



Universidad Nacional
SAN LUIS GONZAGA



Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional

Esta licencia es la más restrictiva de las seis licencias principales Creative Commons, permitiendo a otras solo descargar sus obras y compartirlas con otras siempre y cuando den crédito, pero no pueden cambiarlas de forma alguna ni usarlas de forma comercial.

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>



N° 036-2024

CONSTANCIA

El que suscribe, director de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica, hace constar que se ha realizado el análisis con el software de verificación de similitud de la Tesis cuyo título es:

“REDUCCIÓN DE LATENCIA EN REDES 5G”

Presentado por:

QUINTANILLA MAYURI, LIZANDRA MIRELLA BELEN

TITULANDO EGRESADO del nivel de **PREGRADO** de la Facultad **INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA** – Escuela Profesional de **INGENIERÍA ELECTRÓNICA**. El resultado obtenido es un porcentaje de **UNO POR CIENTO (1%)**, por el cual se le otorga el calificativo de:

APROBADO

Se adjunta al presente, el reporte de evaluación con el software de verificación de originalidad.

Ica, 12 de Febrero del 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN



Mag. Zenon Eudilio Pacheco Casavilca
JEFE DE UNIDAD

UNIVERSIDAD NACIONAL "SAN LUIS GONZAGA"
VICERRECTORADO DE INVESTIGACIÓN
Facultad de Ingeniería Mecánica Eléctrica y Electrónica



Reducción de latencia en redes 5G

Línea de investigación

Ciencias naturales, ingeniería y tecnologías sostenibles

INFORME FINAL DE TESIS

Autora:

LIZANDRA MIRELLA BELEN QUITANILLA MAYURI

Ica, Perú

2022

Dedicatoria

Dedico mi tesis principalmente a Dios, por darme la fuerza necesaria para culminar esta meta.

A mi madre y a mi hijo por todo su amor y por motivarme a seguir hacia adelante.

También a mis hermanos, por brindarme su apoyo moral en esas noches que tocaba investigar.

Agradecimientos

Es un orgullo para mí poder nombrar a todas las personas que de una u otra forma me ayudaron a cumplir esta meta tan anhelada de graduarme en la carrera “ingeniería electrónica” en honor a este orgullo quiero ofrecer mis agradecimientos a:

- Primero doy gracias a Dios por darme la voluntad, la fuerza de permitir terminar esta carrera ingeniería electrónica.
- Doy gracias a mi madre Betty Mayuri Conde, hermanos Cindy Quintanilla Mayuri, Roberto Quintanilla Mayuri e hijo Maximiliano Mamani Quintanilla por ser mi principal apoyo en este proyecto.
- Doy gracias a la Universidad “San Luis Gonzaga”, por contar con los mejores profesores que un estudiante puede tener, por preocuparse por tener las mejores instalaciones por brindar todas las herramientas para poder enseñar de la mejor manera.
- Doy gracias a los docentes y en especial por al Ing. Hipólito Rodríguez Casa vilca, que me apoyó desde el inicio en este proyecto.
- También a la empresa Cantaloc S.A.C , darle las gracias por su apoyo económico y acogerme en la empresa.
- Doy gracias a mi compañera Cindy Lucero Huaripoma por abrirme las puertas de su casa y apoyarme en este largo camino académico que hoy veo terminado y no podría presentar mi tesis sin ofrecerles mi gratitud.

Indice

Dedicatoria.....	ii
Agradecimientos	iii
Índice.....	iv
Índice de tablas.....	viii
Índice de figuras.....	ix
Resumen.....	xi
Abstract.....	xii
I. Introducción.....	1
1.1. Realidad problemática	1
1.1.1. Problema general.....	1
1.1.2. Problemas específicos	1
1.2. Antecedentes	1
1.2.1. Antecedentes internacionales	1
1.2.2. Antecedente nacional	3
1.3. Justificación e importancia de la investigación.....	3
1.3.1. Justificación.....	3
1.3.2. Importancia.....	3
1.4. Objetivos de la investigación	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Contenido de la investigación	4
II. Estrategia metodológica	5
2.1. Análisis de la evolución de la red LTE a 5G	5
2.2. Arquitectura de la red.....	8
2.2.1. Técnicas facilitadoras.....	10
2.3. Arquitectura de la red 5G.....	16
2.3.1. Arquitectura de red independiente (SA).....	16
2.3.2. Arquitectura de red no independiente (NSA).....	17

