

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN ENLACE DE COMUNICACIÓN 5G
HACIENDO USO DE SDR**



ASTRID DANIELA NARVÁEZ LÓPEZ.

ISABELA YANZA INSUASTY.

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos

Popayán

2022

**ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN ENLACE DE COMUNICACIÓN 5G
HACIENDO USO DE SDR**



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

ASTRID DANIELA NARVÁEZ LÓPEZ.

ISABELA YANZA INSUASTY.

Directora: MsC. Claudia Milena Hernández Bonilla

Universidad del Cauca

Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones

Departamento de Telecomunicaciones

Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL

Sistemas de Comunicaciones Móviles e Inalámbricos

Popayán

2022

*A mis padres, mi hermano, y mi familia, por ser mi apoyo incondicional,
Mi polo a tierra, por su amor sin limitantes,
A los amigos que me deja esta etapa de la vida y a mi IEEE,
Sin ustedes no hubiese sido posible,
A mis maestros, parte fundamental de este proceso,
A mi universidad del Cauca, la mejor de todas,
A Dios por darme la vida y permitirme realizar mis sueños.*

Isabela Yanza Insuasty

*A mis padres por ser el motor que impulsa mis sueños,
por su paciencia, amor y confianza en cada paso del proceso,
A mi hija porque en corto tiempo me ha enseñado que las mejores cosas de la vida
son aquellas llenas de aprendizaje y amor,
A mi familia que siempre estuvo dispuesta a escucharme y apoyarme,
A mis amigos y compañeros que llenaron de alegría
y aprendizaje esta etapa de vida
A mis maestros por ser un pilar en el camino recorrido,
Y a Dios por guiar mi vida y permitirme alcanzar mis sueños.*

Astrid Daniela Narváez L.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la MSc. Claudia Milena Hernández Bonilla, Directora del Proyecto, por sus valiosas orientaciones.

Al comité de programa de pregrado en Electrónica y Telecomunicaciones por sus aportes y recomendaciones, al grupo de investigación de Grupo de Radio e Inalámbricas - GRIAL, por su colaboración en el desarrollo del presente trabajo y a todos los ingenieros y docentes que hicieron parte de este camino universitario y que serán recordados con alegría.

También expresan un agradecimiento muy especial a sus familiares y amigos por su acompañamiento y apoyo incondicional, y sin los cuales no podrían culminar satisfactoriamente esta etapa de vida.

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1	1
MARCO TEÓRICO	1
1.1. EVOLUCIÓN DE LAS REDES	2
1.2. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVIL DE QUINTA GENERACIÓN	4
1.3. REQUISITOS DE LA RED 5G	6
1.4. SERVICIOS Y CASOS DE USO	10
1.5. ARQUITECTURA DE RED 5G	11
1.5.1. sdrNG-RAN	12
1.5.2. 5G-Core.....	12
1.5.3. Interfaz Radio	14
1.5.3.1. Nivel Físico 5G.....	15
1.5.4. Consideraciones de espectro 5G	28
1.6. MÉTRICAS DE DESEMPEÑO PARA UN ENLACE 5G	29
1.6.1. EVM	29
1.6.2. BER	30
1.6.3. Cobertura.....	31
1.6.4. SNR	31
1.7. SOFTWARE DEFINED RADIO	32
1.8. MATLAB	33
A. 5G Toolbox.....	34
B. Communications Toolbox	34
CAPÍTULO 2	35
DESARROLLO METODOLÓGICO	35
2.1. REQUERIMIENTOS	35
2.1.1. Definición del Problema	35
2.1.2. Requerimientos Funcionales	36
2.1.3. Requerimientos No Funcionales	36
2.2. DISEÑO DEL ENLACE	36
2.3. IMPLEMENTACIÓN	39
2.3.1. Características de simulación	40
2.3.1.1. Transmisión	40
2.3.1.2. Recepción	41

2.3.2.	Características Hardware	42
2.3.2.1.	Efectos de dispositivos Hardware en la transmisión y recepción de la señal	42
2.4.	PLAN DE PRUEBAS	43
CAPÍTULO 3	.....	44
PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	.....	44
3.1.	CONFIGURACIONES DEL ENLACE	44
3.1.1.	Prueba de Calibración	45
3.2.	PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO.....	50
3.2.1.	Escenario 1.....	50
3.2.1.1.	EVM.....	51
3.2.1.2.	SNR.....	52
3.2.1.3.	BER teórica	53
3.2.1.4.	BER vs SNR	54
3.2.2.	Escenario 2.....	55
3.2.2.1.	EVM.....	56
3.2.2.2.	SNR.....	57
3.2.2.3.	BER Teórica	58
3.2.2.4.	BER vs SNR	59
3.2.3.	Comparación de Escenarios de Prueba.....	60
3.2.3.1.	EVM.....	60
3.2.3.2.	SNR.....	62
2.3.4.	Análisis General	63
CAPÍTULO 4	.....	64
CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	.....	64
4.1.	CONCLUSIONES	64
4.2.	TRABAJOS FUTUROS	65
REFERENCIAS	.....	66
APENDICE A.	Instalación y Configuración de Paquetes para Prueba de Calibración en Windows	72

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Valores Mínimos de la Eficiencia Espectral del Quinto Percentil.	8
Tabla 2. Valores Mínimos de la Eficiencia Espectral Media.....	8
Tabla 3. Tipos de Movilidad.....	9
Tabla 4. Símbolos por Numerología OFDM.....	21
Tabla 5. Valores de Ancho de Banda según Rango de Frecuencia.....	40
Tabla 6. SCS en Función de la Numerología μ	40
Tabla 7. NRB en Función de SCS y BW.....	41
Tabla 8. Parámetros Fijos del Enlace.....	45
Tabla 9. Parámetros Variables del Enlace.....	45
Tabla 10. Configuración Prueba de Calibración.....	46

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Evolución de las Redes. Fuente por autor.....	2
Figura 2. Sistema 5G. Fuente por Autor.....	4
Figura 3. Línea de Tiempo de Especificaciones. Fuente por Autor.....	5
Figura 4. Línea de Tiempo Proyecto IMT-2020. Tomada y Adaptada de [14].....	6
Figura 5. Principales Servicios 5G y sus Casos de Uso. Tomada y Adaptada de [10].	10
Figura 6. Arquitectura 5G. Tomada y Adaptada de [17].....	11
Figura 7. Núcleo Móvil 5G. Fuente por Autor.....	13
Figura 8. OFDMA. Tomada y Adaptada de [28].....	17
Figura 9. Técnicas TDD y FDD. Tomada y Adaptada de [29].....	17
Figura 10. Multitrayecto entre Tx y Rx. Tomada de [13].....	18
Figura 11. Ejemplo CP-OFDM. Tomada y Adaptada de [31].....	20
Figura 12. Longitud de Ranura con CP Normal. Tomada y Adaptada de [35].....	21
Figura 13. Longitud de Ranura con CP Extendido. Tomada y Adaptada de [35].....	22
Figura 14. Bloque de Recursos Físico. Tomada de [3].....	23
Figura 15. Espacio de subportadoras según numerología.....	24
Figura 16. Estructura de Trama 5G. Tomada y Adaptada de [3].....	24
Figura 17. Diagrama de Estructura de Tiempo-Frecuencia SSB. Tomada y Adaptada de [43].....	27
Figura 18. Transmisor SDR. Tomada y Adaptada de [54].....	33
Figura 19. Receptor SDR. Tomada y Adaptada de [54].....	33
Figura 20. Metodología RUP. Tomada y Adaptada de [27].....	35
Figura 21. Modelo del Enlace. Fuente por Autor.....	37
Figura 22. Diagrama de Bloques Tx. Fuente por Autor.....	37
Figura 23. Diagrama de Bloques Rx. Fuente por Autor.....	37
Figura 24. Diagrama de Flujo del Enlace. Fuente por Autor.....	38
Figura 25. Diagrama de Bloques del Enlace.....	39

Figura 26. Montaje Experimental.....	42
Figura 27. Montaje Prueba de Calibración	46
Figura 28. Espectro de Potencia Señal Transmitida.....	47
Figura 29. Espectrograma de la Señal Recibida	47
Figura 30. Espectro de Potencia Señal Recibida.....	48
Figura 31. Correlación PSS vs Desplazamiento en Frecuencia.	48
Figura 32. Correlación SSS	49
Figura 33. Constelación del Canal PBCH.....	49
Figura 34. Estimaciones de SNR para el Canal PBCH-DMRS.....	50
Figura 35. EVM RMS de canal PBCH	50
Figura 36. Escenario de Prueba Interior.	51
Figura 37. Montaje en Escenario de Prueba Interior.	51
Figura 38. EVM vs Distancia Escenario 1.....	52
Figura 39. SNR vs Distancia Escenario 1	53
Figura 40. BER vs Distancia Escenario 1	54
Figura 41. BER vs SNR Escenario 1	55
Figura 42. Escenario de Prueba Exterior.....	56
Figura 43. Montaje Escenario de Prueba Exterior.	56
Figura 44. EVM vs Distancia Escenario 2.....	57
Figura 45. SNR vs Distancia Escenario 2.....	58
Figura 46. BER vs Distancia Escenario 2.....	59
Figura 47. BER vs SNR Escenario 2	60
Figura 48. EVM vs Distancia Configuración 1 Escenario 1 y 2.....	61
Figura 49. EVM vs Distancia Configuración 3 Escenario 1 y 2.....	61
Figura 50. SNR vs Distancia Configuración 1 Escenario 1 y 2	62
Figura 51. SNR vs Distancia Configuración 3 Escenario 1 y 2	63
Figura 52. Placas USRP Comunicación Cableada.....	72
Figura 53. Instalación de Complementos de Matlab.....	73
Figura 54. Paquete de Instalación USRP.	73
Figura 55. Interfaz de instalación USRP.....	74
Figura 56. Serial de Conexión	75
Figura 57. Código de configuración en TX	75
Figura 58. Código de Configuración en RX	75
Figura 59. Configuración de Propiedades de las placas USRP B210	76
Figura 60. Conexión Exitosa con USRP.....	78

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 Asociación de Tercera Generación.
3GPP2	<i>3rd Generation Partnership Project 2</i> , Proyecto Asociación de Tercera Generación 2.
4G	<i>Fourth Generation</i> , Cuarta Generación.
5G	<i>Fifth Generation</i> , Quinta Generación.
5G NR	<i>5G New Radio</i> , Nueva Radio 5G.
5GC	<i>5G Core</i> , Núcleo 5G.
ADC	<i>Analog Digital Converter</i> , Conversor Analógico a Digital.
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i> , Bloque de Función de Gestión de Acceso y Movilidad.
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i> , Sistema Avanzado de Telefonía Móvil.
API	<i>Application Programming Interface</i> , Interfaz de Programación de Aplicaciones.
AUSF	<i>Authentication Server Function</i> , Función de Servidor de Autenticación.
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> , Ruido Blanco Gaussiano y Aditivo.
BER	<i>Bit Error Rate</i> , Tasa de Error de Bit.
BS	<i>Base Station</i> , Estación Base.
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i> , Función de Distribución Acumulativa.
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Código.
CORESET	<i>Control Resource Set</i> , Conjunto de Recursos de Control.
CP	<i>Cyclic Prefix</i> , Prefijo Cíclico.
CP-OFDM	<i>Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal con Prefijo Cíclico.
CS	<i>Circuit Switch</i> , Conmutación de Circuitos.
CSI	<i>Channel Status Information</i> , Información del Estado del Canal.
CSI-RS	<i>Channel State Information Reference Signals</i> , Señales de Referencia de Información de Estado de Canal.
DAC	<i>Digital Analogy Converter</i> , Conversor de Digital a Analógico.
DCI	<i>Downlink Control Information</i> , Información de Control de Enlace Descendente.
DDC	<i>Digital Downlink Converter</i> , Conversor Digital Descendente.
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i> , Transformada Discreta de Fourier.

DL	<i>Down Link</i> , Enlace de Bajada.
DMRS	<i>Modulation Reference Signal</i> , Señal de Referencia de Demodulación.
DUC	<i>Digital Up Converter</i> , Conversor Digital Ascendente.
DVB-S2	<i>Digital Video Broadcasting</i> , Retransmisión de Video Digital.
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i> , Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución del GSM.
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i> , Banda Ancha Móvil Mejorada.
EMM	<i>Mobility Management Entity</i> , Entidad de Gestión de la Movilidad.
EPC	<i>Evolved Packet Core</i> , Núcleo de Paquete Evolucionado.
E-ULTRA	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access</i> , Acceso Universal de Radio Terrestre Evolucionado.
EVM	<i>Error Vector Magnitude</i> , Magnitud Del Vector de Error.
FBMC	<i>Filter Bank MultiCarrier</i> , Banco de Filtros de Múltiple Portadora.
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Frecuencia.
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia.
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i> , Transformada Rápida de Fourier.
FIET	Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
FPGA	<i>Field-Programmable Gate Array</i> , Arreglo de Compuertas Lógicas Programables en Campo.
FR1	<i>Frequency Range 1</i> , Rango de Frecuencia 1.
FR2	<i>Frequency Range 2</i> , Rango de Frecuencia 2.
GFDM	<i>Generalized Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación de División de Frecuencia Generalizada.
GNB	<i>Next Generation Node B</i> , Nodo B de Próxima Generación.
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i> , Servicio General de Paquetes Vía Radio.
GSA	<i>Global Mobile Suppliers Association</i> , Asociación Global de Fabricantes Móviles.
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i> , Sistema Global para las Comunicaciones Móviles.
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> , Solicitud de Repetición Automática Híbrida.
ICTs	<i>Information and Telecommunication Technologies</i> , Tecnologías de Información y Comunicación.
IDE	<i>Integrated Development Environment</i> , Entorno de Desarrollo Integrado.
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i> , Transformación Discreta Inversa de Fourier.

IF	<i>Intermediate Frequency</i> , Frecuencia Intermedia.
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i> , Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Internacionales.
IoT	<i>Internet of Things</i> , Internet de las Cosas.
IoV	<i>Internet of Vehicles</i> , Internet de Vehículos.
ISI	<i>Intersymbol Interference</i> , Interferencia entre Símbolos.
ITU	<i>International Telecommunication Union</i> , Unión Internacional de Telecomunicaciones.
LDPC	<i>Low Density Parity Check</i> , Códigos de Verificación de Paridad de Baja Densidad.
LTE	<i>Long Term Evolution</i> , Evolución a Largo Plazo.
M2M	<i>Machine to Machine</i> , Máquina a Máquina.
MAC	<i>Medium Access Control</i> , Control de Acceso al Medio.
MAI	<i>Multiple Access Interference</i> , Interferencia de Acceso Múltiple.
MIB	<i>Master Information Block</i> , Bloque de Información Maestro.
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> , Múltiples Entradas Múltiples Salidas.
MinTIC	<i>Ministry of Information Technologies and Communications</i> , Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
MMS	<i>Multimedia Message Service</i> , Mensajes Multimedia.
mMTC	<i>Massive Machine Type Communications</i> , Comunicaciones Masivas Tipo Máquina.
mmWave	<i>Millimeter Wave</i> , Ondas Milimétricas.
MS	<i>Mobile Station</i> , Estación Móvil.
MUSA	<i>Multi-User Shared Access</i> , Acceso Compartido Multiusuario.
NEF	<i>Network Exposure Function</i> , Función de Exposición de Red.
NG	<i>New Generation</i> , Nueva Generación.
NG-eNB	<i>New Generation Evolved Node B</i> , Nodo B de Nueva Generación Avanzado.
NOMA	<i>Non Orthogonal Multiple Access</i> , Acceso Múltiple No Ortogonal.
NR-RAN	<i>New Generation RAN</i> , Red de Acceso Radio de Nueva Generación.
NR-Core	<i>Next Generation- Core</i> , Núcleo de Nueva Generación.
NSA	<i>Non-StandAlone</i> , No Autónoma.
NSSF	<i>Network Slice Selection Function</i> , Función de Selector de Corte de Red.
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal.
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonales.
OMA	<i>Orthogonal Multiple Access</i> , Acceso Múltiple Ortogonal.
PBCH	<i>Physical Broadcast Channel</i> , Canal Físico de Transmisión.
PCF	<i>Policy Control Function</i> , Función de Control de Políticas.
PCI	<i>Physical Cell ID</i> , Capa Física de la Celda.

PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i> , Canal Físico de Control de Enlace Descendente.
PDMA	<i>Pattern Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Polarización.
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> , Canal físico Compartido de Enlace Descendente.
PIET	Programa de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones.
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i> , Canal de Acceso Aleatorio Físico.
PRB	<i>Physical Resources Block</i> , Bloques de Recursos Físicos.
PS	<i>Packet Switch</i> , Conmutación de Paquetes.
PSS-SSS	<i>Primary and Secondary Synchronization Signals</i> , Señales de Sincronización Primarias y Secundarias.
PT-RS	<i>Phase Tracking Reference Signals</i> , Señales de Referencia de Seguimiento de Fase.
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i> , Canal de Control de Enlace Ascendente Físico.
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i> , Canal Físico Compartido de Enlace Ascendente.
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> , Modulación de Amplitud en Cuadratura.
QoS	<i>Quality Of Service</i> , Calidad de Servicio.
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i> , Desplazamiento de Fase en Cuadratura.
RE	<i>Resource Element</i> , Elemento de Recurso.
RMSA	<i>Resource Spread Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Dispersión de Recursos.
RMS	<i>Root Mean Square</i> , Valor Cuadrático Medio.
RUP	<i>Rational Unified Process</i> , Proceso Racional Unificado.
SA	<i>Stand Alone</i> , Autónoma.
SC	<i>Single Carrier</i> , Portadora Única.
SCMA	<i>Sparse Code Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por Detección de Portadora.
SCS	<i>Subcarrier Spacing</i> , Espacio de Subportadora.
SDR	<i>Software Defined Radio</i> , Radio Definido por Software.
SDSF	<i>Structured Data Storage Network Function</i> , Función de Red de Almacenamiento de Datos Estructurados.
SIB	<i>System Information Block</i> , Bloques de Información del Sistema.
SMF	<i>Session Management Function</i> , Función de Gestión de Sesiones.
SMS	<i>Short Message Service</i> , Servicio de Mensajes Cortos.
SNR	<i>Signal to Noise Ratio</i> , Relación Señal a Ruido.
SRS	<i>Sounding Reference Signals</i> , Señales de Referencia de Sondeo.
TDD	<i>Time Division Duplexing</i> , Duplexación por División de Tiempo.

TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> , Acceso Múltiple por División de Tiempo.
TRxP	<i>Transmission Reception Points</i> , Puntos de Transmisión Recepción.
TSG-SA	<i>Technical Specification Group Service and System Aspects</i> , Aspectos del Servicio y del Sistema.
UDM	<i>Unified Data Management</i> , Gestión de Datos Unificada.
UDSF	<i>Unstructured Data Storage Network Function</i> , Función de Red de Almacenamiento de Datos no Estructurados.
UE	<i>User Equipment</i> , Equipos de Usuarios.
UL	<i>Up Link</i> , Enlace de Subida.
UL-SCH	<i>Uplink Shared Channel</i> , Canal Compartido de Enlace Ascendente.
UFMC	<i>Universal Filtered MultiCarrier</i> , Filtro Universal con Multiportadora.
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i> , Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles.
UPF	<i>User Plane Function</i> , Función de Plano de Usuario.
URLLC	<i>Ultra Reliable Low Latency Communications</i> , Comunicaciones Ultra Confiables y de Baja Latencia.
UIT-R	<i>International Telecommunication Union -Radiocommunication</i> , Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.
USRP	<i>Universal Software Radio Peripheral</i> , Periférico Radio de Software Universal.
V2V	<i>Vehicle to Vehicle</i> , Vehículo a Vehículo.
V2I	<i>Vehicle to Infrastructure</i> , Vehículo a Infraestructura.
V2X	<i>Vehicle To X</i> , Vehículo a Todo.
VSA	<i>Vector Signal Analyzer</i> , Analizador de Señales Vectoriales.
WCDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i> , Tecnología CDMA de Banda Ancha.
WIMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i> , Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas.
W-OFDM	<i>Window - Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> , Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal con Ventana.
WOLA	<i>Weighted Overlap and Add</i> , Superposición Ponderada y Adicionada.
WRC	<i>World Radiocommunications Conference</i> , Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones.



CAPÍTULO 1.

MARCO TEÓRICO

Los avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (ICTs, *Information and Telecommunication Technologies*) han generado retos cada vez mayores para los sistemas de comunicación móvil, producidos por el crecimiento masivo en el número de dispositivos conectados y el volumen de tráfico de datos en actividades de transmisión, recepción y procesamiento [1]. En torno a esta evolución, la Quinta Generación (5G, *Fifth Generation*) de redes de comunicación móvil se presenta como un campo de innovación imprescindible para la creación de redes más inteligentes, ofreciendo mejoras en velocidad, latencia, eficiencia espectral, consumo de energía, cobertura ubicua y alta fiabilidad; abarcando tres tipos de casos de uso: Banda Ancha Móvil Mejorada (eMBB, *Enhanced Mobile Broadband*), Comunicaciones Ultra Fiables y de Baja Latencia (URLLC, *Ultra Reliable, Low Latency Communications*) y Comunicaciones Masivas Tipo Máquina (mMTC, *Massive Machine Type Communications*), los cuales abren paso a nuevas aplicaciones y servicios para brindar una mejor experiencia de usuario [2]. Lo anterior, mediante el uso de nuevos requisitos y especificaciones de acceso inalámbrico con un nivel físico flexible en rangos de frecuencia operativas bajas de hasta 6 GHz como en los actuales sistemas de comunicación móvil y altas hasta 52,6 GHz o mayores que se esperan ser alcanzadas para futuras versiones de la tecnología [3].

La implementación de 5G a nivel de laboratorio se ha tornado atractiva para las instituciones de educación superior y centros de investigación que buscan estar a la vanguardia con los avances en el ecosistema 5G debido a su relevancia a nivel mundial. Sin embargo, los costos de equipos especializados que permiten implementar un laboratorio 5G son elevados y no pueden ser obtenidos con facilidad, por lo que se presentan tecnologías como la Radio Definido por Software (SDR, *Software Defined Radio*) que junto a herramientas de desarrollo software ofrecen facilidades para la investigación, implementación y análisis de este tipo de sistemas reduciendo costos y ofreciendo ventajas como mayor flexibilidad y escalabilidad para la infraestructura de comunicaciones inalámbricas [4]. El presente trabajo analiza el desempeño a nivel físico de un sistema de comunicación 5G haciendo uso de SDR en la banda de 3500MHz, además se evalúan diferentes métricas de desempeño bajo características propias definidas en la especificación 15 de 5G [5].

El documento se divide en 4 capítulos, organizado de la siguiente manera: en el primer capítulo se describe la evolución de las redes de comunicación móvil y las generalidades de los sistemas 5G. El segundo capítulo detalla el desarrollo metodológico, el diseño, implementación y pruebas para el modelo de enlace de comunicación 5G. En

el tercer capítulo se encuentran los resultados y el análisis de desempeño de la implementación realizada. Por último, en el cuarto capítulo se presentan las conclusiones y trabajos futuros.

1.1. EVOLUCIÓN DE LAS REDES

La evolución de las redes de comunicación es el cambio de analógico a digital, pasando de servicios de voz a la comunicación de datos de alta velocidad, junto a nuevas aplicaciones que mejoran la experiencia del usuario [6]. Estas mejoras requieren avances en la capacidad de transporte de datos y la reducción de latencia como se observa en la Figura 1.

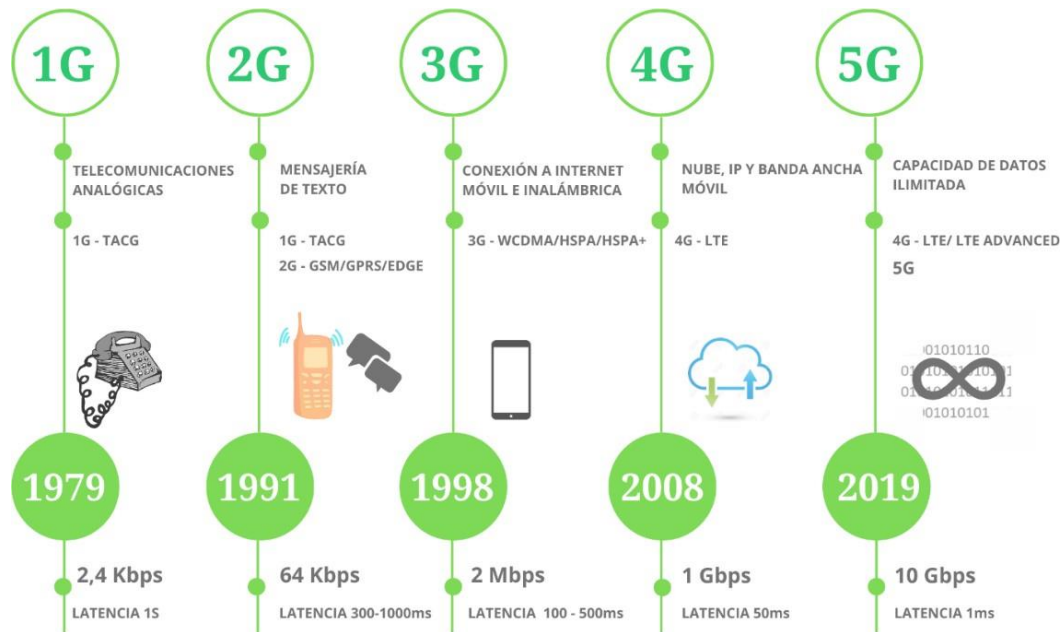


Figura 1. Evolución de las Redes. Fuente por autor.

La Primera Generación (1G, *First Generation*) de comunicación celular usó comunicaciones analógicas, transmitió y recibió principalmente voz sobre Conmutación de Circuitos (CS, *Circuit Switch*), utilizó formatos como el Sistema Avanzado de Telefonía Móvil (AMPS, *Advanced Mobile Phone System*), se basó en el Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) y alcanzó velocidades de 1 a 2.4 Kbps en frecuencias de 800 a 900 MHz y tenía poca seguridad [7] [8].

La Segunda Generación (2G, *Second Generation*) marcó el cambio de la comunicación móvil analógica a digital. En esta generación se empleó el Sistema Global para las Comunicaciones Móviles (GSM, *Global System for Mobile Communications*) el primer estándar para facilitar el roaming global. Los servicios prestados fueron voz y datos de baja velocidad, voz digital y Servicio de Mensajes Cortos (SMS, *Short Message Service*). Las técnicas de acceso empleadas fueron Acceso Múltiple por División



de Tiempo (TDMA, *Time Division Multiple Access*) y Acceso Múltiple por División de Código (CDMA, *Code Division Multiple Access*). 2G alcanzó una velocidad en el rango de 14.4 Kbps a 64 Kbps y la comunicación se estableció por conmutación de circuitos [7] [8].

El aumento de los requerimientos en tasas de transmisión de datos, impulsaron la necesidad de la evolución de las tecnologías de 2G, lo que generó la aparición de las generaciones 2.5G y 2.75G, caracterizadas por incorporar nodos de Conmutación de Paquetes (PS, *Packet Switch*) a los nodos existentes de CS, haciendo uso de los estándares de Servicio General de Paquetes Vía Radio (GPRS, *General Packet Radio Service*) y Tasas de Datos Mejoradas para la Evolución del GSM (EDGE, *Enhanced Data Rates for GSM Evolution*), con una velocidad de 115 Kbps y 384 Kbps respectivamente, con servicios multimedia y correo electrónico [7].

Luego, la Tercera Generación (3G, *Third Generation*), a fin de satisfacer la creciente demanda de velocidades de datos de acceso celular, introdujo el Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, *Universal Mobile Telecommunications System*) basado en la tecnología CDMA de Banda Ancha (WCDMA, *Wideband Code Division Multiple Access*) alrededor del año 2000, para aumentar el número de conexiones, mejorar la calidad de voz y la velocidad de transferencia de datos. Fue estandarizada por el Proyecto de Cooperación de Tercera Generación (3GPP, *3rd Generation Partnership Project*) y 3GPP2 (3rd Generation Partnership Project 2), alcanzó velocidades de 384 Kbps a 2 Mbps, con servicios no solo de Mensajes Multimedia (MMS, *Multimedia Message Service*), sino también de transferencia de contenido de video, geolocalización, televisión móvil y video llamadas de mejor calidad [3] [8].

