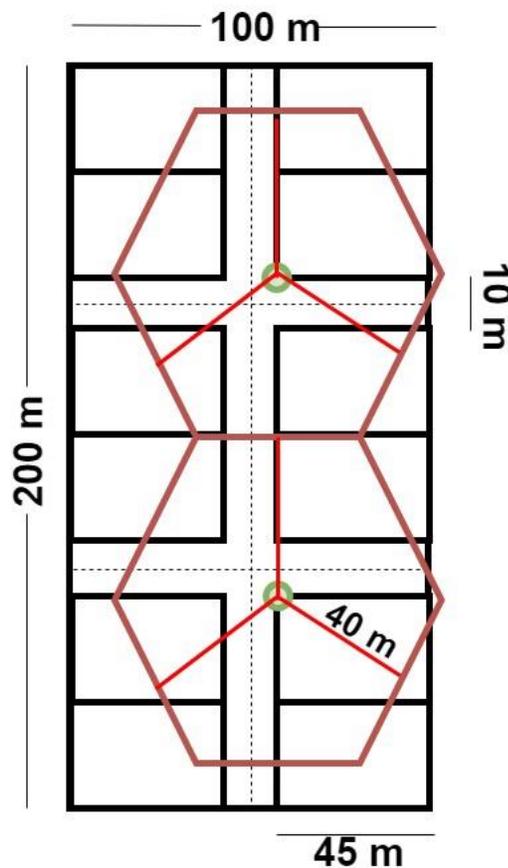


Figura 2.3 Escenario UMi SC. Fuente por Autor.

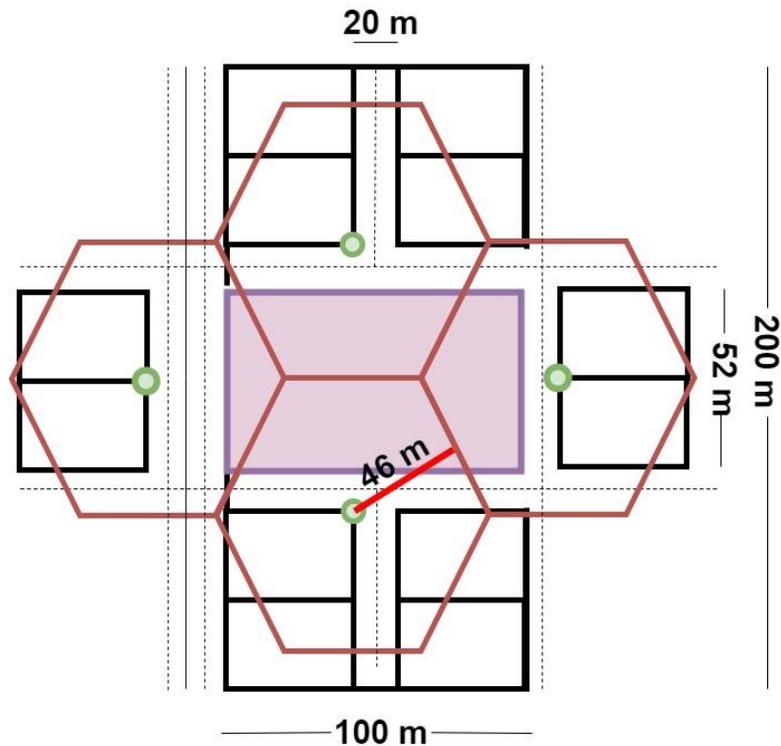


Figura 2.4 Escenario UMi OS. Fuente por Autor.

B. Escenario UMa

El tercer escenario está constituido con características muy similares a UMi OS, con la diferencia de que la densidad de UEs es menor en UMa. En la Figura 2.5 se observa el plano definido para este escenario.

A continuación, se mencionan las principales características planteadas para el escenario UMa.

- ✓ Distribución uniforme entre calles y edificios.
- ✓ Dimensión de edificios: 40 m \times 26 m.
- ✓ Dimensión del escenario: 220 m \times 400 m.
- ✓ El ancho de las calles: 20 m.
- ✓ Dos plazas (sin edificación relevante o árboles).
- ✓ gNB ubicado a una altura de 30 m en el centro de las plazas.
- ✓ Altura de UE de 1,5 m.
- ✓ Radio de las celdas menor a 200 m.
- ✓ UEs delimitados en el área de la celda hexagonal con una distribución uniforme y aleatoria por sector.
- ✓ Las comunicaciones O2O se establecen con UEs ubicados en calles y las comunicaciones O2I se establecen con UEs ubicados dentro de los edificios del escenario.



De acuerdo a las dimensiones del escenario, el radio de las celdas hexagonales y las distancias entre los edificios y plazas que caracterizan el escenario, se definen dos celdas de 98 m de radio cada una para cubrir el escenario UMA.

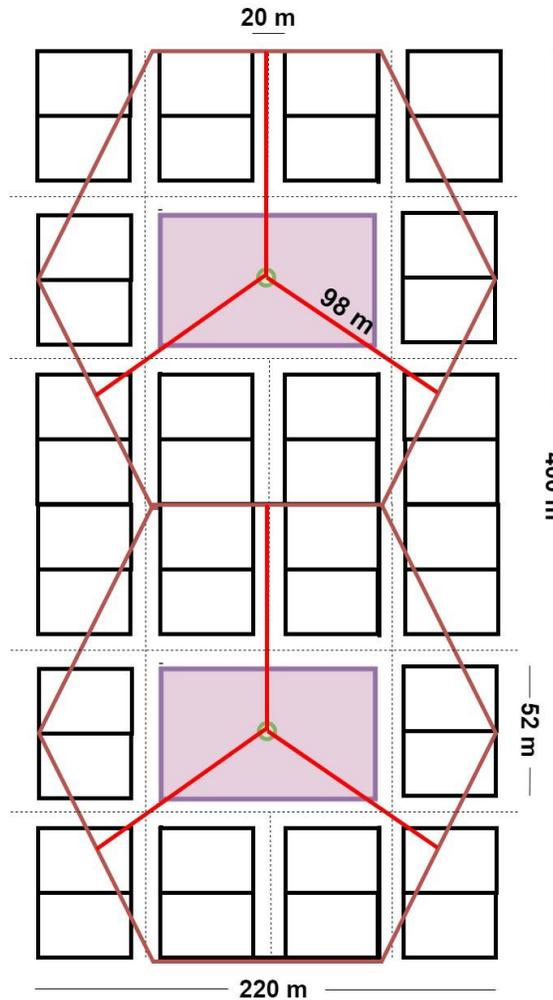


Figura 2.5 Escenario UMA. Fuente por Autor.

C. Escenario RMa

El escenario RMa ha sido incluido en los estudios de 3GPP en [TR 38.913] [59] pero su rango de frecuencia no incluye el espectro mmWave; se caracteriza principalmente por contar con un área muy extensa en comparación con los demás escenarios, con UEs ubicados en automóviles y en casas que se encuentran separadas considerablemente dentro de la zona [52][60]. En la Figura 2.6 se observa el plano del escenario RMa considerado en la simulación.

- ✓ UEs delimitados en el área de la celda hexagonal con distribución uniforme y aleatoria por sector.



- ✓ Terreno plano.
- ✓ UEs *indoor*.
- ✓ gNB ubicado a una altura de 35 m.
- ✓ Altura de UE de 1,5 m.
- ✓ Radio de las celdas hexagonales hasta 2500 m.
- ✓ Distancia de follaje 50 m.
- ✓ Las comunicaciones O2I se establece con usuarios ubicados dentro de vehículos.

Considerando el radio hexagonal de las celdas y la dimensión del escenario que describe a RMa se consideran dos celdas de 2500 m de radio cada una.

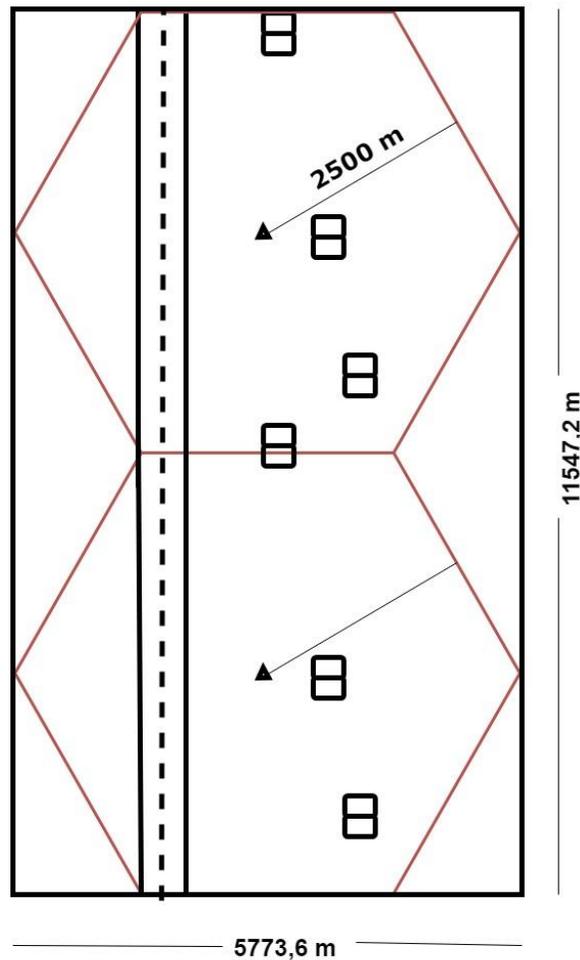


Figura 2.6 Escenario RMa. Fuente por Autor.

2.4.2 Definición del Modelo de Pérdidas de Propagación

Con el fin de determinar el modelo de pérdidas de trayecto para el desarrollo de este trabajo de grado, se realizó la comparación de los modelos ABG y CI, basados en los artículos [61]–[63] resaltando sus principales diferencias en la Tabla 2.1.

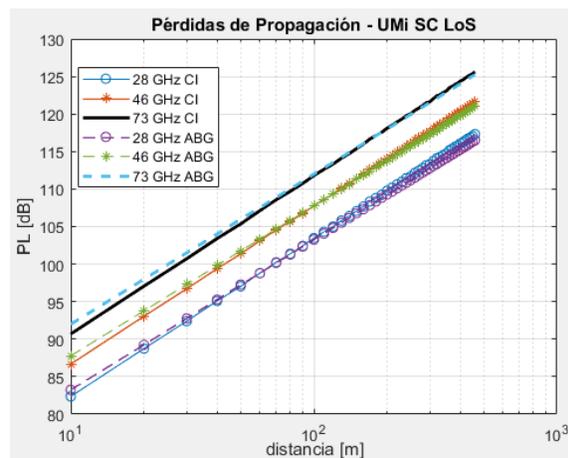
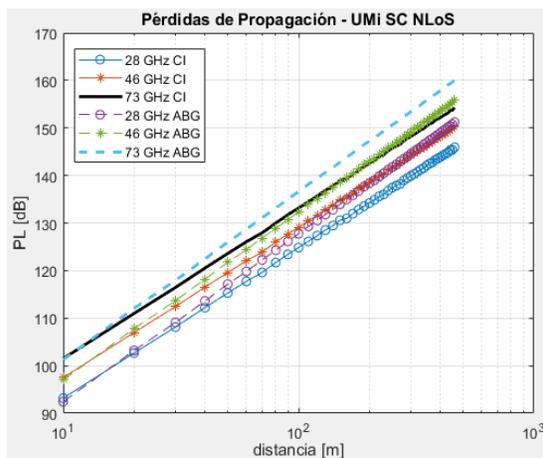


	Modelo ABG	Modelo CI
Parámetros	α, β, γ	n (PLE)
Precisión	Alta	Alta
Variación de parámetros en función de frecuencia	Si	No
Variación de parámetros en función de distancia	Si	No
Simplicidad	No	Si

Tabla 2.1 Comparación modelos de pérdidas ABG y CI. Fuente por Autor.

El modelo de pérdidas ABG es más preciso de acuerdo a las campañas de mediciones y trazado de rayos realizados desde 2 GHz a 73,5 GHz en comparación al modelo de pérdidas CI. El modelo ABG es preciso, pero se deben hacer ajustes a los parámetros α, β, γ en función de la distancia y la frecuencia [56] según el escenario de implementación.

En la Figura 2.7 se muestran los resultados promedio de pérdidas de propagación para los modelos de pérdida ABG y CI en función de la distancia y frecuencia (28 GHz, 46 GHz y 73 GHz), para los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa definidos por 3GPP, además, se considera RMa con UEs en vehículos. Los parámetros α, β, γ y n de los modelos de pérdidas de propagación son tomados de la Tabla 1.3.



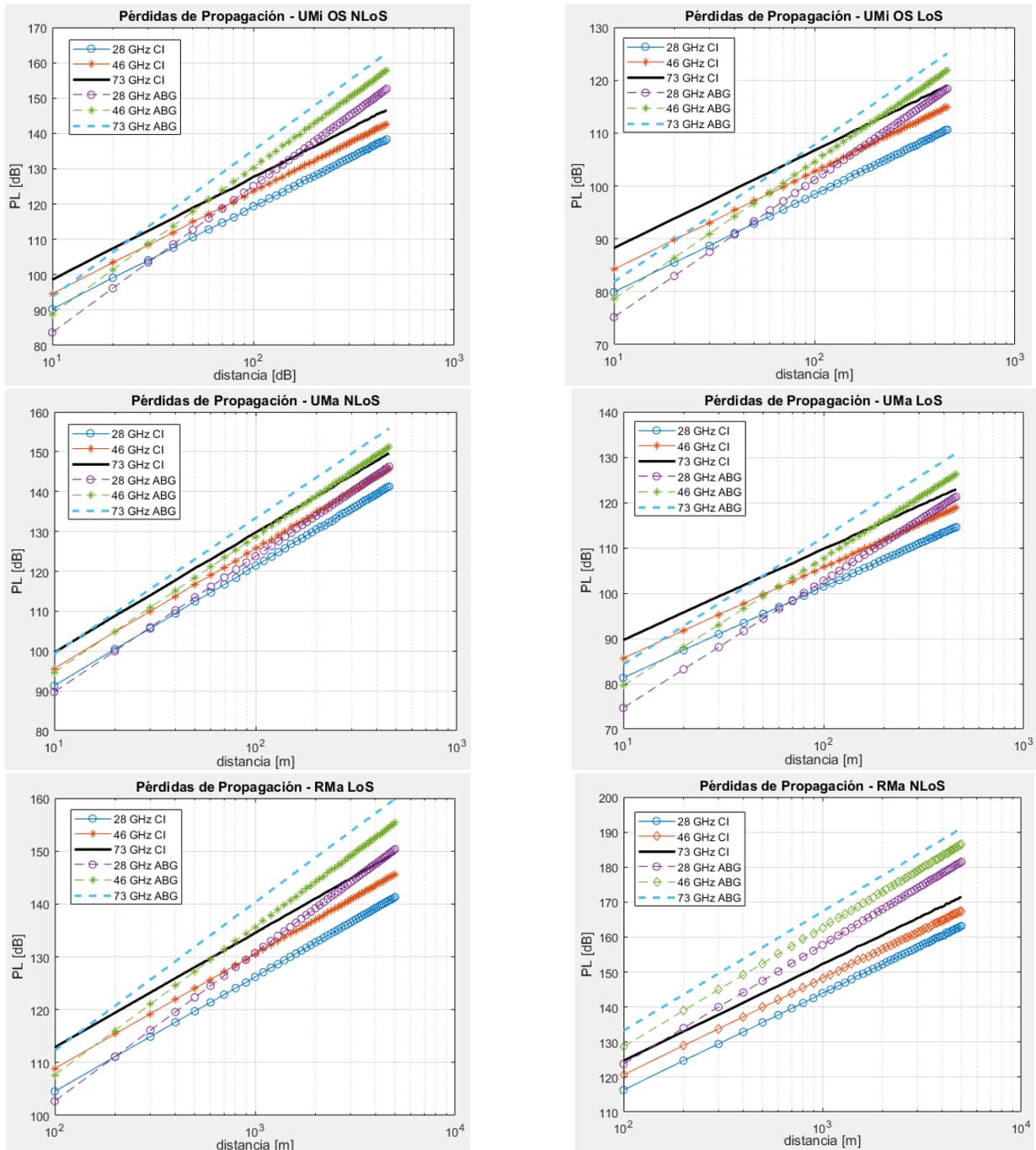


Figura 2.7 Modelos de pérdidas ABG y CI en escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa. Fuente por Autor.

Para los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa con LOS y NLOS, en general, se observa que para las frecuencias de simulación (28, 46 y 73 GHz) a cortas distancias del enlace el modelo ABG predice menores pérdidas que el modelo CI y para distancias grandes predice mayores pérdidas, considerando la configuración fija de parámetros α , β , γ y n mencionados en [12]. Se comprueba que el modelo



ABG debe hacer ajustes en el parámetro α y β para conservar la estabilidad en distancias grandes y frecuencias.

En general, el modelo CI es más simple porque sólo tiene un parámetro de ajuste fácil de calcular, además, proporciona precisión y estabilidad prácticamente semejante al modelo ABG, sin realizar ajustes al parámetro n (PLE) según el escenario. Por estas razones se elige el modelo de pérdidas de propagación CI para el presente trabajo de grado.

2.4.3 Definición del Modelo de Sistema

Un sistema de comunicación inalámbrica está conformado por tres bloques principales: fuente, medio de transmisión y el dispositivo receptor. Cada bloque tiene características especiales que hacen posible establecer una comunicación. En la Figura 2.8 se muestra el modelo de sistema con los parámetros generales de cada bloque.



Figura 2.8 Modelo general del sistema. Fuente por Autor.

5G debe ser compatible con la tecnología existente, hasta septiembre del 2018 no se contará con una versión estandarizada de 5G, por lo tanto, se asumen los parámetros más relevantes de una red LTE tanto en gNBs como en UEs para la evaluación de una red 5G.

A continuación, se especifican los parámetros considerados en la simulación, estos parámetros fueron definidos acorde a la propuesta de modelo de canal para bandas



hasta 100 GHz [12] por diferentes empresas y grupos de trabajo interesados en 5G [61], [64]–[66].