2.4. Latencia en 5G	17
2.4.1. Parámetros de QoS.....	18
2.4.2. Requisitos técnicos de rendimiento para 5G.....	20
2.4.3. Fuentes de latencia en una red celular.....	21
2.4.4. Capa física URLLC en 5G NR.....	23
2.4.5. Métricas de evaluación para los requisitos de URLLC.....	25
2.4.6. Restricciones y enfoques para lograr una baja latencia.....	30
2.5. Indicador clave de rendimiento para el diseño de forma de onda 5G NR	34
2.5.1. Comparación de forma de onda para 5G NR	36
2.5.2. Idoneidad de OFDM para 5G NR	39
2.6. NOMA vs OMA	42
2.6.1. NOMA.....	42
2.6.2. Escenario de dos usuarios de NOMA.....	43
2.6.3. Mecanismo de NOMA	44
2.7. Estructura del marco de 5G NR	46
2.7.1. Canales físicos y señales 5G NR.....	49
2.7.2. Canales físicos compartidos.....	50
A. Canal compartido de enlace descendente físico	50
B. Canal compartido de enlace ascendente físico	51
2.6.3. Canales de control físico	52
A. Canal de control de enlace descendente físico	52
B. Canal de control de enlace ascendente físico	53
2.7.4. Señales de referencias físicas.....	54
A. Señales de referencia de demodulación de enlace descendente y enlace ascendente (DMRS).....	54
B. Señales de referencia de seguimiento de fase de enlace descendente y enlace ascendente (PTRS).....	55
C. Señales de referencia de información de estado de canal (CSI-RS)....	55
D. Señales de referencia de sondeo (SRS)	55
III. Resultados	56

3.1. Simulación	56
3.2. Simulación de la duración de la ráfaga para candidatos 5G	56
3.3. Simulación de la estructura del marco de 5G.....	57
3.3.1. Canales	58
3.3.1.1. Resultados y comentarios.....	58
3.3.2. Dúplex de división de tiempo (TDD).....	59
3.3.2.1. Piezas de ancho de banda (BWP)	59
3.3.2.2.1. Resultados y comentarios.....	59
3.3.2.2. Símbolos/Marcos	60
3.3.3. Dúplex por división de frecuencia (FDD).....	60
3.3.3.1. Parte de ancho de banda (BWP)	61
3.3.3.1.1. Resultados y comentarios.....	61
3.3.3.2. Símbolos/Marcos	62
3.4. Resultados y comentarios	62
3.4.1. Otros datos interesantes sobre 5G NR.....	64
IV. Discusión	65
V. Conclusiones	66
VI. Recomendaciones	68
VII. Referencias bibliográficas	69

Índice de Tablas

Tabla I: Mejoras en las versiones de la red LTE.....	6
Tabla II: Resumen de las técnicas de cancelación y supresión de auto interferencias.....	11
Tabla III: Ventanas de atenuación atmosférica.....	13
Tabla IV: Coeficientes de reflexión a 28 GHz.....	13
Tabla V: Exponentes de pérdida de trayectoria.....	13
Tabla VI: Diferenciales de retardo rms.....	13
Tabla VII: Estadística de interrupciones a 38 Ghz.....	14
Tabla VIII: Requisitos de rendimiento técnico de la URLLC.....	20
Tabla IX: Comparación entre esquemas de codificación de canales para baja latencia.....	32
Tabla X: Visión general de las técnicas en la red central para baja latencia.....	34
Tabla XI: Resumen comparativo de las formas de onda multiportadoras.....	36
Tabla XII: Evaluación de alto nivel de la OFDM sobre la latencia.....	41
Tabla XIII: Comparación NOMA vs OMA.....	46
Tabla XIV: Espaciado de subportadora soportado con símbolo proporcional y duraciones CP.....	47
Tabla XV: Número y longitud de las ranuras con el espaciado de la subportadora soportada.....	48
Tabla XVI: Esquemas de modulación admitidos para el enlace descendente.....	53
Tabla XVII: Esquemas de modulación admitidos para el enlace ascendente.....	54
Tabla XVIII: Parámetros de SIMULACIÓN para la duración del tiempo de ráfaga.....	56
Tabla XIX: Parámetros de SIMULACIÓN para la estructura del marco.....	57

Índice de Figura

Figura N°1: Red de acceso GSM vs red de acceso LTE.....	5
Figura N°2: Arquitectura de red LTE-Advanced.....	6
Figura N°3: Cronología de la función de lanzamiento de 3GPP.....	7
Figura N°4: Bandas de funcionamiento especificadas en la versión 15 de 3GPP para ondas milimétricas	8
Figura N°5: Plan de tiempo de evolución de la RRN	8
Figura N°6: Arquitectura de red.....	9
Figura N°7: Ilustración del despliegue de celdas pequeñas	12
Figura N°8: Interferencia en las comunicaciones D2D full-duplex	12
Figura N°9: Escenario típico de formación de haces dentro de una celda.....	14
Figura N°10: Arquitectura de beamforming: (a) Beamforming ideal (b) Beamforming equivalente de desplazamiento de fase	15
Figura N°11: Ejemplo de entrecerrar los ojos del haz con 32 elementos lineales de antena y dirección de haz de 200	15
Figura N°12: Pérdida de trayectoria en el espacio libre para diferentes frecuencias	16
Figura N°13: Arquitectura de red 5G SA.....	17
Figura N°14: Arquitectura de red 5G NSA.....	17
Figura N°15: Aprovisionamiento de QoS	19
Figura N°16: Latencia en el retardo E2E de la transmisión de paquetes	21
Figura N°17: Estructura de paquetes y tramas para URLLC: a) estructura de paquetes; b) estructura del bastidor; (c) numerologías admitidas para 5G NR	24
Figura N°18: Procedimiento del plano de usuario para la evaluación	27
Figura N°19-a: Procedimiento de plano de usuario para la evaluación	28
Figura N°20: Procedimiento del plano C empleado en la evaluación de la latencia del plano de control.....	28
Figura N°21: Diferentes tipos de almacenamiento en caché en 5G	33
Figura N°22: Categorías de diferentes soluciones para lograr baja latencia en 5G	34
Figura N°23: Importancia de los indicadores de rendimiento de la forma de onda, especialmente para la baja latencia	36