En 2010 inició la transición a la Cuarta Generación (4G, *Fourth Generation*), con el objetivo de optimizar la calidad de los servicios, disminuir la latencia y extender la seguridad de la red. Lo anterior mediante la implementación del estándar de Evolución a Largo Plazo (LTE, *Long Term Evolution*), que no solo implica cambios importantes en la interfaz aérea, sino, que abre paso a la Multiplexación por División de Frecuencia Ortogonal (OFDM, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) y la Duplexación por División de Tiempo (TDD, *Time Division Duplexing*) o Duplexación por División de Frecuencia (FDD, *Frequency Division Duplexing*), alcanzando una velocidad de 100 Mbps en el Enlace Descendente (DL, *Down Link*), con servicios como acceso web móvil, telefonía IP, servicios de juegos, televisión móvil de alta definición, videoconferencia, televisión 3D, computación en la nube, entre otros [8] [9].

La creciente demanda de tráfico de datos, en las redes inalámbricas de telefonía móvil y el poco espectro de frecuencias disponible, junto con las exigencias por parte de los usuarios, respecto a calidad, cobertura, velocidad de descarga y latencia, impulsaron a pensar en una nueva generación de red inalámbrica denominada 5G.

1.2. SISTEMAS DE COMUNICACIÓN MÓVIL DE QUINTA GENERACIÓN

5G se diseñó con el fin de soportar los nuevos requerimientos de las tecnologías móviles, mediante una variedad de mejoras, servicios y aplicaciones, en rangos de frecuencias definidos, liberando y potenciando entornos como el Internet de las Cosas (IoT, *Internet of Things*), realidad virtual y aumentada, vehículos autónomos, comunicaciones Máquina a Máquina (M2M, *Machine to Machine*), Vehículo a Vehículo (V2V, *Vehicle to Vehicle*), Vehículo a Infraestructura (V2I, *Vehicle to Infrastructure*) y servicios Big Data. Una visión general de los servicios que serán soportados en 5G se muestran en la Figura 2 [10].



Figura 2. Sistema 5G. Fuente por Autor.

Los requerimientos 5G, demandan nuevas definiciones de arquitectura, tecnologías de acceso, algoritmos a nivel físico y pila de protocolos, que han sido el resultado de la investigación y el desarrollo desde hace casi una década por parte de las organizaciones de estandarización internacional, empezando con la definición de la tecnología de acceso inalámbrico Nueva Radio 5G (5G-NR, *5G-New Radio*), a cargo de 3GPP, que la llamó NR porque su interfaz aérea no sería compatible con versiones anteriores de ningún estándar 4G [11]. En septiembre de 2015 se llevó a cabo el primer taller 5G en Phoenix, EE. UU, que marcó el inicio de esta tecnología. 3GPP dividió esta estandarización en dos fases que contienen desde la especificación 15 hasta la 17.

Como se observa en la línea de tiempo de la Figura 3, en la primera fase fue entregada la especificación 15 que incluyó características técnicas importantes para el inicio de los despliegues y estudios del ecosistema a cargo de 3GPP desde el 2016 [3]. Esta especificación se limitó a la operación NR No Autónoma (NSA, *Non-StandAlone*),



donde la implementación de la infraestructura 5G dependía del núcleo de red LTE para el acceso y la movilidad, pero más adelante para las versiones finales de la especificación 15, disponibles desde 2018, se exploró el funcionamiento NR Independiente (SA, *StandALone*), para aprovechar las ventajas de los nuevos casos de uso aislados del núcleo LTE. Con la finalización de la especificación 15, 3GPP se enfocó en la primera etapa de la especificación 16, conocida como etapa de trabajo o Fase 2 de 5G, en la cual a finales del año 2019 se realizaron cerca de 83 estudios, más otros trece relacionados con la especificación 17, que cubrían temas diversos como servicio de prioridad multimedia, servicios de capa de aplicación de Vehículo a Todo (V2X, *Vehicle To X*), acceso satelital, el soporte de red de área local, convergencia inalámbrica/alámbrica y técnicas de radio novedosas. Concluyendo en 2020 este proceso con la definición de una red totalmente autónoma o NSA, y abriendo paso a la adición de nuevas funcionalidades en Versiones posteriores [12].

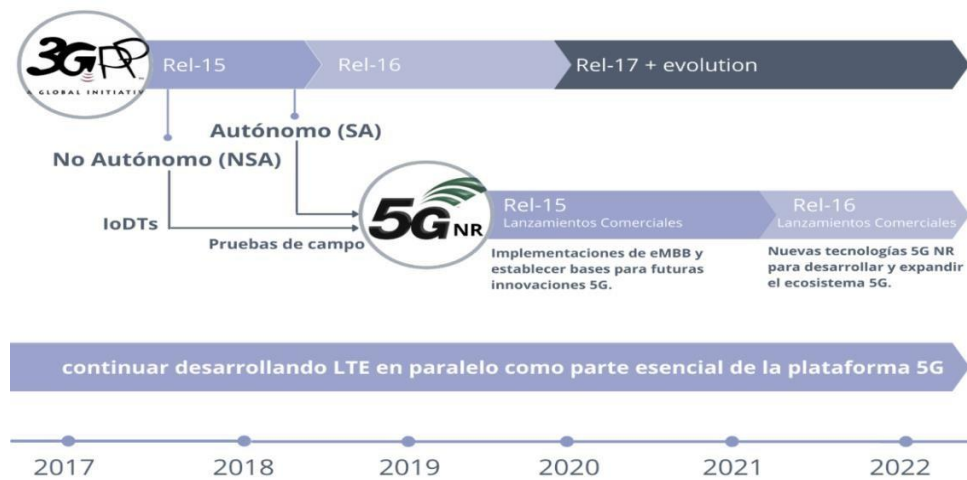


Figura 3. Línea de Tiempo de Especificaciones. Fuente por Autor.

Por otro lado, el grupo de Radiocomunicaciones de la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT-R, *International Telecommunication Union - Radiocommunication*) dedicado a desarrollar el marco de estándares para los Sistemas de Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT, *International Mobile Telecommunications*), que abarca IMT-2000 e IMT- *Advanced* con las perspectivas de la industria 3G y 4G, continúa evolucionando junto a su grupo de trabajo 5D en el desarrollo de la especificación IMT-2020 para redes, servicios y dispositivos 5G a escala regional e internacional. En la Figura 4 se observa la línea de tiempo de las tres etapas del proyecto IMT-2020 donde la primera fase, se encargó de los requerimientos técnicos de la red 5G; la segunda fase, el estudio las tecnologías candidatas para la interfaz radio 5G según los requerimientos de la anterior fase, y la tercera buscó estandarizar la red 5G con los requerimientos y tecnologías necesarias para su implementación [13].

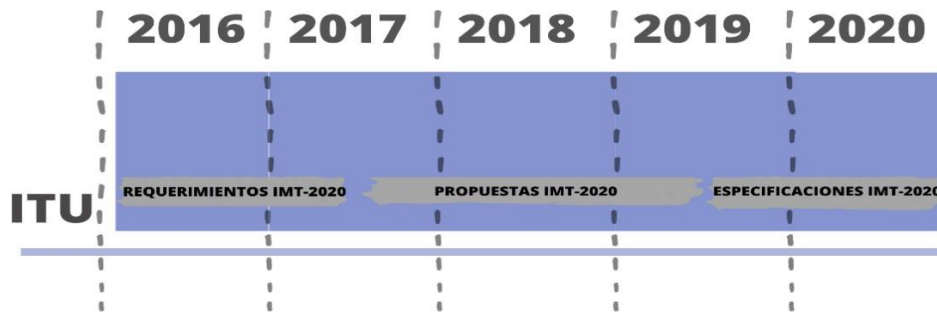


Figura 4. Línea de Tiempo Proyecto IMT-2020. Tomada y Adaptada de [14].

Con base en lo anterior, se ha promovido alrededor del mundo la implementación de sistemas de prueba de comunicación que permitan conocer las capacidades de la tecnología 5G en escenarios reales. Países como Estados Unidos, China, Japón y Corea del Sur han realizado los primeros despliegues de esta tecnología, ofreciendo servicios 5G a sus usuarios, con estrategias de gestión de espectro acordes a la banda empleada [3]. Por otro lado, aunque en América Latina prevalecen las comunicaciones 3G y 4G, países como: Chile, México, Brasil, Argentina, Costa Rica, Uruguay y Colombia, muestran avances para la implementación futura de 5G. En el caso de Colombia se propuso un plan de desarrollo 5G publicado en diciembre de 2019, en el cual se establece el camino de implementación de la tecnología en todas las regiones del país, posteriormente, en julio de 2020 se otorgaron permisos para el desarrollo de pilotos en la banda de 3500 MHz [15], para lograr que dicha tecnología fuese una realidad antes del 2022 favoreciendo inicialmente el entorno de salud con pilotos que facilitan la atención médica. Otro de los avances es la elaboración de un diagnóstico de las medidas regulatorias, normativas o técnicas de la tecnología a cargo de la ANE como de la atribución actual de las bandas de frecuencias clave para el despliegue con el fin de brindar mayor cobertura e incluir todos los casos de uso que faciliten la masificación de la tecnología 5G.

1.3. REQUISITOS DE LA RED 5G

Los nuevos servicios, aplicaciones y casos de uso de 5G con el fin de ofrecer una mejor experiencia de usuario, tienen requisitos contenidos en la especificación R15-SG05-C-0040 de la UIT-R, relacionados con el desempeño de las tecnologías de interfaz radioeléctrica candidatas a IMT-2020 que definen el ecosistema 5G. Dichos requisitos se describen a continuación [16]:

A. VELOCIDAD MÁXIMA DE DATOS

Es la tasa de datos máxima alcanzable, se define para una única Estación Móvil (MS, *Mobile Station*) y se representa como la relación entre la eficiencia espectral de la banda en uso y el ancho de banda del canal. 20 Gbps para el DL y 10 Gbps para el



Enlace Ascendente (UL, *Up Link*) es el requisito mínimo para conseguir una velocidad máxima de datos [16].

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de eMBB.

B. Eficiencia Espectral Máxima

Es la velocidad o tasa de datos máxima en condiciones ideales normalizadas por el ancho de banda del canal, y hace referencia a los bits de datos recibidos asumiendo condiciones libres de errores asignables a una sola MS. Los requisitos mínimos para las eficiencias espectrales máximas son 30 bps/Hz para DL y 15 bps/Hz para UL [16].

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de eMBB.

C. Velocidad de Datos de Usuario

Es el 5% de la Función de Distribución Acumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) del *throughput*¹ de usuario, definido como el número de bits recibidos correctamente. Los valores objetivo para la velocidad de datos experimentada por el usuario son 100 Mbps en DL y 50 Mbps en UL [16].

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de eMBB.

D. Eficiencia Espectral de Usuario del Quinto Percentil²

Es el 5% de la CDF del *throughput* normalizado del usuario, y representa la relación entre el número de bits recibidos correctamente durante un cierto período de tiempo, dividido por el ancho de banda del canal³ [16].

Los valores mínimos para la eficiencia espectral del quinto percentil dependen del entorno y del enlace (UL-DL), como se observa en la Tabla 1 [16].

ENTORNO	UL	DL
Interiores–eMBB	0.21 bits/s/Hz	0.3 bps/Hz
Urbano–eMBB	0.15 bps/Hz	0.225 bps/Hz
Rural–eMBB	0.045 bps/Hz	0.12 bps/Hz

¹ *Throughput* es la velocidad de transmisión efectiva o envío de datos sin errores a través de un sistema [17].

² El percentil es una medida estadística utilizada para comparar datos. Puede tomar un valor de 0 a 100 que equivale al porcentaje de datos que son iguales o menores que un determinado valor. El Quinto percentil equivale al 5% de los datos que tendrán un valor igual o menor al de referencia.

³ El ancho de banda del canal para este propósito se define como el ancho de banda efectivo multiplicado por el factor de reutilización de frecuencia ($1/n$, donde n es el número de celdas). Cabe aclarar que el ancho de banda efectivo es el ancho de banda operativo normalizado considerando la relación de enlace ascendente y enlace descendente [16].



Tabla 1. Valores Mínimos de la Eficiencia Espectral del Quinto Percentil.

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de eMBB.

E. Eficiencia Espectral Media

Se define como el desempeño agregado por los Equipos de Usuarios (UE, *User Equipment*), es decir, el número de bits recibidos de manera correcta en determinado tiempo, dividido el ancho de banda del canal en una banda específica por el número existente en la red de Puntos de Transmisión Recepción (TRxP, *Transmission Reception Points*) [16].

Los valores mínimos para la eficiencia espectral media, dependen del entorno y del enlace (UL-DL) como se observa en la Tabla 2 [16].

ENTORNO	UL	DL
Interiores-eMBB	9 bps/Hz/TRxP	9 bps/Hz/TRxP
Urbano-eMBB	5.4 bps/Hz/TRxP	7.8 bps/Hz/TRxP
Rural-eMBB	1.6 bps/Hz/TRxP	3.3 bps/Hz/TRxP

Tabla 2. Valores Mínimos de la Eficiencia Espectral Media.

F. Capacidad del Tráfico de Área

Es el desempeño de tráfico total por área geográfica, depende de la eficiencia espectral, el despliegue de red y ancho de banda, el valor objetivo de este requerimiento es de $10 \text{ Mbps}/\text{m}^2$ en el entorno de prueba de interiores – eMBB [16].

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de eMBB.

G. Retardo

Existen diferentes tipos de retardo, entre ellos, el retardo del plano de control el cual se define como el tiempo que se tarda en realizar el cambio del estado inactivo al estado activo o transferencia de datos, y tiene como valor mínimo requerido 20 ms; y el retardo del plano de usuario que está definido por el tiempo en milisegundos desde que la fuente emisora envía hasta que el destino recibe, tiene como valor mínimo 4 ms para eMBB y 1 ms para URLLC [16].

H. Densidad de Conexión

Es el número total de dispositivos que cumplen con una Calidad de Servicio (QoS, *Quality Of Service*) específica por unidad de área en km^2 , debe lograrse para un ancho de banda limitado con un QoS adecuado, lo que implica la entrega de un mensaje



de cierto tamaño dentro de un tiempo definido y con cierta probabilidad de éxito. El requisito mínimo de densidad de conexión es de 1.000.000 de dispositivos por km^2 [16].

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de mMTC.

I. Eficiencia Energética

Es la capacidad que tiene la interfaz radio para reducir el consumo energético de la red de acceso con respecto a la capacidad de tráfico producido, en algunos casos se soporta por la eficiencia energética de la red y del dispositivo con el fin de brindar respaldo en la transmisión de datos [16].

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de mMTC.

J. Confiabilidad

Se relaciona con la capacidad de transmitir una cantidad determinada de tráfico dentro de un período de tiempo definido, con una alta probabilidad de éxito. El valor mínimo de la probabilidad de éxito en este requerimiento es de $1-10^{-5}$ para transmitir 32 Bytes en 1 ms, igual se impulsa a realizar estudios para transmitir hasta 100 Bytes [16].

K. Movilidad

Es la velocidad máxima que un dispositivo puede llegar a tener obteniendo una calidad aceptable en el servicio, sin pérdida de paquetes y conexión estable. Para 5G se tienen velocidades de hasta 500 km/h, como se observa en la Tabla 3 [16].

Tipos de movilidad	Velocidad
Estacionario	0 Km/h
Peatón	10 Km/h
Vehículos	10 Km/h hasta 120 Km/h
Vehículos de alta velocidad	120 Km/h hasta 500 Km/h

Tabla 3. Tipos de Movilidad.

L. Tiempo de interrupción de la movilidad

Es el periodo de tiempo mínimo durante el cual el UE no puede hacer intercambio de paquetes a ninguna Estación Base (BS, *Base Station*⁴), en este tiempo se pueden

⁴ La BS es un transmisor o receptor de radio que incluye una o varias antenas. Se utiliza en las redes de telecomunicaciones móviles y es el encargado de mantener la comunicación entre la red y los usuarios a través de un enlace de radio [18].



ejecutar procedimientos de red de acceso por radio, protocolos de señalización de control de recursos radio u otros intercambios de mensajes entre la MS y la red de acceso por radio, su valor mínimo es de 0ms [16].

Este requisito se define con fines de evaluación en el escenario de uso de eMBB y URLLC.

M. Ancho de banda

Es la cantidad de datos que se pueden transferir de un punto a otro dentro de una red en un período de tiempo específico [16].

Según la evaluación del IMT-2020 para la tecnología 5G NR se utilizan anchos de banda de hasta 100 MHz con frecuencias de portadora inferiores a 6 GHz, y de hasta 1GHz con frecuencias comprendidas en el rango de las ondas milimétricas [19] [16].

1.4. SERVICIOS Y CASOS DE USO

Según los patrones de uso IMT-2020 para 5G, la tecnología no sólo se limita a la banda ancha móvil, sino que soporta una variedad de escenarios emergentes con diferentes casos de uso, nuevos servicios, aplicaciones y requisitos como se observa en la Figura 5, cabe resaltar que no todos los requisitos se deben cumplir simultáneamente y varían según el escenario. De acuerdo con la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU, *International Telecommunication Union*), los principales casos de uso 5G son eMBB, mMTC y URLLC [9].

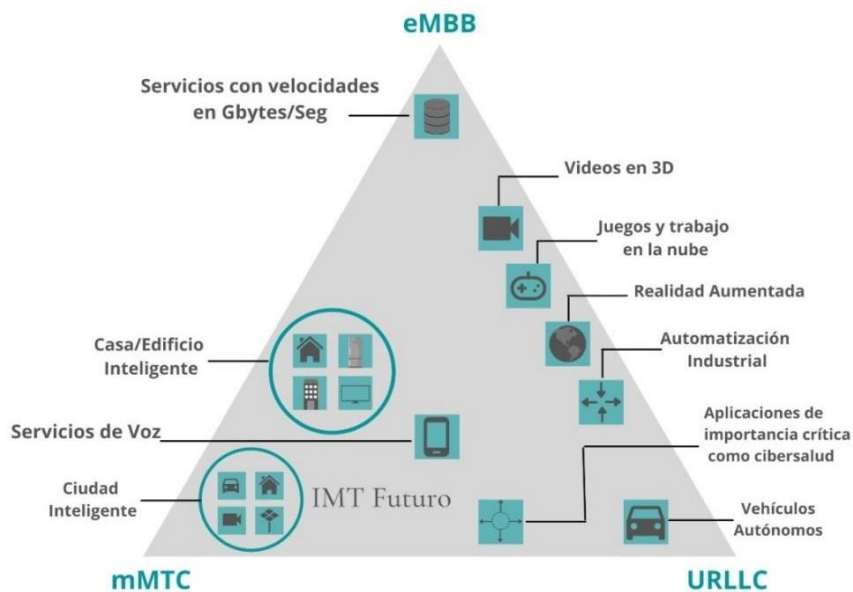


Figura 5. Principales Servicios 5G y sus Casos de Uso. Tomada y Adaptada de [10].



A continuación, se describen:

- **eMBB**: tiene como prioridad brindar altas velocidades de datos, comunicación de baja latencia en algunas áreas y acceso confiable de banda ancha en áreas con gran densidad de usuarios, mejorando la experiencia del usuario en aplicaciones como realidad virtual, conducción autónoma y demás industrias verticales [10].
- **mMTC**: tiene como prioridad brindar una gran cantidad de conexiones, menor tiempo de espera y consumo energético, para soportar la interconexión del mundo, IoT y demás industrias verticales, las cuales se encuentran en desarrollo con la evolución de las comunicaciones móviles [10].
- **uRLLC**: tiene como prioridad la alta confiabilidad y baja latencia, para soportar los requerimientos en la automatización de la industria, la telemedicina, redes inteligentes y demás industrias verticales [10].

Estos casos de uso, aplicaciones y servicios presentan posibilidad de adaptación o cambios según evolución y estandarización de la arquitectura.

1.5. ARQUITECTURA DE RED 5G

La arquitectura de red es la base de las nuevas especificaciones 5G donde se aportan innovaciones para soportar los nuevos servicios y aplicaciones, con el uso de nuevo espectro de alta frecuencia y equipamiento como Pequeñas Celdas (*Small Cells*) para ampliar la cobertura en áreas amplias o crear redes y antenas de Múltiples Entradas Múltiples Salidas (MIMO, *Multiple Input Multiple Output*), para enviar y recibir más datos simultáneamente y a más usuarios utilizando los mismos recursos [20]. 5G-NR emplea una arquitectura con características definidas por 3GPP en los conceptos de Red de Acceso Radio de Nueva Generación (NG-RAN, *New Generation RAN*) y Núcleo 5G (5GC, *5G-Core*) [12], que representan los componentes básicos de la red.

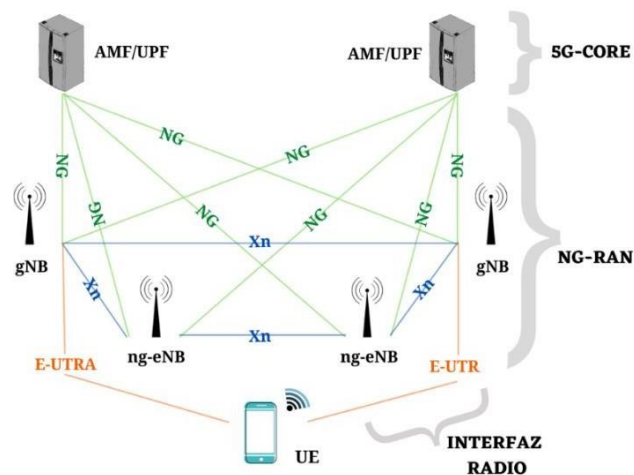


Figura 6. Arquitectura 5G. Tomada y Adaptada de [17].



En el diagrama de la Figura 6 se observa la arquitectura de la red 5G conformada por la NG-RAN y el 5G-Core definidos por 3GPP [21], con una interfaz aérea entre el Nodo B de Próxima Generación (gNB, *Next Generation Node B*) y un UE⁵, de nombre Nueva Radio (NR, *New Radio*) y una interfaz entre el Nodo B de Nueva Generación Avanzado (NG-eNB, *New Generation Evolved Node B*) y el UE, de nombre Acceso Universal de Radio Terrestre Evolucionado (E-UTRA, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access*) al igual que en LTE. Por otra parte, la interconexión entre gNB y NG-eNB se realiza a través de la interfaz Xn y cada nodo se conecta al núcleo mediante la interfaz de Nueva Generación (NG, *New Generation*) más concretamente al bloque de Función de Gestión de Acceso y Movilidad (AMF, *Access and Mobility Management Function*) mediante la interfaz NG-C y al bloque de función de Plano de Usuario (UPF, *User Plane Function*) mediante la interfaz NG-U. A continuación, se definen las funciones y los componentes básicos de la arquitectura 5G:

1.5.1. sdrNG-RAN

Es responsable de proporcionar la conectividad necesaria entre los Equipos de Usuario (UE, *User Equipment*) y la red troncal del sistema para la transmisión radio. La NG-RAN gestiona el uso de los recursos radio disponibles para la provisión de servicios portadores de forma eficiente. Admite el despliegue de sistemas tanto SA como NSA, para proporcionar a los UE el acceso a 5G-NR y LTE. 5G tiene una Red de Acceso Radio (RAN, *Radio Access Network*) que ya no está limitada por la proximidad de la BS o la infraestructura compleja como en anteriores generaciones y sus funciones se basan en el acceso a datos y la coordinación de la gestión de recursos en los sitios de radio. NG-RAN contiene dos tipos de nodos, gNB conocido como la actual BS de 5G que proporciona servicios de plano de control y de usuario, y el NG-eNB que es una evolución de los nodos LTE y proporciona servicios hacia el UE [21]. 3GPP ha entregado una NG-RAN que es una base sólida pero flexible para 5G.

1.5.2. 5G-Core

Es responsable de las funciones no relacionadas con el acceso radio, tales como la autenticación, carga, configuración de conexiones extremo a extremo, gestión de movilidad, entre otros [13]. El núcleo móvil 5G está enfocado principalmente en servicios, está dividido en un plano de usuario y uno de control. El plano de usuario representa las funciones de envío de tráfico de datos del usuario, mientras que el plano de control representa las funciones y procedimientos necesarios para gestionar los recursos de la red y establecer la comunicación [11]. El núcleo está compuesto por un conjunto de bloques como se observa en la Figura 7, cuyas funciones se dividen en tres grupos [13].

⁵ UE es un dispositivo que permite a un usuario acceder a los servicios de red [22].

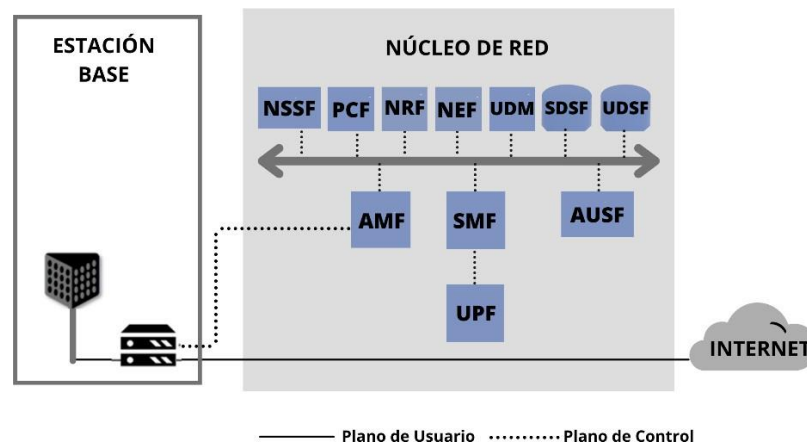


Figura 7. Núcleo Móvil 5G. Fuente por Autor.

El primer grupo de bloques ejecutan las funciones en el plano de control en relación con el 4G-Core o Núcleo de Paquete Evolucionado (EPC, *Evolved Packet Core*). Estos bloques son:

- **AMF:** responsable de la gestión de la conexión, accesibilidad y movilidad, la autenticación y autorización de acceso y los servicios de ubicación. Gestiona los aspectos relacionados con la movilidad de la Entidad de gestión de la movilidad (EMM, *Mobility Management Entity*)⁶ del EPC.
- **Función de Gestión de Sesiones (SMF, *Session Management Function*):** gestiona la sesión de cada UE, incluida la asignación de direcciones IP, los aspectos de control de QoS y los aspectos de control del enrutamiento.
- **Función de Control de Políticas (PCF, *Policy Control Function*):** gestiona las reglas de políticas relacionadas con el acceso y movilidad a la AMF, para la detección de flujo de datos de aplicaciones y servicios, QoS y cobro basado en flujo a la SMF.
- **Gestión de Datos Unificada (UDM, *Unified Data Management*):** gestiona la identidad del usuario, incluida la generación de credenciales de autenticación.
- **Función de Servidor de Autenticación (AUSF, *Authentication Server Function*):** es un servidor de autenticación o base de datos para la provisión del servicio de conectividad IP entre los equipos de usuario conectados.

El segundo grupo de bloques también se ejecuta en el plano de control, pero no está relacionado con el EPC:

⁶ EMM constituye el elemento principal del plano de control de la red LTE para gestionar el acceso de los terminales a través de las redes de acceso [7].



- **Función de Red de Almacenamiento de Datos Estructurados (SDSF, *Structured Data Storage Network Function*):** se utiliza para almacenar datos estructurados. Podría implementarse mediante una "Base de datos SQL" en un sistema basado en microservicios.
- **Función de Red de Almacenamiento de Datos no Estructurados (UDSF, *Unstructured Data Storage Network Function*):** se utiliza para almacenar datos no estructurados.
- **Función de Exposición de Red (NEF, *Network Exposure Function*):** es un medio para exponer nuevos servicios a terceros, incluida la traducción entre representaciones internas y externas de datos. Podría ser implementado por un servidor con Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, *Application Programming Interface*) en un sistema basado en microservicios.
- **Función de Repositorio de NF (NRF, *NF Repository Function*):** es un medio para descubrir los servicios disponibles. Podría implementarse mediante un "Servicio de descubrimiento" en un sistema basado en microservicios.
- **Función de Selector de Corte de Red (NSSF, *Network Slice Selection Function*):** es un medio para seleccionar un sector de red que sirve a un UE determinado. Los segmentos de red son esencialmente una forma de dividir los recursos de la red para diferenciar el servicio prestado a diferentes usuarios.