- ✓ Modulación: QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM.
- ✓ Forma de Onda: CP-OFDM.
- ✓ Modelo de pérdidas de propagación CI.
- ✓ Pérdidas atmosféricas en función de lluvia, humedad, presión y temperatura.
- ✓ Perdidas de penetración.
- ✓ Ancho de Banda: 200 MHz.
- ✓ Frecuencia: 28 GHz y 73 GHz.
- ✓ Potencia de transmisión variable: 10 dBm, 20 dBm y 30 dBm.
- ✓ Número de UEs variable: 10 UEs/sector y 166 UEs/sector.
- ✓ Codificación turbo código (1/3, 1/2, 2/3, 3/4).

2.4.4 Creación y Ubicación de los UEs - gNB

Se ubican los gNB de acuerdo a las Figuras 2.3 – 2.6 para los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa, respectivamente. La distribución de UEs se realiza de forma aleatoria y uniforme por sector, limitados por el área de cada celda.

Los UEs *indoor* y *outdoor* se diferencian por un identificador, que depende de la posición del usuario en el escenario.

Para los UEs se considera una ganancia de antena es de 2 dBi y para los gNBs se consideran arreglos de antenas que generen una ganancia de 18 dBi. En la Figura 2.9 se muestra el patrón de radiación del arreglo de antenas con las siguientes características:

Radiadores isotrópicos, espaciamiento $\lambda/4$, HPBW: 19,41, directividad 20,8868 dBi, 128 elementos, frecuencia: 28.5GHz.

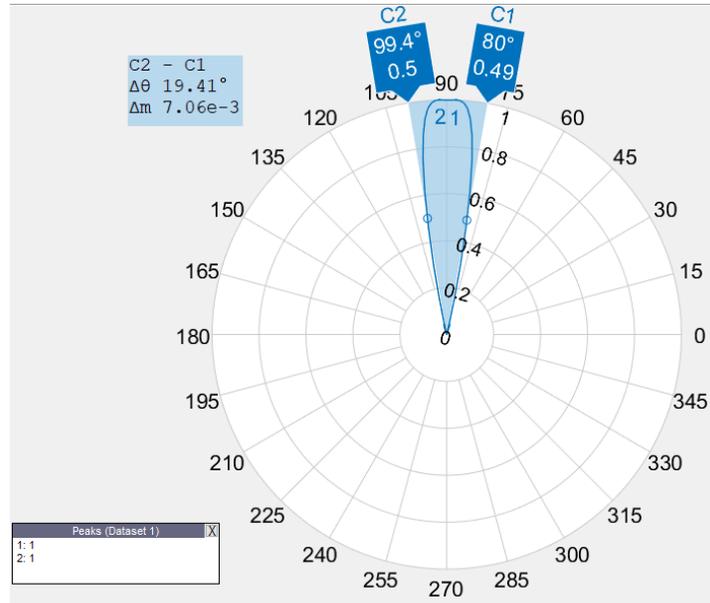


Figura 2.9 Patrón de radiación antenna del gNB. Tomada de [67]

2.4.5 Distancias entre UEs y gNBs

Se realiza el cálculo de las distancias de cada UE a cada gNB, es decir se obtienen m distancias por usuario, donde m hace referencia al número de gNBs que hay en el escenario.

Para el cálculo de la distancia se tiene en cuenta la posición de los UEs y de los gNBs, al igual que las alturas de las antenas, como se observa en la Ecuación (2.1).

$$Distancia_{UEBS}[m] = \sqrt{(BS_y - UE_y)^2 + (BS_x - UE_x)^2 + (h_{antBS} - h_{antUE})^2}, \quad (2.1)$$

donde,

UE_y posición en [m] del UE en el eje y;
 BS_y posición en [m] del gNB en el eje y;
 h_{antBS} altura en [m] de la antena del gNB;

UE_x posición en [m] del UE en el eje x;
 BS_x posición en [m] del gNB en el eje x;
 h_{antUE} altura en [m] de la antena del UE.

2.4.6 Pérdidas del Sistema

Según la Recomendación del grupo 3GPP [3GPP TR 36.873] [51], mencionada y considerada en la propuesta de modelo de canal [12], las pérdidas totales del sistema se definen según la Ecuación (2.2).



$$PL = PL^{CI} + PL_w + PL_{in} + PL_{atm} + PL_{follaje}, \quad (2.2)$$

donde,

PL^{CI} pérdidas de propagación en [dB] según el modelo de pérdidas CI de NYU.

PL_w pérdida de penetración en [dB] por la fachada de edificios a causa de los materiales que generan interferencia considerados en [33].

PL_{in} pérdida en interiores en [dB] de edificios de acuerdo a la distancia *indoor*, en este caso de estudio no se consideran pérdidas adicionales por obstáculos en interiores.

PL_{at} pérdidas atmosféricas en [dB] presentes en el escenario que afectan la comunicación.

$PL_{follaje}$ pérdidas por follaje en [dB] presentes en el escenario, se considera sólo para RMa.

Las pérdidas totales dependen del escenario y ubicación del UEs. A continuación, se explican las pérdidas que se tienen en cuenta para el desarrollo del presente trabajo de grado.

✓ Pérdidas de propagación: Modelo CI - NYU

Las pérdidas de propagación están definidas según el modelo de pérdidas CI como se observa en la Ecuación (2.3). Son las pérdidas que se presentan debido al escenario donde se transmite la señal, de acuerdo a la propuesta de modelo de canal [12], se debe tener en cuenta si los UEs tienen LOS o NLOS con el gNB para así establecer los parámetros n y σ .

$$PL^{CI}(f, d)[dB] = 32,45 + 20 \log_{10} f_{[GHz]} + 10n \log_{10}(d_{[m]}) + X_{\sigma}^{CI} \quad (2.3)$$

Las pérdidas de propagación se calculan en los escenarios de estudio UMi SC, UMi OS, UMa y RMa.

Los parámetros necesarios n y σ para el cálculo de pérdidas haciendo uso del modelo CI en los diferentes escenarios se toma de referencia la Tabla 2.2 nombrada en la propuesta de modelo de canal [12].



Escenarios	Parámetros Modelo CI	
UMa LOS	$n = 2,0$	$\sigma = 4,1$ dB
UMa NLOS	$n = 3,0$	$\sigma = 6,8$ dB
UMi SC LOS	$n = 2,1$	$\sigma = 3,76$ dB
UMi SC NLOS	$n = 3,17$	$\sigma = 8,09$ dB
UMi OS LOS	$n = 1,85$	$\sigma = 4,2$ dB
UMi OS NLOS	$n = 2,89$	$\sigma = 7,1$ dB
RMa LOS	$n = 2,16$	$\sigma = 1,7$ dB
RMa NLOS	$n = 2,75$	$\sigma = 6,7$ dB

Tabla 2.2 Parámetros del modelo CI. Tomada de [12][57].

✓ Pérdidas atmosféricas

En el medio ambiente se encuentran diferentes tipos de partículas que generan atenuación a la señal, en este caso se le denominan pérdidas atmosféricas, porque incluye varios aspectos del medio ambiente como humedad, presión atmosférica, temperatura y precipitación.

Las pérdidas atmosféricas están definidas según la Ecuación (2.4) tomadas de NYUSIM [68] y el artículo de estudio relacionado con los efectos atmosféricos sobre las propagaciones de mmWave [69]. Estas pérdidas dependen de la distancia entre transmisor y receptor, un factor α que está en función de la frecuencia y la atenuación por oxígeno, aire seco, vapor de agua, lluvia y agua líquida. Las pérdidas atmosféricas se tienen en cuenta en los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa.

$$L_{atm} = \alpha_{at} \left[\frac{dB}{m} \right] \cdot D_{T-R} [m] \quad (2.4)$$

donde,

L_{atm} : pérdidas atmosféricas en [dB].

α_{at} : factor de atenuación según Ecuación (2.5) en $\left[\frac{dB}{m} \right]$

D_{T-R} : distancia entre el transmisor y el receptor en [m]

$$\alpha_{at} = \alpha_1 \cdot f \cdot \text{Img} \left(l_{\text{oxígeno}} + l_{\text{aire seco}} + l_{\text{vapor agua}} + l_{\text{agua líquida}} + l_{\text{at lluvia}} \right) \quad (2.5)$$



donde,

α_1 : factor de atenuación.

Img : parte imaginaria de las pérdidas.

$l_{oxígeno}$: pérdidas por oxígeno.

$l_{aire seco}$: pérdidas por aire seco.

$l_{vapor agua}$: pérdidas por vapor de agua.

$l_{agua líquida}$: pérdidas por agua líquida.

$l_{at lluvia}$: pérdidas por lluvia.

Los parámetros como presión atmosférica están entre 10^{-5} y 1013.25 mbar, la humedad está entre 0 y 100%, la temperatura entre -100°C y 50°C y la tasa de precipitación de lluvias está entre 0 y 150 mm/h [68][69].

A continuación, se mencionan los parámetros empleados en esta simulación tomados de NYUSIM [68]:

Presión: 1013.25 mbar, presión a nivel del mar

Humedad: 50%

Temperatura: 20°C

Tasa de precipitación de lluvias: 0 mm/h

✓ Pérdidas por penetración

Se denominan pérdidas por penetración a las pérdidas ocasionadas por distintos obstáculos. En este caso se tienen en cuenta los edificios y el material empleado en su arquitectura. Se han realizado estudios de diferentes modelos dependientes de la frecuencia de la señal que se transmite para calcular las pérdidas tanto en vidrio como en concreto, según se define en el modelo de canal propuesto [12] y se observa en las Ecuaciones (2.6) – (2.8).

$$L_{IRR \text{ vidrio}} = 23 + 3f, \quad (2.6)$$

$$L_{Concreto} = 5 + 4f, \text{ y} \quad (2.7)$$

$$L_{vidrio} = 2 + 0,2f \quad (2.8)$$

donde,

$L_{IRR \text{ vidrio}}$: Factor de pérdidas debido a la mezcla entre vidrio y concreto

$L_{Concreto}$: Factor de pérdidas por concreto.



L_{vidrio} : Factor de pérdidas por vidrio.

Normalmente las edificaciones tienen una combinación de materiales, dependiendo de ello se establece un modelo de baja pérdida y otro de alta pérdida, Ecuaciones (2.10) y (2.11) respectivamente [12]. En los dos modelos se adiciona una pérdida de 5 dB, con el fin de tener en cuenta la incidencia no perpendicular sobre el obstáculo (fachada del edificio), la pérdida por distancia en interiores está definida por la Ecuación (2.9) y la desviación estándar es de $\sigma_{high} = 5 \text{ dB}$ para el modelo de altas pérdidas y $\sigma_{low} = 3 \text{ dB}$ para el modelo de bajas pérdidas.

$$PL_{in} = 0.5 \left[\frac{dB}{m} \right] \cdot Distancia_{indoor} [m], \quad (2.9)$$

$$PL_{w-low} = 5 - 10 \log_{10} \left(0.3 \cdot 10^{-\frac{L_{vidrio}}{10}} + 0.7 \cdot 10^{-\frac{L_{concreto}}{10}} \right) + N(0, \sigma_{low}), \text{ y} \quad (2.10)$$

$$PL_{w-high} = 5 - 10 \log_{10} \left(0.7 \cdot 10^{-\frac{L_{RRvidrio}}{10}} + 0.3 \cdot 10^{-\frac{L_{concreto}}{10}} \right) + N(0, \sigma_{high}) \quad (2.11)$$

donde,

N representa el factor de desvanecimiento lento.

Para el escenario RMa se tiene en cuenta el modelo de bajas pérdidas porque los UEs están dentro de vehículos. Para los escenarios UMi SC, UMi OS y UMA se emplea el modelo de altas pérdidas.

✓ Pérdidas por follaje

Las pérdidas por follaje se deben a la presencia de hojas, ramas y plantas en el escenario donde se propaga la señal. El cálculo de pérdidas por follaje está definido por la Ecuación (2.12), el factor de atenuación de 0.4 dB/m tomado del artículo [70] a una distancia fija determinada de 50 m.

$$L_{follaje} = \alpha \cdot D_{follaje}, \quad (2.12)$$

donde,

$L_{follaje}$: pérdidas por follaje [dB].

α : factor de atenuación $\left[\frac{dB}{m} \right]$

$D_{follaje}$: distancia del follaje [m].



Solo se tiene en cuenta para RMa porque es el único escenario que se considera con árboles y vegetación.

2.4.7 Potencias del Sistema

A. Potencia en recepción

El cálculo de la potencia en recepción se realiza con base en el balance del enlace radioeléctrico definido por la Ecuación (2.13).

$$P_{rxUE} = P_{txgNB} + G_{tot} - L_{tot}, \quad (2.13)$$

donde,

P_{tx} : potencia del gNB en [dBm].

G_{tot} suma de las ganancias de antena tanto del gNB como del UE (18 dBi y 2 dBi respectivamente) [66], [67].

L_{tot} : pérdidas totales en el sistema dadas por la Ecuación (2.14).

$$L_{tot} = L_{propagación} + L_{atmosféricas} + L_{penetración} + L_{follaje} \quad (2.14)$$

Dependiendo de la ubicación del UE en el escenario, las pérdidas por penetración son nulas para un UE *outdoor* en la propia celda. Si el UE es *indoor* las pérdidas por penetración están en función de la distancia y del material del edificio.

B. Potencia interferente

La potencia interferente es la suma de las potencias en milivatios (mW) que percibe un usuario de los gNB vecinos, como se observa en la Figura 2.10. Para el cálculo de la potencia interferente se tiene en cuenta las pérdidas por distancia y penetración, según el caso y se considera que afecta a todo el ancho de banda asignado al UE. Este cálculo depende de cada escenario y la ubicación de los usuarios.

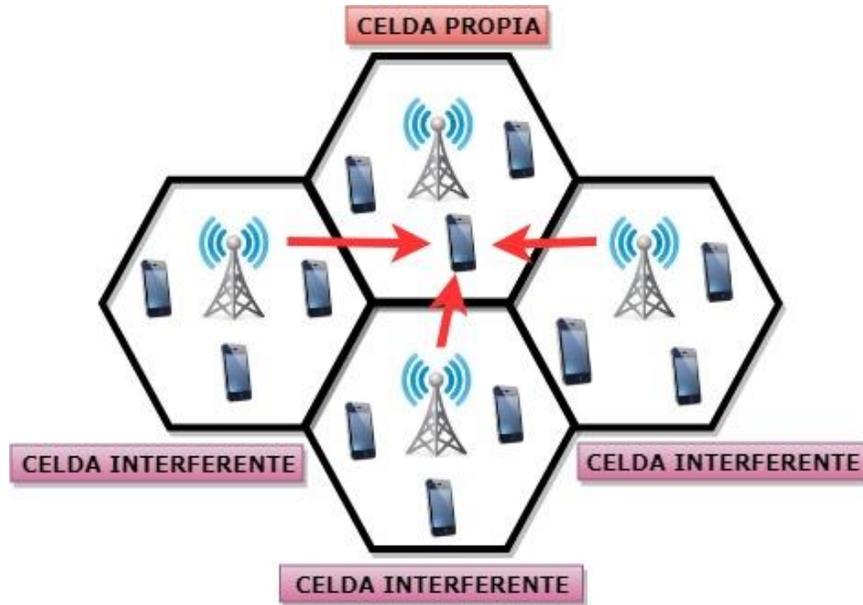


Figura 2.10 Interferencia de gNB con un UE. Tomada y Adaptada de [71].

La potencia interferente se calcula según la Ecuación (2.15).

$$p_{interferente} = \sum_{m=1}^j p_{rxm} , \quad (2.15)$$

donde,

j : número de gNB interferentes.

p_{rxm} potencia en recepción del UE por el gNB $_j$ interferente en [mW].

$p_{interferente}$ potencia total interferente en [mW].

C. Potencia de ruido

La potencia de ruido del sistema para el UE está definida según las Ecuaciones (2.16) y (2.17).

$$p_n = KTBf_{sis}g, y \quad (2.16)$$

$$P_n = N_o + 10 \log_{10}(BW_{RB} \cdot nRB) + NF, \quad (2.17)$$

donde,

p_n : potencia de ruido del sistema en [mW].



P_n : potencia de ruido del sistema en [dBm].

$N_0 = -174 \text{ dBm/Hz}$ densidad de potencia de ruido térmico que corresponde a $10 \log(KT_0)$.

B : ancho de banda asignado al UE y es igual a $(BW_{RB} \cdot nRB)$.

BW_{RB} : ancho de banda de un bloque de recursos (180 KHz).

nRB : número de bloques de recursos asignados al UE.

NF : Figura de ruido del receptor 5 dB y es igual a $10 \log f_{sig}$.

2.4.8 Métricas de Desempeño

A. Cálculo de SINR

La SINR es la relación señal a ruido e interferencia en una red de comunicaciones inalámbricas. Por medio de este valor se determina si un usuario puede acceder o no a los recursos radio disponibles en la red.

El cálculo se realiza para cada usuario como se indica en la Ecuación (2.17).

$$sinr = \frac{p_{Rx}}{(p_{interferente} + p_n)}, \quad (2.16)$$

donde,

$sinr$: relación señal a ruido e interferencia en veces.

p_{rx} : potencia en recepción [mW]

$p_{interferente}$: potencia interferente [mW].

p_n : potencia de ruido [mW].

B. CQI con base en SINR

Para determinar el Indicador de Calidad del Canal (CQI, *Channel Quality Indicator*) se tiene en cuenta el modelo de sistema a nivel de enlace implementando modulaciones M-QAM, codificación turbo con tasas de 1/3, 1/2, 2/3 y 3/4, forma de onda OFDM y canal AWGN.

En la Figura 2.11 se presentan los resultados de la BER respecto a la SINR, implementando el sistema a nivel de enlace de la sección anterior, se observa que a partir de una BER de 10^{-5} los valores de SINR para los Esquemas de Modulación y Codificación (MCS, *Modulation and Coding Scheme*) se estabilizan o su variación es mínima.