Figura N°24: Comparación de PAPR de formas de onda multiportadora y forma de onda DFTS-OFDM de portadora única.....	38
Figura N°25: Comparación de formas de onda multiportadora sujetas a un canal de desvanecimiento variable en el tiempo (velocidad UE de 60 km/h a una frecuencia portadora de 6 GHz)	38
Figura N°26: Un resumen de alto nivel de los requisitos de diseño de forma de onda para diferentes tipos de enlaces: enlace ascendente, descendente, enlace lateral, enlace V2V y enlace de backhaul	41
Figura N°27: Ejemplo de dos usuarios usando NOMA	43
Figura N°28: Diagrama de constelaciones NOMA QPSK.....	43
Figura N°29: Esquema de decodificación de usuario lejano.....	44
Figura N°30: Esquema de decodificación cercano al usuario.....	44
Figura N°31: OMA vs NOMA en la asignación de ancho de banda	45
Figura N°32: Estructura del marco NR.....	49
Figura N°33: Estructura de fotogramas para SFI = 0 (10 subtramas, 100% downlink).....	50
Figura N°34: Ilustración de 5G NR PDSCH.....	51
Figura N°35: Ilustración de 5G NR PDCCH y PUCCH. Para el enlace descendente, el esquema de modulación es de esta forma.....	53
Figura N°36: Eficiencia espectral y duración de ráfaga para los candidatos destacados de 5G	56
Figura N°37: Canales de enlace descendente FR1 (TDD/FDD).....	58
Figura N°38: Canales de enlace descendente FR2 (TDD/FDD).....	58
Figura N°39: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR1 (TDD)	59
Figura N°40: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR2 (TDD)	59
Figura N°41: Simulación de fotogramas para FR1 (TDD)	60
Figura N°42: Simulación de fotogramas para FR2 (TDD)	60
Figura N°43: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR1 (TDD)	61
Figura N°44: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR2 (FDD)	61
Figura N°45: Simulación de tramas para FR1 (FDD).....	62
Figura N°46: Simulación de trama para FR2 (FDD)	62

RESUMEN

Esta investigación se enfoca en abordar la latencia como el tiempo de demora en la transmisión de datos en el funcionamiento óptimo de las redes 5G. Se propone como objetivo determinar la reducción de latencia en redes 5G. Para ello se analizará la evolución de LTE a 5G, arquitectura de red, técnicas facilitadoras clave, arquitectura y latencia del 5G, parámetros de QoS, requisitos técnicos de rendimiento para 5G, fuentes de latencia en una red celular, capa física URLLC en 5G NR, métrica de evaluación para los requisitos de URLLC, restricciones y enfoques para lograr una baja latencia, identificando los espectros radioeléctricos que despliegan los anchos de bandas 1.7 GHz, 2.1 GHz, 2.5 GHz y 3.5 GHz en frecuencias inferiores a 6 GHz. A partir de ello, se diseñó y simuló utilizando protocolos de redes la estructura de la trama para enlace descendente e identificando sus parámetros. La implementación del espectro 5G varía de un país a otro, pero según los estándares introducidos por 3GPP, podemos obtener fácilmente un ancho de banda de 100 MHz en la frecuencia sub-6 GHz, lo que es un ancho de banda eficiente en comparación con el 4G, que tiene un ancho de banda máximo de 20 MHz. Además, el uso de múltiples numerologías permite diferentes escenarios y aplicaciones, como URLLC, eMBB, mMTC, para ser desplegadas. Las subportadoras estrechas permiten al usuario un menor consumo de batería y son eficientes en modo de espera y en modo activo asignamos al usuario un SCS más amplio y, como resultado, una duración de símbolo más corta.

Palabras claves: redes 5G, latencia, URLLC.