El tercer grupo incluye un único bloque que se ejecuta en el plano de usuario:

- **Función de Plano de Usuario (UPF, *User Plane Function*):** reenvía el tráfico entre la RAN e Internet. Además, es responsable del reenvío de paquetes, de la aplicación de políticas, la interceptación legal, los informes de uso del tráfico y la vigilancia de QoS.

1.5.3. Interfaz Radio

La interfaz radio es una parte importante dentro de los sistemas 5G y hace posible comunicación entre los UE y los nodos NG-RAN. Está compuesta por 3 niveles, el nivel de control, nivel de acceso y el nivel físico, siendo este último según las series TS 38.200 [23], el que ofrece servicios de transporte de datos a los dos niveles superiores. El nivel físico se presenta como la base de esta tecnología, con características que le brindan a 5G ventajas frente a otras generaciones en el uso eficiente del espectro, control de tasas de paquetes perdidos o con errores, tiempo de retardo, velocidad, operación multicanal, entre otras [3].



1.5.3.1. Nivel Físico 5G

Constituye una de las principales diferencias en relación a los sistemas predecesores de comunicaciones móviles, en tanto que permite conseguir mayores niveles de capacidad y eficiencia en el uso de los recursos radio. El nivel físico presenta los componentes básicos de 5G necesarios para la comunicación en la red, donde resaltan las técnicas de acceso, forma de onda, modulación y codificación de canales. Además, tiene como nueva característica la utilización de frecuencias en la región de ondas milimétricas del espectro, lo que permite que el ancho de banda disponible en estas regiones sea mucho mayor, para lograr mayores velocidades de datos. Según 3GPP, las bandas de frecuencia para 5G son clasificadas en Rango de Frecuencia 1 (FR1, *Frequency Range 1*) y Rango de Frecuencia 2 (FR2, *Frequency Range 2*) [24]. FR1 para frecuencias bajas y medias de 450 MHz a 6 GHz, que se utilizan para transportar la mayor parte del tráfico de comunicaciones móviles celulares tradicionales, mientras que FR2, para frecuencias altas de 24,25 GHz a 52,6 GHz, se centra en capacidades de alta velocidad de datos y de corto alcance [16]. Las especificaciones de nivel físico comenzaron con la versión 15 de 5G-NR y sus características han sido divididas en diferentes publicaciones [13].

A continuación, se describen los componentes físicos y los aspectos necesarios para la implementación y el diseño de sistemas 5G [25].

1.5.3.1.1. Componentes de Nivel Físico

A. Técnicas de Acceso Múltiple

Permiten a la red proporcionar recursos de radio a varios UE, de manera eficiente en cuanto al espectro, los costos y la complejidad. Existen varias técnicas y dependen de la manera en que se dividen los recursos del medio para atender diferentes usuarios. De 1G a 3G, se implementaron esquemas de acceso múltiple como FDMA⁷, TDMA⁸ y CDMA⁹. Luego, para LTE y LTE Advanced se desarrolló el Acceso Múltiple por División de Frecuencia Ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access*) para DL y de Portadora Única (SC, *Single Carrier*)-FDMA¹⁰ para UL como esquemas de Acceso Múltiple Ortogonal (OMA, *Orthogonal Multiple Access*), donde di-

⁷ FDMA es una técnica que divide el ancho de banda RF en varios rangos de frecuencias que son asignados a cada canal de usuario para el uso del sistema de radio [17].

⁸ TDMA es una técnica que utiliza un canal común para establecer la comunicación entre múltiples usuarios al asignarle a cada uno de ellos una ranura de tiempo diferente [17].

⁹ CDMA es una técnica que permite que numerosas señales ocupen un solo canal de transmisión, optimizando el uso del ancho de banda disponible. El principio básico es que se utilizan diferentes códigos CDMA para distinguir entre los diferentes usuarios [17].

¹⁰ SC-FDMA es una técnica donde antes de aplicar la IFFT, los símbolos están precodificados por una DFT, para que cada subportadora después de IFFT contenga parte de cada símbolo [1].



ferentes usuarios son asignados a recursos ortogonales en tiempo, frecuencia o dominio de código para mitigar Interferencia de Acceso Múltiple (MAI, *Multiple Access Interference*).

Para la conectividad masiva de los sistemas de comunicación móvil con diversos requisitos de QoS no son suficientes las técnicas OMA, por lo tanto, el Acceso Múltiple No Ortogonal (NOMA, *Non Orthogonal Multiple Access*) es considerable como una técnica candidata para sistemas LTE y 5G con el fin de apoyar la implementación de casos de uso como mMTC. Con NOMA, múltiples UE se programan conjuntamente y comparten los mismos recursos de radio en tiempo, frecuencia y código. Se han propuesto diferentes esquemas para NOMA incluyendo, dominio de potencia NOMA [26], Acceso Múltiple por Detección de Portadora (SCMA, *Sparse Code Multiple Access*) [27], entre otros [1].

En 5G-NR se definió el uso de OFDMA tanto en la transmisión de UL como DL. Estos esquemas ortogonales tienen como ventaja no tener interferencia mutua entre los UE, lo que conduce a un alto desempeño del sistema con receptores simples [27].

B. OFDMA:

La técnica de transmisión OFDM constituye la base para la técnica de acceso múltiple OFDMA. OFDM permite enviar la información a través de un canal sobre múltiples portadoras adecuadamente espaciadas en frecuencia, repartiendo la información entre todas, convirtiendo un flujo de datos de alta velocidad en varios flujos paralelos de baja velocidad, simplificando el problema de propagación multitrayecto. Lo que diferencia a OFDM de otros procedimientos de multiplexación en frecuencia es la ortogonalidad, lo que implica que el espaciamiento Δf entre portadoras consecutivas es siempre igual al inverso del periodo de símbolo T_s , como se expresa en la Ecuación 1 y se observa en la Figura 8.

$$\Delta f = \frac{1}{T_s} \quad (1)$$

Con base en lo anterior, OFDMA es una técnica de multiplexación que distribuye las subportadoras a diferentes usuarios de manera simultánea como se observa en la Figura 8. OFDMA ofrece un desempeño alto para eMBB tanto para el DL como para UL [11].

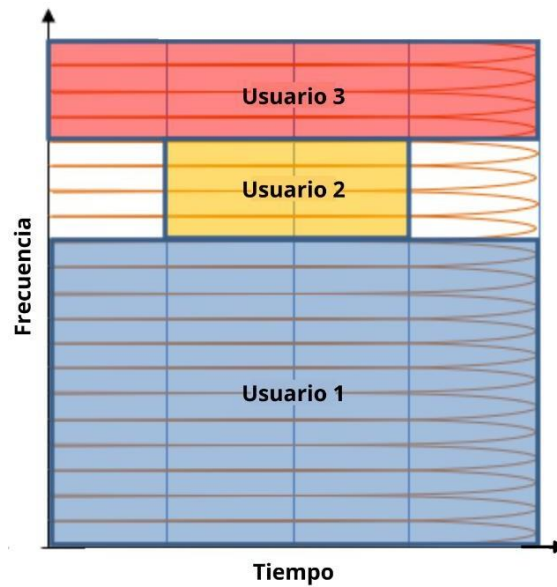


Figura 8. OFDMA. Tomada y Adaptada de [28].

C. Técnicas de Duplexación

FDD y TDD, son dos técnicas diferentes de uso del espectro empleadas en las comunicaciones digitales. Mientras que FDD usa frecuencias separadas para UL y DL, proporcionando un intercambio simultáneo de información y reduciendo interferencia entre enlaces como se observa en la Figura 9.a, TDD usa una sola frecuencia para el UL y DL, por lo tanto, transmiten en diferentes instantes de tiempos como se observa en la Figura 9.b, donde los intervalos de tiempo pueden tener duración variable, lo que lo hace más adecuado para demandas de transmisión asimétrica y en casos en los que el espectro emparejado no está disponible. En general, FDD se considera mejor para la cobertura, mientras que TDD es mejor para la capacidad.

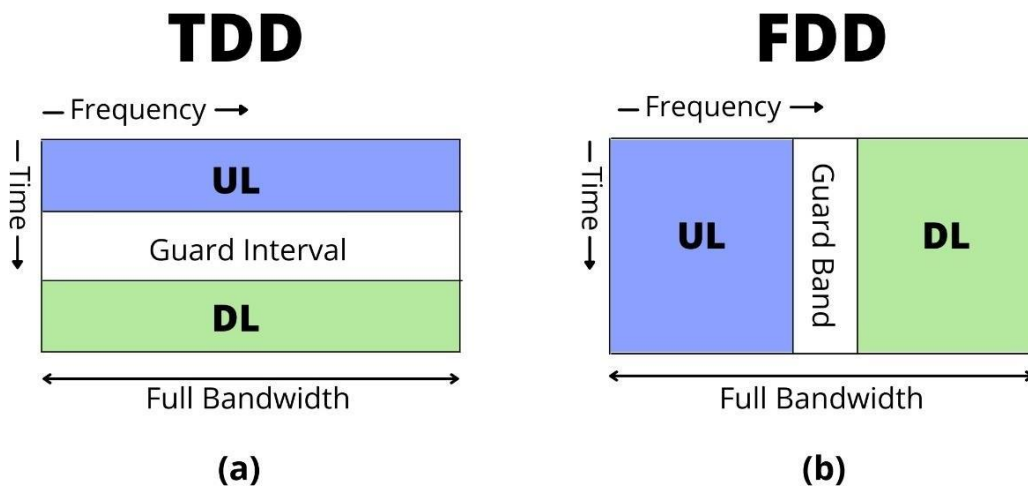


Figura 9. Técnicas TDD y FDD. Tomada y Adaptada de [29].



D. Forma de Onda

El aumento de los usuarios y la demanda de tráfico móvil exponencial, requiere nuevas formas de onda que proporcionen capacidad para soportar un mayor número de usuarios, compartiendo de manera más eficiente el ancho de banda disponible y aportando flexibilidad en el momento de generar la señal para adaptarla a las diferentes necesidades de los casos de uso [3].

Las formas de onda de 5G se basan en OFDM, y el receptor no necesita conocer el proceso de filtrado exacto en el transmisor, a diferencia de 4G existen evoluciones y la posibilidad de implementar ondas simétricas para UL y DL. Las diferentes formas de onda candidatas para el ecosistema 5G NR, se nombran a continuación [3]:

- OFDM Prefijo Cíclico (CP-OFDM, *CyclicPrefix - Orthogonal Frequency Division Multiplexing*).
- CP-OFDM con Superposición Ponderada y Adicionada (WOLA, *Weighted Overlap and Add*).
- Filtro Universal con Multiportadora (UFMC, *Universal Filtered MultiCarrier*).
- Banco de Filtros de Múltiple Portadora (FBMC, *Filter Bank MultiCarrier*).
- Multiplexación de División de Frecuencia Generalizada (GFDM, *Generalized Frequency Division Multiplexing*).

En agosto de 2016 el 3GPP decidió utilizar la forma de onda CP-OFDM tanto para DL como para UL en la versión 15 de NR [25].

• CP-OFDM:

Cabe aclarar que la transmisión de la información en canales inalámbricos de comunicaciones móviles no sólo se ve afectada por el factor clásico de Ruido Blanco Gaussiano y Aditivo (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*), sino también por efectos de Interferencia Entre Símbolos (ISI, *Interference Inter Symbol*), desvanecimientos de señal y por interferencias de otros elementos dentro y fuera del canal. Es por eso que la señal está sujeta a distorsiones causadas por reflexiones y difracciones. Las distorsiones incluyen retardo temporal, atenuación en potencia y ensanchamiento frecuencial. Como se observa en la Figura 10, la señal recibida es la suma de un rayo principal y sus versiones atenuadas y retardadas que viajan por diferentes caminos.

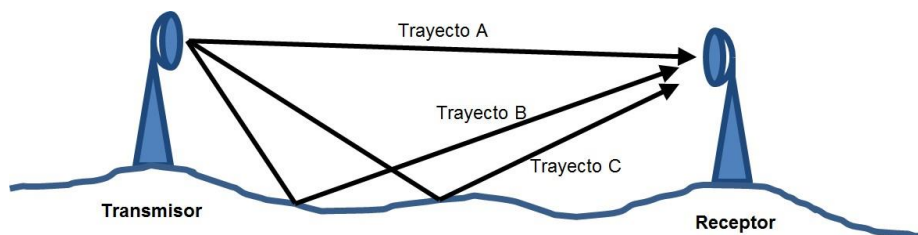


Figura 10. Multitrayecto entre Tx y Rx. Tomada de [13].



Los desvanecimientos en la propagación inalámbrica se dividen en desvanecimientos en gran escala y en pequeña escala. El desvanecimiento en gran escala hace referencia a la atenuación promedio de potencia de señal o pérdidas de propagación debido a la transmisión en grandes áreas mucho mayores que la longitud de onda. El desvanecimiento en pequeña escala hace referencia a cambios de amplitud y fase debidos a pequeñas variaciones en la separación entre transmisor y receptor, en distancias comparables a la longitud de onda. Además, el desvanecimiento en pequeña escala produce los efectos de dispersión temporal (canal selectivo en frecuencia o plano en frecuencia) y variancia temporal (desvanecimientos rápidos o lentos) del canal.

La forma de onda CP-OFDM fue ideada para combatir la ISI además de aportar a la eficiencia espectral. Es empleado por 5G-NR tanto en UL como en DL hasta al menos 52,6 GHz, a diferencia de LTE donde solo se usa para transmisiones de DL. CP-OFDM tiene como ventajas simplificar el diseño del sistema, facilitar la comunicación de dispositivo a dispositivo, brindar extensiones de OFDM en escenarios de cobertura limitada, desempeño en compatibilidad con tecnologías de múltiples antenas, alta eficiencia espectral y baja complejidad de implementación [3][30].

CP-OFDM consiste en insertar un Prefijo Cíclico (CP, *Cyclic Prefix*), el cual precede o extiende cada uno de los símbolos transmitidos para proteger la información útil de la señal y así contrarrestar la ISI. El CP debe ser la cuarta parte de la duración del símbolo, pero no más pequeño que el mayor ruido del canal estimado y se genera duplicando la última sección de la parte útil del símbolo OFDM. Si se elige una duración de CP mayor que la dispersión de retardo del canal, entonces la señal no sufre ISI. Cabe aclarar que OFDM trabaja con transmisión de símbolos largos para que la inserción del CP no suponga una pérdida de capacidad notable, además por no ser un procedimiento de portadora única, genera un menor uso de espectro, implementando la transmisión de varias portadoras en paralelo [3][10].

Es importante señalar que el sistema más eficiente para modular y demodular una señal en OFDM, es un sistema digital que emplea la Transformada Discreta Inversa de Fourier (IDFT, *Inverse Discrete Fourier Transform*) y la Transformada Discreta de Fourier (DFT, *Discrete Fourier Transform*). En la Figura 11, se tiene un ejemplo de dos símbolos OFDM contiguos, cada uno con su correspondiente CP. Los colores representan el valor de la señal. El CP al comienzo de cada símbolo OFDM muestra una copia del color del final del símbolo OFDM. Cuando se demodula la señal, la FFT de N puntos se toma en la posición después de la CP, que se indica con la ventana FFT. Para conocer el inicio de una trama de la señal se destina un símbolo para tener una secuencia con propiedades particulares que permita el proceso de sincronización entre transmisión y recepción.

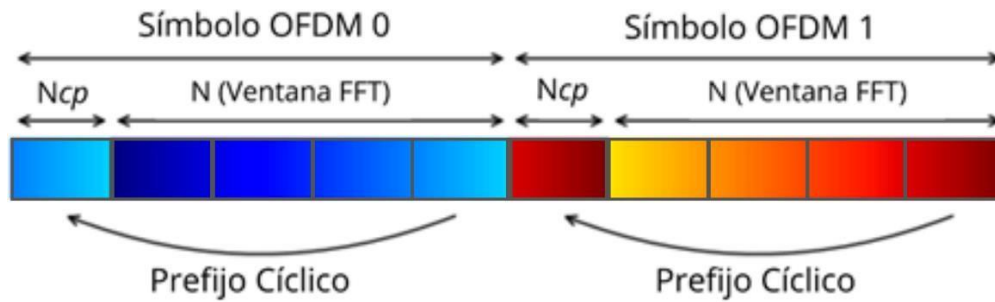


Figura 11. Ejemplo CP-OFDM. Tomada y Adaptada de [31].

A diferencia de LTE que tiene sólo un tipo de espaciamiento entre subportadoras de 15KHz, 5G-NR para permitir diversos servicios en una amplia gama de frecuencias y despliegues, admite múltiples tipos de Espacio de Subportadora (SCS, *Subcarrier Spacing*) para la forma de onda. En NR se define una numerología OFDM escalable, definida en la especificación 38.211 de 3GPP [32], esta numerología μ , es un factor de valor entero positivo que varía entre 0 y 4, donde según su valor, se tienen características como el SCS, la duración del símbolo, la duración del CP y las ranuras por subtrama [33]. A medida que el SCS aumenta, también aumenta el número de símbolos que puede alojar cada trama, ya que cada subtrama tendrá más slots y por lo tanto el tiempo de cada símbolo debe disminuir. Para compensar la duración del símbolo, el tiempo de escucha del CP varía, decreciendo cuando el SCS crece y haciéndose más grande cuando el SCS disminuye [33]. La Tabla 4 muestra la variación del número de símbolos de acuerdo a la numerología y CP. Cabe resaltar que el SCS varía con la frecuencia del espectro y/o la velocidad máxima del UE para minimizar el impacto del desplazamiento en frecuencia y el ruido de fase, Cuanto más ancho es la SCS, más corta es la longitud del símbolo. El efecto del aumento de la robustez por el aumento de la longitud de CP juega un papel dominante en la eficiencia del espectro. Sin embargo, la sobrecarga causada por el aumento de la longitud del CP es más dominante que el aumento de la robustez por lo cual tiende a disminuir la eficiencia del espectro.

Respecto al SCS, entre más pequeño sea el SCS mejora la eficiencia del espectro en el enlace, pero si se hace demasiado pequeño o demasiado grande, la robustez de la comunicación se puede ver afectada por el ruido de fase.



Parámetros de Interfaz Aérea 5G: Numerología (μ), Espacio de Subportadora, Duración útil de símbolo (T_u), Duración de CP (T_{cp}), y Ranuras por Subtrama

μ	SCS (kHz)	T_u (μ s)	Type CP	T_{cp} (μ s)	Slot (μ s)	slots/subframe
0	15	66.66	Normal	5.21/4.69	1000	1
1	30	33.33	Normal	2.60/2.34	500	2
2	60	16.66	Normal	1.30/1.17	250	4
			Extended	4.16	250	4
3	120	8.33	Normal	0.65/0.59	125	8
4	240	4.17	Normal	0.33/0.29	62.5	16

Tabla 4. Símbolos por Numerología OFDM. Tomada de [33].

Según la especificación 15 de 3GPP, se tienen cinco separaciones de subportadoras 15KHz, 30KHz, 60KHz, 120KHz y 240KHz, como se muestra en la figura 9, todas con un CP normal y con la ranura de 14 símbolos OFDM. Adicional, se define un CP extendido para los 60 KHz con 12 símbolos OFDM [3]. En esta especificación se denota que no todas las numerologías pueden usarse para todos los canales y señales físicos. La numerología $\mu=4$ no es compatible con canales de datos y $\mu=2$ no es compatible con señales de sincronización. Además, para los canales de datos, sólo se admiten $\mu = 0, 1, 2$ en el rango de frecuencia FR1 y $\mu = 2, 3$ en FR2. [34]

Otro de los factores que varían con respecto a la numerología es la longitud de la ranura. Como se muestra en la Figura 12 y Figura 13, la longitud del intervalo de tiempo varía dependiendo del SCS, es decir, a medida que el SCS se hace mayor, la longitud del intervalo de tiempo se reduce, por ejemplo, en $\mu = 0$ se observa una longitud de ranura mucho mayor que en $\mu = 4$ [35].

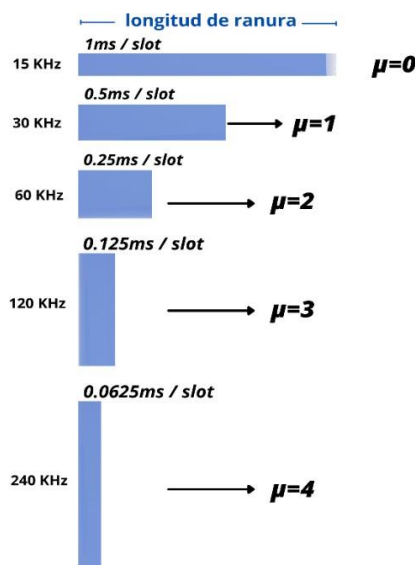


Figura 12. Longitud de Ranura con CP Normal. Tomada y Adaptada de [35].

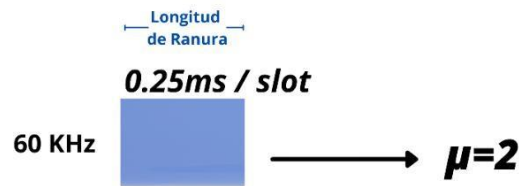


Figura 13. Longitud de Ranura con CP Extendido. Tomada y Adaptada de [35].

E. Esquemas de Modulación

Los esquemas de modulación permiten adaptar la señal al medio, llevando a cabo la transmisión de la información sobre una señal portadora que puede variar su amplitud, frecuencia o fase, para ello toma la secuencia de bits que sale del codificador y la transforma en una forma de onda adecuada a las características del canal de comunicaciones.

Los esquemas que se usan son Desplazamiento de Fase en Cuadratura (QPSK, *Quadrature Phase-Shift Keying*), Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM, *Quadrature Amplitude Modulation*) de diferentes órdenes, 16 QAM, 64 QAM y 256 QAM para UL y DL, como en LTE. NR cubrirá una amplia gama de casos de uso y es probable que el conjunto de esquemas de modulación admitidos sea expandido. [18] [19] [20][39]. Se suelen reservar algunas portadoras para transmitir información de sincronismo y ecualización espectral, o bien para establecer canales de servicio.

F. Codificación del Canal

La finalidad de la codificación de canal es la detección y corrección de errores producidos en el canal de comunicación. Algunos de los esquemas de codificación candidatos que se han adoptado teniendo en cuenta que los principales casos de uso de 5G-NR requieren un mejor desempeño, latencia y confiabilidad en comparación con un sistema 4G, son los Códigos de Verificación de Paridad de Baja Densidad (LDPC, *Low Density Parity Check*) usado para datos de usuario y códigos polares 5G para información de control. Los códigos LDPC están diseñados para admitir un alto desempeño, una tasa y longitud de código variable, además de una buena capacidad de corrección de errores. Los códigos polares, como esquema de codificación para el control, están diseñados para funcionar bien con una longitud de bloque corta mientras se aborda un problema de latencia en la decodificación de cancelación sucesiva [40].

- **LDPC**

Los códigos de comprobación de paridad de baja densidad sobresalen en los sistemas de comunicación debido a su buen desempeño para corrección y su facilidad para paralelizar el proceso de decodificación, lo que permite su uso en sistemas que requieran altas velocidades de transmisión. Los LDPC son códigos de bloque lineales definidos por una matriz de paridad dispersa, es decir, de baja densidad de 1s. Hoy



en día, el uso de estos códigos es reconocido ya que es uno de los códigos que puede aproximarse al límite de la capacidad de Shannon. A diferencia de otros códigos, los LDPC soportan altas velocidades de codificación, razón por la cual han sido usados para estándares de comunicaciones como, Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas (WiMAX, *Worldwide Interoperability for Microwave Access*) (IEEE 802.16e), DVB-S2 (*Digital Video Broadcasting*) y 10GBase-T Ethernet (IEEE 802.3) [41].

- **Códigos Polares 5G**

Los códigos polares 5G, se muestran como esquema de codificación para el control del escenario eMBB así como para el alcance de la versión 15 del escenario URLLC, centrándose en soportar bajas latencia en las comunicaciones celulares 5G, es decir, están diseñados para funcionar con longitud de bloque corta al momento de abordar un problema de latencia en la decodificación de cancelación sucesiva. A diferencia de la capacidad alcanzable de los códigos LDPC que se basan en el desempeño promedio del conjunto, la capacidad alcanzable de los códigos polares se puede probar con una realización en específico [40].

1.5.3.1.2. Recursos Nivel Físico

Los recursos físicos de tiempo y frecuencia NR se definen con base en los símbolos y subportadoras OFDM, como se observa en la Figura 14. En el dominio de la frecuencia los recursos se agrupan en un Bloques de Recursos Físicos (PRB, *Physical Resources Block*) de 12 subportadoras, que ocupan 180 KHz y 0.5 ms con una numerología 0. La unidad más pequeña de recursos es llamada Elemento de Recurso (RE, *Resource Element*) y un PRB contiene 84 RE con CP normal y 72 con CP extendido [11]. Cabe resaltar que a medida que se aumenta la numerología el espacio de las 12 subportadoras se amplía como se observa en la Figura 15.

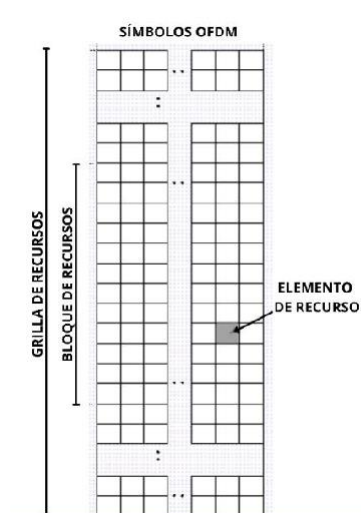


Figura 14. Bloque de Recursos Físico. Tomada de [3].

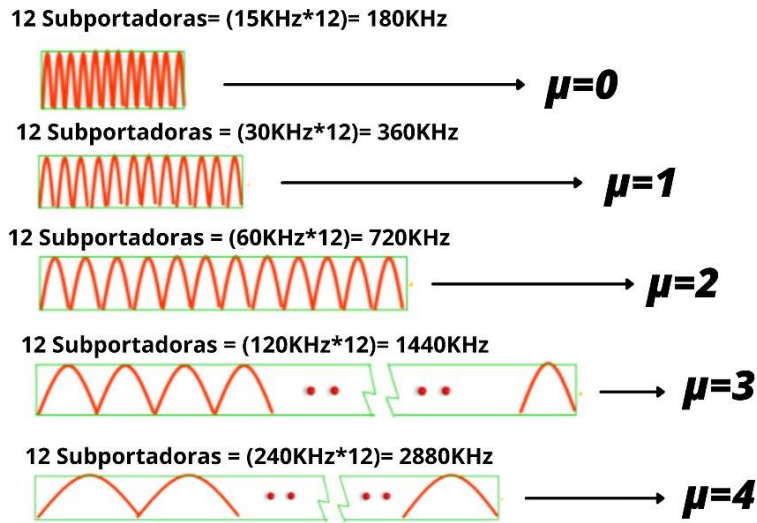


Figura 15. Espacio de subportadoras según numerología.

En el dominio del tiempo, las transmisiones de radio se organizan en tramas, subtramas, ranuras y mini ranuras de radio. En la Figura 16 se ilustra la estructura de trama NR, donde cada trama de radio tiene una duración de 10 ms y consta de 10 subtramas de 1 ms. Cada subtrama está formada por una o varias ranuras adyacentes, con 14 símbolos OFDM cada una con duración de símbolo de 66,7 μs . El tiempo de duración de una ranura, escala con el espaciado de subportadora elegido, donde la duración de un símbolo OFDM es inversamente proporcional al espaciado de subportadora. La capa física de 5G utiliza estos recursos de frecuencia y tiempo para la transmisión de información. Cabe resaltar, que estos recursos representan canales físicos y señales físicas, como en LTE [11].