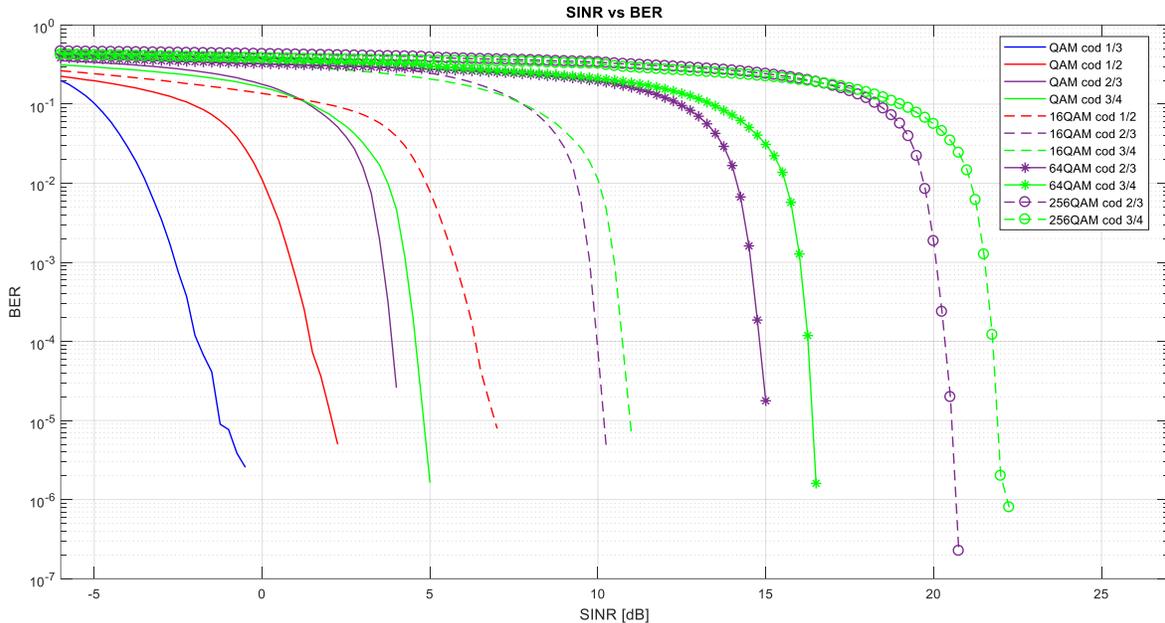


Figura 2.11 Modulación M-QAM con tasas de codificación 1/3, 1/2, 2/3 y 3/4.
Fuente por Autor.

Tomando los resultados de BER vs SINR de simulaciones a nivel de enlace, que sirven como parámetros de simulación a nivel de sistema en la Figura 2.11, se determina el valor de SINR objetivo para cada modulación y codificación a partir de una BER de 10^{-5} para la implementación del MCS en el modelo de simulación del sistema.

Con el valor objetivo de SINR se asigna el CQI, que indica el estado del canal en el DL y representa el MCS. Los resultados de CQI según la SINR objetivo se muestran en la Tabla 2.3 junto con el número de bits que pueden transmitirse en una subtrama de 1 ms.

Para el cálculo de bits por Bloque de Recursos (RB, *Resource Block*) se tiene en cuenta la subtrama de LTE y está dado por la Ecuación (2.18)

$$\frac{bits}{RB} = (\#Sim_{OFDM} \cdot \#Subp \cdot \#bits_{modulación} \cdot T_{Cod}) - \#bits_{señalización} \quad (2.18)$$

donde,

$\frac{bits}{RB}$: número de bits por RB

Sim_{OFDM} : número de símbolos OFDM, para este caso son 7 símbolos.



$Subp$: número de subportadoras, para este caso son 12 subportadoras.

$bits_{modulación}$: número de bits por modulación.

T_{Cod} : Tasa de codificación.

$bits_{señalización}$: número de bits de señalización empleados en la codificación, para este caso son 4 bits.

Índice CQI	SINR [dB] Referencia	Bits/símbolo	Modulación	Codificación	Bits/RB
0		Fuera de Rango			
1	-0,7	2	QAM	1/3	52
2	1,6	2	QAM	1/2	80
3	3,9	2	QAM	2/3	108
4	4,7	4	QAM	3/4	122
5	6,5	4	16QAM	1/2	164
6	10	4	16QAM	2/3	220
7	10,8	6	16QAM	3/4	248
8	14,8	6	64QAM	2/3	332
9	16,3	6	64QAM	3/4	374
10	20,4	6	256QAM	2/3	444
11	21,9	6	256QAM	3/4	500

Tabla 2.3 Relación de SINR, CQI y MCS. Fuente por Autor.

C. Asignación de Recursos

Entre los planificadores utilizados por los operadores de telefonía móvil se encuentra el planificador Round Robin [72], que es planteado para una evaluación inicial de la red, el cual divide los RBs radio entre los UEs en igual cantidad sin tener en cuenta las condiciones del canal radio. Al no considerar las condiciones del canal, los UEs que no presenten buenas condiciones tendrán el mismo número de recursos que los UEs con buenas condiciones, lo cual reducirá el *throughput* del sistema.

Inicialmente se asignan dos RB a cada UE para hacer un cálculo inicial de la SINR; luego se verifica qué usuarios cumplen con la SINR objetivo y se reasignan los RBs entre ellos, se recalcula la potencia de ruido y nuevamente el valor de la SINR.

D. Cálculo de *Throughput*

El *throughput* del sistema está definido como la velocidad de transmisión total de datos (datos de usuario, señalización y control) sin errores en recepción.



Para el cálculo del *throughput* se hace uso de la Ecuación (2.19) y (2.20) teniendo en cuenta el número de RB por usuario y el número de bits en función de la modulación y codificación presentados en la Tabla 2.4 [73].

$$Throughput_{UE\text{errores}} = 2 \cdot nRB \cdot Bits_{MCS} \left[\frac{\text{bits}}{\text{subtrama}} \right] \cdot 1000 \left[\frac{\text{subtrama}}{\text{segundo}} \right], \quad (2.19)$$

$$Throughput_{UE} = Throughput_{UE\text{errores}}(1 - BER_{UE}) \quad (2.20)$$

donde,

$Throughput_{UE\text{errores}}$: throughput UE con errores en [bps]

$Throughput_{UE}$: throughput UE sin errores en [bps]

$Bits_{MCS}$: número de bits en función de modulación y codificación por subtrama.

nRB : número de RB por UE.

BER_{UE} : BER del UE

Para hacer el cálculo de la BER_{UE} se realiza la simulación a nivel de enlace considerando la SINR del UE y el MCS.

E. Probabilidad de Servicio

El experimento considera la distribución de n-UEs de forma uniforme y aleatoria en un escenario de implementación (UMi SC, UMi OS, UMa y RMa), experimento que se repite un número considerable de veces (método de Montecarlo) para obtener la tendencia estadística de los resultados. Este experimento cuenta con el siguiente espacio muestral de eventos $S_1(UE_{in_s}, UE_{in_{sins}})$, $S_2(UE_{out_s}, UE_{out_{sins}})$ donde “UE_{in_s}” representa a los UEs *indoor* con servicio, “UE_{in_{sins}}” representa a los UEs *indoor* sin servicio, UE_{out_s} representa a los UEs *outdoor* con servicio y UE_{out_{sins}} representa a los UEs *outdoor* sin servicio.

La probabilidad para cada evento está dada por la Ecuación (2.21)

$$P_n = \frac{\# \text{ veces que ocurre el evento}}{\text{iteraciones} * UE_{celda}} \quad (2.21)$$

La probabilidad total por evento está dada según las Ecuaciones (2.22) y (2.23)

$$P(in_s) + P(in_{sins}) = 1 \quad (2.22)$$

$$P(out_s) + P(out_{sins}) = 1 \quad (2.23)$$



Se calcula la probabilidad de asignación de modulación considerando el espacio muestral de eventos $Q(A_{QAM}, A_{16QAM}, A_{64QAM}, A_{256QAM}, \text{Sin Asignación})$ donde A_{QAM} son los UEs con modulación QAM, A_{16QAM} son los UEs con modulación 16QAM, A_{64QAM} son los UEs con modulación 64QAM, A_{256QAM} son los UEs con modulación 256QAM y Sin Asignación son los UEs sin asignación de modulación.

La probabilidad de asignación está definida según la Ecuación (2.24)

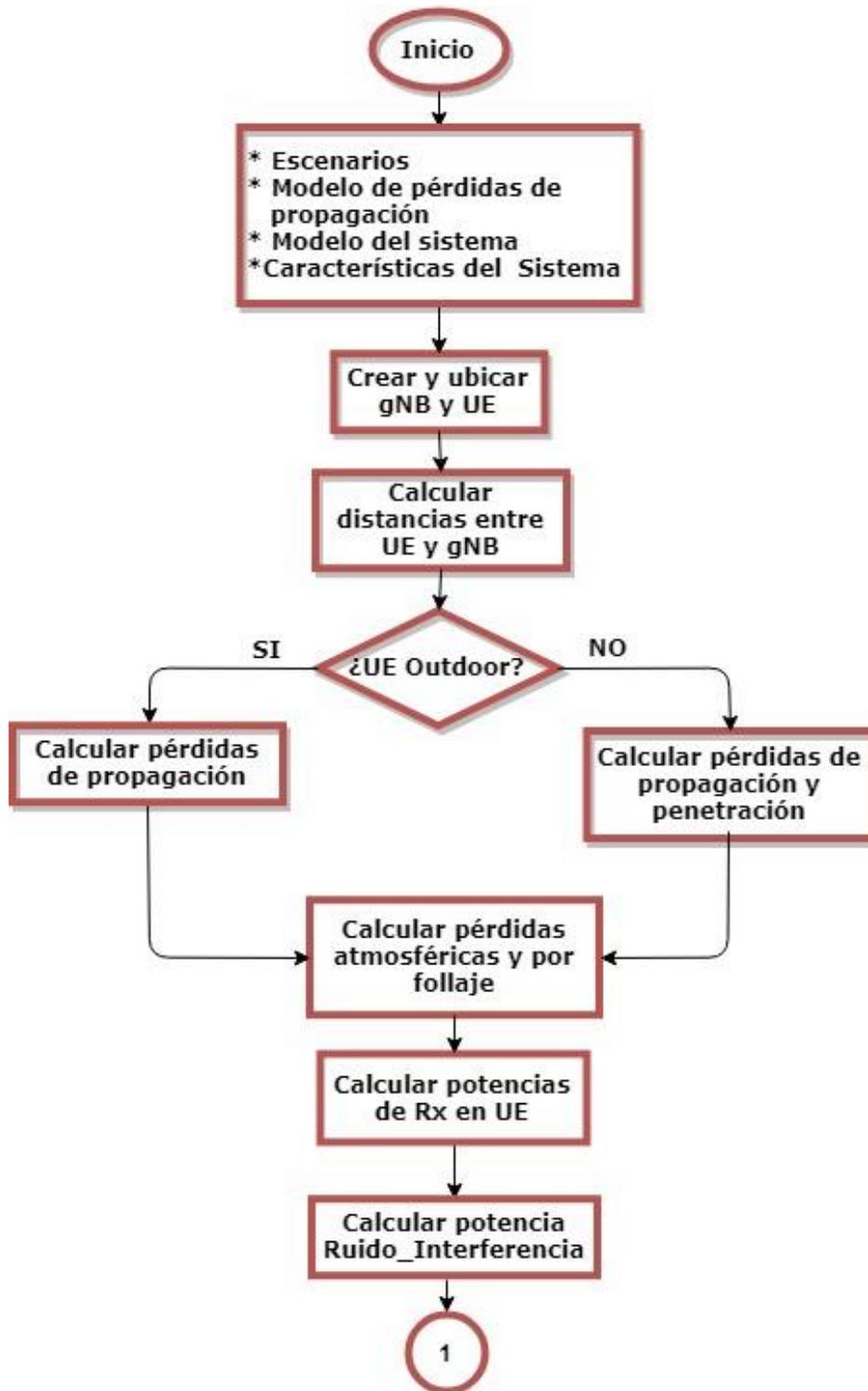
$$P(A_{QAM}) + P(A_{16QAM}) + P(A_{64QAM}) + P(A_{256QAM}) + P(\text{Sin Asignación}) = 1 \quad (2.24)$$

2.5 IMPLEMENTACIÓN

La implementación se realiza con base a un diagrama de flujo del sistema que depende de cada uno de los escenarios. Considerando los procesos previamente mencionados en la sección anterior se especifican los procesos generales que se tuvieron en cuenta para el desarrollo e implementación.

2.5.1 Diagrama de Flujo de Simulación

El diagrama de flujo de simulación es el proceso lógico que se plantea de forma general para definir el sistema a simular. En la Figura 2.12 se muestra cada bloque que contiene las operaciones lógicas y numéricas que dependen del escenario de estudio, generando datos e información para realizar el análisis de capacidad del sistema.



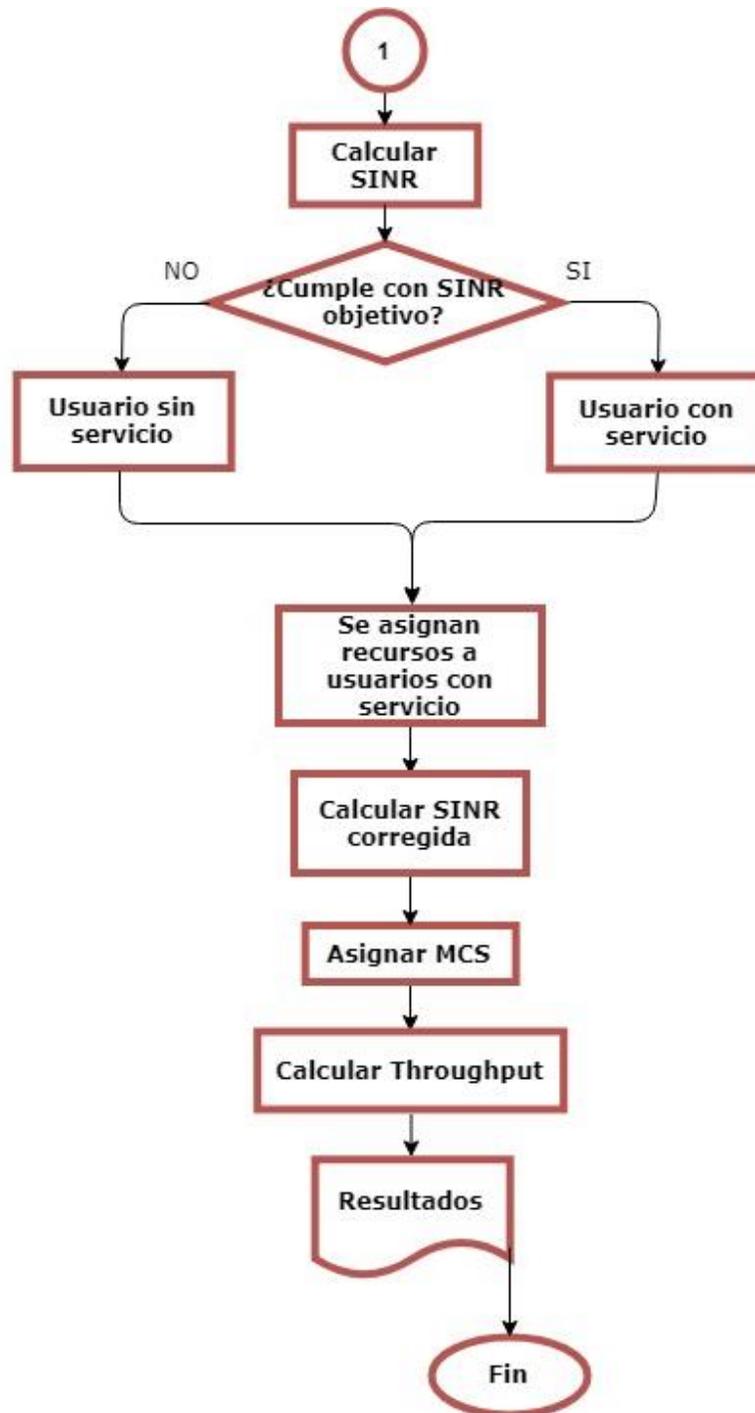


Figura 2.12 Diagrama de flujo de simulación. Fuente por Autor

CAPÍTULO III. EXPERIMENTACIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se evalúa la capacidad de una red celular 5G, se consideraron los escenarios UMi *Street Canyon*, UMi *Open Square*, UMa y RMa y el modelo de simulación a nivel de sistema presentado en el capítulo 2. El procedimiento para evaluar la capacidad se divide en tres casos de estudio denotados en la Figura 3.1, con el fin de determinar los valores de potencia que ofrezcan la mayor probabilidad de servicio, observar el efecto de la frecuencia en las pérdidas totales del sistema y hallar la capacidad de la red considerando diferente número de UEs por sector.

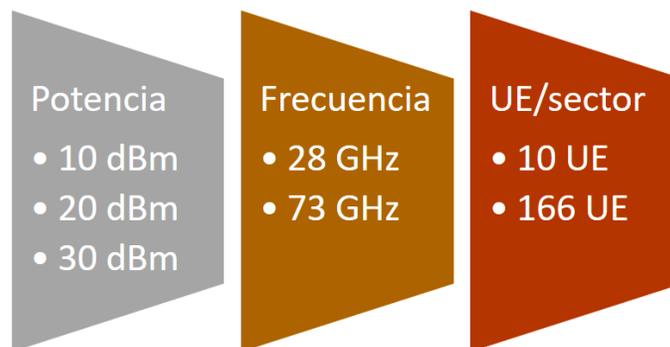


Figura 3.1 Casos de estudio. Fuente por Autor.

3.2 CONDICIONES INICIALES DE ESTUDIO

A continuación, se describen los parámetros iniciales para los casos de estudio:

- ✓ **Ancho de Banda:** hasta 1 GHz en mmWave [59] se escoge 200 MHz, porque soporta 10 veces la capacidad de una red LTE y cumple los requerimientos para 5G.
- ✓ **Número máximo de UEs por subtrama:** está limitado a la cantidad de RB disponibles en el ancho de banda del sistema. Una subtrama contiene 1000 RB (ancho de banda = 200 MHz, configuración de trama LTE) y la cantidad



mínima de RB asignables por UE son 2, entonces, el número máximo de UEs por subtrama es 500. La distribución de UEs en la celda se hace en 3 sectores, por lo tanto, en los casos de estudio se establecen 166 UEs por sector para no sobre pasar el límite de UEs por subtrama.

- ✓ **Número de iteraciones:** en la generación de los resultados para cada caso de estudio, se realizaron 300 iteraciones del sistema en los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa porque a partir de este número, por el método de Montecarlo, el sistema presenta pequeños cambios en la media y varianza de los resultados de SINR de UEs.