ABSTRACT

This research focuses on addressing latency as the data transmission delay time in the optimal operation of 5G networks. It is proposed as an objective to determine the latency reduction in 5G networks. For ellom, the evolution from LTE to 5G, network architecture, key enabling techniques, 5G architecture and latency, QoS parameters, technical performance requirements for 5G, sources of latency in a cellular network, URLLC physical layer in 5G NR, evaluation metrics for URLLC requirements, constraints and approaches to achieve low latency, identifying radio spectrums deploying bandwidths 1.7 GHz, 2.1 GHz, 2.5 GHz and 3.5 GHz at frequencies below 6 GHz. Based on this, the downlink frame structure was designed and simulated using network protocols and its parameters were identified. The implementation of 5G spectrum varies from country to country, but according to the standards introduced by 3GPP, we can easily obtain a bandwidth of 100 MHz in the sub-6 GHz frequency, which is an efficient bandwidth compared to 4G, which has a maximum bandwidth of 20 MHz. In addition, the use of multiple numerologies allows different scenarios and applications, such as URLLC, eMBB, mMTC, to be deployed. Narrow subcarriers allow the user lower battery consumption and are efficient in standby mode and in active mode we assign the user a wider SCS and, as a result, a shorter symbol duration.

Keywords: 5G networks, latency, URLLC

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática.

El Perú abarca una serie de desafíos que van desde brechas socioeconómicas hasta problemas de infraestructura, y uno de los desafíos específicos está relacionado con la reducción de latencia en redes 5G en ciertas zonas de la costa peruana. La latencia, que se refiere al tiempo de demora en la transmisión de datos, es crucial en el funcionamiento óptimo de las redes 5G con aplicaciones de respuestas inmediatas, como la telemedicina, la automatización industrial o vehículos autónomos. En el caso de las ciudades de la costa peruana de constante crecimiento y desarrollo, la reducción de la latencia en redes 5G se convierte en un factor crucial para potenciar su desarrollo económico y mejorar la calidad de vida de sus habitantes, debiendo mejorar su infraestructura de telecomunicaciones. Esto implica la instalación de antenas 5G, fibra óptica y equipos de transmisión que permitan una conectividad más eficiente. En muchas ocasiones, el acceso a estas tecnologías se ve obstaculizado por limitaciones presupuestarias, de inversión y regulación dificultando su implementación, por otro lado, la educación y la capacitación son aspectos cruciales. Resultando fundamental la inversión en programas de formación y capacitación para profesionales locales, así como fomentar la educación en áreas relacionadas con la tecnología y las telecomunicaciones desde etapas tempranas, otro problema importante es la concienciación y aceptación por parte de la población. Muchas veces, existe resistencia o falta de comprensión sobre los beneficios y el impacto positivo que puede tener el desarrollo de estas tecnologías en la ciudad siendo esencial la realización de campañas informativas y educativas para involucrar a la comunidad y generar confianza en la implementación de estas redes.

1.1.1. Problema general.

¿Cómo se podrá realizar la reducción de latencia en redes 5G?

1.1.2. Problemas específicos.

¿Cómo se logrará identificar los espectros radioeléctricos que despliegan los anchos de bandas 1.7 GHz, 2.1 GHz, 2.5 GHz y 3.5 GHz en frecuencias inferiores a 6 GHz?

¿Cómo se diseñar y simular en el entorno de desarrollo integrado la estructura de la trama para enlace descendente e identificar sus parámetros?

1.2. Antecedentes.

1.2.1. Antecedentes internacionales.

En el año 2022, V. Figueroa [1] tuvo como objetivo de proporcionar información acerca de cómo la Tecnología 5G, detallando tres ventajas que traerá consigo un know-how. Como se diseñó metodológico se propuso manifestar las características, la

implementación y el funcionamiento de la red inalámbrica, empleando métodos teóricos como: histórico-lógico y análisis-síntesis. Brindando respuestas técnicas acerca de las dudas de las personas suelen hacerse cuando surge un producto, se planearon desventajas o anomalías que proporcionará la tecnología 5G.

En el año 2021, J. Romero [2] tuvo como objetivo obtener una calibración en el modelo del canal InF implementando en la plataforma ns-3, utilizando la comparación de curvas de los principales indicadores de rendimiento (KPI). En cuanto a la metodología se propone el uso de un simulador NS-3, de redes el cual se basa en eventos directos, el software mencionado promueve el desarrollo de modelos de simulación realista. Para la obtención de los resultados y calibración del modelo, se han tomado como referencia las métricas aportadas por las empresas: Ericsson, Huawei, Nokia y ZTE y se logró una calibración satisfactoria.

En el año 2020, A. Castro [3] realizaron un estudio analizar el impacto del TTI sobre la latencia de la Red de Acceso Radio (RAN) de sistemas 5G. Para lo cual se realiza el estudio de la estructura de trama de nivel físico de Sistemas 5G y se propone diseñar escenarios de Simulación teniendo en cuenta la latencia en el nivel físico. Es posible concluir con la reducción del TTI, ya sea implementando diferentes numerologías o reduciendo el número de símbolos por TTI genera un gran impacto sobre la latencia de la RAN.