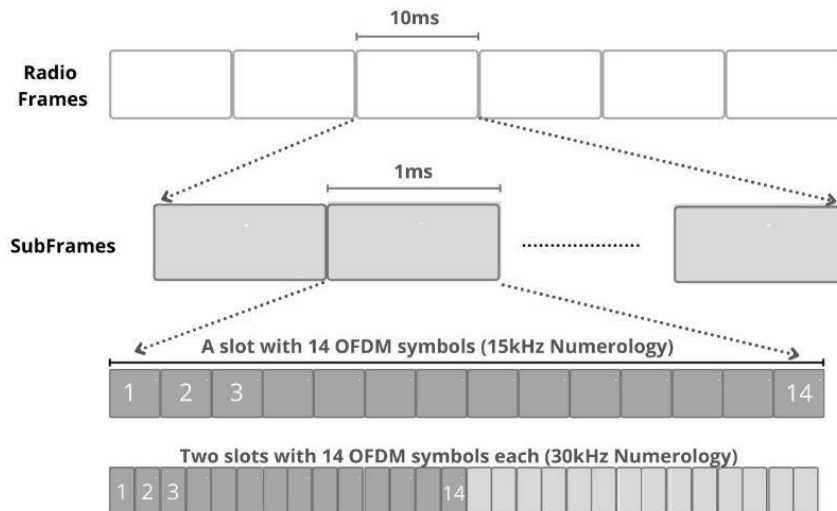


Figura 16. Estructura de Trama 5G. Tomada y Adaptada de [3].



1.5.3.1.3. Canales y Señales Físicos

Los canales y señales físicas están formados de recursos de frecuencia y tiempo, son utilizados en el diseño de enlaces a nivel físico para la transmisión de datos de usuario y mensajes de control facilitando la demodulación, estimación y ecualización del canal [3].

A. Canales Físicos

Los canales físicos se utilizan para transportar información a través de la interfaz radio, a menudo tienen canales de nivel superior asignados a ellos para proporcionar un servicio específico. Estos transportan datos de carga útil o propiedades de modulación, multiplexación de señales de referencia, potencia de transmisión, recursos de RF, entre otros, y permiten al sistema de comunicaciones reconocer el tipo de datos que se están enviando para tratarlos correctamente [42].

Los canales físicos 5G varían tanto para UL como DL, ya que cada uno tiene diferentes requisitos y funciones. Existen tres canales físicos para cada uno de los enlaces:

Canales físicos de enlace descendente 5G NR.

- **Canal Físico de Transmisión, (PBCH, *Physical Broadcast Channel*):** este canal hace parte del bloque de señales de sincronización. Su función es proporcionar a los UE el Bloque de Información Maestro (MIB, *Master Information Block*) y junto con PDCCH soportar la sincronización de tiempo y frecuencia para la adquisición, selección y reelección de celdas. El PBCH usa modulación QPSK y transmite una Señal de Referencia de Demodulación (DMRS, *Modulation Reference Signal*) específica de cada celda.
- **Canal Físico de Control de Enlace Descendente, (PDCCH, *Physical Downlink Control Channel*):** su función principal es programar las transmisiones de DL en el PDSCH y también las transmisiones de datos de UL en el PUSCH. La información transportada por este canal se denomina Información de Control de Enlace Descendente (DCI, *Downlink Control Information*), el cual contiene la información de programación para los datos de UL o DL, y la información de control para un UE o un grupo de UE's. Un DCI es asignado a los recursos físicos en un determinado ancho de banda para extraer parámetros como frecuencia, tiempo de recursos de dominio y la identidad de secuencia codificada. Para los DMRS, el PDCCH se configura en un UE por medio de un Conjunto de Recursos de Control (CORESET, *Control Resource Set*).

El PDCCH usa QPSK como formato de modulación y codificación polar como esquema de codificación, excepto para pequeños paquetes de datos.



- **Canal Físico Compartido de Enlace Descendente (PDSCH, *Physical Downlink Shared Channel*):** transporta datos de usuario; mensajes de control de capa superior específicos de UE mapeados desde canales superiores, Bloques de Información del Sistema (SIB, *System Information Block*) y paginación.

El PDSCH usa un formato de modulación adaptativa que depende de las condiciones del enlace, es decir, SNR. También utiliza un esquema de codificación flexible.

Canales físicos de enlace ascendente 5G NR.

- **Canal de Acceso Aleatorio Físico (PRACH, *Physical Random Access Channel*):** utilizado por un UE para solicitar la configuración de la conexión denominada acceso aleatorio. Este transmite un preámbulo de acceso aleatorio inicial.
- **Canal Físico Compartido de Enlace Ascendente (PUSCH, *Physical Uplink Shared Channel*):** es la contraparte del PDSCH. Se utiliza para transportar datos desde el Canal Compartido de Enlace Ascendente (UL-SCH, *Uplink Shared Channel*)¹¹ y sus canales mapeados superiores en frecuencia y tiempo compartido.

Al igual que el PDSCH, el PUSCH también tiene un formato muy flexible. La asignación de recursos de frecuencia se realiza utilizando bloques de recursos junto con un esquema de codificación y modulación flexible que depende de la SNR del enlace. Para soportar la estimación y demodulación del enlace del canal, el PUSCH contiene señales DMRS.

- **Canal de control de enlace ascendente físico (PUCCH, *Physical Uplink Control Channel*):** transporta los datos de control del UL. También es posible que, dependiendo de la asignación de recursos, la información o los datos de control del UL se pueda enviar a través del PUSCH, aunque en la dirección del DL, la información de control se envíe siempre en el PDCCH.

B. Señales Físicas

Mientras que los canales físicos transportan la información de la capa de Control de Acceso al Medio (MAC, *Medium Access Control*)¹², las señales físicas sólo son utilizadas en la capa física. Las señales para transmisiones DL y UL se describen a continuación [43].

Señales físicas de enlace descendente.

¹¹ UL-SCH es un canal de transporte utilizado para transmitir datos de enlace ascendente [11].

¹² MAC es responsable de la corrección de errores, la planificación y asignación de recursos del enlace ascendente y descendente [11].



- **Señales de Sincronización Primarias y Secundarias (PSS, SSS, *Primary and Secondary Synchronization Signals*):** Junto con PBCH son necesarias para permitir el acceso del UE a la red. Específicamente, proporcionan información de tiempo de trama de radio e Identificación de celda en la búsqueda de celda inicial.
- **Bloque de Señales de Sincronización (SSB, *Synchronization Signal Block*):** el SSB engloba las señales de sincronización primarias (PSS), las señales de sincronización secundarias (SSS) y PBCH. A través del PSS y SSS, el UE puede obtener información de tiempo, información de desplazamiento de frecuencia e ID de celda y a través del PBCH se puede obtener el número de trama de radio y permitir alinearse con la interfaz aérea.

SSB ocupa un total de 4 símbolos OFDM en el dominio del tiempo y un total de 240 subportadoras (20 PRB) en el dominio de la frecuencia, numeradas del 0 al 239, En la Figura 17 se observa el PSS ubicado en el medio con 127 subportadoras del símbolo 0, el SSS ubicado en 127 subportadoras en el medio del símbolo 2 y el canal PBCH ubicado en los símbolos 1-3 donde ocupa todas las subportadoras de 0 a 239 y el símbolo 2 donde su ocupación excluye las subportadoras usadas por SSS y la protección SSS.

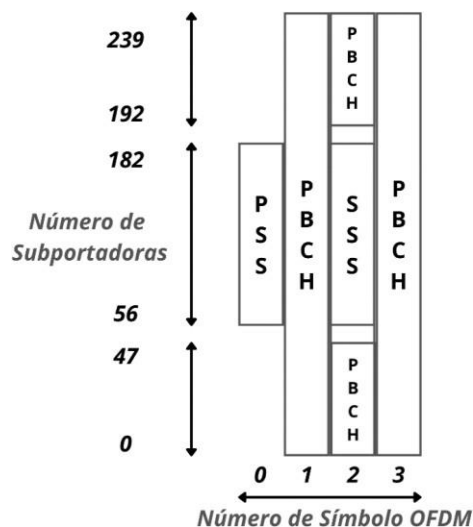


Figura 17. Diagrama de Estructura de Tiempo-Frecuencia SSB. Tomada y Adaptada de [43].

- **Señales de Referencia de Demodulación (DMRS, *Demodulation Reference Signals*):** se utilizan para la estimación del canal y permiten la demodulación adecuada de PBCH, PDCCH y PDSCH.
- **Señales de Referencia de Seguimiento de Fase (PT-RS, *Phase Tracking Reference Signals*):** se utilizan para estimar el ruido de fase en el PDSCH. Solo se utilizan en rangos de alta frecuencia.



- **Señales de Referencia de Información de Estado de Canal (CSI-RS, *Channel State Information Reference Signals*):** se utilizan para proporcionar Información del Estado del Canal (CSI, *Channel Status Information*).

Señales físicas de enlace ascendente

- **DMRS:** se utilizan para la estimación del canal y permiten la demodulación adecuada de PUCCH y PUSCH.
- **PT-RS:** presenta la misma función que en DL.
- **Señales de Referencia de Sondeo (SRS, *Sounding Reference Signals*):** Es equivalente a CSI-RS. Por lo tanto, proporciona CSI al gNB para configurar las tareas de adaptación del enlace¹³ y programación en UL.

1.5.4. Consideraciones de espectro 5G

Para soportar los nuevos casos de uso y las velocidades de banda ancha mayores con respecto a las tecnologías ya existentes, 5G necesita una cantidad considerable de espectro móvil nuevo y armonizado dentro de tres rangos de frecuencia, con el fin de brindar una cobertura amplia. Los tres rangos están definidos en bandas de frecuencia bajas, por debajo de 1 GHz, medias entre 1-6 GHz y altas por encima de 6 GHz.

Teniendo así en las bandas bajas una expansión en la cobertura de la banda móvil 5G en zonas urbanas, suburbanas y rurales. Para este caso se tienen en cuenta las bandas de 700 MHz de 4G para usarlas como puente entre la cuarta y quinta generación.

En las bandas medias se evidencia la unión entre cobertura y capacidad para dar paso a los servicios que soportan 5G, en cuanto a la disponibilidad de frecuencias, se tiene priorizado el rango de 3300 a 3800 MHz, el cual ha sido considerado para el despliegue inicial de la tecnología 5G en el mundo donde resalta la banda de 3500 MHz candidata en diferentes países. Cabe resaltar que la industria móvil en busca de una armonización global del espectro está diseñando soluciones de tipo rango de sintonización “*tunning range*” para la totalidad del rango de 3300–4200 MHz, en el que el equipo puede ser reconfigurado para operar en los múltiples sub rangos de la banda de 3500 MHz¹⁴.

¹³ La adaptación del enlace se basa en la configuración de parámetros de transmisión del enlace radio para manejar las variaciones de la calidad que se presentan por los cambios en las condiciones del canal [44].

¹⁴ La banda de 3500 MHz definida por 3GPP como banda n78 es ampliamente usada actualmente en los pilotos 5G alrededor del mundo debido a su disponibilidad en comparación al espectro celular más bajo [11].



Finalmente, para lograr velocidades de banda ancha ultra-altas previstas para 5G, es necesario emplear frecuencia por encima de 6 GHz, actualmente, las bandas de 26 GHz o 28 GHz cuentan con el mayor apoyo internacional en este rango. La Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (WRC, *World Radiocommunications Conference*) identificó rangos de frecuencias en las bandas de frecuencias de 24,25 a 27,5 GHz, de 37 a 43,5 GHz, de 45,5 a 47 GHz, de 47,2 a 48,2 GHz y de 66 a 71 GHz para el despliegue de redes 5G. Es importante resaltar que de estos 17.25 GHz de espectro identificados para las IMT en la WRC-19, sólo 14.75 GHz fueron armonizados teniendo así un 85% de armonización a nivel global, con lo cual se espera lograr una itinerancia mundial y aprovechar las economías de escala [45].

En Colombia la adopción y uso de la tecnología 5G permitirá el acceso a nuevas aplicaciones para brindar mayor ancho de banda, bajas latencias y comunicaciones masivas tipo máquina para el desarrollo industrial del país. A finales de 2021, el Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC, *Ministry of Information Technologies and Communications*), publicó un proyecto que modifica uno de los artículos del Decreto 1078 de 2015, parte importante para el desarrollo de los servicios móviles 5G, donde expone que aumentarán los topes vigentes definidos para las bandas por debajo de los 3 GHz. Además, se definirá una nueva categoría para el espectro en bandas entre 3 GHz y 6 GHz, con el propósito de habilitar la asignación de la banda de 3.5 GHz, la cual cuenta con cerca de 400 MHz disponibles [14].

1.6. MÉTRICAS DE DESEMPEÑO PARA UN ENLACE 5G

Una variedad de factores del medio pueden distorsionar una señal que se transmite en un enlace de comunicación [46]. Para garantizar el cumplimiento de los requisitos de desempeño definidos para la nueva generación de comunicaciones móviles, existen métricas según la especificación 5G [5], que permiten el análisis 5G a nivel físico de los enlaces que implementan esta tecnología. Métricas como La Magnitud Del Vector de Error (EVM, *Error Vector Magnitude*), SNR, Tasa de Error de Bit (BER, *Bit Error Rate*) y Cobertura, generan información acerca de la calidad de las señales de telecomunicaciones moduladas, el número de símbolos enviados correctamente y la capacidad de la BS de demodular correctamente señales en diversas condiciones y configuraciones [47]. Las relaciones entre estas métricas son vitales para permitir el diseño de sistemas adaptables [11]. A continuación, se describen las métricas mencionadas:

1.6.1. EVM

Es una métrica de desempeño empleada para evaluar la calidad de la comunicación, con la medida de errores entre los símbolos ideales y recibidos. EVM se define como el Valor Cuadrático Medio (RMS, *Root Mean Square*) de la diferencia entre una colección de símbolos [48]. Estas diferencias se promedian sobre un número dado, típicamente gran número de símbolos y por lo general, se muestran como un porcentaje de la potencia promedio por símbolo de constelación [47]. Las mediciones de EVM se



realizan en analizadores de señales vectoriales, analizadores en tiempo real u otros instrumentos que capturan un registro de tiempo y realizan internamente una Transformada Rápida de Fourier (FFT, *Fast Fourier Transform*) para permitir el análisis en el dominio de la frecuencia. Las señales se reducen antes de realizar los cálculos de EVM, dado que los sistemas de modulación M-arios¹⁵ BPSK, 4-QAM, 16-QAM, entre otros, tienen diferentes niveles de amplitud.

Para calcular y comparar las mediciones de EVM de manera efectiva se suele llevar a cabo una normalización, donde la amplitud cuadrática media de todos los símbolos posibles en la constelación sea uno. EVM se puede expresar matemáticamente como se observa en la Ecuación 2 [48]:

$$EVM_{RMS} = \sqrt{\frac{\sum_{i=0}^{N-1} |S_i - R_i|^2}{\sum_{i=0}^{N-1} |R_i|^2}} \times 100\% \quad (2)$$

Donde S_i es el vector de señal medida del i -ésimo símbolo, R_i es su vector de señal de referencia correspondiente y N es el número de símbolos únicos en la constelación. Cabe aclarar que EVM puede proporcionar la métrica de desempeño deseada antes de que se lleve a cabo la demodulación y puede tomar valores de 0 a 100% siendo los valores cercanos al 0% evidencia de un buen desempeño [47].

1.6.2. BER

La tasa de error de bit es una métrica de desempeño que describe la probabilidad de error en términos de número de bits erróneos por total de bits transmitidos. Se puede ver la tasa de error de bits en términos de SNR, donde E_b/N_0 es la relación señal/ruido para el sistema de modulación M-aria y la conformación del pulso de coseno elevado a velocidad de datos. A diferencia de EVM, para la medición de BER se debe demodular primero la señal en el receptor. La definición de BER se puede expresar como en la Ecuación 3.

$$BER = \frac{\text{Número de bits con errores}}{\text{Número total de bits enviados}} \quad (3)$$

Cabe resaltar que si en el receptor se presenta una SNR alta, la tasa de error de bits será muy pequeña y no tendrá un efecto perceptible en el sistema [47].

Otra forma de obtener esta métrica es relacionando el valor de EVM con el tipo y orden de modulación, para encontrar teóricamente el valor de la BER como se observa en la Ecuación 4.

¹⁵ M-ario es un término derivado de la palabra binario y representa las modulaciones digitales donde en lugar de transmitir un bit a la vez, se transmiten dos o más bits simultáneamente. "M" es un número que representa la cantidad de condiciones o combinaciones posibles para la agrupación binaria que se considere [49].



$$BER = \frac{4}{\log_2 M} \cdot Q \left(\sqrt{\frac{3}{EVM^2 \cdot (M-1)}} \right) \quad (4)$$

1.6.3. Cobertura

Permite verificar la distancia donde el enlace mantiene unas métricas de desempeño ideales para su funcionamiento según la especificación 15 de 3GPP.

1.6.4. SNR

Es la relación entre la potencia de la señal que se transmite y la potencia del ruido que la altera, en un determinado ancho de banda, generalmente se mide en el lado receptor donde la señal se procesa. La Ecuación 5 permite calcular la SNR de un sistema de comunicación [47] [50]:

$$SNR = 10 * \log_{10} \left(\frac{\text{Potencia de la señal}}{\text{Potencia del ruido}} \right) \text{ dB} \quad (5)$$

Otra manera de medir la SNR es usando la expresión E_b/N_0 , la relación de energía de la señal por bit a densidad de potencia de ruido. Es un parámetro conveniente tanto para medir el desempeño de un sistema de comunicación como para determinar las tasas de transmisión de datos y las tasas de error. En la Ecuación 6 se presenta la expresión de cálculo de E_b/N_0 :

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{S/T_b}{k*T} = \frac{S}{k*T*R} \quad (6)$$

Donde,

- k : Es la constante de Boltzmann ($1,3803 * 10^{-23}$ J/K).
- T : Temperatura absoluta en grados (K).
- S : Potencia de la señal (W).
- T_b : Tiempo requerido para la transferencia de un bit ($T_b = 1/R$ seg).
- R : Tasa de transmisión de datos (bps).

La relación E_b/N_0 es importante porque la tasa de error de bits para datos digitales es una función decreciente en esta relación, es decir, a medida que aumenta la energía de bit en relación con la densidad espectral de ruido (incrementando E_b/N_0), el desempeño de BER en el receptor es menor. En la Ecuación 7 se observa el cálculo de E_b/N_0 en función de la SNR.

$$\frac{E_b}{N_0} = SNR * b * T_b = SNR * \frac{B}{R} \quad (7)$$

Donde,

B: Es el ancho de banda de la señal (Hz).



Si el valor de SNR es alto hace referencia a una señal con mejor calidad y un desempeño óptimo. Este parámetro es importante en una transmisión de datos ya que establece el límite superior alcanzable en la velocidad de los datos.

1.7. SOFTWARE DEFINED RADIO

Esta tecnología se define como el radio en el que algunas o todas las funciones de la capa física se realizan por software, es decir, utiliza software para el procesamiento de señales en lugar de los componentes de hardware tradicionales que generalmente se fabrican para dichas tareas. SDR tiene aplicaciones principalmente en comunicaciones móviles, investigación, desarrollo y proyectos militares, debido a que proporciona ventajas como, una mayor flexibilidad, reducción de costos de producción y mantenimiento, escalabilidad y mayor vida útil para la infraestructura de comunicaciones inalámbricas [51].

Para evaluar el desempeño de los nuevos algoritmos y arquitecturas de los sistemas 5G, es necesario realizar diseños y desarrollar prototipos de prueba de concepto en entornos reales, lo que resulta costoso y limitante para las instituciones o industrias que no cuentan con los recursos necesarios. En entornos académicos, la tecnología SDR ofrece facilidades para realizar una investigación menos costosa, permitiendo experimentación. Esta tecnología es importante en los sistemas de comunicación inalámbricos modernos, ya que a diferencia de los equipos radio tradicionales, permite definir por medio de software características como la modulación, el ancho de banda de la señal, la frecuencia de portadora, la técnica de acceso múltiple, entre otras funciones [52]. Para la implementación de enlaces SDR, son necesarios dispositivos hardware programables específicos, como el Periférico Radio de Software Universal (USRP, *Universal Software Radio Peripheral*), tarjeta Madre desarrollada por GNU Radio a la que se le pueden incorporar otras tarjetas [53].

Aunque los dispositivos SDR más comunes son receptores, la tecnología también incluye esquemas de transmisión que tienen componentes de procesamiento de señal, interfaz digital, interfaz RF analógica y antenas. En la Figura 18 se observa la estructura de un transmisor SDR, el cual recibe una señal de banda base como entrada, normalmente generada por una herramienta software. El primer bloque es un Conversor Digital Ascendente (DUC, *Digital Up Converter*) que transfiere la señal de banda base a Frecuencia Intermedia (IF, *Intermediate Frequency*). En el segundo bloque se muestra un Conversor de Digital a Analógico (DAC, *Digital Analogy Converter*) que transforma las muestras al dominio analógico, seguido de un Conversor de RF Ascendente (RF-UC, *RF Up Converter*) que cambia la señal hacia frecuencias más altas para que finalmente esta pueda ser amplificada y dirigida a la antena.

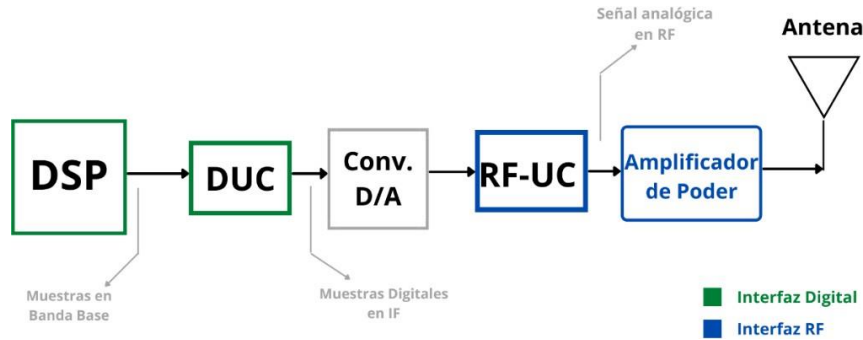


Figura 18. Transmisor SDR. Tomada y Adaptada de [54].

La Figura 19 muestra el diagrama de bloques de un receptor SDR, conformado por un amplificador que garantiza un óptimo nivel de potencia, un sintonizador RF y un convertor de la señal en RF a IF, seguido de un Conversor Analógico a Digital (ADC, *Analogy Digital Converter*), que genera muestras digitales a partir de la señal IF de entrada. Las muestras digitales llegan a un Conversor Digital Descendente (DDC, *Digital Downlink Converter*) que consta de tres partes principales, un mezclador digital, un oscilador local digital y un filtro paso bajo de respuesta de impulso finito. El mezclador digital y el oscilador local cambian las muestras digitales de IF a banda base, mientras que el filtro pasa bajo limita el ancho de banda y la tasa de muestreo mediante un procedimiento conocido como diezmado, el cual resulta de la división de la frecuencia de muestreo original por un factor N, llamado factor de diezmado. Esto con el fin de adaptar la señal a la capacidad de transmisión de datos del bus de comunicación para su posterior procesamiento [51].

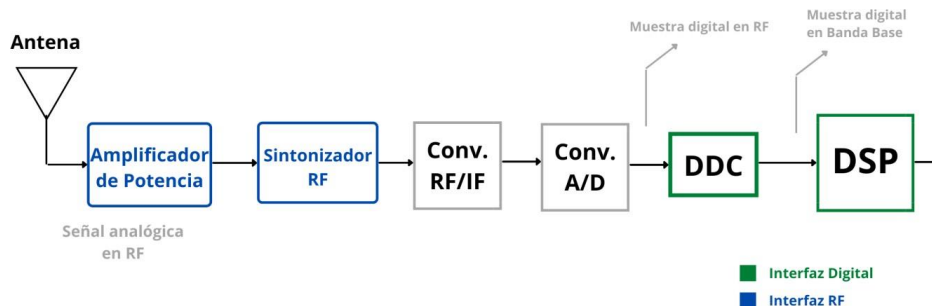


Figura 19. Receptor SDR. Tomada y Adaptada de [54].

1.8. MATLAB

Es una plataforma software que ofrece un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, *Integrated Development Environment*) que hace uso de un lenguaje propio para diseñar y analizar diferentes sistemas. Esta herramienta combina un entorno ideal para el análisis iterativo y los procesos de diseño con un lenguaje de programación que expresa las matemáticas de matrices y arrays directamente.



MATLAB está compuesto de variadas prestaciones como Simulink, un entorno de programación visual, que sirve para simular el comportamiento de los sistemas dinámicos. Además, contiene Toolboxes o cajas de herramientas que incluyen colecciones completas de funciones conocidos como archivos propios (extensión m). Las áreas en las que se encuentran disponibles estas cajas de herramientas incluyen procesamiento de señales, sistemas de control, redes neuronales, lógica difusa, ondas, simulación, entre otras. MATLAB es una herramienta ideal para simular sistemas de comunicaciones digitales, gracias a su sencillo lenguaje y sus excelentes capacidades de visualización de datos, está siendo ampliamente utilizado en la implementación de sistemas de comunicación móvil, facilitando pruebas a nivel de laboratorio en entornos de investigación académicos. Unas de las herramientas para el desarrollo y prueba de estos sistemas son 5G Toolbox y Communication Toolbox.

A. 5G Toolbox

Es una herramienta que proporciona funciones conformes a estándares y ejemplos de referencia para diseñar e implementar enlaces de sistemas de comunicación 5G de extremo a extremo, a través de la creación de modelos de prueba que incluyen generación de formas de onda según el estándar de 3GPP versión 15, simulación de operaciones de transmisión y recepción a nivel físico, modelado de canales y medición de desempeño con métricas como EVM, BER, SNR, entre otros [52].

5G Toolbox utiliza un diseño basado en modelos que aceleran la implementación de hardware y software 5G. Puede generar automáticamente códigos y bancos de pruebas. También permite verificar algoritmos y arquitecturas 5G, con el desarrollo de prototipos de prueba de concepto en entornos reales¹⁶ haciendo uso de SDR. Brindando flexibilidad mediante el uso de código abierto lo que permite actualizar prototipos rápidamente en respuesta a los cambios en los requerimientos [52].

B. Communications Toolbox

Proporciona algoritmos y aplicaciones para el análisis, el diseño, la simulación de extremo a extremo y la verificación de sistemas de comunicaciones. Contiene algoritmos y aplicaciones para codificación de canal, modulación, MIMO, OFDM y métricas de desempeño que permiten crear y simular modelos de capa física de sistemas de comunicaciones inalámbricas basados en estándares. Además, a través de paquetes de soporte de hardware facilita la comprobación de diseños con pruebas reales sobre aire, conectando a los modelos de transmisión y recepción dispositivos de radio SDR [55].

¹⁶ En el presente trabajo de grado, entornos reales hace referencia a implementaciones en escenarios de prueba por un medio inalámbrico.

CAPÍTULO 2.

DESARROLLO METODOLÓGICO

El diseño e implementación del enlace se lleva a cabo mediante la metodología del Proceso Racional Unificado (RUP, *Rational Unified Process*) [56]. Es una metodología caracterizada por ser iterativa e incremental, bajo la cual se realizan pequeñas iteraciones que van incrementando su nivel de funcionalidad hasta que el producto se encuentre terminado [57]. Cada una de las iteraciones consta de cuatro fases como se observa en la Figura 20, captura de requerimientos, análisis y diseño, implementación, y pruebas. A continuación, se detallan las características de cada una de las fases.

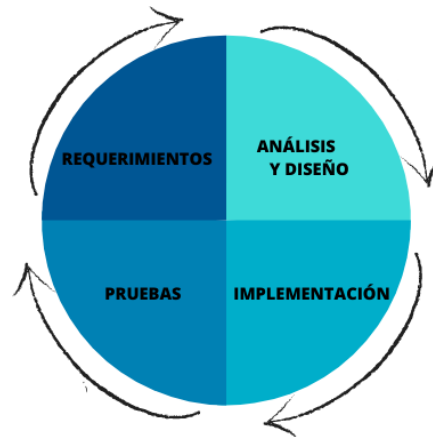


Figura 20. Metodología RUP. Tomada y Adaptada de [27].

2.1. REQUERIMIENTOS

Para la definición de estos requerimientos es necesario tener un contexto claro del problema de estudio en particular.