3.3 CASO DE ESTUDIO 1

El objetivo es determinar la potencia entre tres valores discretos que genere la mayor probabilidad de servicio. Se evalúa probabilidad de servicio y SINR de una celda en función de la potencia de transmisión en los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa.

El valor de potencia de 30 dBm, en el gNB, es el más utilizado en los estudios a nivel de sistema con mmWave [55],[56],[74], por esto se asigna como potencia de referencia en los casos de estudio.

En este caso de estudio se varía la potencia de transmisión del gNB (DL) en 10 dBm, 20 dBm y 30 dBm.

3.3.1 Análisis de Probabilidad de Servicio

En la Tabla 3.1 se muestran los resultados de probabilidad de servicio de UEs y de celda, además del radio de cobertura en los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa.



Escenario	Potencia dBm	UEs Outdoor (%)	UEs Indoor (%)	Prob Servicio Outdoor (%)	Prob Servicio Indoor (%)	Prob Servicio Celda (%)	Radio (m)
UMi SC	10	28,3119	71,6881	100	1,6601	29,502	45,98
	20	28,4833	71,5167	100	22,3949	44,4994	46,11
	30	28,4505	71,5495	100	69,8649	78,4385	46,09
UMi OS	10	49,9766	50,0234	72,3778	0,1365	36,2403	52,94
	20	49,8159	50,1841	72,1612	1,4084	36,6546	52,99
	30	49,9833	50,0167	72,3333	2,6377	37,4739	52,94
UMa	10	61,0830	38,9170	99,2428	0	60,6205	113,06
	20	60,9003	39,0997	99,2548	0,3903	60,5991	113,03
	30	60,9766	39,0234	99,2535	7,4114	63,4137	112,99
RMa	10	Se consideran los usuarios <i>en vehículos (Indoor)</i> .				0	0
	20					0,0241	54,53
	30					0,2825	222,52

Tabla 3.1 Probabilidad de servicio en función de la potencia. Fuente por Autor.

Según los resultados de la Tabla 3.1, para UMi SC, UMi OS y UMa, la probabilidad de servicio en la celda aumenta a medida que la potencia es mayor porque la probabilidad de usuarios *indoor* con servicio se incrementa, el caso más relevante se encuentra en UMi SC. La probabilidad de servicio para UEs *outdoor*, en cada escenario, presenta variaciones mínimas al cambiar la potencia de transmisión, porque las pérdidas totales de los UEs *outdoor* se mantienen, y los 20 dB de diferencia entre los casos de prueba con potencias de transmisión de 30 dBm y 10 dBm, no son suficiente para disminuir la probabilidad de servicio de los UEs *outdoor*. La mayor probabilidad de servicio para los UEs *indoor* se obtiene con una potencia de 30 dBm, para el escenario UMi SC la probabilidad de servicio de UEs *indoor* es la más alta comparado con los escenarios UMi OS, UMa y RMa.

Para el escenario UMi SC se observa que la potencia de 10 dBm es suficiente para dar cobertura a la totalidad de UEs *outdoor*, sin embargo, la probabilidad de servicio de los UEs *indoor* es mínima. En el escenario se da servicio al 99,2 % de los UEs *outdoor* para la potencia de 10 dBm pero la probabilidad de servicio *indoor* es 0.

La mayor probabilidad de servicio de UEs *outdoor* es de 60,62% en el escenario UMa, corresponde al 99,2428% del 61,083% de la distribución de UEs *outdoor* en la celda, con la potencia de 10 dBm, debido a que cuenta con mayor espacio para distribuir los UEs *outdoor* respecto a los UEs *indoor*.



La distancia del enlace en el escenario RMa es el principal factor que limita la probabilidad de servicio, considerando: bajas pérdidas de propagación (LOS), pérdidas por penetración (modelo de bajas pérdidas) y pérdidas por follaje (a una distancia de 50 m), se alcanza un radio máximo de servicio de 222,52 m radiando con una potencia de 30 dBm.

3.3.2 Análisis de SINR

Las Figuras 3.2, 3.4, 3.6 y 3.8 presentan los resultados de la CDF de SINR para los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa respectivamente.

- **UMi SC**

La Figura 3.2 presentan las CDF de SINR de los UEs *indoor* y los UEs *outdoor* para las potencias de 10 dBm, 20 dBm y 30 dBm. En el escenario UMi SC, se aprecia la relación directa entre la potencia y la SINR, porque a medida que aumenta la potencia de transmisión, la SINR crece para los UEs *indoor* y *outdoor*. La potencia de 30 dBm presentó mayor probabilidad de alcanzar valores de SINR altos, para los UEs *outdoor* y los UEs *indoor*. Con la potencia de 30 dBm los UEs *indoor* alcanzan una SINR alta en comparación con las potencias de 10 dBm y 20 dBm, porque la probabilidad de que los UEs *indoor* y *outdoor* del sistema presenten una SINR por encima de un valor específico aumenta conforme lo hace la potencia de transmisión. Con una potencia de 30 dBm el 100% de los UEs *indoor* presentan una SINR inferior a 34,85 dB, con la potencia de 20 dBm el 100% tienen SINR inferior a 21,36 dB, finalmente con la potencia de 10 dBm el 100% presenta una SINR menor a 10,08 dB. De acuerdo a los valores de SINR obtenidos, se concluye que solo la potencia de 30 dBm permite asignar una modulación 256QAM con tasa de codificación 3/4.

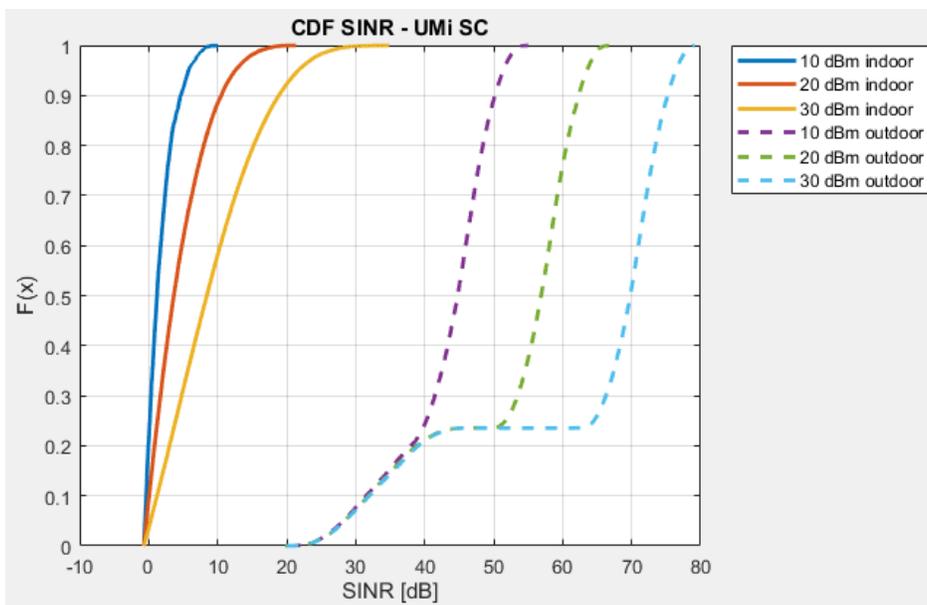


Figura 3.2 CDF SINR UMi SC en función de la potencia. Fuente por Autor.

Conforme con la Figura 3.2, en la CDF de SINR de los UEs *outdoor*, las potencias de 20 dBm y 30 dBm presentan un comportamiento similar hasta 45,87 dB, esto representa los valores que puede tomar un UE *outdoor* con interferencia. Con las potencias de 10 dBm, 20 dBm y 30 dBm los UEs *outdoor* presentaron valores de SINR mayores a 19,78 dB, por lo tanto, la menor modulación que puede ser asignada a estos UEs es de 64QAM con tasa de codificación 3/4 de acuerdo al MCS de la Tabla 2.4.

En la Tabla 3.2 se relacionan los resultados de probabilidad de asignación de los diferentes esquemas de modulación según la potencia radiada por el gNB en el escenario UMi SC. La suma de las probabilidades de las modulaciones QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM de cada potencia, corresponde a la probabilidad de servicio de la celda.

Escenario	Potencia	Prob QAM (%)	Prob 16QAM (%)	Prob 64QAM (%)	Prob 256QAM (%)	Sin Asignación (%)
UMi SC	10 dBm	1,1499	0,0402	0,0013	28,3106	70,498
	20 dBm	11,4699	4,2182	0,3253	28,4859	55,5007
	30 dBm	19,7931	19,4893	7,2035	31,9525	21,5616

Tabla 3.2 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en UMi SC. Fuente por Autor.



Al aumentar la potencia del gNB, se observa que la probabilidad de asignación de las modulaciones también se incrementa, la modulación con mayor probabilidad de asignación para las potencias de 10 dBm, 20 dBm y 30 dBm es 256QAM, porque brinda servicio a todos los UEs *outdoor* que en su mayoría tienen SINR superior a 20,4 dB de acuerdo a la Figura 3.2.

La Figura 3.3 muestra el diagrama de cobertura en función de la SINR del escenario UMi SC con una asignación de 50 RB por UE, se observa la diferencia entre las potencias de 10 y 30 dBm, específicamente en la cobertura de UEs *indoor*, para la potencia de 30 dBm hay mayor cobertura que con la potencia de 10 dBm. Con la potencia de 30 dBm es de resaltar que los UEs ubicados en la calle vertical tienen una SINR menor a 35 dB aproximadamente debido a la interferencia que se presenta y los UEs ubicados en las calles horizontales alcanzan una SINR mayor a 50 dB debido a que no hay interferencia.

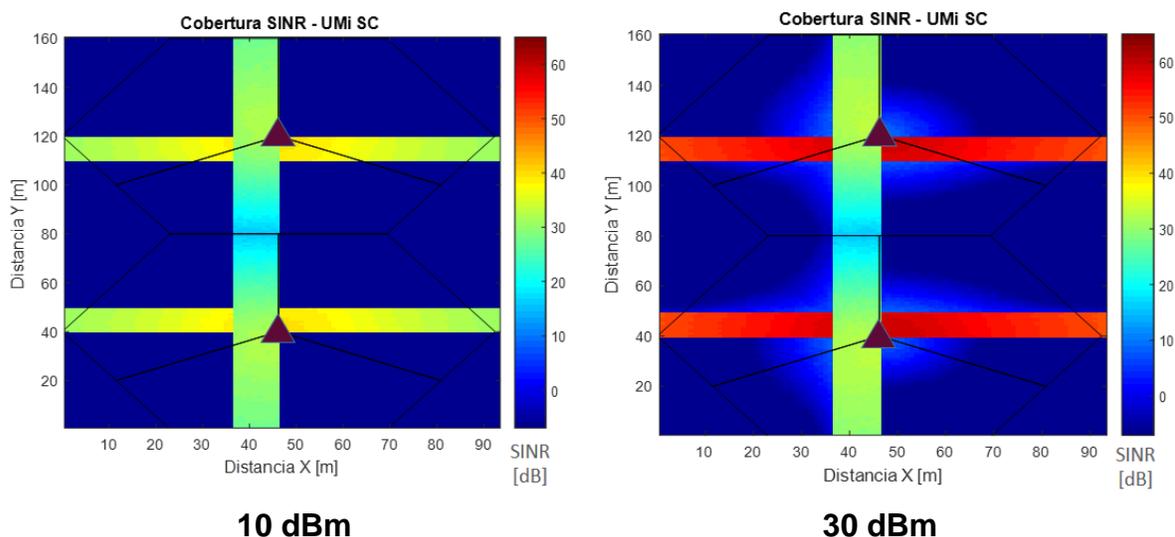


Figura 3.3 Diagrama de cobertura escenario UMi SC en función de SINR.
Fuente por Autor.

- **UMi OS**

La Figura 3.4 muestra la CDF de SINR del escenario UMi OS, la variación de potencia genera resultados similares para los UEs *outdoor* respecto a la CDF de SINR; esto se debe a las tres celdas interferentes del sistema y al escenario, si se disminuye la potencia de transmisión, la potencia en recepción es menor, por lo tanto, la interferencia es menor, manteniéndose la relación de SINR.



Para los UEs *indoor* a medida que incrementa la potencia de transmisión, la SINR aumenta, debido a que la interferencia se reduce por las pérdidas de penetración en el edificio.

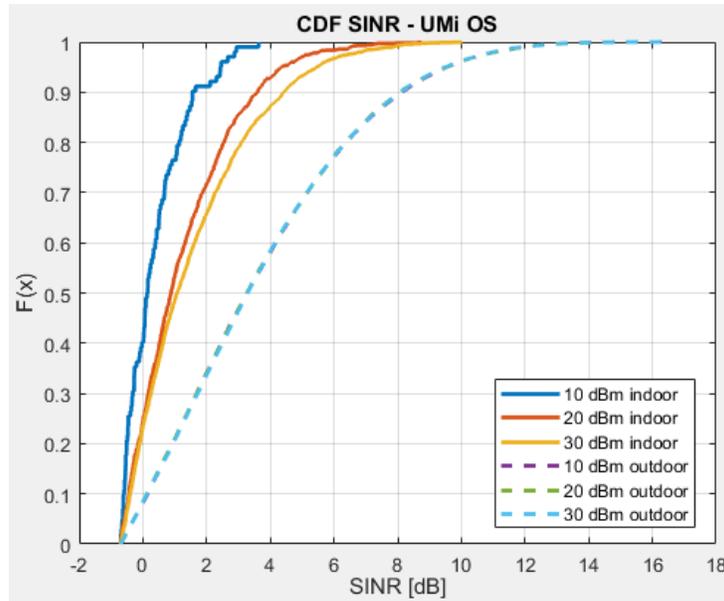


Figura 3. 4 CDF SINR UMi OS en función de la potencia. Fuente por Autor.

En el escenario UMi OS se observa que los UEs *outdoor* con servicio tienen una SINR menor a 16,43 dB para una potencia de 20 dBm, este valor de SINR permite que la mayor modulación asignada al UE sea 64QAM con tasa de codificación 3/4. Este escenario está limitado por interferencia, la configuración de 4 celdas con reuso universal de frecuencias es crítico para la SINR.

La Tabla 3.3 muestran los resultados de probabilidad de asignación de los esquemas de modulación en el escenario UMi OS. El efecto de incrementar la potencia de transmisión se refleja en el aumento de la probabilidad de asignación de la modulación QAM, esto corresponde a los UEs *indoor* con servicio que también ascienden, como se observa en la Tabla 3.1 y en la Figura 3.4.



Escenario	Potencia	Prob QAM (%)	Prob 16QAM (%)	Prob 64QAM (%)	Prob 256QAM (%)	Sin Asignación (%)
UMi OS	10 dBm	29,2952	6,9324	0,0127	0	63,7597
	20 dBm	29,8193	6,8240	0,0114	0	63,3453
	30 dBm	30,5348	6,9244	0,0147	0	62,5261

Tabla 3.3 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en UMi OS. Fuente por Autor.

La interferencia en el escenario UMi OS, se ve reflejado en las modulaciones de 64QAM y 256QAM, ya que la probabilidad de asignar 256QAM es nula y la probabilidad de asignar 64QAM es muy baja comparado con la probabilidad de asignación de las modulaciones QAM y 16QAM. La suma de las probabilidades de las modulaciones QAM, 16QAM, 64QAM y 256QAM de cada potencia, corresponde a la probabilidad de servicio de la celda.

El diagrama de cobertura en función de la SINR para el escenario UMi OS se presenta en la Figura 3.5, el cual es un escenario que presenta mayor interferencia en comparación a los escenarios UMi SC y UMa. La SINR máxima alcanzada es de aproximadamente 20 dB, también es clara la diferencia entre las potencias de 10 y 30 dBm en cuanto a la cobertura de UEs *indoor*,

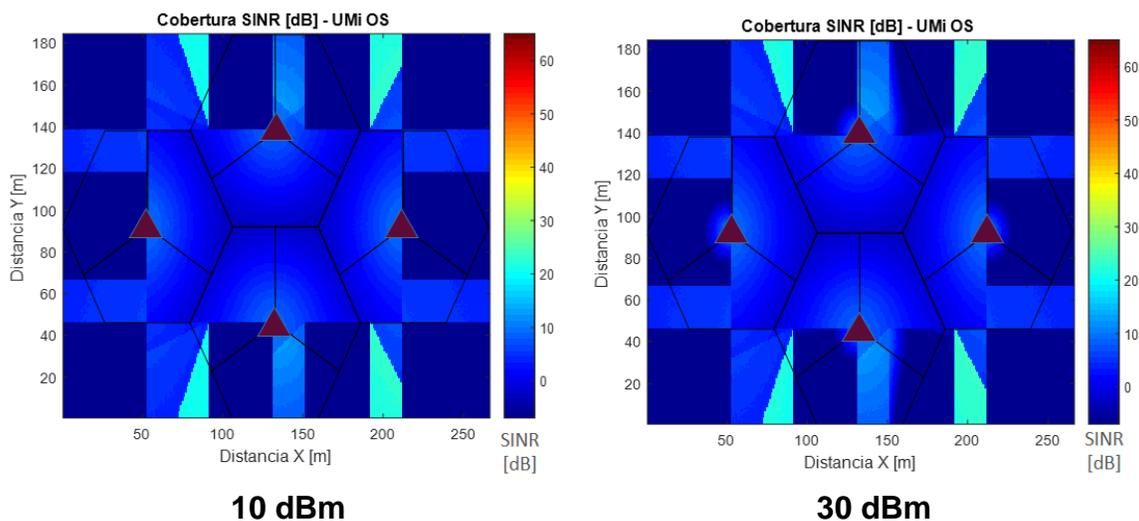


Figura 3.5 Diagrama de cobertura escenario UMi OS en función de SINR. Fuente por Autor.



- **UMa**

Los resultados de CDF de SINR para el escenario UMa se muestra en la Figura 3.6, a medida que la potencia de transmisión es mayor, la probabilidad de tener valores de SINR superiores a un valor específico, crece para todos los UEs con servicio y también aumenta la probabilidad de servicio de UEs *indoor*, según la Tabla 3.1. Los mayores valores de SINR se encuentran con la potencia de 30 dBm, en este escenario también hay interferencia, pero es menor en comparación con UMi SC y UMi OS lo que se refleja en la CDF de SINR de los UEs *outdoor*, que solo presentan comportamiento similar de SINR hasta 13,12 dB para las potencias de 10, 20 y 30 dBm.