En el 2019, E. Medina [4] tuvo como objetivo poder desarrollar antenas en miniaturas de banda ultra ancha UWB, debiendo ser fácilmente adaptables a teléfonos 5G, a su vez analizar y optimizar las estructuras propuestas utilizando programas de computadora para el análisis electromagnético y desarrollar la capacidad de operar en bandas 28 GHz y 38-39 GHz, logrando un mayor de ancho de banda y en consecuencia aumento de la velocidad de transmisión y capacidad del canal. En cuanto la metodología se diseña 3 propone 3 estructuras diferentes (cuadrada circular y con forma de T asimétrica) utilizando el programa de análisis electromagnético Ansoft HFSS.

En el 2018, M. Ruilova [5] tuvo como objetivo el poder analizar las tecnologías de una red móvil de banda ancha 5G y sus factibilidades para poder potenciar el desarrollo del internet de las cosas (IoT). En cuanto a la metodología de trabajo utilizada fue realizar un estudio de la red móvil de banda ancha 5G para poder mejorar y potenciar el internet. Se realiza un análisis a detalle acerca del potencial de la tecnología 5G, por 3GGP para el IoT. En el 2020, J. Luque [6] tuvo como objetivo los entornos urbano-densos en las bandas 28 GHz y 73 GHz para caracterizar la propagación a gran escala. Cabe mencionar que los modelos de pérdida de propagación a gran escala en bandas milimétricas proporcionan una caracterización

más compleja para el tipo de servicios y retos que 5G promete soportar a diferencia de los modelos en bandas inferiores a 6 GHz. La investigación se desarrolla bajo un enfoque cuantitativo e incluye fenómenos asociados al canal de radio con línea de vista (LOS) y sin línea de vista (NLOS), donde las pérdidas de propagación son obtenidas usando los modelos de canal.

1.2.2. Antecedente nacional.

No se ha encontrado antecedentes locales.

1.3. Justificación e importancia de la investigación.

1.3.1. Justificación.

La investigación se justifica socialmente, por el impacto significativo en la sociedad en términos de innovación, acceso equitativo, mejoras en la atención médica y la seguridad, así como en la eficiencia y la sostenibilidad general; económicamente, por impulsar la productividad, fomentar la innovación, apoyar sectores tecnológicos emergentes y mejorar la competitividad en el mercado global. Esto se traduce en beneficios económicos tangibles para empresas, industrias y la economía en general; teóricamente, por los principios de comunicación, información, sistemas, tecnología y eficiencia, todos los cuales respaldan la búsqueda de mejoras continuas en las redes de comunicación para optimizar su funcionamiento y capacidad de transferencia de datos; técnicamente, por la combinación de mejoras en la infraestructura de red, protocolos de comunicación más eficientes, tecnologías de procesamiento más rápidas y la implementación de estrategias avanzadas para optimizar la transmisión de datos y minimizar los tiempos de respuesta; prácticamente, por la mejora tangible en la experiencia del usuario, una mayor eficiencia operativa, la habilitación de tecnologías avanzadas y la garantía de servicios más confiables y disponibles en una amplia gama de aplicaciones cotidianas y contextos industriales, y; ambientalmente por el balance entre la eficiencia energética lograda a través de la tecnología y el impacto ambiental de la infraestructura adicional necesaria.

1.3.2. Importancia.

Conforme se ha señalado previamente, la importancia de la propuesta de investigación se ciñe entender que el retardo se genera al demorar la propagación y transmisión de paquetes dentro de una red, la sumatoria de estos se denomina latencia de la red; su aumento o disminución varía por la conectividad o distancia entre dispositivos. En el Perú, la tecnología 5G se despliega bajo el estándar no autónomo (NSA) en el espectro radioeléctrico de las bandas 1.7 GHz, 2.1 GHz, 2.5 GHz y 3.5 GHz. El tráfico de internet en el 2017 era de 46,000 GB/s y en el 2022 es de 150,700 GB/s, permitiendo optimizar la conectividad, interoperabilidad, dispositivos tecnológicos de comunicación, y la IoT.

1.4. Objetivos de la investigación.

Según el proyecto propuesto, los objetivos son:

1.4.1. Objetivo general.

Determinar la reducción de latencia en redes 5G.

1.4.2. Objetivos específicos.

Identificar los espectros radioeléctricos que despliegan los anchos de bandas 1.7 GHz, 2.1 GHz, 2.5 GHz y 3.5 GHz en frecuencias inferiores a 6 GHz.

Diseñar y simular en el entorno de desarrollo integrado la estructura de la trama para enlace descendente e identificar sus parámetros. Hipótesis y variables de la investigación.