2.1.1. Definición del Problema

5G es una nueva tecnología en proceso de estandarización que promete nuevos servicios y aplicaciones, es por ello que su implementación a nivel de laboratorio es atractiva para las instituciones de educación superior y centros de investigación que buscan estar a la vanguardia con los avances en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (ICT, *Information and Communication Technologies*) debido a su relevancia a nivel mundial. Sin embargo, los costos de los equipos que permiten implementar tecnologías 5G son elevados y no pueden ser adquiridos con facilidad por instituciones como la Universidad del Cauca, que al no contar con los recursos suficientes, está limitada en la realización de pruebas y por tanto, en su desarrollo investigativo en esta área de las ICT.



2.1.2. Requerimientos Funcionales:

Los requerimientos funcionales son las características indispensables del enlace que deben ser implementadas para cumplir con los objetivos del desarrollo. Las cuales son:

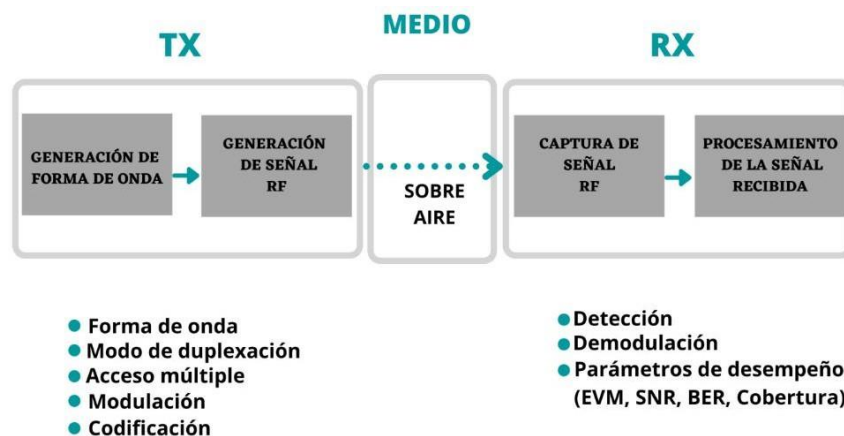
- Implementar un enlace de comunicación 5G en la banda de 3500 MHz empleando SDR.
- Configurar parámetros del enlace relacionados con las características de nivel físico como acceso múltiple, modulación, codificación, forma de onda que permita el análisis de modelos de canal según referencias de la especificación 15 de 3GPP.
- Desplegar los resultados de las métricas de análisis como EVM y SNR de manera gráfica.

2.1.3. Requerimientos No Funcionales:

- Emplear dispositivos de bajo costo y de bajo consumo de potencia para la construcción del prototipo.
- Entregar resultados confiables¹⁷ de las métricas de desempeño del enlace.
- Desarrollar un código fuente sencillo y entendible.
- Elegir los parámetros adecuados para el diseño e implementación del enlace de comunicación 5G.

2.2. DISEÑO DEL ENLACE

En el diseño del enlace de comunicación 5G, se plantea un módulo transmisor y un módulo receptor con un método de comunicación simplex. En la Figura 21 se muestra el modelo general del enlace acorde a lo estipulado para 5G-NR a nivel físico en bandas de hasta 6GHz [5].



¹⁷ Resultados confiables hace referencia a resultados basados en la especificación 15 de 5G NR.



Figura 21. Modelo del Enlace. Fuente por Autor.

El proceso de transmisión inicia con la generación de la forma de onda CP-OFDM de enlace descendente 5G según la especificación 15 de 3GPP, posteriormente se aplican características físicas a la señal como acceso múltiple, modulación y diferentes técnicas de codificación, para transmitirla de forma digital en banda base, con parámetros físicos de configuración. Finalmente, la señal resultante es radiada al canal. En la Figura 22 muestran de forma general los componentes del transmisor.

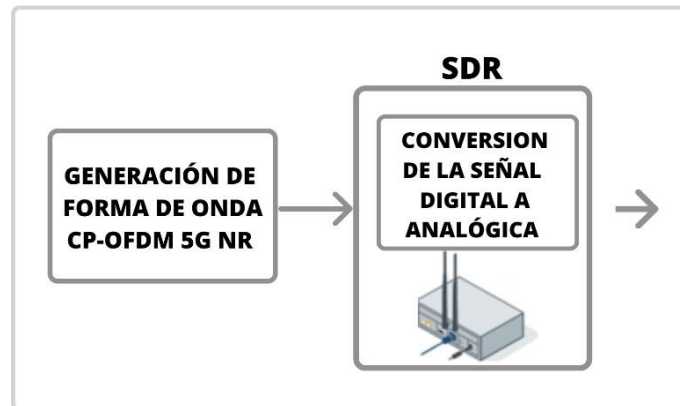


Figura 22. Diagrama de Bloques Tx. Fuente por Autor.

Por otra parte, una vez la señal viaja por el canal radio o medio físico donde se le agrega ruido y distorsiones, es captada por la antena, convirtiendo la señal a muestras digitales con el fin de llevar a cabo el procesamiento digital, con tareas de demodulación OFDM, estimación, ecualización y demodulación del canal, procesos importantes para determinar los cambios que han ocurrido sobre la señal al ser transmitida por el canal, para posteriormente ser corregidos y recuperar la información. Finalmente se realiza el cálculo de parámetros de desempeño como se observa en la Figura 23.

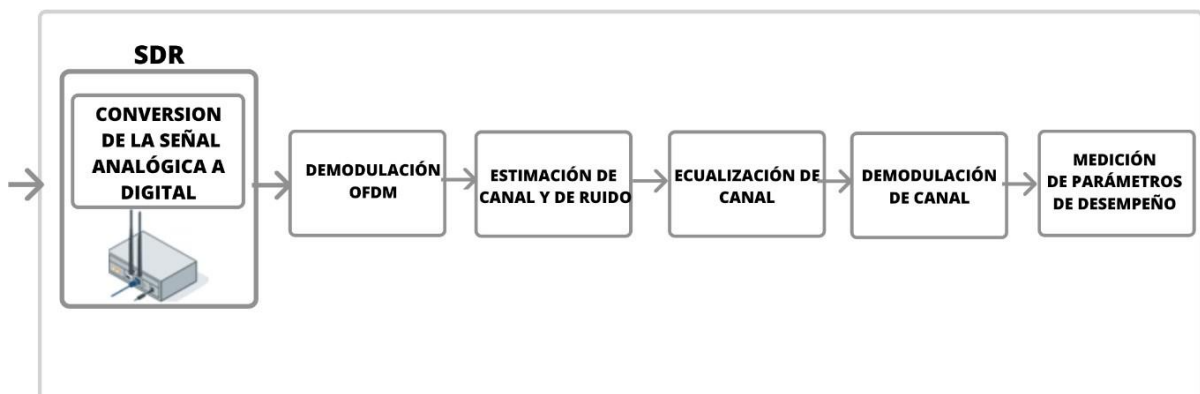


Figura 23. Diagrama de Bloques Rx. Fuente por Autor.



En la Figura 24 se muestra el diagrama de flujo de la transmisión y recepción del enlace 5G. Estos procesos se realizan varias veces asignando recursos físicos y modificando características de nivel físico para analizar el desempeño en función de EVM y SNR con base a la distancia entre los dispositivos de transmisión y recepción.

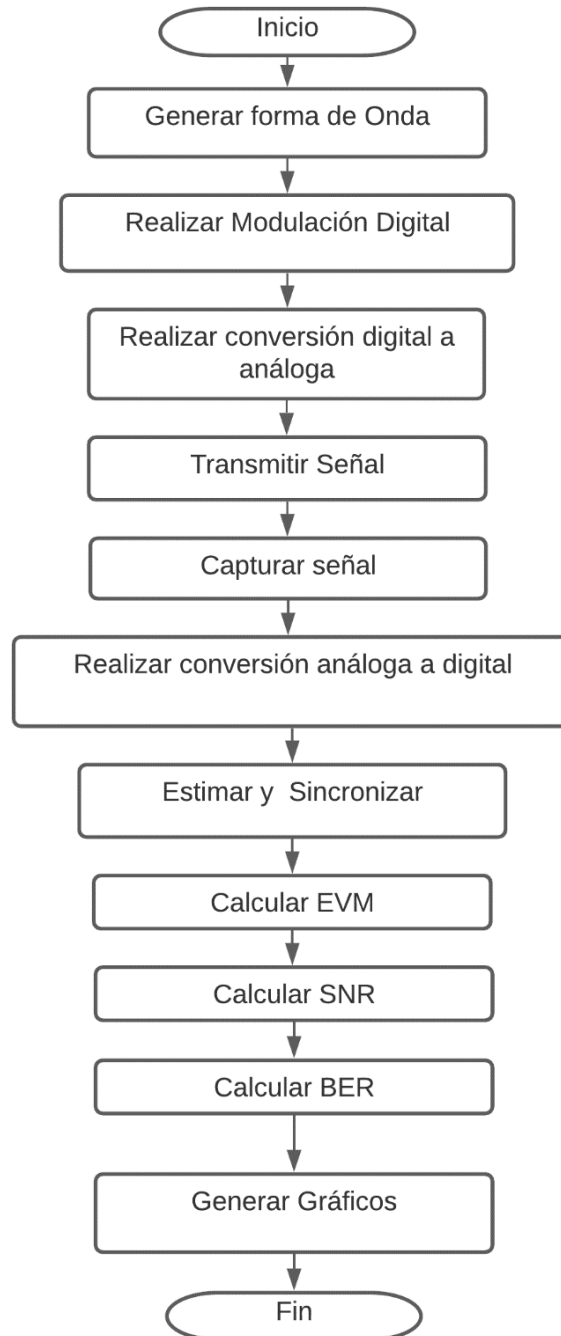


Figura 24. Diagrama de Flujo del Enlace. Fuente por Autor.

2.3. IMPLEMENTACIÓN

Para la implementación a nivel físico del enlace 5G definido anteriormente es importante considerar la parte software y hardware que la componen. Para la parte software se usa la herramienta MATLAB en dos computadores donde se lleva a cabo el modelado, la configuración y el análisis del enlace; para la parte hardware se conectan los computadores a un montaje experimental con elementos USRP para brindar una interfaz transmisión/recepción que permite radiar la señal al medio como se observa en la Figura 25.

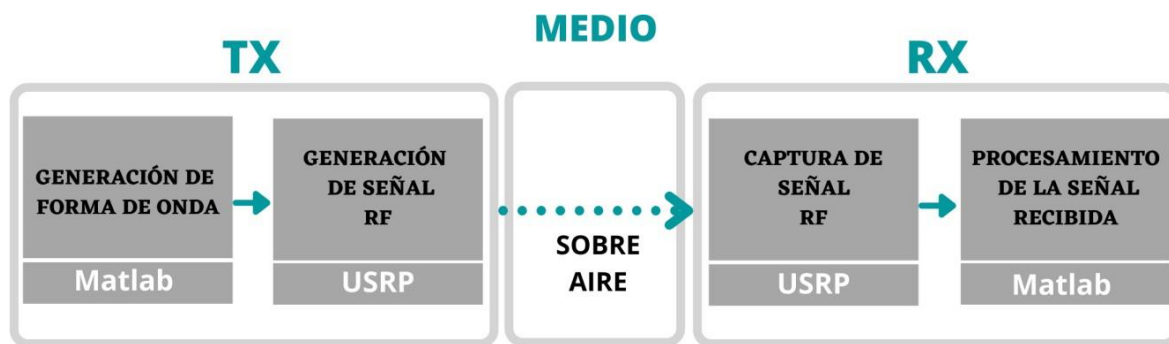


Figura 25. Diagrama de Bloques del Enlace.

En el transmisor con el uso de 5G Toolbox en uno de los computadores, se genera la forma de onda de enlace descendente 5G con características físicas variables según la especificación 15 de 3GPP como acceso múltiple OFDMA, modulación QPSK y codificación LDPC para el canal PBCH, canal físico de análisis. Posteriormente dicha señal se envía en banda base a los dispositivos SDR donde se realiza la conversión a RF de acuerdo con los parámetros de configuración del enlace. La señal resultante se radia al canal mediante antenas log periódicas conectadas a los puertos de transmisión/recepción de la tarjeta USRP.

Una vez la señal RF viaja por el canal radio, es captada por la antena de la USRP. Posteriormente la señal se convierte a muestras digitales en banda base para ser entregada al computador de recepción y llevar a cabo el procesamiento digital en MATLAB, con procesos de sincronismo en tiempo y en frecuencia, estimación y ecualización del canal; para finalmente realizar el cálculo de los parámetros de desempeño EVM, SNR y cobertura.

Lo anterior conforme a la especificación 15 de 5G NR, la cual define características de implementación descritas a continuación.



2.3.1. Características de simulación

2.3.1.1. Transmisión

Para la implementación de los módulos de transmisión de la Figura 25, se definen parámetros de configuración de tipo estructura con valores configurables a nivel físico, así como algunos valores por defecto en MATLAB.

2.3.1.1.1. Forma de Onda

- **Frecuencia** La frecuencia para una forma de onda 5G está definida entre los rangos FR1 y FR2.
- **Ancho de banda** El ancho de banda de la forma de onda puede variar teniendo en cuenta el rango de frecuencia como se muestra en la Tabla 5.

Rango de Frecuencia	Ancho de Banda (MHz)
FR1	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 ó 100
FR2	50, 100, 200 ó 400

Tabla 5. Valores de Ancho de Banda según Rango de Frecuencia.

- **SCS** El espaciado de subportadora se mide en kHz, para todos los canales y señales de referencia de la señal portadora, puede tomar diferentes valores, los cuales dependen de la numerología, como se observa en la Tabla 6.

Numerología (μ)	SCS (KHz)
0	15
1	30
2	60
3	120
4	240

Tabla 6. SCS en Función de la Numerología μ .

- **NRB** El número de RB en la cuadrícula de recursos de portadora, puede tomar valores enteros de 1 a 275, este valor depende del SCS y el ancho de banda como se observa en la Tabla 7.



SCS (KHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	25 MHz	30 MHz	40 MHz	50 MHz	60 MHz	70 MHz	80 MHz	90 MHz	100 MHz
	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N/A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Tabla 7. NRB en Función de SCS y BW.

- **Canales y señales físicas**

Para las señales de sincronización (SS), CORESET, espacios de búsqueda, PBCH, PDCCH, PDSCH y DM-RS asociadas, sobresalen características variables como esquemas modulación, codificación y acceso múltiple para verificación en un canal real.

2.3.1.2. Recepción

Para garantizar la reconstrucción de la señal transmitida es importante considerar que se tiene una forma de onda CP-OFDM que usa un prefijo cíclico que con el aumento del ancho de banda y SCS genera la necesidad de realizar una sincronización más estricta en los dominios de tiempo y frecuencia, lo que significa que cualquier desplazamiento en frecuencia o la mínima desincronización de las tramas causaría grandes problemas de ISI y no existiría protección frente a los fenómenos de propagación como el multitrayecto. Además, de características de sincronización a nivel de hardware que dependen de los directamente de los dispositivos usados.

Es importante considerar que antes de que un UE pueda acceder al canal, primero debe encontrar y sincronizarse a una celda; posteriormente recibir y decodificar la información necesaria para comunicarse y operar correctamente dentro de dicha celda. A ese primer paso se le llama búsqueda de celda y consiste en determinar el momento en el que comienza una trama en el DL y conocer la Identidad de Capa Física de la Celda (PCI, *Physical Cell ID*).

Para realizar este proceso es necesario identificar las dos señales de sincronización transmitidas PSS y SSS. Como se tiene una única celda, las dos señales PSS que lleva la trama son idénticas y pueden tomar un valor de tres posibles (0,1 o 2), este valor con el que se identifica la señal PSS se obtiene mediante el cálculo de la correlación más fuerte entre estos valores y posibles desplazamientos en frecuencia, usados para procesos de sincronización; se denota como identificador de capa física N_{ID2} . Una vez se detecta e identifica la señal PSS, se realiza la identificación de las señales SSS con un proceso similar de correlación, a diferencia de las PSS, cada una puede ser identificada con un valor diferente entre 0 y 167, que se denota como número de grupo de identidad de celda de capa física N_{ID1} . Con los valores N_{ID2} y N_{ID1} , se determina la PCI que se calcula mediante la Ecuación 8:

$$NID (CELL) = 3 N_{ID1} + N_{ID2} \quad (8)$$

Una vez identificada la celda, para la extracción de recursos del canal PBCH, es necesario obtener el bloque SSB y los elementos de recurso asociados, por lo que inicialmente se hace la sincronización de las señales y la estimación de desplazamiento de frecuencia y tiempo aproximada. Con la señal sincronizada, se lleva a cabo la búsqueda del índice DMRS del canal PBCH mediante el cálculo de la mejor SNR. Con lo anterior, se realiza la estimación del canal para lograr la ecualización, demodulación, y finalmente calcular el valor de EVM en el canal PBCH del enlace.

2.3.2. Características Hardware

Para la implementación de los módulos hardware de transmisión y recepción, se optó por el montaje de la Figura 26, que consta de dos partes, cada una conformada por un computador con características de procesador Core i7 y memoria RAM 8Gb; un elemento SDR, en este caso una USRP modelo B210, la cual cuenta con una cobertura de frecuencia continua desde 70 MHz a 6 GHz y una antena logarítmica periódica WA5VJB con rango de frecuencia de 850 MHz a 6,5 GHz.

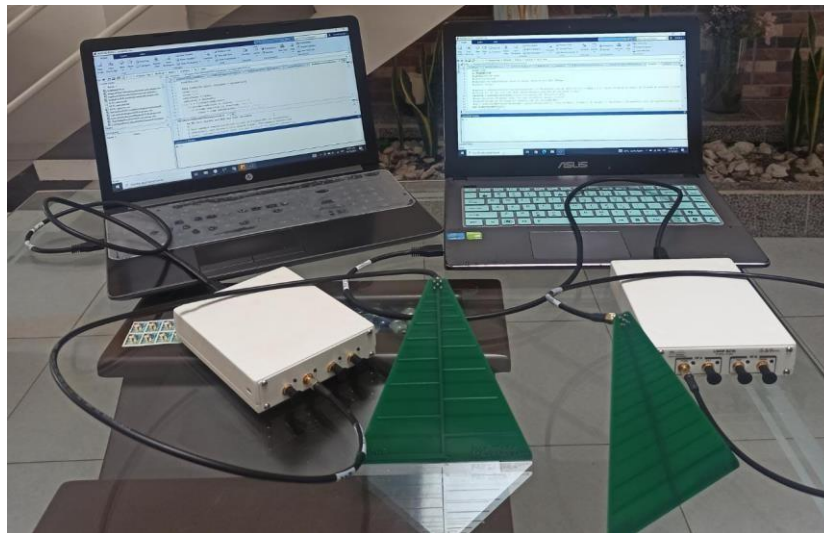


Figura 26. Montaje Experimental.

2.3.2.1. Efectos de dispositivos Hardware en la transmisión y recepción de la señal

Dentro de los fenómenos que afectan la captura de la señal se encuentran los impedimentos físicos o hardware mencionados a continuación:

- **Conversión DAC y ADC:** la transmisión de las señales involucra la conversión digital a analógica y en la recepción una conversión analógica a digital. Sin embargo, el número de bits asignados a estos conversores dependen de la placa USRP usada y no es posible su modificación. En general, los parámetros



que determinan esos valores son la precisión requerida para la constelación de símbolos, la tasa de muestreo, entre otros.

- **Desajuste en frecuencia de osciladores:** los desajustes entre los osciladores de transmisión y recepción, causan desplazamientos en la frecuencia en recepción que afectan la recuperación de los símbolos y la ortogonalidad entre subportadoras. Es importante aclarar que estas frecuencias no pueden ser modificadas en la placa USRP, para lo que se hace necesario llevar a cabo una sincronización de manera manual.
- **Efecto no lineal del amplificador:** hace referencia a la distorsión de la señal introducida por el amplificador cuando la amplitud máxima es superada y se comienza a operar en la zona no lineal.

2.4. PLAN DE PRUEBAS

Para evaluar el desempeño del enlace de comunicación 5G a través del análisis de los parámetros de desempeño EVM, SNR, cobertura y BER teórica, en el capítulo 3 se presenta un plan de pruebas y los resultados para dos escenarios con características de configuración variables.



CAPÍTULO 3.

PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se detalla el proceso realizado para la recolección de resultados de las pruebas del enlace de comunicación 5G y el posterior análisis de cada escenario de evaluación.

Las pruebas para el análisis del desempeño del enlace, se realizaron en dos escenarios de prueba específicos, uno en interiores y otro en exteriores, recolectando un total de 750 muestras.

3.1. CONFIGURACIONES DEL ENLACE

En la Tabla 8 se muestran los parámetros de configuración fijos con los que se ejecutaron las pruebas para los escenarios existentes. Además, fue necesario configurar uno a uno los canales físicos PBCH, PDCCH y PDSCH, debido a que el 5G Toolbox lo requiere para la generación de una forma de onda 5G válida.

Parámetros de Simulación		Valor	
Número de Tramas		100	
PBCH (38.802)	Modulación	QPSK	
	Carga útil	MIB	
PDCCH (38.213, 38.211)	Nivel de Agregación	1	
	Localización de candidato	1	
	Periodo (ms)	1	
	Coreset	Duración de símbolo	2
		Número de REG	6



	Espacio de Búsqueda	Tipo	UE
		Duración	1
PDSCH (38.211)	Modulación		QPSK
	Numero de Capas		1
	Mapeo		TIPO A
	Periodo (ms)		10
	DMRS	Tipo	1

Tabla 8. Parámetros Fijos del Enlace.

Adicionalmente, en la Tabla 9 se observan los parámetros variables propios de la forma de onda 5G basados en la especificación 15 de 5G NR y el 5G Toolbox. Se definen tres configuraciones diferentes variando BW, SCS, μ , periodo y mapeo, en el canal PBCH y número de recursos de frecuencia en el canal PDCCH. Las configuraciones 1, 2 y 3 son usadas en el escenario de prueba interior y las configuraciones 1 y 3 en exteriores.

Parámetros de Simulación Variables		Configuración 1	Configuración 2	Configuración 3
SCS		15	15	30
BW (MHz)		5	10	10
μ		0	0	1
PBCH	Mapeo	Tipo A	Tipo A	Tipo B
	Periodo (ms)	5	10	15
PDCCH	Recursos de Frecuencia	18	52	24

Tabla 9. Parámetros Variables del Enlace

3.1.1. Prueba de Calibración

Esta prueba se realiza con el fin de verificar el proceso de transmisión/recepción del enlace, a través de un medio cableado de 1 metro de largo, como se observa en la Figura 27.

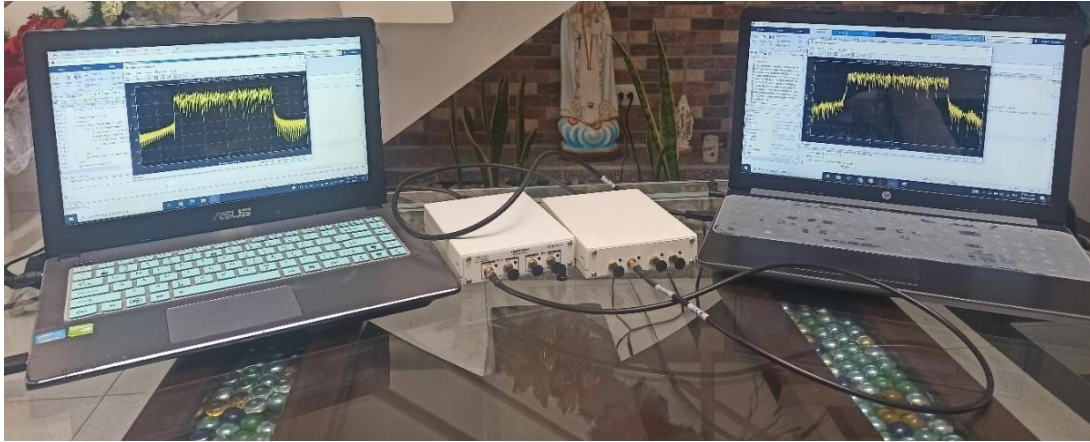


Figura 27. Montaje Prueba de Calibración.

Para la transmisión se utilizó la configuración fija de la Tabla 8 y la configuración 1 de parámetros variables, como se muestra en la Tabla 10.

Parámetros de Simulación Variables		Valor
SCS		15
BW (MHz)		5
NUM		0
PBCH	Mapeo	Tipo A
	Periodo (ms)	5
PDCCH	Recursos de Frecuencia	18

Tabla 10. Configuración Prueba de Calibración.

En la Figura 28 se observa el espectro de la forma de onda 5G transmitida por la USRP a 3500 MHz.

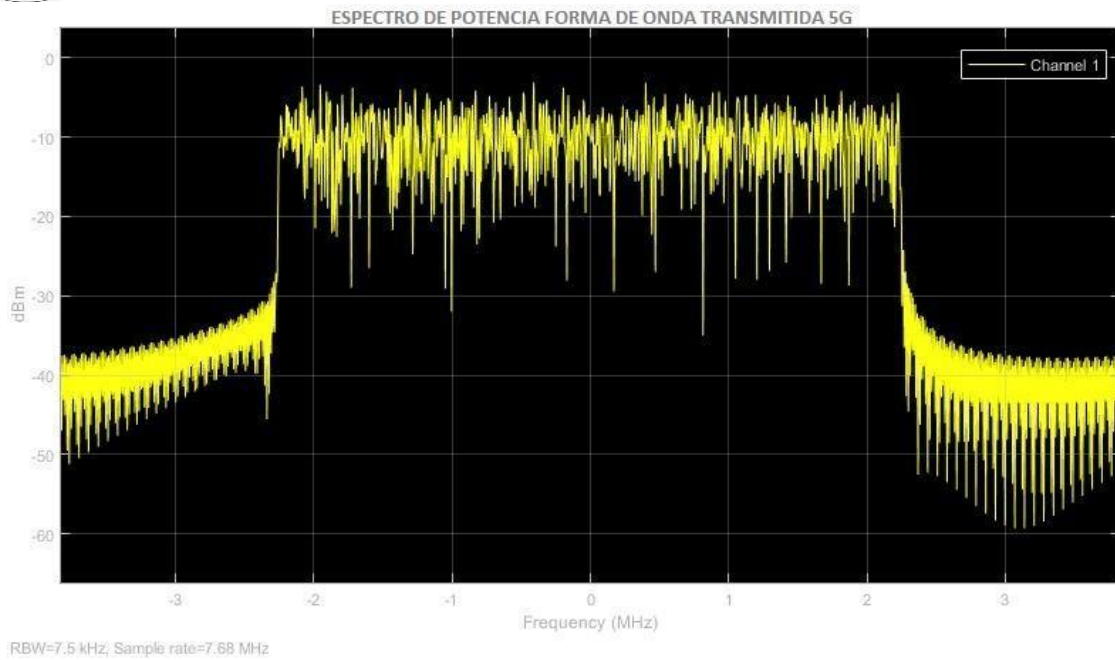


Figura 28. Espectro de Potencia Señal Transmitida.

En recepción la USRP captura la forma de onda transmitida para su posterior procesamiento. Además, se obtiene el espectrograma de la señal de la Figura 29, las figuras de correlación PSS vs desplazamiento en frecuencia, correlación SSS, constelación PBCH y valores de SNR.

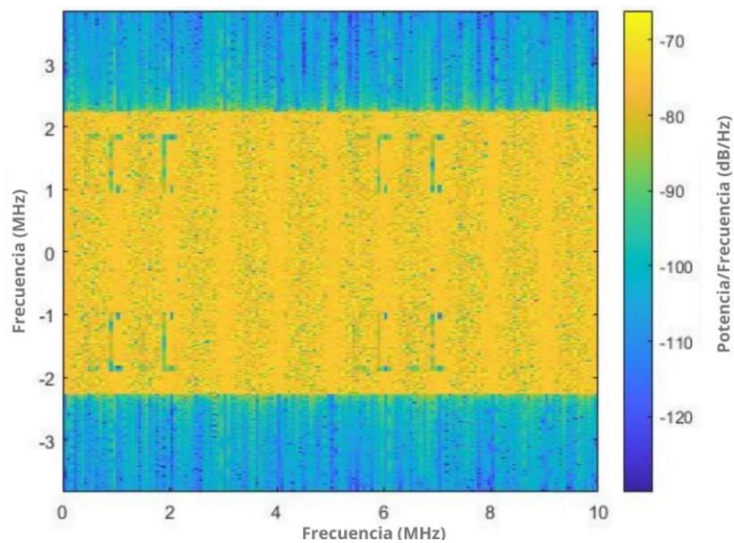


Figura 29. Espectrograma de la Señal Recibida.