Para la potencia de 10 dBm no se tiene servicio en UEs *indoor* por las pérdidas adicionales de distancia y el escenario con espacios más amplios sin el efecto de calle de cañón que tiene el escenario UMi SC, por esta razón, la potencia de 10 dBm no se considera en los resultados de CDF de SINR para UEs *indoor* en la Figura 3.6.

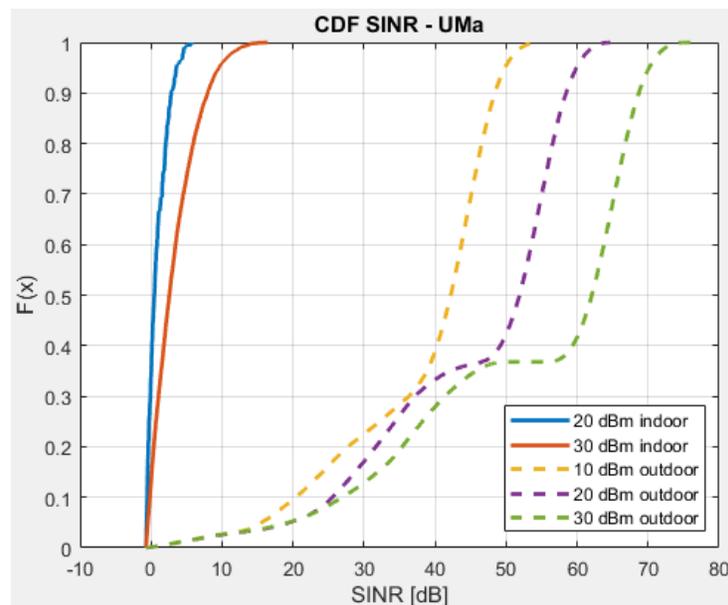


Figura 3.6 CDF SINR UMa en función de la potencia. Fuente por Autor.

En la Tabla 3.4 se muestran los resultados de la probabilidad de asignación de los esquemas de modulación M-QAM y la probabilidad de UEs sin servicio o sin asignación de la celda. La modulación presenta mejor desempeño con 30 dBm al ofrecer servicio a más UEs, particularmente *indoor*, la modulación con mayor probabilidad de asignación es 256QAM y corresponde a los UEs *outdoor* con



servicio dado que presenta la misma probabilidad, como se puede comparar entre las Tablas 3.1 y 3.4, los UEs *outdoor* de este escenario presentan la mayor probabilidad de servicio respecto a los escenarios UMi SC, UMi OS y RMa.

Escenario	Potencia	Prob QAM (%)	Prob 16QAM (%)	Prob 64QAM (%)	Prob 256QAM (%)	Sin Asignación (%)
UMa	10 dBm	0,5489	1,1637	3,6094	55,4554	39,2226
	20 dBm	0,6800	0,5683	0,8715	58,7269	39,1533
	30 dBm	2,9655	1,0730	0,8541	58,7219	36,3855

Tabla 3.4 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en UMa. Fuente por Autor.

Se observa en la Tabla 3.4 que con la potencia de 30 dBm la probabilidad de los UEs sin asignación disminuye, esto se debe al incremento de la probabilidad de servicio de UEs *indoor* según la Tabla 3.1, la probabilidad de asignación de 256QAM se mantiene para la potencia de transmisión de 20 y 30 dBm.

En la Figura 3.7 se presenta el diagrama de cobertura en función de la SINR donde se observa que con la potencia de 10 dBm los UEs *outdoor* con servicio presentan SINR inferior a 35 dB aproximadamente y con la potencia de 30 dBm los UEs *outdoor* con servicio alcanzan SINR de 50 dB en las plazas, excepto en la calle vertical que presenta mayor interferencia donde la SINR se reduce a 35 dB. En las calles encerradas en círculos rojos se consideran UEs NLOS y su SINR es inferior a 15 dB debido a las pérdidas y la interferencia en ese punto del escenario.

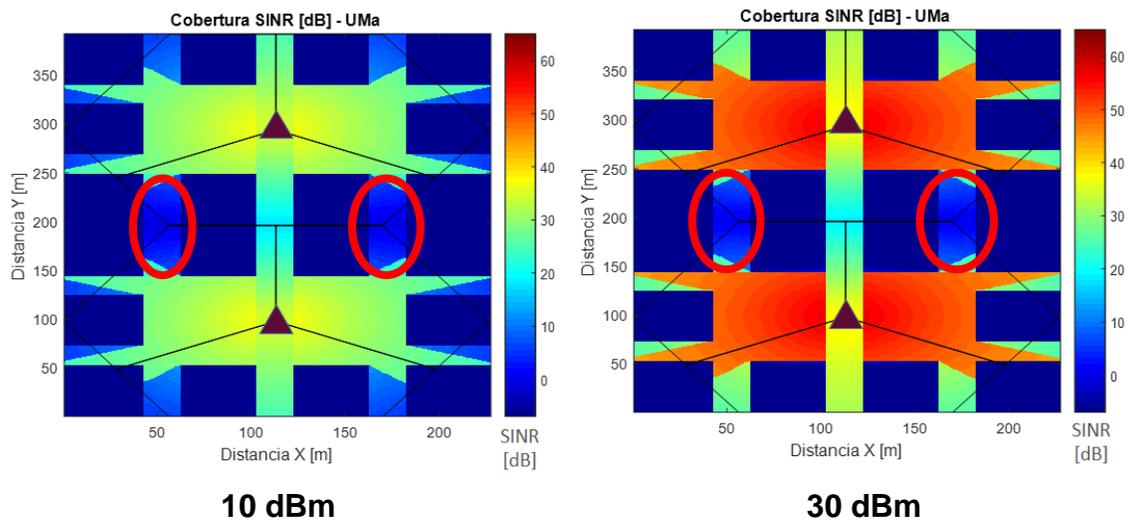


Figura 3.7 Diagrama de cobertura escenario UMa en función de SINR. Fuente por Autor.



- **RMa**

Para el escenario RMa de acuerdo a los resultados de probabilidad de servicio de la Tabla 3.1, se concluye que no hay UEs con servicio si el gNB radia con la potencia de 10 dBm, debido a las pérdidas por penetración, follaje, y propagación que se presentan en el enlace, razón por la cual, la potencia de 10 dBm no se considera para el análisis de SINR.

En el escenario RMa, la potencia de transmisión de 20 dBm presentó la SINR más baja en comparación con la potencia de 30 dBm. En la Figura 3.8 se evidencia que con una potencia de 20 dBm, los UEs tienen una SINR inferior a 4,15 dB y con una potencia de 30 dBm presentan una SINR menor a 14,18 dB.

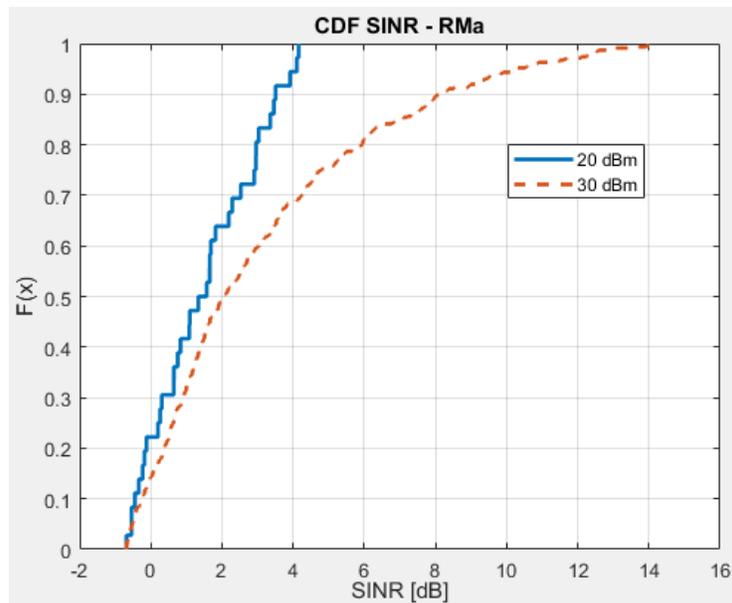


Figura 3.8 CDF SINR RMa en función de la potencia. Fuente por Autor.

La Tabla 3.5 muestra las probabilidades de asignación de los esquemas de modulación y la probabilidad de UEs sin servicio en el escenario RMa. Se observa que el incremento de potencia no afecta las probabilidades de asignación de los esquemas de modulación 64QAM y 256QAM porque no cumple la SINR objetivo para cada modulación. También se evidencia un bajo incremento en la probabilidad de QAM y 16QAM, sin embargo, la probabilidad de asignación es muy baja.

Para la potencia de 20 dBm debido a la poca cobertura que genera, solo hay probabilidad de asignar la modulación QAM, pero en un porcentaje casi nulo y para la potencia de 30 dBm se asigna solo hasta 16QAM como se observa en Tabla 3.5.



Escenario	Potencia	Prob QAM (%)	Prob 16QAM (%)	Prob 64QAM (%)	Prob 256QAM (%)	Sin Asignación (%)
RMa	20 dBm	0,0241	0	0	0	99,9759
	30 dBm	0,2363	0,0462	0	0	99,7175

Tabla 3. 5 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de la potencia en RMa. Fuente por Autor.

Como se observó en el escenario RMa, la probabilidad de servicio (detallado en la Tabla 3.1) es muy baja debido a las pérdidas totales en el escenario y las grandes distancias del enlace, disminuyendo la SINR como se observa en la Figura 3.9 donde se grafica el diagrama de cobertura para la potencia de 20 y 30 dBm. La potencia de 10 dBm no se tiene en cuenta debido a que no brinda cobertura. Es evidente que los UEs con servicio para las potencias de 20 dBm y 30 dBm son muy pocos y alcanzan una SINR inferior a 10 dB, razón por la cual no se considera el escenario RMa a partir del segundo caso de estudio.

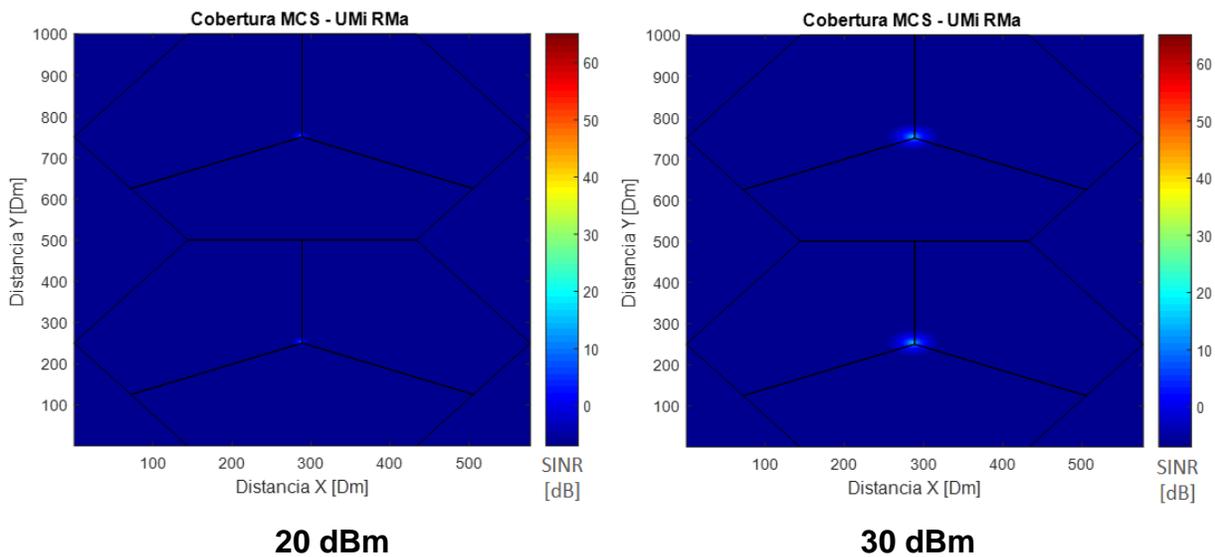


Figura 3.9 Diagrama de cobertura escenario UMA en función de SINR. Fuente por Autor.

En el caso de estudio 1, los resultados de probabilidad de servicio y SINR muestran que la mayor capacidad de UEs con servicio se alcanza con la potencia de 30 dBm. Para los siguientes casos de estudio se establece como parámetro fijo la potencia de transmisión en 30 dBm.



3.4 CASO DE ESTUDIO 2

El objetivo es comparar el efecto de la frecuencia en las pérdidas totales del sistema para evaluar su capacidad, para lograrlo se analiza la probabilidad de servicio y las pérdidas totales de una celda, en función de la frecuencia en los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa de estudio.

Se consideran las frecuencias de 28 GHz y 73 GHz con los demás parámetros fijos. Las frecuencias de 28 GHz y 73 GHz son las más empleadas en estudios para 5G haciendo uso de mmWave[54], [55], [61], [74] en los escenarios UMi y UMa [65],[70],[75].

3.4.1 Análisis Probabilidad de Servicio

La probabilidad de servicio presenta variaciones dependiendo de la frecuencia con la que radie el gNB. La Tabla 3.6 contiene los resultados de probabilidad de servicio de los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa.

Escenario	f [GHz]	UEs Outdoor %	UEs Indoor %	Prob Servicio Outdoor %	Prob Servicio Indoor %	Prob Servicio %
Umi SC	28	28,4505	71,5495	100	69,8649	78,4385
	73	28,3039	71,6961	100	0,8318	28,9003
Umi OS	28	49,9833	50,0167	72,3333	2,6377	37,4739
	73	50,1131	48,8869	72,2755	0,0452	36,2416
UMa	28	60,9766	39,0234	99,2535	7,4114	63,4137
	73	60,9137	39,0863	92,2736	0	60,4712

Tabla 3. 6 Probabilidad de servicio en función de la frecuencia. Fuente por Autor.

Según los resultados de la Tabla 3.6, la probabilidad de servicio de UEs *indoor* en la celda para los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa, disminuye al aumentar la frecuencia de 28 GHz a 73 GHz, esto se debe al incremento en las pérdidas de propagación, pérdidas por penetración y pérdidas atmosféricas que están directamente relacionadas con la frecuencia, cómo se muestra en las Ecuaciones (2.4) – (2.8).

Para el escenario UMa, la probabilidad de servicio de los usuarios *indoor* con una frecuencia de 73 GHz es nula, debido a que las pérdidas adicionales por frecuencia y distancia no permiten alcanzar el valor de SINR objetivo de servicio (-0,7 dB).



Es de anotar que la probabilidad de servicio de los usuarios *outdoor* aumenta en los escenarios UMi OS y UMa para 73 GHz, esto se debe a la dispersión de los datos generada por la ubicación aleatoria de los UEs en el escenario de simulación.

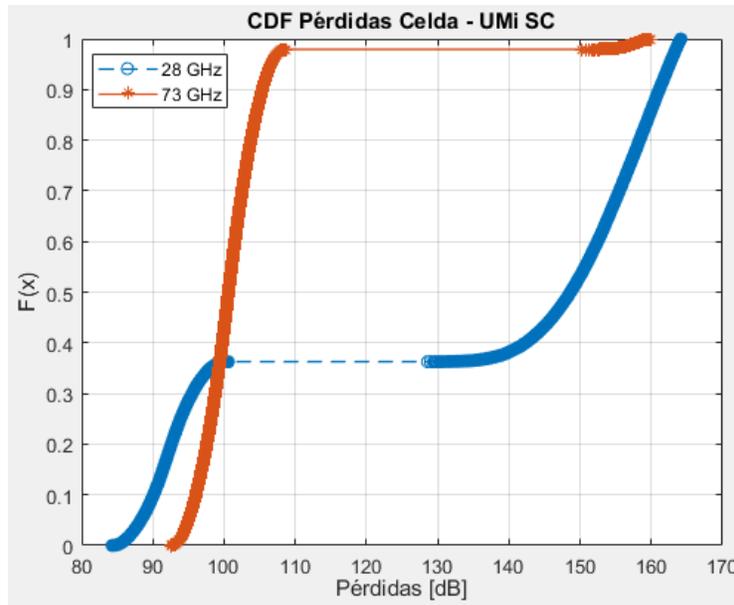
3.4.2 Análisis de Pérdidas

Las pérdidas totales del sistema están directamente relacionadas con la frecuencia de transmisión de gNB. En las Figura 3.10 y 3.11 se presentan las pérdidas totales en los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa respectivamente.

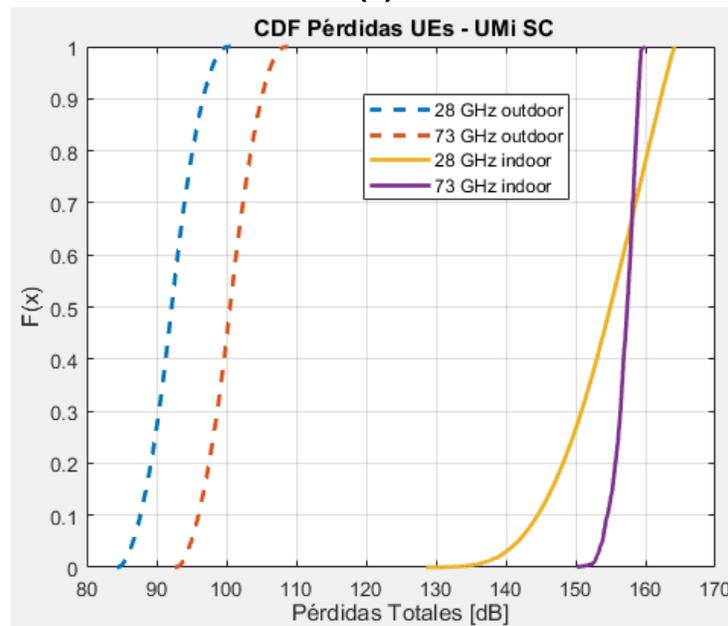
- **UMi SC**

En la Figura 3.10 (a) se presenta la CDF de pérdidas totales en la celda sin hacer distinción entre UEs *outdoor* e indoor y en (b) se observan las gráficas de CDF de pérdidas en la celda diferenciando los UEs *indoor* de los UEs *outdoor* en el escenario UMi SC para las frecuencias de 28 GHz y 73 GHz. En la Figura 3.10 (a) se observa que la frecuencia de 73 GHz presenta mayor probabilidad de alcanzar valores superiores de pérdidas respecto a la frecuencia de 28 GHz hasta 108.8 dB, después se presenta un salto, esto se debe a valores de pérdidas que no se presentan porque las pérdidas totales de UEs *outdoor* no superan 108.8 dB y las pérdidas en UEs *indoor* son mayores a 150 dB para 73 GHz, como se observa en la Figura 3.10 (b). A partir de 128,6 dB la probabilidad de alcanzar valores elevados disminuye porque la probabilidad de UEs *indoor* es menor que con la frecuencia de 28 GHz.