1.5. Contenido de la investigación.

Para una mejor comprensión en el capítulo I, se hace la introducción describiendo la realidad problemática, los antecedentes, la justificación e importancia, y los objetivos de la investigación. Respecto al capítulo II, se explica la metodología empleada en la investigación con base al análisis de la evolución de LTE a 5G, arquitectura de red, técnicas facilitadoras clave, arquitectura y latencia del 5G, parámetros de QoS, requisitos técnicos de rendimiento para 5G, fuentes de latencia en una red celular, capa física URLLC en 5G NR, métrica de evaluación para los requisitos de URLLC, restricciones y enfoques para lograr una baja latencia. De acuerdo a ello, en el capítulo III se explica los resultados obtenidos tras realizar cálculos y simulaciones de la duración de la ráfaga para candidatos 5G y estructura del marco de 5G. En virtud de ello, en el capítulo IV, se discuten los resultados de la investigación. Finalmente, en el capítulo V, se formula las conclusiones de la tesis, y en el capítulo VI, se propone las recomendaciones para futuras investigaciones.

II. ESTRATEGIA METODOLÓGICA

2.1. Análisis de la evolución de la red LTE a 5G. El desarrollo de LTE comenzó durante el período de HSPA+ (High Speed Packet Access plus) en el lanzamiento de 3GPP del 2004 [7]. La primera versión de la red LTE es la 3GPP versión 8 del 2008; el 3GPP versión 9 finalizada en el 2009 es la segunda versión de la red LTE, LTE-Advanced entró en el mercado en el 2011 por el 3GPP versión 10. La versión 10 y posteriores del 3GPP son llamados LTE- Advanced. A continuación se analiza la evolución de LTE hasta LTE-Advanced:

- a. LTE versión 8.** El 3GPP versión 8 está implementado principalmente por capas macro/microcelda, proporcionando tasas de datos máximas más altas que las anteriores HSPA+. Mejorando la capacidad del sistema y la cobertura de la zona. Otra característica que mejoró en la versión 8 es la baja latencia, la reducción de costos operativos, soporte de múltiples antenas, operación flexible de ancho de banda [7].

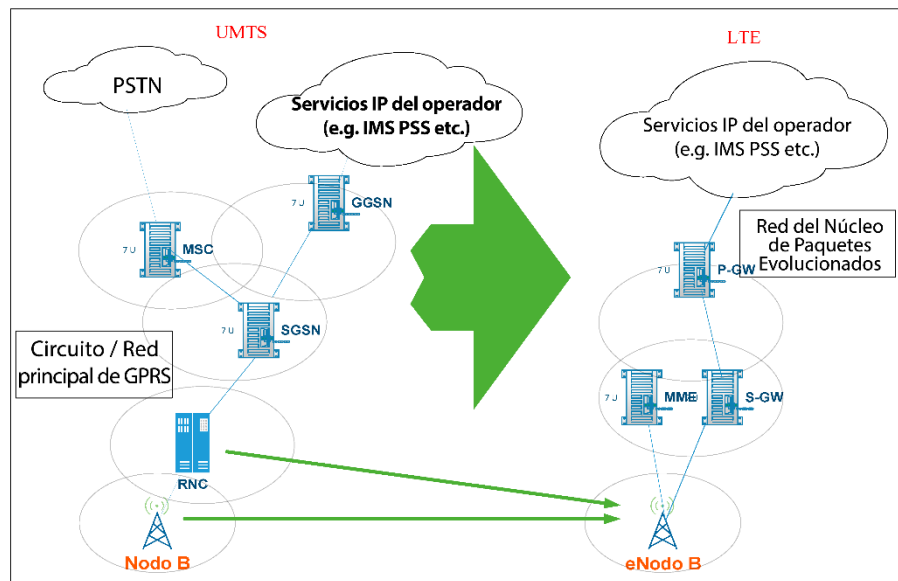


Figura N°1: Red de acceso GSM vs red de acceso LTE.

La figura N°1 explica cómo la red LTE evolucionó a partir de la arquitectura de red GSM anterior de UMTS. El nodo B y el RNC se combinan como e-nodo B en la red LTE. LTE utiliza la tecnología de acceso de radio OFDMA y proporciona ortogonalidad entre múltiples usuarios.

- b. LTE versión 9.** Es la versión completa de la red LTE que no se completó en la versión 8. Incluye servicios de transmisión/multidifusión, servicios de posicionamiento y funcionalidad mejorada de llamadas de emergencia. Proporcionándole interoperabilidad

entre WiMAX (IEEE 802.16) y convergió juntos el WCDMA de 3GPP y CDMA-2000 de 3GPP2. [7]

c. LTE versión 10. La red LTE versión 10 y posteriores se denominan LTE-Advanced, que cumplen todos los requisitos de las IMT-Avanzadas. Por lo tanto, es un sistema de comunicación móvil 4G que incluye algunas características adicionales a las versiones anteriores. En la agregación de portadoras, se agregan múltiples componentes de portadoras para proporcionar soporte para un ancho de banda de transmisión alto. LTE-Advanced puede admitir la agregación de operadores de hasta 100 MHz. La retransmisión inalámbrica proporciona extensión de cobertura de celda y un rendimiento mejorado del borde de la celda [9].