En el espectrograma de la Figura 29, en el eje Y se observa que la señal recibida ocupa el ancho de banda de 5 MHz definido para la forma de onda de transmisión.



Adicional a esto en la Figura 30 se muestra que el espectro de la forma de onda capturada, presenta características como BW y potencia similares al transmitido de la , lo que confirma que el dispositivo USRP de recepción recupera la información transmitida.

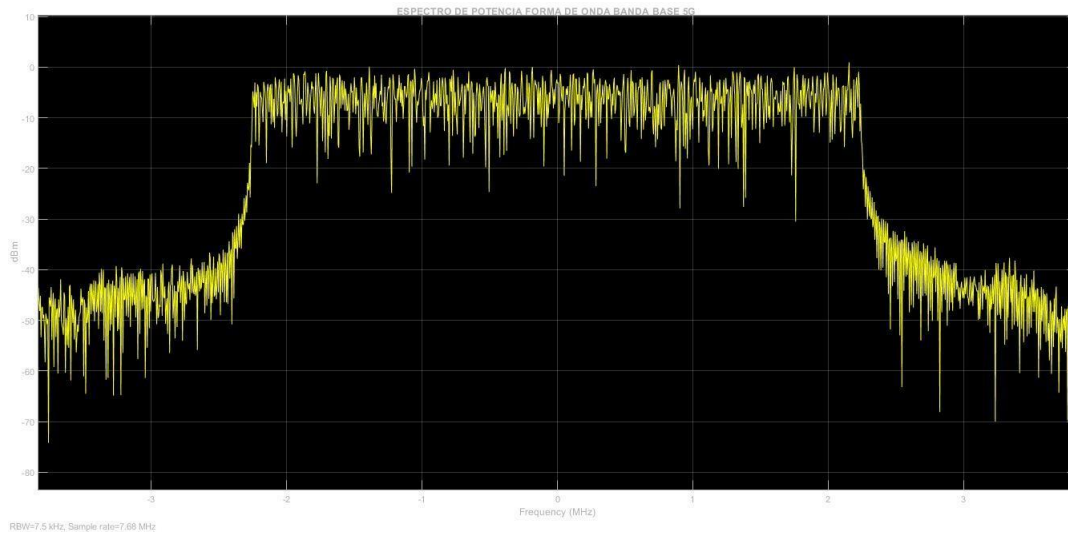


Figura 30. Espectro de Potencia Señal Recibida.

Posteriormente para la extracción de recursos de la forma de onda y análisis del canal PBCH, se obtuvo el valor del identificador físico N_{ID2} para PSS igual a 1 como se observa en la Figura 31 y el valor de correlación SSS N_{ID1} de la Figura 32 igual a 0, dando paso a la identificación de la celda definida como 1.

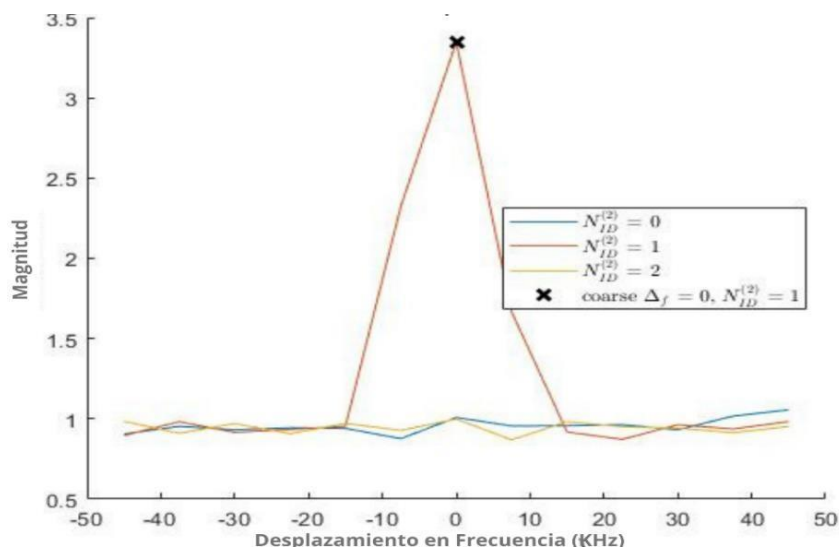


Figura 31. Correlación PSS vs Desplazamiento en Frecuencia.

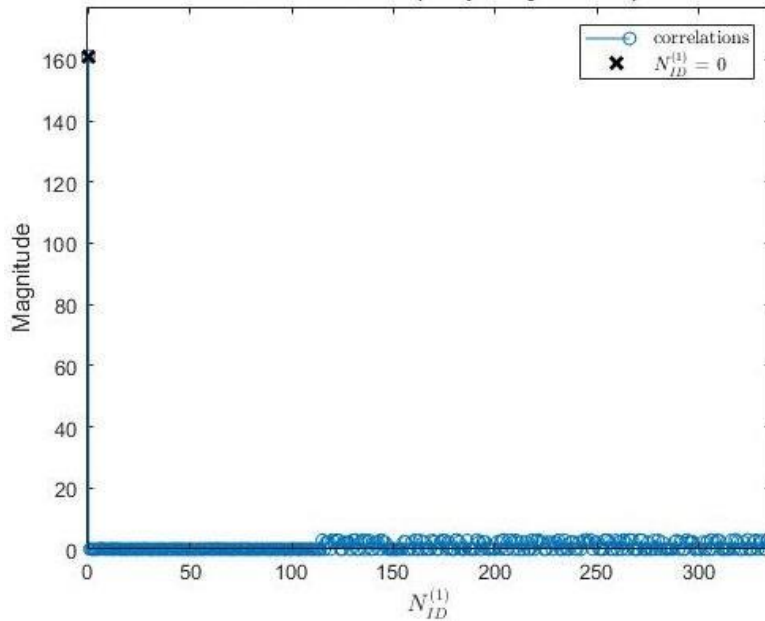


Figura 32. Correlación SSS.

En la Figura 33 se muestra la constelación donde los símbolos capturados, se ubican en uno de los 4 posibles estados que caracterizan la modulación QPSK usada, tanto en fase como en cuadratura, demostrando que la señal recibida, conserva las características de transmisión.

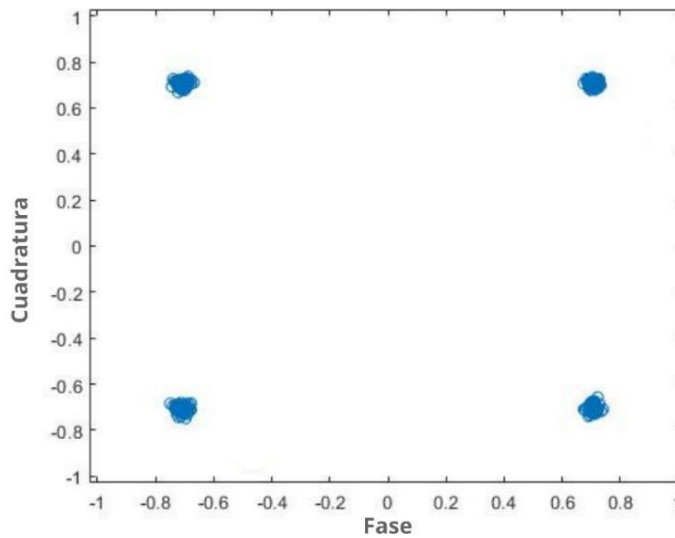


Figura 33. Constelación del Canal PBCH

Finalmente, se obtienen los parámetros de desempeño SNR y EVM, con un SNR de 38 dB, como se observa en la Figura 34 y un EVM de 2.695% como se observa la Figura 35. Valores que representan pocos errores con respecto a la ubicación de los símbolos transmitidos, confirmando lo observado en la Figura 33.

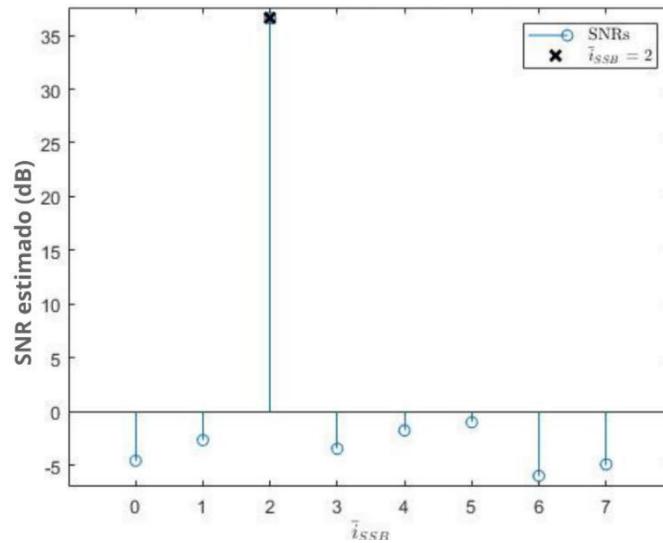


Figura 34. Estimaciones de SNR para el Canal PBCH-DMRS.

```
Desplazamiento de frecuencia: -1069 Hz
Time offset to synchronization block: 49358 samples (6.427 ms)
Cell identity: 1
-- PBCH demodulation and BCH decoding --
PBCH RMS EVM: 2.695%
```

Figura 35. EVM RMS de canal PBCH.

Con base en la constelación recibida y los resultados de desempeño se verifica la apropiada comunicación entre el módulo TX y RX, proporcionando la calibración del enlace para las siguientes pruebas.

3.2. PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO

Para el enlace de comunicación 5G se realizaron las pruebas por comunicación inalámbrica en línea de vista en dos escenarios, interior y exterior. Considerando 3 diferentes configuraciones, se tomaron 30 muestras para 5 distancias específicas de lo cual se obtuvo un promedio por cada una, con el fin de analizar gráficamente el EVM, SNR y BER.

3.2.1. Escenario 1

Este escenario de prueba corresponde a una sala de computo ubicada en la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca, que tiene como medidas 2.8 m de ancho, 3.65 m de alto y 7.35 m de largo, y contiene



dispositivos cercanos al transmisor y receptor como computadores de mesa, portátiles, teléfonos celulares y una ventana grande por donde circula aire como se observa en la Figura 36. El montaje se ubica en una de las mesas de trabajo del laboratorio, como se observa en la Figura 37. Se consideran las tres configuraciones y el promedio de las 450 muestras obtenidas para 5 distancias entre 3 cm y 100 cm.



Figura 36. Escenario de Prueba Interior.

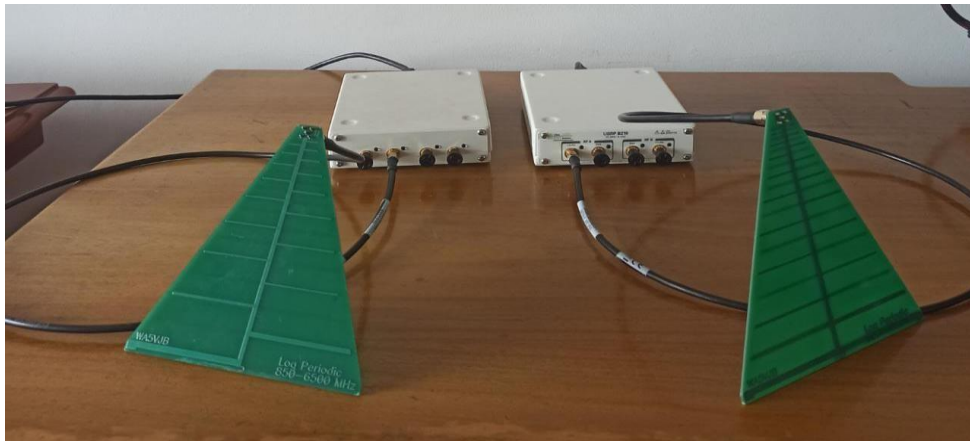


Figura 37. Montaje en Escenario de Prueba Interior.

3.2.1.1. EVM

Para el análisis de EVM se considera la Figura 38, donde se observa que para cualquiera de las configuraciones el valor de EVM aumenta conforme aumenta la distancia, teniendo un mínimo de 4.405% en la configuración número 1 y un máximo de 71.02% en la configuración número 3, configuraciones expuestas en la Tabla 9. Aunque en las tres configuraciones el EVM tiende a aumentar con la distancia, la número 3 sube con más rapidez que las demás, iniciando con 41.83% en 3 cm y finalizando con un pico de 71.02% en 100 cm, encontrando mayor deterioro de la señal en esta



configuración, con una diferencia promedio de 49% respecto a la configuración número 1 y de 33% frente a la número 2.

Finalmente, se presenta un mejor desempeño de EVM en la configuración número 1, debido al aumento de BW y SCS que se da en las configuraciones número 2 y 3. Por lo tanto, la distancia y las configuraciones con las que se realizaron las pruebas, juegan un papel fundamental en el desempeño del enlace, puesto que su variación hace a la señal susceptible a fenómenos de propagación como el ruido y el multitrayecto, que producen desviaciones en los símbolos de la constelación resultante.

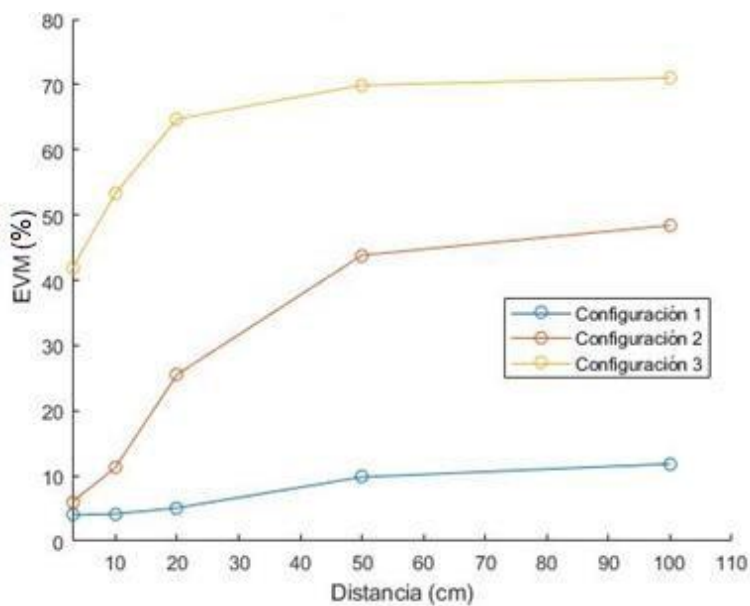


Figura 38. EVM vs Distancia Escenario 1.

Según la ITU el desvanecimiento por multitrayecto es el fenómeno de propagación más común por debajo de los 10 GHz en las transmisiones inalámbricas con visibilidad directa y obstáculos presentes en el medio [58], es por esto que a mayor distancia el efecto de este fenómeno es más visible en los resultados de EVM obtenidos.

3.2.1.2. SNR

Para el análisis de SNR se considera la Figura 39 donde se observa que para cualquiera de las configuraciones el valor de SNR disminuye conforme aumenta la distancia, teniendo como valor máximo 30 dB correspondientes a la configuración número 1 y un valor mínimo en la configuración número 2 correspondiente a 4.63 dB. Aunque en las tres configuraciones la SNR tiende a disminuir, en las configuraciones número 1 y 2, cae con mayor rapidez que en la configuración número 3, comenzando con picos de 30.4 dB y 27 dB en la distancia de 3cm y terminando en valores de 18 dB y



4.63 dB en 100 cm. Cabe resaltar que la configuración número 3 no sufre una caída brusca y los valores tienden a mantenerse, pero el desempeño es el más deficiente.

Adicionalmente, en la configuración número 2 en las distancias de 50 cm y 100 cm, se presenta mayor deterioro frente a la configuración número 3 con una diferencia promedio de 3 dB. Por último, es evidente que la configuración con mejor desempeño es la configuración número 1, dado que en todas las distancias se tienen los valores más altos de SNR.

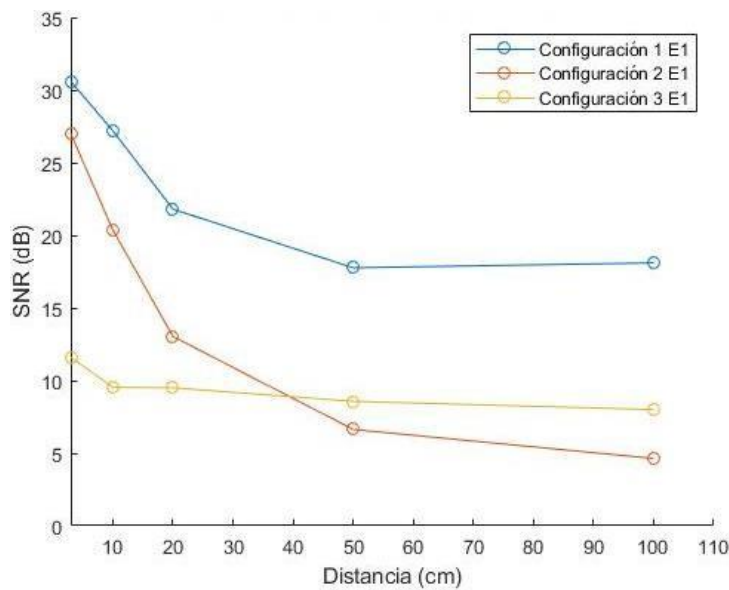


Figura 39. SNR vs Distancia Escenario 1.

3.2.1.3. BER teórica

Para el análisis se determinó la métrica de desempeño BER de forma teórica, haciendo uso de la Ecuación 4 definida en el capítulo 1, tomando como referencia los valores de EVM obtenidos.

$$BER = \frac{4}{\log_2 M} \cdot Q \left(\sqrt{\frac{3}{EVM^2 \cdot (M-1)}} \right) \quad (4)$$

En la Figura 40, se observa que en el eje vertical los valores de BER en escala logarítmica aumentan directamente proporcional a la distancia, encontrando como valor mínimo $10e^{-114}$ correspondiente a la configuración número 1 y el valor máximo en la configuración número 3 correspondiente a $10e^{-1}$. Aunque en las tres configuraciones la BER tiende a aumentar, en las configuraciones número 1 y 2 crece con rapidez, comenzando con $10e^{-114}$ y $10e^{-62}$ en la distancia de 3cm y termina en valores de



$10e^{-12}$ y $10e^{-2}$ en 100 cm; a diferencia de la configuración número 3, donde la BER no se ve afectada por la distancia y los valores tienden a mantenerse. Cabe resaltar que esta última tiene la configuración más exigente y el desempeño es deficiente.

Finalmente, se presenta un mejor desempeño de BER en la configuración número 1 respecto a las demás, debido al aumento de BW y SCS en las configuraciones número 2 y 3. Por lo tanto, la variación de la distancia y las configuraciones ocasionan problemas en la propagación de la señal, haciéndola más vulnerable a los efectos nocivos del medio.

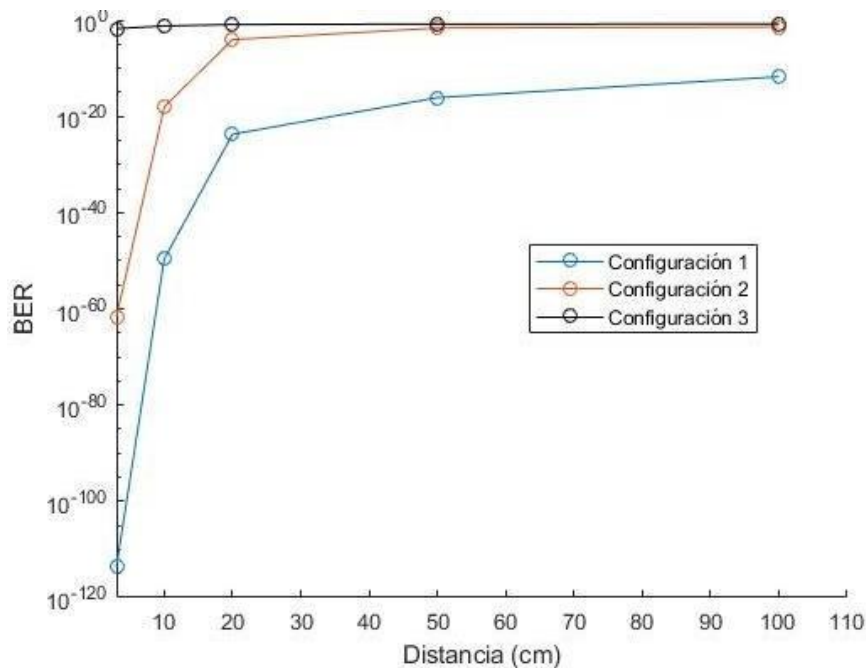


Figura 40. BER vs Distancia Escenario 1.

3.2.1.4. BER vs SNR

Para el análisis de BER vs SNR se considera la Figura 41, donde se observa que la BER disminuye conforme aumenta la SNR manteniendo la misma tendencia en las tres configuraciones. Adicionalmente se aprecia que en la configuración número 3 no existen cambios significativos, a diferencia de las configuraciones número 1 y 2 donde los valores de BER caen con más rapidez en SNR mayores a 15 dB, alcanzando mínimos de $10e^{-62}$ y $10e^{-114}$, respectivamente.

Con lo anterior, se comprobó que a distancias mayores donde la SNR toma valores más bajos, las configuraciones número 2 y 3 tienen desempeño similar pero muy bajo, mientras que para distancias cortas donde la SNR toma valores altos, el desempeño de la configuración 1 es superior alcanzando un valor de $10e^{-114}$, dado que en distan-



cias mayores el aumento del BW y SCS en las configuraciones, hacen a la señal vulnerable a los fenómenos de propagación presentando desfases en los símbolos de la constelación recibida.

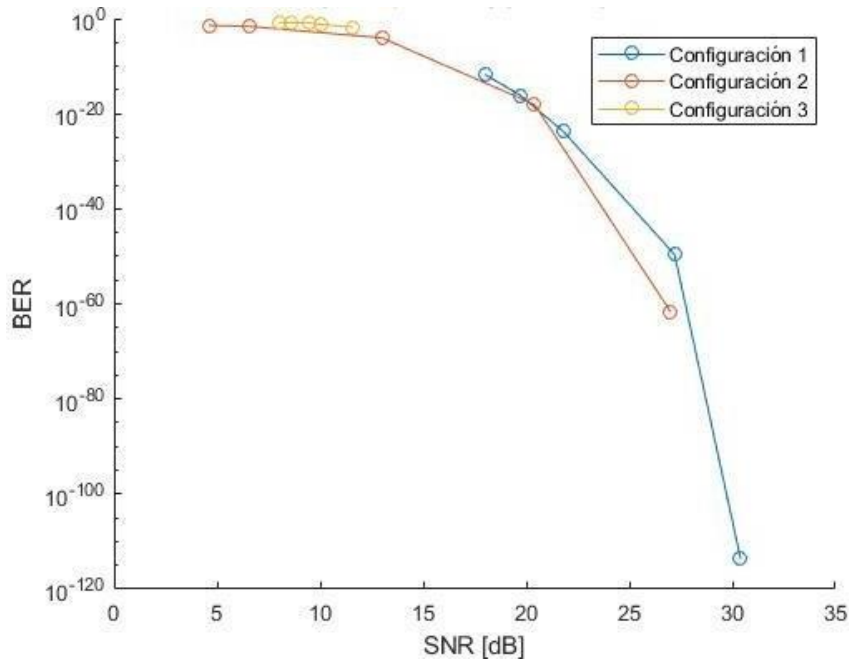


Figura 41. BER vs SNR Escenario 1.

3.2.2. Escenario 2

Este escenario corresponde al parque principal de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones de la Universidad del Cauca. El montaje se ubica entre el edificio y los árboles del parque, sin techo, a una distancia de 3 metros de la pared del edificio y 12 metros de los árboles, como se observa en la Figura 42 y Figura 43. Para este escenario se tienen en cuenta solamente las configuraciones 1 y 3, y el promedio de las 300 muestras obtenidas para 5 distancias entre 3 cm y 100 cm.



Figura 42. Escenario de Prueba Exterior.

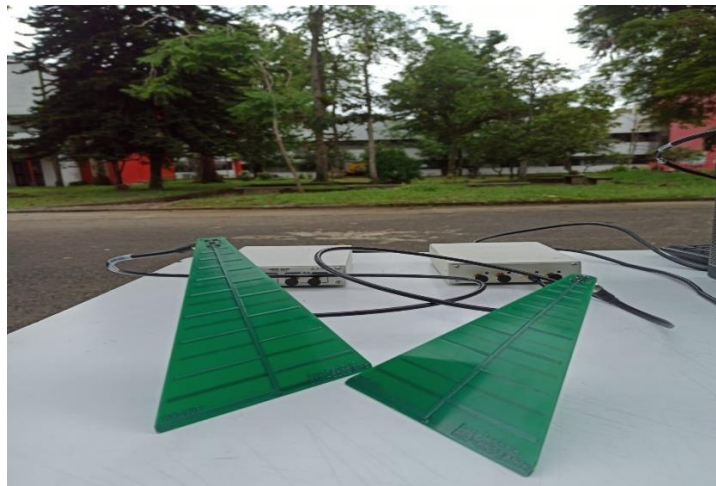


Figura 43. Montaje Escenario de Prueba Exterior.

3.2.2.1. EVM

Para el análisis de EVM se considera la Figura 44, donde se observa que los valores presentan un incremento directamente proporcional a la distancia teniendo un mínimo de 4.88% en la configuración número 1 y un máximo de 31% coincidente en las configuraciones 1 y 3. Aunque en las dos configuraciones el EVM tiende a aumentar, la configuración número 3 lo hace con más rapidez que la configuración número 1 en distancias de 3 cm hasta 50 cm, comenzando con 5.27% en la distancia de 3cm y alcanzando 27.27% en 50 cm; a diferencia de la configuración número 1, que inicia con 4.88% en 3 cm y alcanza 19% en los 50 cm. Para la distancia de 100 cm el EVM es de 31% y se comporta igual en las dos configuraciones.

Finalmente, se presenta un mejor EVM en la configuración número 1, debido la exigencia en BW y SCS que tiene la configuración número 3. Es necesario tener en



cuenta que en escenarios de exteriores, fenómenos de propagación como el ruido, el multirayecto y las influencias climáticas pueden afectar la señal, pero en el caso de esta última configuración, para frecuencias inferiores a los 6 GHz no interfieren dichos fenómenos [59].

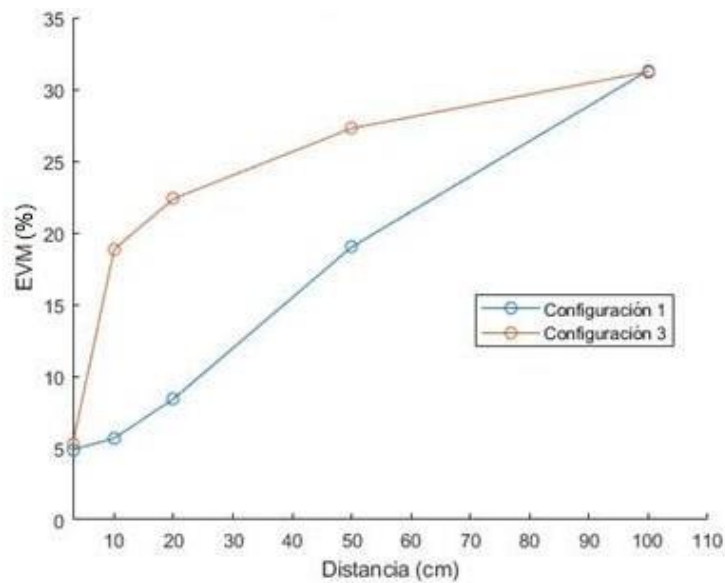


Figura 44. EVM vs Distancia Escenario 2.