En la Figura 3.10 (b), al incrementar la frecuencia del gNB, las pérdidas para los UEs *outdoor* también aumentan, las pérdidas totales que presentan los UEs *indoor* con la frecuencia de 28 GHz son menores que las de 73 GHz hasta 158 dB, después este comportamiento se invierte debido a la probabilidad de servicio *indoor* que es mayor para 28 GHz en comparación a la frecuencia de 73 GHz como se ve en la Tabla 3.6, por lo tanto, hay mayores pérdidas. Las pérdidas que presenta un UE *indoor* son superiores a 128,6 dB y 150,2 dB para las frecuencias de 28 GHz y 73 GHz, respectivamente y las pérdidas totales de los UEs *indoor* son menores a 159,9 dB para 73 GHz y 164,1 dB para 28 GHz, con esto se corrobora que las pérdidas más altas se obtuvieron con la frecuencia de 28 GHz debido a los UEs *indoor*.



(a)



(b)

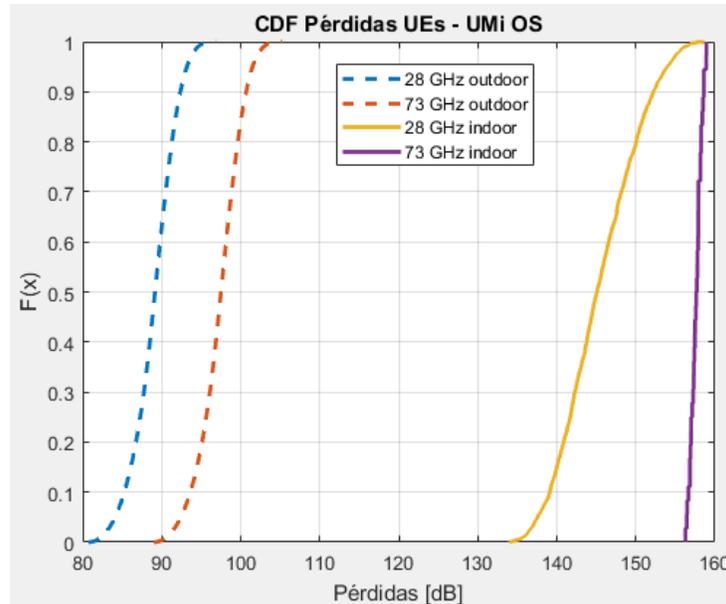
Figura 3.10 CDF Pérdidas totales por UMi SC en función de la frecuencia. Fuente por Autor.

- **UMi OS y UMa**

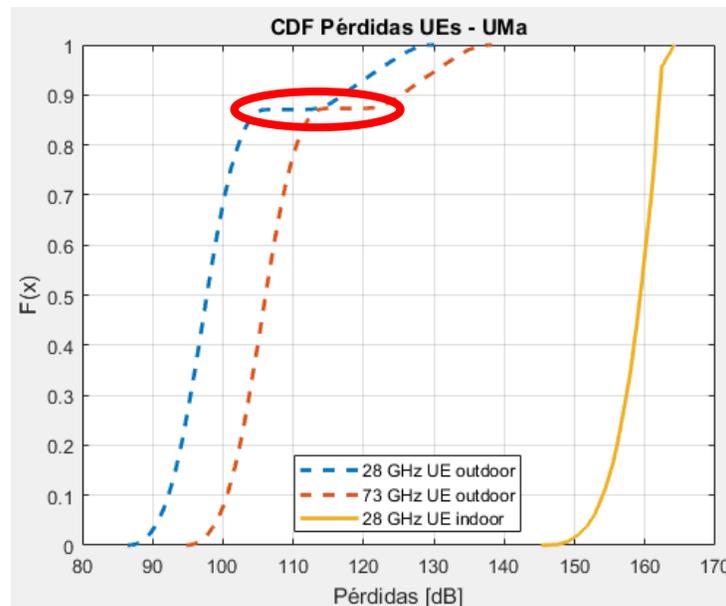
En la Figura 3.11 (a) y (b) se muestran los resultados de la CDF de pérdidas totales para los escenarios UMi OS y UMa, respectivamente. En general se observa que la probabilidad de que los UEs *indoor* y *outdoor* presenten una pérdida total por encima



de un valor específico, aumenta con la frecuencia. En el escenario UMa de la Figura 3.11 (b) no se tiene CDF de pérdidas totales para la frecuencia de 73 GHz en *indoor* porque con esta frecuencia las pérdidas no permiten alcanzar la SINR de servicio que es -0,7 dB.



(a)



(b)

Figura 3.11 CDF de pérdidas totales UMi OS y UMa en función de la frecuencia.

Fuente por Autor



En el escenario UMi OS de la Figura 3.11 (a), las pérdidas que experimenta un UEs *outdoor* para una frecuencia de 28 GHz son inferiores a 96,83 dB y para 73 GHz son menores a 102,5 dB; en el escenario UMa de la Figura 3.11 (b) se observa que las pérdidas de un UEs *outdoor* son inferiores a 130 dB para una frecuencia de 28 GHz y para 73 GHz son menores a 138,2 dB, según estos resultados, el efecto de la frecuencia en las pérdidas de los UEs *outdoor* es un incremento de aproximadamente 8,2 dB. Además, se observa un salto en las pérdidas totales de los UEs *outdoor* para las frecuencias de 28 y 73 GHz como se observa en la Figura 3.11 (b) denotados con un ovalo rojo, estos valores de pérdidas no se presentan y se debe a la diferencia entre UEs *outdoor* con NLOS y LOS.

Como resultado del análisis de probabilidad de servicio y pérdidas totales en la celda, la frecuencia de 73 GHz da cobertura a un gran porcentaje de los UEs *outdoor* pero no se utiliza en el caso de estudio 3 porque se busca la mayor probabilidad de servicio tanto *outdoor* como *indoor* por lo tanto, se determina que la frecuencia de 28 GHz alcanza mayor probabilidad de servicio en los escenarios UMi SC UMi OS y UMa. Este valor de frecuencia se fija para el siguiente caso de estudio.

3.5 CASO DE ESTUDIO 3

El objetivo del último caso de estudio es evaluar la probabilidad de servicio de la celda, el *throughput* de UE y el *throughput* de celda en los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa variando el número de usuarios que solicitan servicio al gNB. El *throughput* calculado en el presente trabajo de grado es considerado con errores debido al tiempo de simulación a nivel de enlace necesario para calcular el *throughput* sin errores, que tiene una duración de 42 segundos aproximadamente por UE, teniendo en cuenta que son 300 iteraciones y 498 UEs por celda, el tiempo de simulación sin interrupción requerido para los UEs en los escenarios de implementación es mayor a 200 días (Equipo con sistema operativo Windows 8.1 64 bits, memoria RAM de 8192 MBytes, procesador Intel (R) Core (TM) i5-5200U CPU 2.20 GHz (4 CPUs), tarjeta de video Intel(R) HD Graphics 5500, Matlab 2017b).

Para definir la cantidad de UEs que solicitan servicio, se establece el valor mínimo de 10 UEs por sector según la recomendación TR 38.913 [59] con el fin de alcanzar el *throughput* máximo en la celda.

Los valores de potencia y frecuencia son 30 dBm y 28 GHz como se determinó en los casos de estudio 1 y 2, respectivamente.



3.5.1 Análisis de Probabilidad de Servicio

La probabilidad de servicio está directamente relacionada con el número de UEs que solicitan servicio al gNB. En la Tabla 3.7 se muestra la probabilidad de servicio de la celda para los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa en función del número de UEs solicitantes por sector.

Escenario	UEs / sector	UEs Outdoor %	UEs Indoor %	Prob Servicio Outdoor %	Prob Servicio Indoor %	Prob Servicio %
UMi SC	10	28,5	71,5	100	13,8927	38,4333
	166	28,4505	71,5495	100	69,8649	78,4385
UMi OS	10	49,5667	50,4333	72,2930	0,8591	36,2667
	166	49,9833	50,0167	72,3333	2,6159	37,4739
UMa	10	60,8778	39,1222	99,2698	0,1705	60,50
	166	60,9766	39,0234	99,2535	7,4114	63,4137

Tabla 3.7 Probabilidad de servicio en función del número de UEs.

Fuente por Autor

Como se emplea la función de distribución aleatoria uniforme para ubicar a los UEs en la celda. La distribución de UEs *outdoor* e *indoor* para 10 UEs es similar a la distribución de UEs *outdoor* e *indoor* con 166 UEs, presenta pequeñas variaciones que se atribuyen a la varianza de los datos.

En el escenario UMi SC se da servicio al 100% de los UEs *outdoor* y para el escenario UMa el 99,25% de los UEs aproximadamente. El escenario UMi OS al estar limitado por interferencia, no alcanza a dar cobertura a todos los UEs *outdoor*, como se observa en la Tabla 3.7, para 10 UEs por sector la probabilidad de UEs *outdoor* con servicio es 72,2930% y con 166 UEs por sector la probabilidad de servicio de UEs *outdoor* es 72,3333%.

En el escenario UMi SC, la probabilidad de UEs *indoor* con servicio se incrementa a medida que hay más UEs solicitantes, esto ocurre porque se distribuyen más UEs en regiones *indoor* con servicio.

3.5.2 Análisis de Throughput

El análisis de *throughput* se realiza desde dos perspectivas: *throughput* de usuario y *throughput* de celda para los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa.



- UMi SC

En la Figura 3.12 se muestra la CDF de *throughput* de celda en el escenario UMi SC. La distribución de 10 UEs por sector presenta la mayor probabilidad de alcanzar un *throughput* alto a partir de 460 Mbps en comparación a la distribución de 166 UEs por sector.

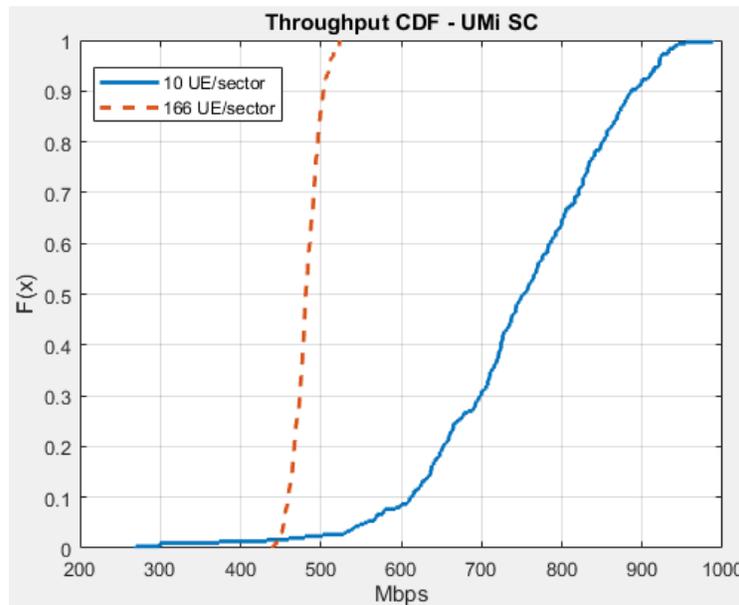


Figura 3.12 CDF de Throughput UMi SC en función del número de UEs.
Fuente por Autor.

De acuerdo a la Figura 3.12 y la Tabla 3.7, el *throughput* de celda en el escenario UMi SC con una distribución de 10 UEs por sector es menor a 988 Mbps, con una probabilidad de servicio de 38,43% y con 166 UEs por sector el *throughput* está por debajo de 523,6 Mbps con una probabilidad de servicio de 78,43%, por lo tanto, se observa que a mayor probabilidad de servicio se obtiene menor *throughput*. El *throughput* de celda de 988 Mbps se alcanza cuando se asigna la mayor cantidad de RB con la modulación de 256QAM para UEs *outdoor* e *indoor*. El *throughput* disminuye debido al aumento de los UEs *indoor* con esquemas de modulación básicos, además, que se reparten los RB equitativamente para los UEs *indoor* y *outdoor*.

El *throughput* de celda más bajo en el escenario UMi SC se presentó para la distribución de 10 UEs por sector, el 1,667% de los UEs tienen un *throughput* inferior a 432,8 Mbps, esto ocurre cuando se tienen pocos UEs *outdoor* con servicio comparado con los UEs *indoor* con servicio.



En la Tabla 3.8 se relacionan los resultados de probabilidad de asignación de las modulaciones para los UEs con servicio y la probabilidad de UEs sin servicio o sin asignación. Para una distribución de 166 UEs por sector, se tiene que las modulaciones QAM y 16QAM en conjunto son asignadas con mayor probabilidad, en comparación a la modulación 256QAM, esto implica que el *throughput* será menor de manera general, por el contrario, para la distribución de 10 UEs por sector se observa que la modulación con mayor probabilidad de asignación es 256QAM, que refleja los resultados obtenidos anteriormente.

Escenario	UEs/sector	Prob QAM (%)	Prob 16QAM (%)	Prob 64QAM (%)	Prob 256QAM (%)	Sin Asignación (%)
UMi SC	10	8,0556	1,8556	0,0333	28,4889	61,5666
	166	19,7932	19,4893	7,2035	31,9525	21,5615

Tabla 3.8 Probabilidad de asignación de modulaciones en función de UE - UMi SC. Fuente por Autor

En la Figura 3.13 se observa el *throughput* por UE para las distribuciones de 10 UEs y 166 UEs por sector. Para la distribución de 10 UEs por sector se logra el mayor *throughput* de UE y este depende del número de RB que se asignen.

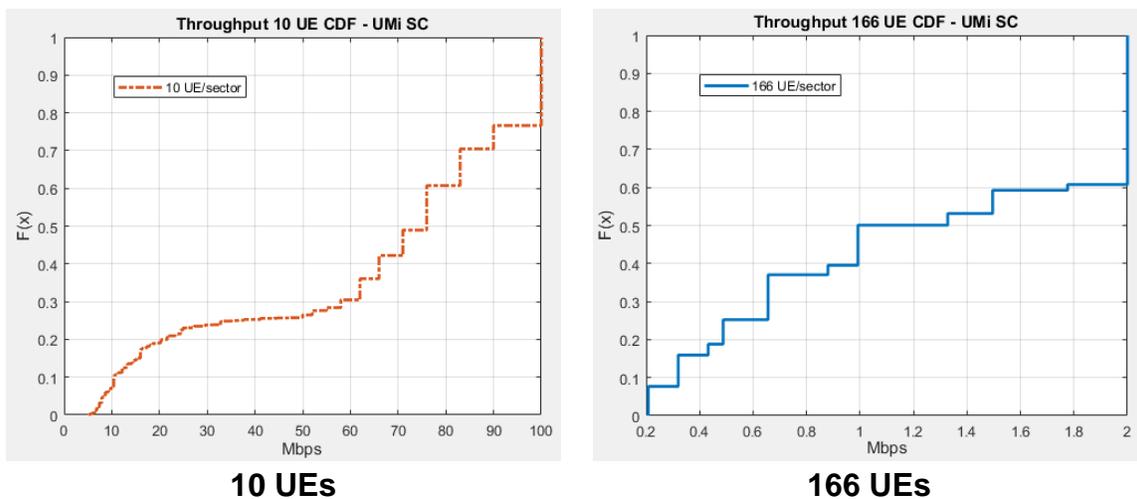


Figura 3.13 CDF de *Throughput* de UE - UMi SC. Fuente por Autor.

El *throughput* por UE para la distribución de 166 UEs por sector está en el rango de 0,208 Mbps a 2 Mbps, para 10 UEs por sector está entre 5,2 Mbps y 100 Mbps. El 39,23% de los UEs tienen un *throughput* de 2 Mbps para 166 UEs por sector debido a que allí se acumulan todos los valores de probabilidad, se considera bajo en



comparación al *throughput* que se alcanza con una distribución de 10 UEs por sector. Para la distribución de 10 UEs por sector se tiene que el 23,36% de los UEs presenta un *throughput* de 100 Mbps.

En la Figura 3.14 se muestra los resultados de *throughput* de celda para el escenario UMi SC, en la izquierda está la PDF para la distribución de 10 UEs por sector y en la derecha la distribución de 166 UEs por sector. Se observa que la dispersión de los datos es mayor en la distribución de 10 UEs por sector y asumiendo una distribución normal en los resultados, la varianza es de 116,5 y para la distribución de 166 UEs por sector la varianza es de 16,9.

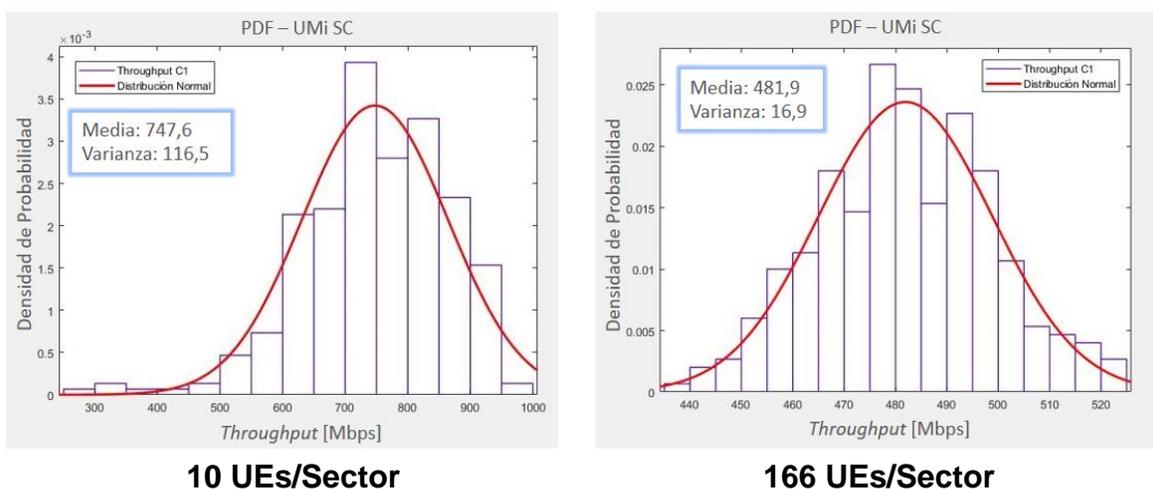


Figura 3.14 pdf *throughput* UMi SC. Fuente por Autor.