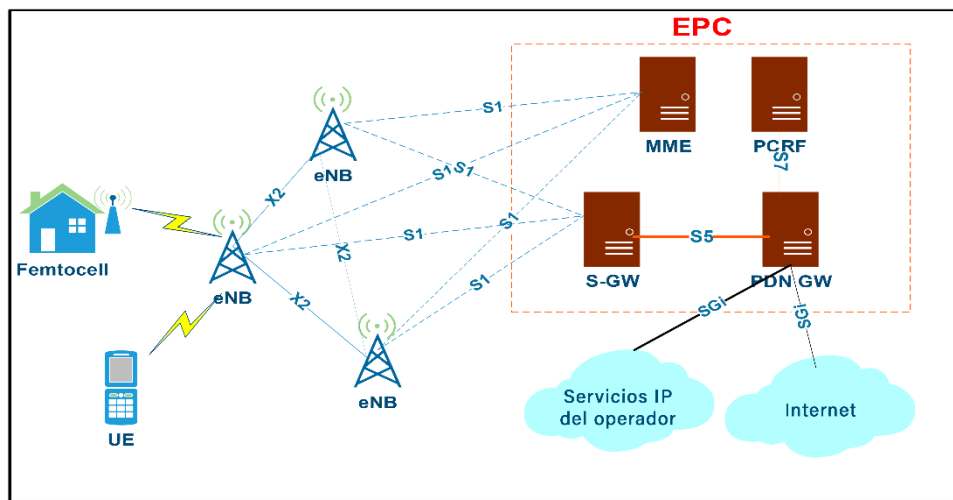


Figura N°2: Arquitectura de red LTE-Advanced.

Tabla I
Mejoras en las versiones de la red LTE.

Mejoras en las versiones de la red LTE		
Versión 8	Versión 9	Versión 10 (LTE-A)
<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilidad del espectro. - Transmisión multiantenna - ICIC 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilidad del espectro. - Transmisión multiantenna. - ICIC - Posicionamiento LTE - Servicios t de difusión/multidifusión (MBMS) - Estación base (eNodeB) doméstica (femto-celda) - LTE MIMO: beamforming de doble capa. 	<ul style="list-style-type: none"> - Carrier aggregation. - Técnicas MIMO avanzadas. - Retransmisión inalámbrica. - eICIC - Transmisión/recepción CoMP - Relay node [HeNB] (femto-celda)

d. LTE Versión 11 a 13. La red LTE Advanced también define la arquitectura eMBMS (multimedia Broadcast/Multicast Service) permitiendo una mayor eficiencia en el servicio de llamadas MCPTT para la transmisión de flujos de voz a todos los participantes del grupo. Introduce una nueva categoría móvil, la categoría 0, que permite un menor rendimiento de datos y un consumo de energía reducido, al permitir 88 múltiple entrada múltiple salida (Multiple-input Multiple-output – MIMO, en inglés) y el esquema de modulación se ha aumentado de 64-QAM a 256-QAM para aumentar el rendimiento del enlace descendente.

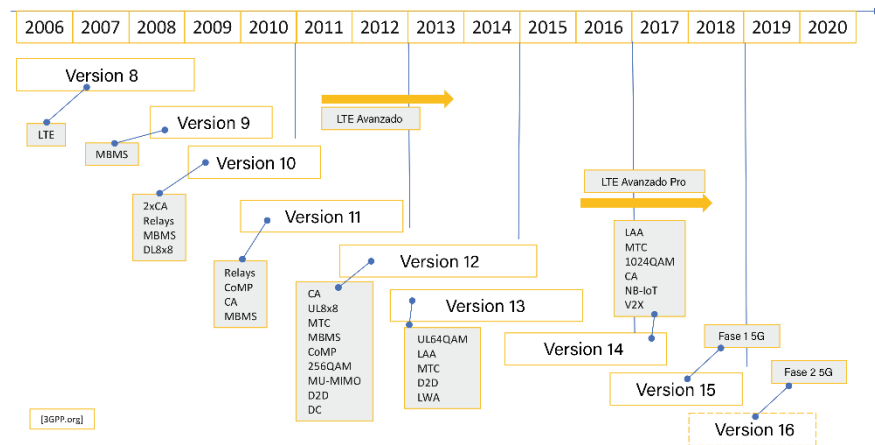


Figura N°3: Cronología de la función de lanzamiento de 3GPP.

- e. **Versión 14.** LTE Aborda la banda ancha móvil, voz sobre LTE (VoLTE), IMS, informes de ubicación, aspectos de vehicle-to-everything(V2X) en particular el vehicle-to-vehicle (V2), y ha mejorado los aspectos del internet de la cosas (CIoT) con soporte 2G, 3G y 4G de Machine-Type of Communications (MTC).
- f. **5G NR fase 1 release 15.** El 3GPP ha dividido el estándar 5G en dos versiones la 15 que corresponde al NR (New radio) fase 1, y la 16 que corresponde al NR fase 2. En NR fase 1, hay elementos comunes entre la red LTE y la tecnología NR, como ambos que utilizan la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM). Los dispositivos pueden comunicarse entre sí, como la red LTE eNB puede conectarse al EPC o a la red central LTE; la red eLTE eNB puede conectarse al núcleo EPC y NextGen core; la estación base gNB es equivalente al LTE eNB. Las bandas de frecuencia donde operará NR están en espectros emparejados y no emparejados, lo que requiere flexibilidad en la disposición dúplex. Por esta razón, NR admite la operación FDD y TDD. También se definen algunos rangos para SDL o SUL [28].