3.2.2.2. SNR

Para el análisis de la SNR, se utiliza la Figura 45 donde se observa que los resultados disminuyen conforme aumenta la distancia, teniendo como valor máximo 31.3 dB correspondiente a la configuración número 1 y el valor mínimo de 10.23 dB en la configuración número 3. Aunque en las dos configuraciones la SNR tiende a disminuir, cae con más rapidez en la configuración número 3 para las distancias de 3 cm a 20 cm, comenzando con un pico de 29.96 dB y terminando con 15.1 dB, pero no para las distancias de 50 cm hasta los 100 cm, donde las dos configuraciones alcanzan valores de SNR semejantes de 14.5 dB y 11.8 dB en 50 cm, y 11 dB y 10.23 dB en 100 cm para las configuraciones número 1 y 3 respectivamente.

En la configuración número 3 en distancias inferiores a 20 cm se presenta mayor deterioro frente a la configuración número 1 con una diferencia promedio de aproximadamente 5 dB. Por último, se presenta un mejor desempeño de SNR en la configuración número 1 respecto a la configuración número 3, debido al aumento de BW y SCS que esta última presenta.

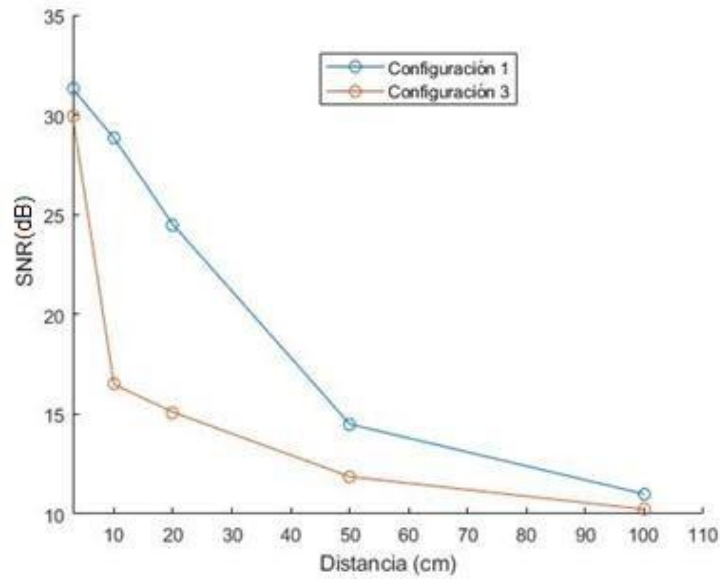


Figura 45. SNR vs Distancia Escenario 2.

3.2.2.3. BER Teórica

Para el análisis de la BER se considera la Figura 46, donde se observa que los aumentan directamente proporcional a la distancia, encontrando como valor mínimo de $10e^{-95}$ correspondiente a la configuración número 1 y un valor máximo de $10e^{-3}$ coincidente en las configuraciones número 1 y 3. Aunque en las dos configuraciones la BER tiende a aumentar, la número 3 lo hace con más rapidez que la número 1 en distancias de 3 cm hasta 20 cm, comenzando con $10e^{-85}$ en la distancia de 3cm y alcanzando $10e^{-6}$ en 20 cm; a diferencia de la configuración número 3, que inicia con $10e^{-95}$ en 3 cm y alcanza $10e^{-32}$ en los 20 cm. Para las distancias de 50 cm y 100 cm las dos configuraciones tienen valores altos de BER de $10e^{-7}$ en la configuración número 1 y $10e^{-4}$ en la configuración número 3 en 50 cm, y $10e^{-3}$ en 100 cm.

Finalmente, se presentan mejores valores de BER en la configuración número 1 con respecto a la configuración número 3, confirmando que el aumento de BW y SCS, tiene un efecto negativo en el desempeño del enlace.

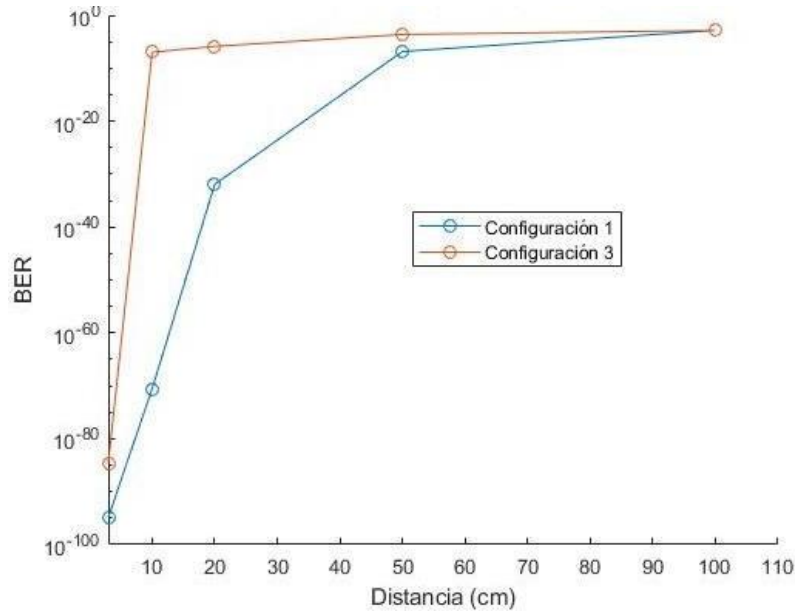


Figura 46. BER vs Distancia Escenario 2.

3.2.2.4. BER vs SNR

Para el análisis de BER vs SNR se considera la Figura 47, donde se observa que la BER disminuye conforme aumenta la SNR conservando la misma tendencia en las configuraciones 1 y 3. Adicionalmente, en valores de SNR menores a 15 dB, las configuraciones se comportan de manera similar, alcanzando diferencias máximas de 3 dB para valores de BER de $10e^{-3}$; mientras que en SNR mayores a 15 dB los valores de BER de la configuración número 3 respecto a la configuración número 1 presentan una caída más significativa alcanzado un mínimo de $10e^{-95}$ para una SNR de 31 dB.

Con lo anterior, se pudo comprobar que a distancias mayores donde la SNR toma valores más bajos, las configuraciones tienen un desempeño similar pero muy deficiente, mientras que para distancias cortas donde la SNR toma valores altos, el desempeño de la configuración número 1 es superior, alcanzando un valor de BER de $10e^{-95}$ respecto a un $10e^{-85}$ para la configuración número 3 con SNR mayores a 30 dB.

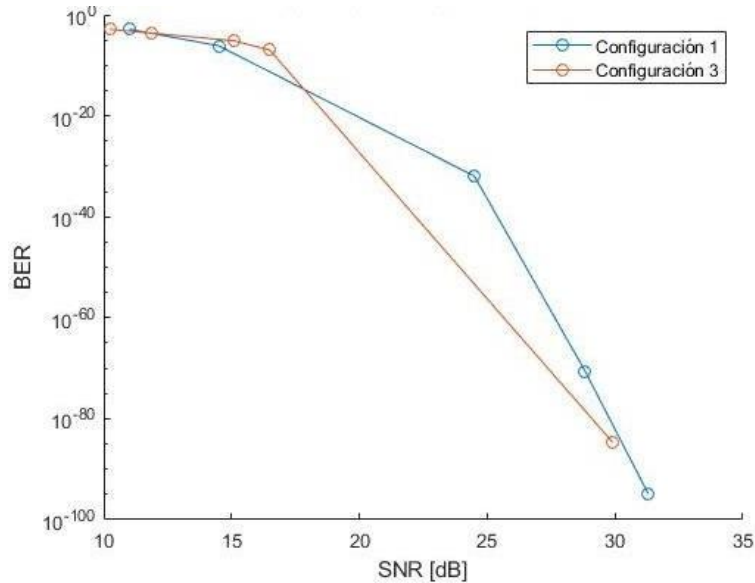


Figura 47. BER vs SNR Escenario 2.

3.2.3. Comparación de Escenarios de Prueba

Para analizar los dos escenarios, se tienen en cuenta las configuraciones comunes a una distancia máxima de 100 cm. Donde, los resultados de EVM y SNR en la configuración número 1 del escenario 1, se comparan con la configuración número 1 del escenario 2, y la configuración número 2 del escenario 1, con la configuración número 2 del escenario 2.

3.2.3.1. EVM

Para el análisis del EVM haciendo uso de la configuración número 1 en ambos escenarios, se considera la Figura 48, donde se observa que los resultados incrementan conforme aumenta la distancia teniendo un valor mínimo de 4.405% en el escenario 1 y un máximo de 31.31% correspondiente al escenario 2. Para las distancias de 3 cm a 20 cm los dos escenarios tienen valores de EVM similares, pero se presenta un mejor desempeño en el escenario 2 con una diferencia promedio de 0.95% haciéndolo más robusto para distancias cortas; lo que no ocurre en las distancias de 50 cm y 100 cm, donde el escenario 1 evidencia un mejor desempeño con una diferencia promedio de 4.338%, haciéndolo más robusto para distancias largas. Aunque en los dos escenarios el EVM tiende a aumentar, para las distancias de 50 cm a 100 cm, en el escenario 2 se muestra un crecimiento más rápido con 19% en 50 cm y alcanzando 31.31% en 100 cm.

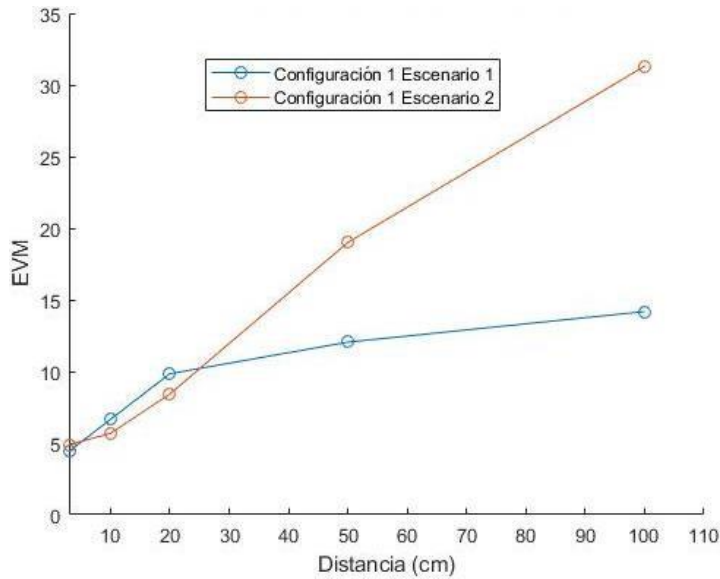


Figura 48. EVM vs Distancia Configuración 1 Escenario 1 y 2.

Al comparar la configuración número 3, se observa en la Figura 49 que el EVM incrementa conforme aumenta la distancia, teniendo un valor mínimo de 5.272% en el escenario 2 y un máximo de 71.02% correspondiente al escenario 1. Aunque en los dos escenarios el EVM tiende a aumentar, el 2 lo hace con mayor rapidez empezando con valores de 41.89% en 3cm y finalizando con 71.02 en 100cm. Finalmente, esta configuración presenta un mejor desempeño en el escenario 2 con una diferencia promedio de 39%, debido a que permite una propagación con menos obstrucciones en línea de vista.

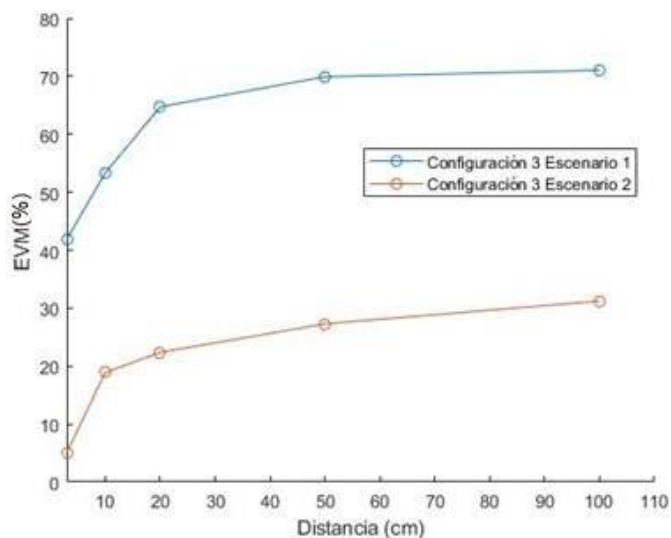


Figura 49. EVM vs Distancia Configuración 3 Escenario 1 y 2.



3.2.3.2. SNR

Para el análisis de la SNR con la configuración número 1 en ambos escenarios, se considera la Figura 50 donde se observa que los valores disminuyen conforme aumenta la distancia, teniendo como valor máximo 31.3 dB y un mínimo de 11 dB correspondientes al escenario 2. Para las distancias de 3 cm a 20 cm los dos escenarios tienen valores de SNR similares, pero se presenta un mejor desempeño en el escenario 2 con una diferencia promedio de 1.66%, haciéndolo más robusto para distancias cortas; lo que no ocurre en las distancias de 50 cm y 100 cm, donde el escenario 1 evidencia un mejor desempeño con una diferencia promedio de 3.55%, haciéndolo más robusto para distancias largas. Aunque en los dos escenarios el EVM tiende a disminuir, para las distancias de 50 cm a 100 cm, en el escenario 2 se muestra una caída más rápida con 14 dB en 50 cm y alcanzando 11 dB en 100 cm.

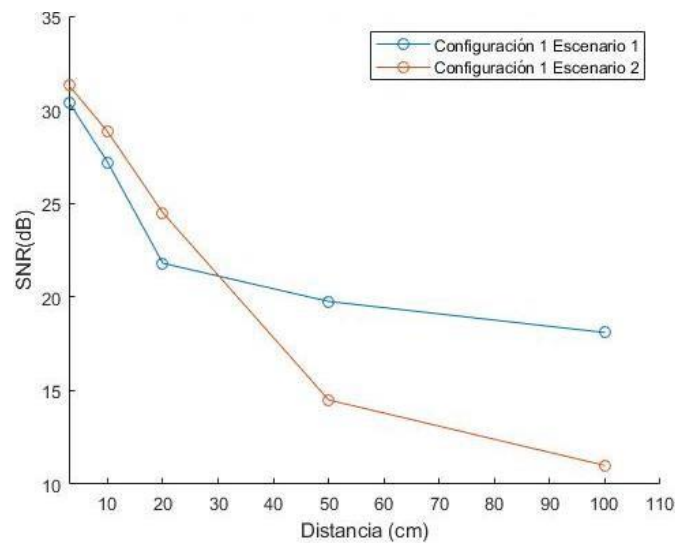


Figura 50. SNR vs Distancia Configuración 1 Escenario 1 y 2.

Al comparar la configuración número 3, se observa en la Figura 51 que la SNR disminuye conforme aumenta la distancia, teniendo un valor máximo de 29 dB en el escenario 2 y un mínimo de 8 dB correspondiente al escenario 1. Aunque en los dos escenarios la SNR tiende a disminuir, el 2 lo hace con mayor rapidez empezando con valores de 29 dB en 3cm y finalizando con 10 dB en 100cm, a diferencia del 1 que inicia con 11 dB en 3 cm y alcanza 8 dB para 100 cm. Finalmente, se presentan mejores valores de SNR en el escenario 2 con una diferencia promedio aproximada de 7.2 dB respecto al 1.

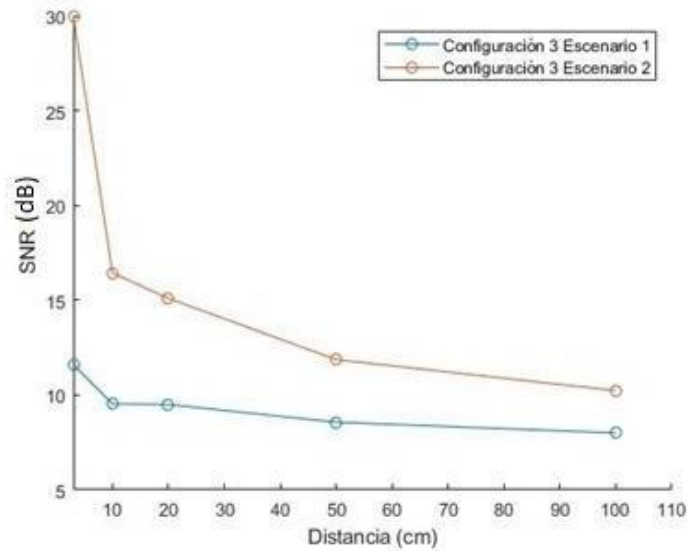


Figura 51. SNR vs Distancia Configuración 3 Escenario 1 y 2.

2.3.4. Análisis General

Al aumentar el BW en el dominio de la frecuencia de la señal en recepción se tiende a recibir un mayor número de bits erróneos por lo que se dificulta su recuperación, además, es importante resaltar que al aumentar el SCS la robustez de la comunicación se puede ver afectada por el ruido de fase. Lo anterior se comprueba con el análisis de las métricas de desempeño, donde, en los escenarios de prueba de interiores y exteriores la configuración número 1 con un SCS de 15 KHz y un BW de 5 MHz, tuvo un mejor desempeño frente a las configuraciones número 2 y 3. Adicional a esto, el escenario de exteriores presenta mejores condiciones para realizar el enlace de comunicación, ya que al tener una propagación de la señal más limpia (Menos obstáculos alrededor del transmisor y receptor) pudo aprovechar mejor el BW sin afectar el desempeño, lo que no sucede con el escenario de interiores que al tener un mayor número de obstáculos cerca, ocasiona efectos de multitrayecto y distorsiones a la señal.



CAPÍTULO 4.

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo, se presentan las conclusiones que surgen a partir del desarrollo y análisis del enlace, como los trabajos futuros en el entorno de la tecnología 5G.

4.1. CONCLUSIONES

- La generación de formas de onda válidas y el adecuado procesamiento de la señal, no se pueden realizar sin antes tener en cuenta todos los aspectos técnicos a nivel físico del estándar 5G-NR.
- La capacidad de procesamiento de los equipos utilizados se afecta cuando se usan frecuencias de muestreo mayores a 30,72 MHz, espaciamientos de subportadora mayores a 30 KHz y anchos de banda superiores a 10 MHz, lo que ocasionó limitaciones al elegir características de mayor exigencia.
- La sincronización para la recepción del enlace retrasó la fase de pruebas debido a la limitación para ajustar características de los osciladores y convertidores de las USRP, obligando a sincronizar manualmente y retransmitir la señal en repetidas ocasiones, buscando a ensayo y error el tiempo exacto de conexión entre el transmisor y el receptor.
- Las instalaciones físicas entre las antenas (cableado y línea de vista), dificultaron la captura de la información afectando el desempeño.
- La propagación de la señal se ve afectada al aumentar la distancia y la exigencia de las configuraciones ya que hace a la señal vulnerable a los efectos nocivos del canal, como el multitrayecto y la atenuación.
- El escenario de exteriores y la configuración 1, se muestran como los más favorables para llevar a cabo la comunicación 5G implementada, ya que al tener una propagación de la señal más limpia (Menos obstáculos alrededor del transmisor y receptor) y menor exigencia, se obtuvo una menor cantidad de errores en recepción.
- A través de dispositivos SDR es posible implementar y evaluar un enlace de comunicación 5G funcional.



4.2. TRABAJOS FUTUROS

- Análisis del desempeño de un enlace de comunicación 5G a nivel físico en canales PDSCH haciendo uso de SDR.
- Análisis del desempeño de un enlace de comunicación 5G a nivel físico haciendo uso de diferentes dispositivos SDR.
- Análisis del desempeño de un enlace de comunicación a nivel físico haciendo uso de diferentes dispositivos SDR para 5G y 4G.
- Análisis de la cobertura y capacidad de un enlace 5G haciendo uso de SDR.



REFERENCIAS

- [1] M. Vaezi, Zhiguo Ding, H. Vincent Poor, "Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond". USA 2020. Springer, Cham.
- [2] E. Dahlman, G. Mildh, S. Parkvall, J. Peisa, J. Sachs and Y. Selén, "5G radio access," Ericsson, 2014. [En Línea]. Disponible en: <https://www.ericsson.com/en/reports-and-papers/ericsson-technology-review/articles/5g-radio-access>.
- [3] A. Zaidi, J. Medbo, G. Durisi, F. Athley, U. Gustavsson, y X. Chen, 5G Physical Layer: principles, models and technology components. USA, Mara Conner 2018. [En línea]. United Kingdom: Elsevier Academic Press.
- [4] Mathworks. "5G New Radio Design with MATLAB". Accedido dic. 16, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/campaigns/offers/5g-technology-ebook.html>.
- [5] 3rd Generation Partnership Project-3GPP, "Release 15," 3GPP a Global Initiative, April 26, 2019. [En Línea] Disponible en: <https://www.3gpp.org/release-15>.
- [6] E. V. Barrera y R. O. Almeida, "Análisis de cambios en características fundamentales de la Telefonía Celular desde 1G hasta 5G" Proyecto de Titulación, Dept. de Ingenierías y Arquitectura, Universidad Santo Tomás, Bucaramanga, 2017. [En línea]. Disponible en: <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/4405/2017-BarreraVargasEver-OrtegaAlmeidaRafaelDionisiotrabajodegrado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [7] B. Kalra, Dr. D. K. Clauhan, "A Comparative Study of Mobile Wireless Communication Network: 1G to 5G", International Journal of Computer Science and Information Technology Research, vol. 2, nº 3, p. 430-433, Septiembre de 2014.
- [8] R. Heath Jr., Introduction to Wireless Digital Communication: A Signal Processing Perspective, 1era Ed. USA, PRENTICE HALL, 2017.
- [9] R. Agustí Comes, *LTE nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. Madrid: Fundación Vodafone España, 2010.
- [10] Huawei Technologies CO Ltda, "5G Wireless Network Planning Solution," Bantian Longgang, China, 2018. [En Línea]. Disponible en: <https://studylib.net/doc/25326172/5g-wireless-network-planing-solution-en>.
- [11] Y. Yifei y W. Xinhui, "5G New Radio: Physical Layer Overview", ZTE Corp., Shenzhen, China, 14 de Julio de 2017. [En Línea]. Disponible en: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/34.1294.TN.20170614.0712.002.html>.
- [12] E. Dahlman y S. Parkvall, "NR - The New 5G Radio-Access Technology", en *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, jun. 2018, pp. 1-6. doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417851.
- [13] International Telecommunication Union-ITU, "5G – Quinta generación de tecnologías móviles", Abril, 2022. [En Línea]. Disponible en: <https://www.itu.int:443/es/mediacentre/backgrounders/Pages/5G-fifth-generation-of-mobile-technologies.aspx>.



- [14] 5G Americas, “5G AT THE EDGE». Accedido: 16 de diciembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.5gamericas.org/wp-content/uploads/2019/10/Executive-Summary-EDGE.pdf>
- [15] Ministerio de tecnologías de la información y las comunicaciones (MinTIC), “Informe de asignación espectro para uso de pruebas técnicas 5g,” Bogotá, Colombia 2020. [En línea]. Disponible en: https://micrositios.mintic.gov.co/plan_5g/pdf/infome_asignacion_5g_2.pdf.
- [16] International Telecommunication Union-ITU, “Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)”. Accedido: 16 de diciembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.itu.int/md/R15-SG05-C-0040/en%7B>.
- [17] A. W. Scott y R. Frobenius, “Multiple Access Techniques: FDMA, TDMA, AND CDMA”, en *RF Measurements for Cellular Phones and Wireless Data Systems*, IEEE, 2008, pp. 413-429. doi: 10.1002/9780470378014.ch30.
- [18] Anritsu, "Diccionario y glosario de términos de tecnología inalámbrica [AB]", Julio de 2021. [En Línea]. Disponible en: <https://www.anritsu.com/en-us/test-measurement/technologies/bts-testing/bts-glossary-a-b>.
- [19] Dr. P. Agyapong, J. Nilsson, “Generación y análisis de señal para 5G NR”. Rohde&Schwarz, 2019. [En línea]. Disponible en: https://cdn.rohde-schwarz.com/pws/dl_downloads/dl_common_library/dl_news_from_rs/219/NEWS_219_10_5G_NR_ES.pdf.
- [20] Telefonica, “Qué es el 5G y cómo funciona”. Accedido: 26 de julio de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.telefonica.com/documents/364672/413998/como-funciona-el-5G.jpg/d90f0011-480f-715e-7c85-462793ca9d9d?t=1564671038764>
- [21] 3rd Generation Partnership Project-3GPP, “NG-RAN Architecture”. Accedido: 9 de junio de 2021. [En Línea]. Disponible en: https://www.3gpp.org/news-events/2160-ng_ran_architecture.
- [22] 3rd Generation Partnership Project-3GPP, “TS 23.101 version 8.0.0 Release 8”. Accedido: 9 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123100_123199/123101/08.00.00_60/ts_123101v080000p.pdf
- [23] 3rd Generation Partnership Project-3GPP, “TS 38.201 V16.0.0”. Accedido: 8 de septiembre de 2021. [En línea]. Disponible en: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3211>.
- [24] Comunidad Huawei Enterprise, "Tópicos sobre 5G: Recursos de dominio de frecuencia 5G parte 1". Accedido: 17 de agosto de 2021. [En Línea]. Disponible en: <https://forum.huawei.com/enterprise/es/t%C3%B3picos-sobre-5g-recursos-de-dominio-de-frecuencia-5g-parte-1/thread/752829-100763>.
- [25] S. Tabbane, “5G networks and 3GPP Release 15”, ITU. Accedido: septiembre 2021. [En Línea]. Disponible en: https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-Presence/AsiaPacific/SiteAssets/Pages/Events/2019/ITUPITA2018/ITU-ASP-CoE-Training-on-/5G%20networks%20and%203GPP%20Release%2015_vf.pdf.
- [26] Z. Wei, J. Yuan, D. W. K. Ng, M. El Kashlan, y Z. Ding, “A Survey of Downlink Non-orthogonal Multiple Access for 5G Wireless Communication Networks”, ZTE Communications, sep. 2016. [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/1609.01856>
- [27] M. Vaezi, Z. Ding, y H. V. Poor, *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*. Springer, Cham, 2018. DOI: 10.1007/978-3-319-92090-0.



- [28] C. M. Hernández, V. M. Quintero, "Nivel Físico LTE". Accedido: 31 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~vflorez/LTE/Capitulo3b%20x6.pdf>
- [29] I. Morcillo, "Implementación de un receptor simple GSM mediante plataforma Software Defined Radio", Proyecto de Titulación, Dept. de Teoría de la Señal y Comunicaciones. Universidad Carlos III de Madrid, Leganés, Septiembre 2014. [En línea]. Disponible en: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/26224/TFG_Isaac_Morcillo_Gutierrez_2014.pdf?sequence=1
- [30] U. Anya, "Study, Measurements and Characterisation of a 5G system using a Mobile Network Operator Testbed", Tesis de Maestría, Dept. de Telecomunicaciones e Informática, Universidad Nacional de Atenas, Atenas, Septiembre de 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-05995/whitepapers/5992-2707.pdf?success=true>
- [31] Keysight Technologies, "First Steps in 5G: Overcoming New Radio Device Design Challenges Serie- Part 1: 5G New Radio Standard," USA, oct. 2019. [En Línea]. Disponible: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/7018-05995/whitepapers/5992-2707.pdf?success=true>.
- [32] 3rd Generation Partnership Project-3GPP, "TS 38.211 V16.1.0". Accedido: 9 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.211/.
- [33] E. A. V. Barrios, "Estudio del rendimiento de nuevas numerologías para sistemas Beyond 5G en la banda de sub-THz", Proyecto de Titulación, Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM, Universidad Politécnica de Valencia, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/157711/Vergara%20-%20Estudio%20del%20rendimiento%20de%20nuevas%20numerolog%C3%ADas%20para%20sistemas%20Beyond%205G%20en%20la%20banda%20de%20s...pdf?sequence=1>.
- [34] 3rd Generation Partnership Project-3GPP, "TS 38.300 V1.2.0 1". Accedido: 15 de agosto de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.300/.
- [35] Qualcomm Technologies, Inc., "Making 5G NR a reality. Leading the technology inventions for a unified, more capable 5G air interface", Qualcomm, 2016. [En línea]. Disponible en: <https://www.qualcomm.com/media/documents/files/white-paper-making-5g-nr-a-reality.pdf>
- [36] M. Al-Imari, B. Mouhouche, y M. Nekovee, "Non-orthogonal FQAM for multiple access in the uplink of 5G wireless networks", en *2016 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, sep. 2016, pp. 75-79. doi: 10.1109/ISWCS.2016.7600878.
- [37] D. Mattera, M. Tanda, y M. Bellanger, "Analysis of an FBMC/OQAM scheme for asynchronous access in wireless communications", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2015, n.º 1, p. 23, marzo 2015, doi: 10.1186/s13634-015-0191-4.
- [38] J. Fickers, A. Ghazisaeidi, M. Salsi, F. Horlin, P. Emplit, y G. Charlet, "Multicarrier offset-QAM modulations for coherent optical communication systems", en *OFC 2014*, mar. 2014, pp. 1-3. doi: 10.1364/OFC.2014.M2A.5.