El *throughput* de celda promedio es 747,6 Mbps y 481,9 Mbps para las distribuciones de 10 y 166 UEs por sector, respectivamente. A menor distribución de UEs por sector el *throughput* de celda se incrementa y también su varianza, esto se debe a la disminución de la probabilidad de servicio de UEs *indoor* que además presentan asignación de modulaciones de alto orden (64QAM y 256QAM) por lo tanto el *throughput* es mayor.

- **UMi OS**

En el escenario UMi OS, el *throughput* de celda no es tan alto en comparación al escenario UMi SC presentado en la Figura 3.15, esto se debe a la interferencia del escenario UMi OS que no permite asignar modulaciones superiores a 64QAM como se muestra en la Tabla 3.9. El *throughput* de celda más alto se obtiene con una distribución de 10 UEs por sector y es inferior a 291,6 Mbps.

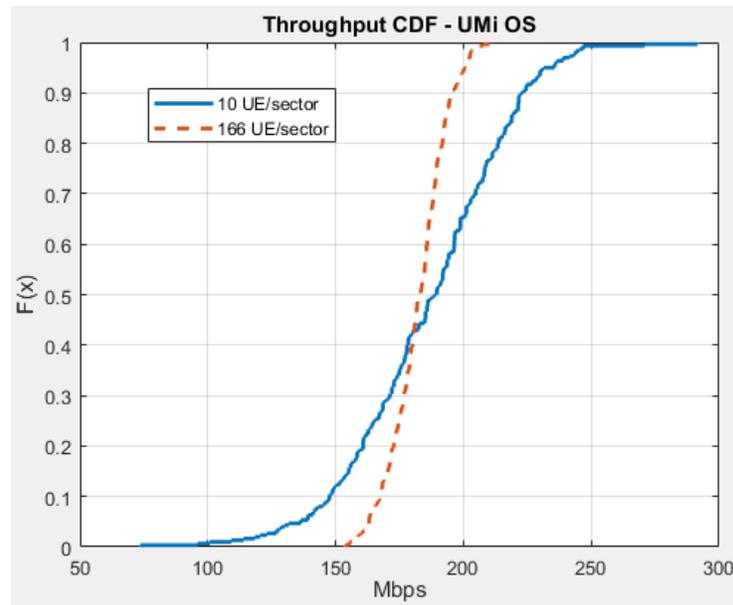


Figura 3.15 CDF Throughput UMi OS. Fuente por Autor.

El *throughput* de celda con menor desempeño se alcanza en una distribución de 10 UEs por sector, porque la cantidad de UEs *outdoor* con servicio es menor comparado con los UEs *outdoor* con servicio en la distribución de 166 UEs por sector, para la distribución de 10 UEs por sector se obtiene que el 43% de los valores de *throughput* de celda son inferiores a 180 Mbps.

En la Tabla 3.9 se muestran las probabilidades de asignación de los esquemas de modulación y la probabilidad de UEs sin servicio o sin asignación, la probabilidad de asignar una modulación 256QAM es nula y la modulación con mayor probabilidad de asignación, tanto para 10 UEs como para 166 UEs por sector, es QAM como se evidencia en la Tabla 3.9, lo anterior se ve reflejado en el bajo *throughput* de la celda en el escenario UMi OS en comparación al escenario UMi SC donde ocurre lo contrario con la probabilidad de las modulaciones detalladas en la Tabla 3.8 (256 QAM mayor probabilidad de asignación que QAM).

Escenario	UEs/sector	Prob QAM (%)	Prob 16QAM (%)	Prob 64QAM (%)	Prob 256QAM (%)	Sin Asignación (%)
UMi OS	10	32,8250	7,3778	0,0083	0	59,7889
	166	33,7535	7,7197	0,0070	0	58,5198

Tabla 3.9 Probabilidad de modulaciones en función de UEs - UMi OS. Fuente por Autor



En la Figura 3.16 se muestran los resultados del *throughput* de UE que se logra en el escenario UMi OS. Comparado con la Figura 3.12 del escenario UMi SC, se observa que el *throughput* por UE en el escenario UMi OS para 166 UEs por sector, es mayor dado que se tiene menor probabilidad de servicio en comparación al escenario UMi SC, por lo tanto, se asignan más RB por UEs.

El *throughput* por UE para una distribución de 166 UEs por sector es menor a 3,74 Mbps. Para una distribución de 10 UEs por sector se observa que el 100% de los valores de *throughput* son inferiores a 66,4 Mbps.

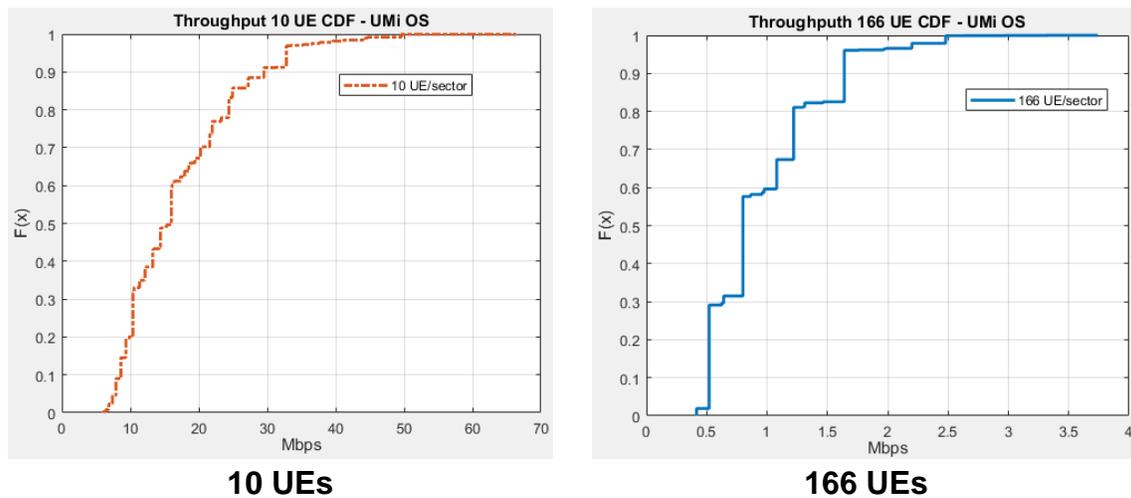
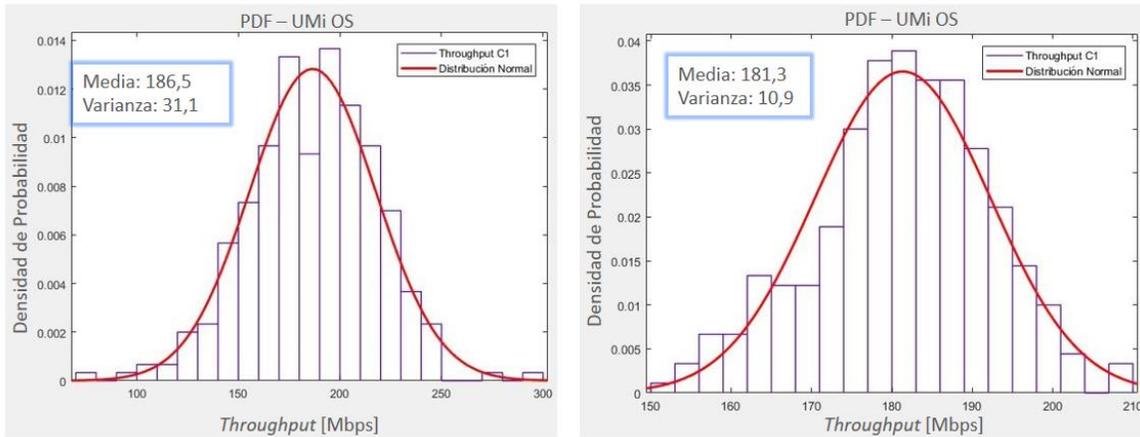


Figura 3.16 CDF de *Throughput* de UE - UMi OS. Fuente por Autor.

La Figura 3.17 presenta los resultados de pdf de *throughput* de celda para UMi OS con distribuciones de 10 y 166 UEs por sector. Se observa que el *throughput* promedio para las dos distribuciones es mucho menor comparado con UMi SC de la Figura 3.14 y se debe a la interferencia en el escenario, sus valores son 186,5 y 181,3 Mbps para las distribuciones de 10 y 166 UEs por sector, respectivamente. La distribución de 10 UEs por sector presenta mayor varianza que la distribución de 166 UEs por sector, varianza de 31,1 y 10,9 respectivamente, presentando el mismo comportamiento que en el escenario UMi SC en menor escala, esto es a menor distribución de UEs por sector el *throughput* y la varianza se incrementan.



10 UEs/Sector

166 UEs/Sector

Figura 3.17 pdf de *throughput* UMi SC. Fuente por Autor.

- **UMa**

El *throughput* por celda en el escenario UMa se muestra en la Figura 3.18. La celda presenta un *throughput* elevado para las distribuciones de 10 UEs y 166 UEs por sector a causa de la baja probabilidad de servicio de UEs *indoor* con SINR menor a 16,4 dB como se detalla en la Figura 3.6, con esquemas de modulación menor a 256QAM.

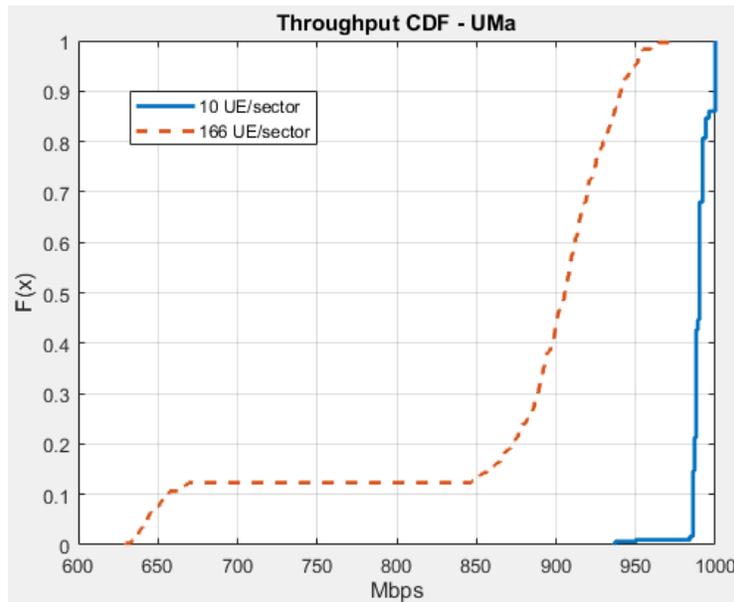


Figura 3.18 CDF de *Throughput* UMa en función del número de UEs. Fuente por Autor



En el escenario UMa, para 10 UEs por sector el *throughput* por celda es superior a 800 Mbps y el *throughput* máximo es de 1000 Mbps, la celda tiene el 4% de probabilidad de obtener este *throughput*. Cuando se asigna la mayor cantidad de RBs por UE, el *throughput* se incrementa y esto depende de los UEs con servicio, la CDF de *throughput* para 166 UEs por sector presentó un salto entre 662,1 Mbps y 792,5 Mbps, esto ocurre cuando los UEs con servicio son mayores a 333 por celda y se asigna 2 RBs por UE, entonces quedan RBs sin asignar por el planificador de recursos *Round Robin*. UMa es el escenario con el *throughput* de celda más alto respecto a los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa con distribución de 10 y 166 UEs por sector.

La Tabla 3.10 presenta las probabilidades de asignación de las modulaciones y la probabilidad de UEs sin servicio o fuera de rango de la celda para el escenario UMa, donde se evidencia que a mayor número de UEs solicitantes se asignan todos los esquemas de modulación.

Escenario	UEs/ sector	Prob QAM (%)	Prob 16QAM (%)	Prob 64QAM (%)	Prob 256QAM (%)	Sin Asignación (%)
UMa	10	0,5489	1,1636	3,6094	55,4555	39,2226
	166	2,9655	1,0730	0,8541	58,7219	36,3855

Tabla 3.10 Probabilidad de modulaciones en función de UE - UMa.
Fuente por Autor.

La Tabla 3.10 presenta los resultados de probabilidad de asignación de modulación para UEs. Para la distribución de 166 UEs por sector se observa un crecimiento de las probabilidades de asignación de modulación QAM y 256QAM y una disminución en la probabilidad 64 QAM, esto se debe a la disminución en la potencia de ruido del sistema en función del ancho de banda asignado a los UEs que es menor.

En la Figura 3.19 se muestra la CDF de *throughput* por UE para la distribución de 10 y 166 UEs por sector. De acuerdo a esta figura, todos los UEs tendrán un *throughput* menor a 90 Mbps porque al ser pocos UEs con servicio se asignan más RB por UE. Para 166 UEs por sector el *throughput* es menor a 3 Mbps y se debe a que se asignan 3 RB por UE con modulación 256QAM y codificación 3/4.

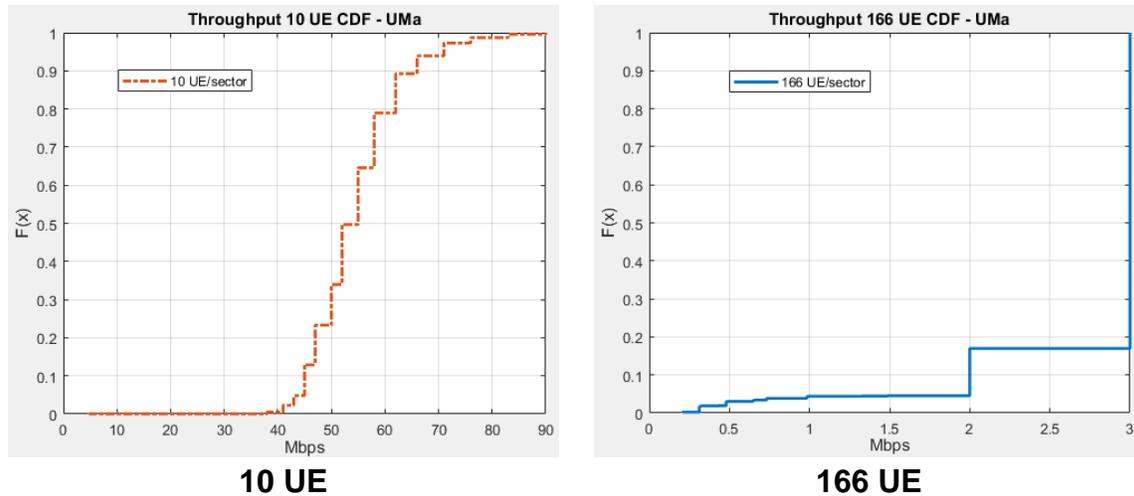
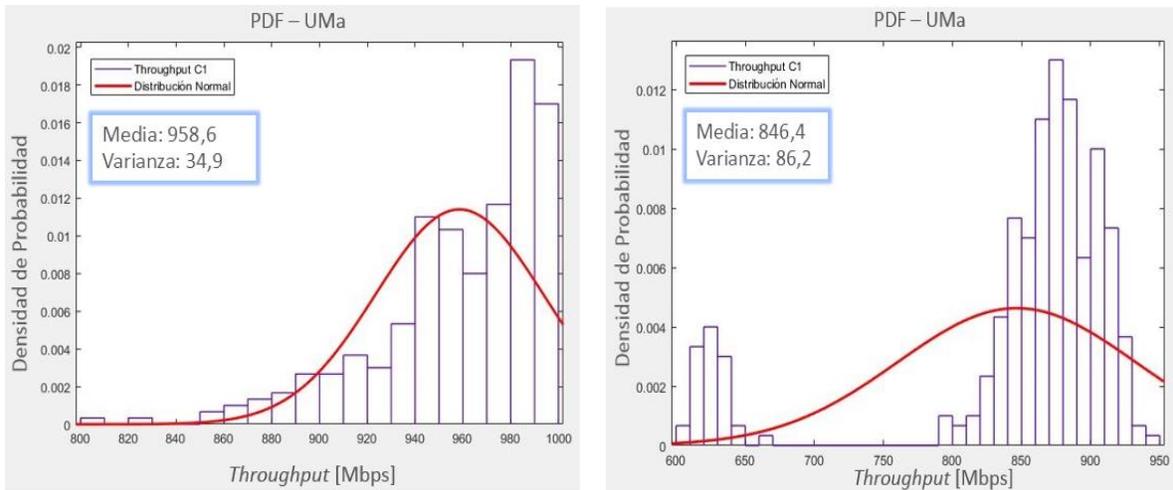


Figura 3.19 CDF de Throughput de UE - UMa. Fuente por Autor

El 95,28% de los UEs presentan un *throughput* superior a 40 Mbps para la distribución de 10 UEs por sector y se debe a la baja probabilidad de servicio de UEs *indoor*. El *throughput* de UE depende del número de UEs que solicitan servicio al gNB y el esquema de modulación con codificación, la relación entre *throughput* y número de UEs es inversamente proporcional porque al incrementar los UEs con servicio, el planificador *Round Robin* asigna menos RB por UE.

La Figura 3.20 presenta los resultados de *throughput* de celda para las distribuciones de 10 y 166 UEs por sector. La distribución de 10 UEs por sector tiene el *throughput* de celda promedio más elevado y es de 958,6 Mbps y la varianza de los datos de *throughput* es de 34,9. A diferencia de los escenarios UMi SC y UMi OS, la varianza no se incrementa cuando la distribución de UEs es menor, esto se debe a la mínima probabilidad de servicio de UEs *indoor* según Tabla 3.7, por esto los UEs con servicio en su mayoría son *outdoor* y generalmente con modulación 256QAM Tabla 3.10.

Para la distribución de 166 UEs por sector el *throughput* de celda promedio es de 846,4 Mbps y comparado con los escenarios UMi SC y UMi OS es mayor para las distribuciones de 10 UEs por sector.



10 UEs

166 UEs

Figura 3.20 pdf de *throughput* de celda UMa. Fuente por Autor.





CAPÍTULO IV.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

4.1 INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de grado analizó la capacidad de una red celular 5G haciendo uso de mmWave, considerando un modelo de simulación a nivel de sistema y el modelo de pérdidas CI de NYU para mmWave, generando resultados en el enlace descendente (DL) de desempeño del sistema en términos de probabilidad de servicio, capacidad de usuarios y *throughput*. Este capítulo da a conocer las conclusiones y trabajos futuros a partir del modelo de simulación a nivel de sistema.

4.2 CONCLUSIONES

Teniendo en cuenta los casos de estudio planteados en el trabajo de grado, se realizó la evaluación de la capacidad de una red celular 5G en términos de potencia de transmisión, probabilidad de servicio de UEs y *throughput* con el modelo de simulación a nivel de sistema, donde se concluye que:

- El modelo CI es más simple porque sólo tiene un parámetro de ajuste fácil de calcular, además, proporciona precisión prácticamente semejante al modelo ABG sin realizar ajustes al parámetro PLE por distancia y frecuencia. Para los escenarios UMi SC, UMi OS y UMa, se observa que, para cortas distancias del enlace, el modelo ABG predice menores pérdidas que el modelo CI y para distancias lejanas del enlace predice mayores pérdidas, considerando la configuración de parámetros α , β , γ y n fijos (sin hacer ajustes en función de la distancia y la frecuencia).
- El modelo de simulación permitió configurar los escenarios UMi SC, UMi OS, UMa y RMa con pocos cambios en la estructura del código, manteniendo parámetros generales, facilitando las pruebas y obteniendo resultados con un sistema común de red.
- El análisis de desempeño en frecuencia y potencia en el caso de estudio 1 y 2 del modelo de red 5G simulado, permitió determinar que la frecuencia de 28 GHz y la potencia de transmisión de 30 dBm obtuvieron la mejor probabilidad de servicio de UEs *indoor* y *outdoor* para los escenarios UMi



SC, UMi OS, UMa y RMa. Se debe resaltar que la frecuencia de 73 GHz brinda servicio a todos los UEs *outdoor* en los escenarios UMi SC y UMa.

- El peor desempeño de cobertura en una red 5G se presentó en los escenarios RMa y UMi OS porque son los escenarios que presentan mayores pérdidas totales debido a las grandes distancias del enlace (10^3 metros) y la interferencia del escenario, respectivamente. En el escenario RMa la implementación de la red no es factible para potencia de 30 dBm con frecuencia de 28 GHz porque las pérdidas limitan el radio de servicio. La distribución de las celdas en el escenario UMi OS que se consideró en este trabajo de grado, no es la ideal por las cortas distancias entre gNB y el escenario UMi OS con plaza abierta.
- Con una configuración de frecuencia de 28 GHz y potencia de 30 dBm, los UEs *outdoor* del escenario UMi SC presentaron valores de SINR superiores a 20 dB aproximadamente, por lo tanto, fueron los UEs con la mejor modulación asignada. La mayor probabilidad de servicio de UEs *indoor* se obtuvo en el escenario UMi SC y es de resaltar que al presentar la mejor probabilidad de servicio es el escenario con el *throughput* de celda más bajo que el escenario UMa.
- El mejor desempeño de *throughput* de celda se obtuvo en el escenario UMa porque tiene la mayor probabilidad de UEs *outdoor* con servicio, SINR altas y esquemas de modulación 256QAM. El *throughput* máximo por UE se presenta en el escenario UMi SC.

4.3 TRABAJOS FUTUROS

El análisis de capacidad de una red celular 5G, está a disposición para la integración de procedimientos relacionados con la tecnología 5G que permitan obtener análisis en el ámbito académico y realizar investigaciones de la misma. En busca de este objetivo se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Implementar interfaz gráfica que permita configurar los parámetros de la red como potencia, frecuencia, ancho de banda, número de UEs por sector y mostrar resultados gráficos de *throughput* de celda, *throughput* de UE, bloques de recursos, cobertura en el DL y UL.
- Implementar y analizar planificadores de recursos radio con control de potencia, además de implementar sistemas MIMO con el fin de mejorar la



eficiencia espectral o conformación de haz para brindar mayor cobertura en escenarios *indoor Hotspot*, UMi y UMa.

- Análisis e implementación de formas de onda como UFMC, FBMC y GFDM en una red 5G para comparar su desempeño con CP- OFDM en escenarios UMi, UMa e *indoor Hotspot*.



BIBLIOGRAFÍA

- [1] F. Boccardi, R. Heath, A. Lozano, T. Marzetta, y P. Popovski, «Five disruptive technology directions for 5G», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, n.º 2, pp. 74-80, feb. 2014.
- [2] J. G. Andrews *et al.*, «What Will 5G Be?», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 32, pp. 1065-1082, jun, 2014.
- [3] E. Martínez, «La evolución de la telefonía móvil», *Rev. Red*, vol. 1, pp. 1-6, 2001.
- [4] E. Barrera Vargas, R. D. Ortega Almeida «Análisis de cambios en características fundamentales de la telefonía celular desde 1G hasta 5G», Especialización Gerencia Comercial de Proyectos de Telecomunicaciones, División de Ingenierías y Arquitectura, Univ. Santo. Tomás, Bucaramanga, 2017.
- [5] Univ. Internacional de Valencia, «Evolución de la red de comunicación móvil, del 1G al 5G | VIU». [En línea]. Disponible en: <https://www.universidadviu.com/evolucion-la-red-comunicacion-movil-del-1g-al-5g/>. [Acceso: 18-jul-2018].
- [6] V. S. Jain *et al.*, «Overview on generations of network : 1G, 2G, 3G, 4G, 5G», *Computer Technology & Applications*, vol. 5, n.º 5, pp. 1789-1794, 2014.
- [7] L. J. Vora, «Evolution of Mobile Generation Technology : 1G To 5G and Review of Upcoming Wireless Technology 5G», *Sci. J. Impact Factor*, vol. 2, n.º 10, pp. 281-291, 2015.
- [8] 5GPPP, «White paper. 5G empowering vertical industries», 2016.
- [9] Recommendation ITU-R V.431-8 «Nomenclature of the frequency and wavelength bands used in telecommunications», p. 5, 2015.
- [10] J.A. Marín García, «Desarrollo de un Sistema de Simulación y Evaluación de las diferentes propuestas de Tecnologías de Acceso Radio para Redes 5G», Trabajo de Grado, Univ. Politécnica de Madrid, Madrid, España, 2017.
- [11] L. Lambert, «Global Harmonisation of 5G Spectrum.», *Louis's Blog*, [En línea]. Disponible en: <https://louislambert.com/2017/11/18/global-harmonisation-on-5g-spectrum-initially-proposed-by-huawei-in-nov-2017/> [Acceso: 12-jun-2018].



- [12] A. University *et al.*, «White paper on “5G channel model for bands up to 100 GHz”», *4th Int. Workshop 5G5G Commun. High. Freq. Bands 5GCHFB*, October, 2016.
- [13] P. Views, «White paper preliminary views and initial considerations on 5G RAN architecture and functional design», 2016.
- [14] ITU, «Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)», pag. 11, feb. 2017
- [15] 5GPPP Architecture Work Group, «White paper. View on 5G architecture (version 2.0)», 2017.
- [16] J. M. Hernando, L. M. Tomás, J. M. Riera, *Comunicaciones Móviles*, 3rd ed. Madrid: editorial Universitaria Ramón Areces, 2015.
- [17] M. Al-Imari, B. Mouhouche, y M. Nekovee, «Non-orthogonal FQAM for multiple access in the uplink of 5G wireless networks», *Proc. Int. Symp. Wirel. Commun. Syst.*, vol. 2016-October, pp. 75-79, 2016.
- [18] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. L. I, y Z. Wang, «Non-orthogonal multiple access for 5G: solutions, challenges, opportunities, and future research trends», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 53, n.º 9, pp. 74-81, 2015.
- [19] Z. Ding *et al.*, «Application of non-orthogonal multiple access in LTE and 5G networks», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 55, n.º 2, pp. 185-191, 2017.
- [20] G. Mazzini, «Power division multiple access», *IEEE 1998 International Conference on Universal Personal Communications*. (Vol. 1, pp. 543-546).
- [21] H. Nikopour y H. Baligh, «Sparse code multiple access», *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. PIMRC*, pp. 332-336, 2013.
- [22] H. Nikopour *et al.*, «SCMA for downlink multiple access of 5G wireless networks», *2014 IEEE Glob. Commun. Conf. Globecom 2014*, pp. 3940-3945, 2014.
- [23] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, y K. Higuchi, «Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access», *IEEE Veh. Technol. Conf.*, pp. 0-4, 2013.
- [24] Y. Tao, L. Liu, S. Liu, y Z. Zhang, «A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G», *China Commun.*, vol. 12, n.º 10, pp. 1-15, 2015.
- [25] Qualcomm, «5G Waveform & Multiple Access Techniques», *Slides*, 2015.
- [26] F.-L. L. and C. J. Zhang, «Signal processing for 5G», 2016.



- [27] D. Mattera, M. Tanda, y M. Bellanger, «Analysis of an FBMC/OQAM scheme for asynchronous access in wireless communications», *EURASIP J. Adv. Signal Process.*, vol. 2015, n.º 1, p. 23, 2015.
- [28] J. Fickers, A. Ghazisaeidi, M. Salsi, F. Horlin, P. Emplit, y G. Charlet, «Multicarrier offset-QAM modulations for coherent optical communication systems», *Conf. Opt. Fiber Commun. Tech. Dig. Ser.*, n.º 1, pp. 6-8, 2014.
- [29] I. Gaspar *et al.*, «GFDM - A framework for virtual PHY services in 5G networks», pp. 1-8, 2015.
- [30] S. K. Bandari, V. V Mani, y A. Drosopoulos, «OQAM implementation of GFDM», 2016 23rd International Conference on Telecommunications (ICT), 2016.
- [31] S. K. Bandari, «GFDM / OQAM implementation under rician fading channel», 2016 International Conference on Advances in Computing, Communications and Informatics (ICACCI), pp. 256-260, 2016.
- [32] G. Fettweis, M. Krondorf, y S. Bittner, «GFDM-generalized frequency division multiplexing», *Veh. Technol. Conf. 2009 VTC Spring 2009 IEEE 69th*, pp. 1–4, 2009.
- [33] «5G Waveforms GFDM FBMC UFMC F-OFDM Radio-Electronics.Com». [En línea]. Disponible en: <http://www.radio-electronics.com/info/cellulartelecomms/5g-mobile-cellular/modulation-waveforms.php>. [Acceso: 31-oct-2017].
- [34] Y. Qi y M. Tesanovic, «FQAM-FBMC design and its application to machine type communication», 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), pp. 1-6, 2016.
- [35] «Coexistence of 5G candidate waveforms with 3G, 4G, and PAN waveforms, Part 1». [En línea]. Disponible en: <https://www.wirelessdesignmag.com/article/2016/11/coexistence-5g-candidate-waveforms-3g-4g-and-pan-waveforms-part-1>. [Acceso: 31-oct-2017].
- [36] E. Ospina y L. Betancour «FBMC, una opción para un uso óptimo del espectro electromagnético», *Telecomunicaciones e Informática*, vol. 3, n.o 5, pp. 39-53, 2013.
- [37] H. Moliné Borrueal, «Tecnología 5G y formas de onda de acceso al medio», Trabajo de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Madrid, España, 2014.
- [38] S. Hong, M. Sagong, C. Lim, K. Cheun, y S. Cho, «FQAM: A modulation scheme for beyond 4G cellular wireless communication systems», *2013 IEEE Globecom Workshop GC Wkshps 2013*, pp. 25-30, 2013.



- [39] S. Wu, Y. Wang, M. Al-Imari, y M. Nekovee, «Frequency and quadrature amplitude modulation for 5G networks», *EUCNC 2016 - Eur. Conf. Netw. Commun.*, pp. 1-5, 2016.
- [40] H. Pradhan, «Block turbo code and its application to OFDM for wireless local area network», M.S. tesis, Dpto. Ing. Elect., National Institute of Technology Rourkela, 2009.
- [41] Lenovo y Motorola, «Views on next generation wireless access success», RAN workshop on 5G, Phoenix, 2015.
- [42] LG Electronics, «Vision, standardization, and technologies for 5G», RAN workshop on 5G, Phoenix, 2015.
- [43] Huawei Technologies, «Vision on 5G radio access technologies», RAN workshop on 5G, Phoenix, 2015.
- [44] Samsung, «Vision and schedule for 5G radio technologies», RAN workshop on 5G, Phoenix, 2015.
- [45] Media Tek Inc «Technology & standardization for 5G», RAN workshop on 5G, Phoenix, pp. 17-18, 2015.
- [46] S. Electric y S. P. Communications, «Industry vision and schedule for the new radio part of the next generation radio technology», RAN workshop on 5G, Phoenix, pp. 1-8, 2015.
- [47] D. Telekom, T. Italia, T. Sonera, y D. Network, «Group of operators ' common vision and priorities for Next Generation Radio Technology», RAN workshop on 5G, Phoenix, pp. 3-6, 2015.
- [48] ETRI, «Vision and enabling technologies: ETRI perspective», RAN workshop on 5G, Phoenix, 2015.
- [49] B. Timus *et al.*, «Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project», *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, January 2016, pp. 26-35, 2014.
- [50] F. J. García Rueda, «Modelos de propagación para comunicaciones móviles 4G y 5G», Trabajo de Grado, Escuela Técnica Superior de Ingeniería y Sistemas de Telecomunicación, Madrid, España, 2014.
- [51] «3GPP TR 36.873 V12.7.0 (2017-12), 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Study on 3D channel model for LTE (Release 12)». .



- [52] 3GPP, «TR 38.900 - V14.2.0 - Study on channel model for frequency spectrum above 6 GHz (Release 14)». 2016.
- [53] S. Piersanti, L. A. Annoni, y D. Cassioli, «Millimeter waves channel measurements and path loss models», *2012 IEEE Int. Conf. Commun. ICC*, pp. 4552-4556, 2012.
- [54] G. R. Maccartney, J. Zhang, S. Nie, y T. S. Rappaport, «Path loss models for 5G millimeter wave propagation channels in urban microcells», *Globecom - IEEE Glob. Telecommun. Conf.*, pp. 3948-3953, 2013.
- [55] G. MacCartney, T. Rappaport, M. Samimi, y S. Sun, «Wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models for future wireless communication system design», *IEEE Trans. Commun.*, vol. PP, n.º 99, pp. 1-1, 2015.
- [56] S. Sun *et al*, «Propagation path loss models for 5G urban micro-and macro-cellular scenarios», *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2016-July, pp. 1-6, 2016.
- [57] G. R. MacCartney Jr. y T. S. Rappaport, «Study on 3GPP Rural Macrocell Path Loss Models for Millimeter Wave Wireless Communications», in *2017 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, May 2017, pp. 1-7.
- [58] C. Hernández, V. Mirama, y V. Solarte, «Adaptación de metodologías de modelado y simulación para sistemas de telecomunicaciones fase 1», 2017.
- [59] «3GPP TR 38.913 V14.3.0 (2017-06), Technical Specification Group Radio Access Network; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies; (Release 14)»
- [60] G. R. MacCartney y T. S. Rappaport, «Rural macrocell path loss models for millimeter wave wireless communications», *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, n.º 7, pp. 1663-1677, 2017.
- [61] T. A. Thomas *et al*, «A prediction study of path loss models from 2-73.5 GHz in an urban-macro environment», *IEEE Veh. Technol. Conf.*, vol. 2016-July, 2016.
- [62] S. Sun *et al.*, «Propagation path loss models for 5G urban micro- and macro-cellular scenarios», in *Proc. IEEE 83rd Veh. Technol. Conf. (2016 IEEE VTC-Spring)*, 2016.
- [63] S. Sun, S. Member, T. S. Rappaport, y T. A. Thomas, «Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5G wireless communications», *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, n.o 5, pp. 2843-2860, 2016.



- [64] N. Solutions, «LTE RPESS LTE FDD coverage planning - cell range», 2014.
- [65] M. K. Samimi, G. R. MacCartney, S. Sun, y T. S. Rappaport, «28 GHz millimeter-wave ultrawideband small-scale fading models in wireless channels», in 2016 IEEE Vehicular Technology Conference (VTC-2016 Spring), pp. 15-18, 2015.
- [66] N. Solutions, «LTE RPESS Nokia solutions and networks academy», 2014.
- [67] A. C. Ordoñez y A. F. Polanco, «Algoritmo de conformación de haz en el dominio de la banda de ondas milimétricas (MMWAVE)», p. 94, 2018, sin publicar.
- [68] S. Sun, «NYUSIM — user manual», New York University and NYU WIRELESS, 2017.
- [69] H. J. Liebe, G. A. Hufford, and M. G. Cotton, “Propagation modeling of moist air and suspended water/ice particles at frequencies below 1000 GHz”, AGARD Conference Proceedings 542, 1993. [Online]. Available: <http://www.its.blrdoc.gov/publications/2670.aspx>
- [70] T. S. Rappaport y S. Deng, «73 GHz wideband millimeter-wave foliage and ground reflection measurements and models», 2015 IEEE Int. Conf. Commun. Workshop ICCW 2015, lcc, pp. 1238-1243, 2015.
- [71] A. J. Moreno Delgado, «Algoritmo de control de potencia para el simulador básico a nivel de sistema para LTE», Trabajo de Grado, Univ. del Cauca, p 74, 2017.
- [72] D. Giraldo Medina y D. F. Uribe Ante, «Simulador básico a nivel de sistema para lte con planificadores de recursos radio integrados», Trabajo de Grado, Univ. del Cauca, p. 95, 2015.
- [73] V. M. Quintero, C. M. Hernández, D. Giraldo, y D. F. Uribe, «Modelado y simulación de planificadores de recursos radio para una red LTE», Entramado, vol. 12, n.o 2, pp. 230-245, 2016.
- [74] M. K. Samimi y T. S. Rappaport, «3-D millimeter-wave statistical channel model for 5G wireless system design», *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 64, n.º 7, pp. 2207-2225, 2016.
- [75] G. R. MacCartney, T. S. Rappaport, S. Sun, y S. Deng, «Indoor office wideband millimeter-wave propagation measurements and channel models at 28 and 73 GHz for ultra-dense 5G Wireless Networks», *IEEE Access*, vol. 3, pp. 2388-2424, 2015.