- [39] C. Ndujiuba, O. Oni, y A. Ibhaze, “Comparative Analysis of Digital Modulation Techniques in LTE 4G Systems”, *Journal of Wireless Networking and Communications*, vol. 5, pp. 60-66, ago. 2015, doi: 10.5923/j.jwnc.20150502.02.
- [40] J. H. Bae, A. Abotabl, H.-P. Lin, K.-B. Song, y J. Lee, “An overview of channel coding for 5G NR cellular communications”, *APSIPA Transactions on Signal and Information Processing*, vol. 8, ed 2019, doi: 10.1017/ATSIP.2019.10.
- [41] F. M. Catalá, “Diseño e Implementación en FPGA de un Decodificador de Códigos LDPC con Secuenciación por Capas”, Proyecto de Titulación, Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM, Universidad Politécnica de Valencia, Gandía, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/34092/memoria.pdf;jsessionid=27CC866055453947524F3A38A431C170?sequence=1>
- [42] European Telecommunications Standards Institute-ETSI, “TS 138.211 V15.2.0, 5G- NR Physical Channels and Modulation”. Accedido: 9 de junio de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/138200_138299/138211/15.02.00_60/ts_138211v150200p.pdf
- [43] E. Garro, M. Fuentes, D. Gomez, J. J. Gimenez, J. L. Carcel, D. Mi, H. Chen, I. Hemadeh, D. Vargas, D. Korpi, “Air Interface.”, 5G Xcast, 2018. [En Línea]. Disponible en: <https://ec.europa.eu/research/participants/documents/downloadPublic?documentIds=080166e5bfa63378&appId=PPGMS>.
- [44] T. Chapman, E. Larsson, P. von Wrycza, E. Dahlman, S. Parkvall, y J. Sköld, “Chapter 5 - Scheduling, link adaptation, and hybrid-ARQ”, en *HSPA Evolution*, Oxford: Academic Press, 2015, pp. 71-87. doi: 10.1016/B978-0-08-099969-2.00005-3.
- [45] Agencia Nacional del Espectro (ANE), “Consulta pública sobre las bandas disponibles para el futuro desarrollo de las IMT en Colombia”, Bogotá, Colombia, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://www.ane.gov.co/Documentos%20compartidos/ArchivosDescargables/noticias/Consulta%20p%C3%BAblica%20sobre%20las%20bandas%20disponibles%20para%20el%20futuro%20desarrollo%20de%20las%20IMT%20en%20Colombia.pdf>.
- [46] 3rd Generation Partnership Project-3GPP, “TS 38.104 NR Base Station (BS) radio transmission and reception”. Accedido: 10 de septiemb de 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/38_series/38.104/.
- [47] R. A. Shafik, Md. S. Rahman, y A. R. Islam, “On the Extended Relationships Among EVM, BER and SNR as Performance Metrics”, en *2006 International Conference on Electrical and Computer Engineering*, Dhaka, Bangladesh, dic. 2006, pp. 408-411. DOI: 10.1109/ICECE.2006.355657.
- [48] R. Shafik, Md. Rahman, A. Islam, y N. Ashraf, “On the error vector magnitude as a performance metric and comparative analysis”, en *2006 International Conference on Emerging Technologies*, Peshawar, Pakistan, 2006, pp. 27-31. DOI: 10.1109/ICET.2006.335992.
- [49] D. R. Smith, “Digital Modulation Techniques”, en *Digital Transmission Systems*, Ed. Boston, MA: Springer US, 2004, pp. 363-436. DOI: 10.1007/978-1-4419-8933-8_6.
- [50] H. W. I. Benítez y D. J. R. Chisaguano, “Simulación de la Técnica de Modulación UPMC para un Canal Multitrayecto Usando Estimación de Canal”, Proyecto de Titulación, Dept. de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, Quito, Ecuador, mayo 2020. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20884?mode=full>.



- [51] C. Ribeiro y A. Gameiro, "A software-defined radio FPGA implementation of OFDM-based PHY transceiver for 5G", *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, vol. 91, may 2017, doi: 10.1007/s10470-017-0939-x.
- [52] L. E. R. Peñas, "Sistemas Basados en SDR para Equipamiento de Comunicaciones Inalámbricas", Proyecto de Fin de Grado, Dept. Teoría de la Señal y Comunicaciones, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [53] C. M. G. Algora, "Radio Definido por Software usando MATLAB ". Proyecto Fin de Grado, Dept. de Telecomunicaciones, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Santa Clara, 2011. [En línea]. Disponible en: <https://dSPACE.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/4729/Carlos%20Manuel%20Garc%C3%ADa%20Algora.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [54] J. R. Machado-Fernández, "Software Defined Radio: Basic Principles and Applications", *Fac. Ing.*, vol. 24, n.º 38, p. 79, Tunja, dic. 2014. DOI: 10.19053/01211129.3160.
- [55] Mathworks, "Communications Toolbox - MATLAB & Simulink." Accessed February 11, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://www.mathworks.com/products/communications.html>
- [56] F. J. G. Peñalvo, A. G. Holgado, y A. V. Ingelmo, "Metodologías de Ingeniería de Software", presentado a 2º Grado en Ingeniería Informática, Curso de Ingeniería de Software I, Universidad de Salamanca, Salamanca, España, 2020.
- [57] Rational the Software Development Company", Rational Unified Process Best Practices for Software Development Teams", 2011. [En línea]. Disponible en: https://www.ibm.com/developerworks/rational/library/content/03July/1000/1251/1251_bestpractices_TP026B.pdf
- [58] International Communication Union Radiocommunication Sector- ITU R, "RECOMENDACIÓN UIT-R P.530-13 - Datos de propagación y métodos de predicción necesarios para el diseño de sistemas terrenales con visibilidad directa", 2009. [En Línea]. Disponible en : https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.530-13-200910-S!!PDF-S.pdf.
- [59] J. M. H. Rábanos, L. M. Tomás, y J. M. R. Salis, *Transmisión por radio*. Madrid, España. Editorial Universitaria Ramon Areces, 2013.
- [60] MathWorks, "Communications Toolbox Support Package for USRP Radio User's Guide", 2020.



LICENCIA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0)

Bajo los siguientes términos:

-  **Atribución** — Usted debe dar crédito de manera adecuada, brindar un enlace a la licencia, e indicar si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo de la licenciante.
-  **NoComercial** — Usted no puede hacer uso del material con propósitos comerciales.
-  **SinDerivadas** — Si remezcla, transforma o crea a partir del material, no podrá distribuir el material modificado.



Esta obra está publicada bajo una Licencia Licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-Sin-Derivadas 4.0 Internacional.



APENDICE A. Instalación y Configuración de Paquetes para Prueba de Calibración en Windows.

Inicialmente se realiza una prueba de calibración del enlace con el fin de preparar el montaje para las futuras pruebas. Para esta prueba se usan dos elementos SDR USRP B210, uno para Tx y otro para Rx, cada uno conectado a un respectivo computador de características mencionadas en el capítulo 2, a través de un puerto USB 3.0, que permite la comunicación para el posterior envío de la señal, a través de un cable coaxial conectado a los puertos de transmisión y recepción de las placas SDR como se observa en la Figura 52.



Figura 52. Placas USRP Comunicación Cableada.

Las características básicas de software para la configuración, se presentan a continuación:

- Sistema Operativo Windows 10
- Matlab R2021a con 5G Toolbox y Communication Toolbox

Es importante aclarar que estas características deben estar presentes en los dos computadores usados, ya que cada una de las versiones de Matlab presenta cambios en las funciones de los Toolboxes lo que podría dificultar las pruebas. Además, cada sistema operativo tiene unas instrucciones específicas de instalación y configuración. Ahora bien, una vez se tenga el montaje se empieza configurando y validando las conexiones computador-USRP mediante la instalación del paquete de soporte hardware definido para la conexión radio vía USB de la USRP B210 que se encuentra en la opción de instalación de complementos en la herramienta de Matlab como se observa en la Figura 53. Para posteriormente confirmar la instalación del paquete de *Communication Toolbox que junto con 5G Toolbox* permiten la implementación y verificación del enlace gracias a las propiedades de desarrollo a nivel físico que contienen, como se observa en la Figura 54.

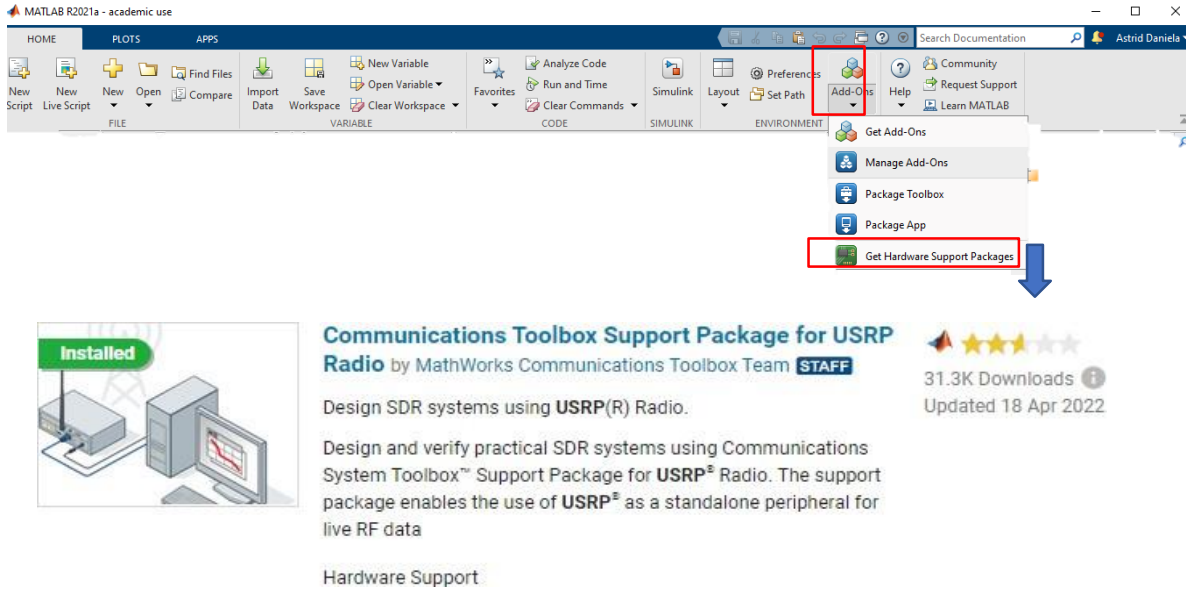


Figura 53. Instalación de Complementos de Matlab.

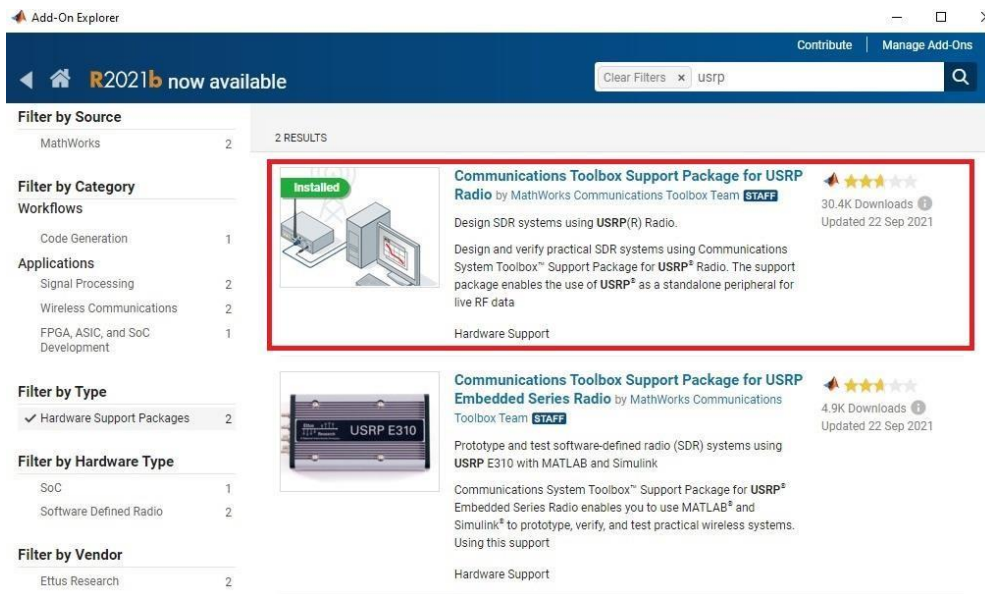


Figura 54. Paquete de Instalación USRP.

Con las USRP conectadas a los computadores de TX y RX se empieza la configuración del paquete y el controlador de los dispositivos eligiendo el tipo de radio en uso como se muestra en la Figura 55.

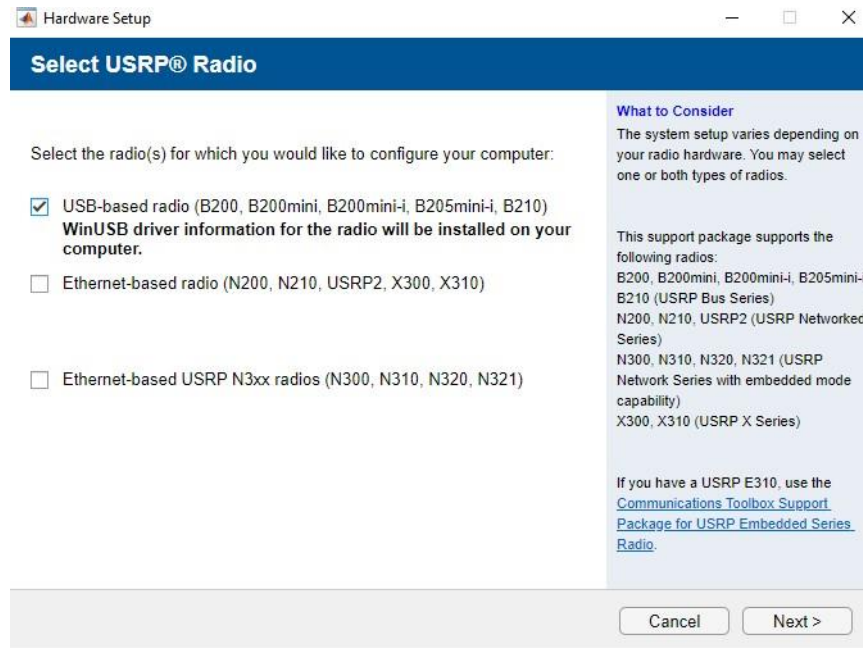


Figura 55. Interfaz de instalación USRP.

Al finalizar la configuración se genera un número serial de identificación del dispositivo USRP como se observa en la Figura 56, necesario para generar la conexión hardware-software dentro de los códigos de implementación de Tx y Rx para el enlace 5G. En caso de no recordar el identificador es posible revisar la información con el comando *findsdru* a través de *Command Window* de Matlab. Posteriormente, a través de código tanto para transmisión como recepción, se construye un objeto de sistema con las funciones *SDRuTransmitter* o *SDRuReceiver*, que permiten la conexión dependiendo la función definida para la radio, como se muestra en la Figura 57 y Figura 58. Otra de las configuraciones importantes en Tx y Rx de las USRP son el factor de diezmado y de interpolación que están directamente relacionados con la frecuencia de muestreo de la señal y dependiendo de la USRP en uso presentan un límite de valores [60].

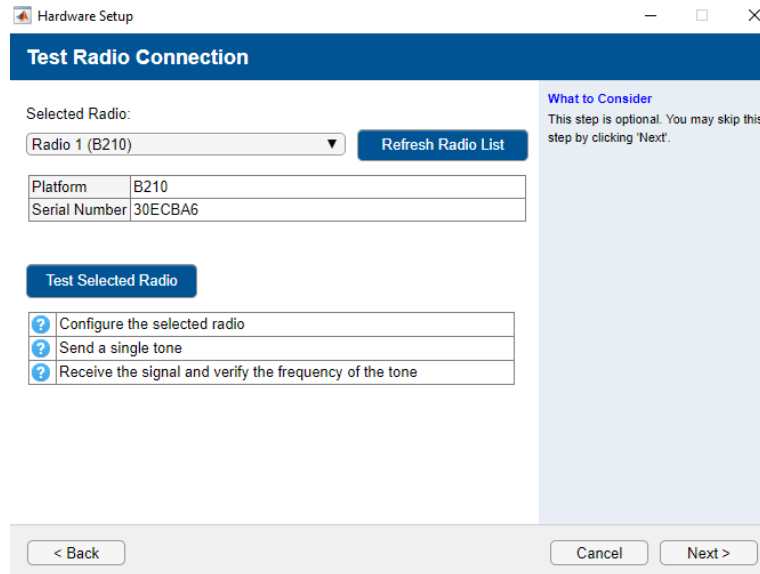


Figura 56. Serial de Conexión.

```
%% CONEXIÓN RADIO PARA ENVÍO DE SEÑAL
radioFound = false;
radiolist = findsdru;
]for i = 1:length(radiolist)
    if strcmp(radiolist(i).Status, 'Success')
        if strcmp(radiolist(i).Platform, 'B210')
            radio = comm.SDRuTransmitter('Platform','B210', ...
                'SerialNum', radiolist(i).SerialNum);
            radio.MasterClockRate = 15.36e6*2; % Solo para Radios B210, Cambie el Master Clock Rate
                                                %por cualquier valor hasta 30.72 MHz.
            radio.InterpolationFactor = 4;      % Tasa de muestreo 7.68 MHz
            radioFound = true;
            break;
        end
    end
end
```

Figura 57. Código de configuración en TX.

```
%%% CONEXIÓN PARA RX
clear all;
close all;
radioFound = false;
radiolist = findsdru;
for i = 1:length(radiolist)
    if strcmp(radiolist(i).Status, 'Success')
        if strcmp(radiolist(i).Platform, 'B210')
            radio = comm.SDRuReceiver('Platform','B210', ...
                'SerialNum', radiolist(i).SerialNum);
            radio.MasterClockRate = 15.36e6 * 2; % Debe tener una relación directa con la frecuencia de muestreo
            radio.DecimationFactor = 4;          % Frecuencia de muestreo es 7.68e6
            radioFound = true;
            break;
        end
    end
end
```

Figura 58. Código de Configuración en RX.



Con estas características definidas, se procede a configurar las propiedades de las placas USRP como el número de canales en uso, la frecuencia central, la ganancia que es específica de la aplicación, pero se recomienda usar al menos la mitad de la ganancia disponible para obtener un rango dinámico razonable; entre otros como se observa en la Figura 59.

```
radio.ChannelMapping = 2;
radio.CenterFrequency = 3.5e9;
radio.Gain = 40;
radio.SamplesPerFrame = 153600;
radio.OutputDataType = 'double';
radio.OverrunOutputPort = true;

radio;
```

Figura 59. Configuración de Propiedades de las placas USRP B210.

Los códigos de Tx y Rx para la comunicación USRP finalizados, se observan a continuación:

- Código de Tx Comunicación USRP

```
%% CONEXIÓN RADIO PARA ENVÍO DE SEÑAL
radioFound = false;
radiolist = findsdru;
for i = 1:length(radiolist)
    if strcmp(radiolist(i).Status, 'Success')
        if strcmp(radiolist(i).Platform, 'B210')
            radio = comm.SDRuTransmitter('Platform','B210', ...
                'SerialNum', radiolist(i).SerialNum);
            radio.MasterClockRate = 15.36e6*2; % Solo para Radios B210, Cambie el Mas-
            ter Clock Rate
            %por cualquier valor hasta 30.72 MHz.
            % Tasa de muestreo 7.68 MHz
            radio.InterpolationFactor = 4;
            radioFound = true;
            break;
        end
        if (strcmp(radiolist(i).Platform, 'X300') || ...
            strcmp(radiolist(i).Platform, 'X310'))
            radio = comm.SDRuTransmitter('Platform',radiolist(i).Platform, ...
                'IPAddress', radiolist(i).IPAddress);
            radio.MasterClockRate = 184.32e6;
            radio.InterpolationFactor = 24;
            radioFound = true;
        end
        if (strcmp(radiolist(i).Platform, 'N300') || ...
            strcmp(radiolist(i).Platform, 'N310'))
            radio = comm.SDRuTransmitter('Platform',radiolist(i).Platform, ...
                'IPAddress', radiolist(i).IPAddress);
            radio.MasterClockRate = 122.88e6;
            radio.InterpolationFactor = 16;
            radioFound = true;
        end
        if (strcmp(radiolist(i).Platform, 'N320/N321'))
            radio = comm.SDRuTransmitter('Platform',radiolist(i).Platform, ...
                'IPAddress', radiolist(i).IPAddress);
            radio.MasterClockRate = 245.76;
            radio.InterpolationFactor = 32;
```



```
        radioFound = true;
    end
end
end

if ~radioFound
    error(message('sdru:examples:NeedMIMORadio'));
end

radio.ChannelMapping = 1;      % Canal de tx usado
radio.CenterFrequency = 3.5e9;
radio.Gain = 40;
radio.UnderrunOutputPort = true;

radio
```

- Código de Rx Comunicación USRP

```
%%% CONEXIÓN PARA RX
clear all;
close all;
radioFound = false;
radiolist = findsdru;
for i = 1:length(radiolist)
    if strcmp(radiolist(i).Status, 'Success')
        if strcmp(radiolist(i).Platform, 'B210')
            radio = comm.SDRuReceiver('Platform','B210', ...
                'SerialNum', radiolist(i).SerialNum);
            radio.MasterClockRate = 15.36e6 * 2; % Debe tener una relación
            directa con la frecuencia de muestreo
            radio.DecimationFactor = 4;% Frecuencia de muestreo es 7.68e6
            radioFound = true;
            break;
        end
        %%Codigo para otras Series de USRP
        if (strcmp(radiolist(i).Platform, 'X300') || ...
            strcmp(radiolist(i).Platform, 'X310'))
            radio = comm.SDRuReceiver('Platform',radiolist(i).Platform, ...
                'IPAddress', radiolist(i).IPAddress);
            radio.MasterClockRate = 184.32e6;
            radio.DecimationFactor = 24;
            radioFound = true;
        end
        if (strcmp(radiolist(i).Platform, 'N300') || ...
            strcmp(radiolist(i).Platform, 'N310'))
            radio = comm.SDRuReceiver('Platform',radiolist(i).Platform, ...
                'IPAddress', radiolist(i).IPAddress);
            radio.MasterClockRate = 122.88e6;
            radio.DecimationFactor = 16;
            radioFound = true;
        end
        if (strcmp(radiolist(i).Platform, 'N320/N321'))
            radio = comm.SDRuReceiver('Platform',radiolist(i).Platform, ...
                'IPAddress', radiolist(i).IPAddress);
            radio.MasterClockRate = 245.76e6;
            radio.DecimationFactor = 32;
            radioFound = true;
        end
    end
end

if ~radioFound
    error(message('sdru:examples:NeedMIMORadio'));
end
```



```
radio.ChannelMapping = 2;  
radio.CenterFrequency = 3.5e9;  
radio.Gain = 50;  
radio.SamplesPerFrame = 76800;  
radio.OutputDataType = 'double';  
radio.OverrunOutputPort = true;  
radio.EnableBurstMode = true;  
radio.NumFramesInBurst = 50;  
  
radio;
```

Con lo anterior se obtiene una conexión exitosa donde se recibe un mensaje a través del *Command Window* como se visualiza en la Figura 60 y ya es posible adicionar los códigos de implementación del enlace con las características a nivel físico que permitirán la transmisión, recepción y procesamiento digital de la señal.

```
Checking radio connections...  
Win32; Microsoft Visual C++ version 14.2; Boost_107200; UHD_3.15.0.0-vendor  
  
----- see libuhd version information above this line -----  
Loading FPGA image: C:\ProgramData\MATLAB\SupportPackages\R2021a\3P.instrset\uhdimage.instrset\uhd-images_3.15.0.0\usrp_b210_fpga.bin...
```

Figura 60. Conexión Exitosa con USRP.



TRABAJO DE GRADO – MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO TI-E: REMISIÓN DEL DOCUMENTO FINAL AL CONSEJO DE FACULTAD POR EL DIRECTOR RESPECTIVO

TITULO: ANÁLISIS DE DESEMPEÑO DE UN ENLACE DE COMUNICACIÓN 5G HACIENDO USO DE SDR

DIRECTOR: MsC. Claudia Milena Hernández Bonilla

ESTUDIANTE 1: Astrid Daniela Narváez López

CÓDIGO: 100615011352

ESTUDIANTE 2: Isabela Yanza Insuasty

CÓDIGO: 100614021010

A) EL TRABAJO CUMPLE CON LAS CONDICIONES DE ENTREGA? SI (X) NO ()

B) DOCUMENTO Y ANEXOS COMPLETAMENTE TERMINADOS? SI (X) NO ()

OBSERVACIONES:

FECHA: 16 de Mayo del 2022

FIRMA: _____
Director del Trabajo de Grado

Nota: Junto con este formato se debe entregar el formato de paz y salvo académico de cada estudiante.

Espacio para uso exclusivo del Consejo de Facultad

Sesión del Consejo de Facultad del día _____

Designación de Jurados

Jurado Coordinador _____

Jurado _____



TRABAJO DE GRADO – MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN



FORMATO TI-F: FORMATO DE REVISIÓN ACADÉMICA, PAZ Y SALVOFINANCIERO PARA NOMBRAMIENTO DE JURADOS DE PARA SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

NOMBRE: Astrid Daniela Narváz López CÓDIGO: 100615011352

PROGRAMA: Ingeniería electrónica y telecomunicaciones CÉDULA: 1063817158

Pago de matrícula del semestre: SI NO

Pago de laboratorio de semestre actual: SI NO

Plan de estudios: completo: SI NO Reingreso: SI NO

Actividad física formativa: SI NO

Prueba de suficiencia en idioma extranjero: SI NO Eva-

luación del director de trabajo de grado: _____

Prueba SABER-PRO: EK201951582865

HORAS DE SEMINARIO: (Aplica solo para estudiantes de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones)

Seminario I: No. de horas _____ CUMPLE: SI NO

Seminario II: No. de horas sustentación de trabajos de grado: CUMPLE: SI NO

No. horas asistencia a seminarios: _____ CUMPLE: SI NO

ACTIVIDADES CULTURALES: (Aplica solo para estudiantes de Ingeniería en Automática Industrial)

SI _____ NO _____

Revisó _____

Fecha _____

FIRMA DECANO



TRABAJO DE GRADO – MODALIDAD TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

FORMATO TI-F: FORMATO DE REVISIÓN ACADÉMICA, PAZ Y SALVOFINANCIERO PARA NOMBRAMIENTO DE JURADOS DE PARA SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

NOMBRE: Isabela Yanza Insuasty

CÓDIGO: 100614021010

PROGRAMA: Ingeniería electrónica y telecomunicaciones CÉDULA: 1061797525

Pago de matrícula del semestre: SI NO

Pago de laboratorio de semestre actual: SI NO

Plan de estudios: completo: SI NO Reingreso: SI NO

Actividad física formativa: SI NO

Prueba de suficiencia en idioma extranjero: SI NO Eva-

luación del director de trabajo de grado: _____

Prueba SABER-PRO: EK201952465979

HORAS DE SEMINARIO: (Aplica solo para estudiantes de Ingeniería Electrónica y Telecomunicaciones)

Seminario I: No. de horas _____ CUMPLE: SI NO

Seminario II: No. de horas sustentación de trabajos de grado: CUMPLE: SI NO

No. horas asistencia a seminarios: _____ CUMPLE: SI NO

ACTIVIDADES CULTURALES: (Aplica solo para estudiantes de Ingeniería en Automática Industrial) SI NO

Revisó _____

Fecha _____

FIRMA DECANO