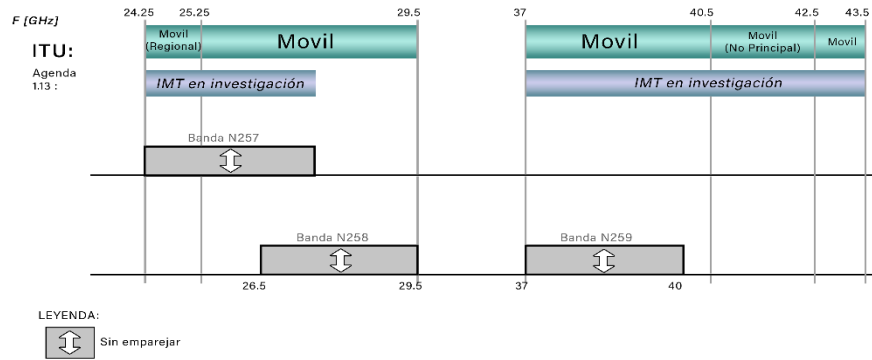


Figura N°4: Bandas de funcionamiento especificadas en 3GPP versión 15 para ondas milimétricas.

g. 5G NR fase 2 release 16. Las características existentes se encuentran en las áreas del MIMO y formación de haces, uso compartido dinámico del espectro (DSS), conectividad dual (DC) y agregación de portadoras (CA), y ahorro de energía en equipos de usuario (UE).

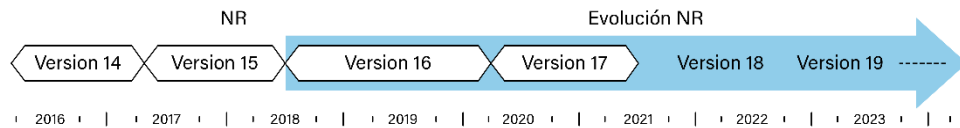


Figura N°5: Plan de tiempo de evolución de la RRN.

Los próximos pasos más allá de la versión 16 incluyen comenzar el trabajo en bandas de frecuencia superiores a 52.6GHz. El siguiente paso está en preparación con el trabajo de modelado de canales ya en marcha para cubrir rangos de frecuencia de hasta 114 GHz. Se espera que la versión 17 cubra la fase de estudio por encima de 52.6GHz, incluida la forma de onda y otras consideraciones L1 debido a una operación de mayor frecuencia, y en ese caso el trabajo normativo se dejaría para alterar la fase de la versión 17 o la versión 18. El soporte para bandas de frecuencia más altas también permitirá la operación 5G-U (NR-U) utilizando frecuencias superiores a 5GHz de operación sin licencia, cubriendo especialmente la banda de frecuencia de 60GHz.

2.2. Arquitectura de red. Las redes móviles se han convertido en una enorme tecnología de acceso multi-radio (multi-RAT) y una red heterogénea multicapa. Pero frente a las aplicaciones emergentes de Internet móvil y las inundaciones digitales, esta arquitectura se vuelve cada vez más incompetente [11], se introducen gradualmente en las redes celulares. La arquitectura de red basada en RAN en la nube (C-RAN) y SDN atrae una gran atención tanto académica como industrial. La arquitectura consiste en la nube de aplicaciones, la nube de controladores SDN, la C-RAN basada en SDN, la red de transporte basada en SDN y la

nube de aplicaciones de red central basada en SDN proporciona varios servicios, como administración de red y monitoreo de rendimiento, etc. La nube de controladores SDN transforma las políticas de la nube de aplicaciones y proporciona servicios de control centralizados para elementos de red objetivos mediante estas políticas, como C-RAN, red de transporte y network central. El C-RAN basado en SDN consiste en grupos de unidades de banda base (BBU) a gran escala, sistemas de radio sobre fibra (RoF) y puntos de acceso de radio distribuidos (RAP) y RAP ligeros (LRAP). Los grupos BBU proporcionan un procesamiento centralizado de señales de banda base mucho más allá de una sola estación base. Los RAP logran la cobertura de la celda de señalización como macro célula, mientras que los LRAP logran la transmisión de datos como células pequeñas, Los RAP y LRAP conectan BBU a través del sistema RoF. El sistema RoF logra conexiones inteligentes entre RAPs/LRAPs y BBU. El controlador SDN proporciona un complemento dinámico del ancho de banda de cada RAP/LRAP a la conexión BBU y la gestión de grupos BBU, incluida la red RAT y la versión. .

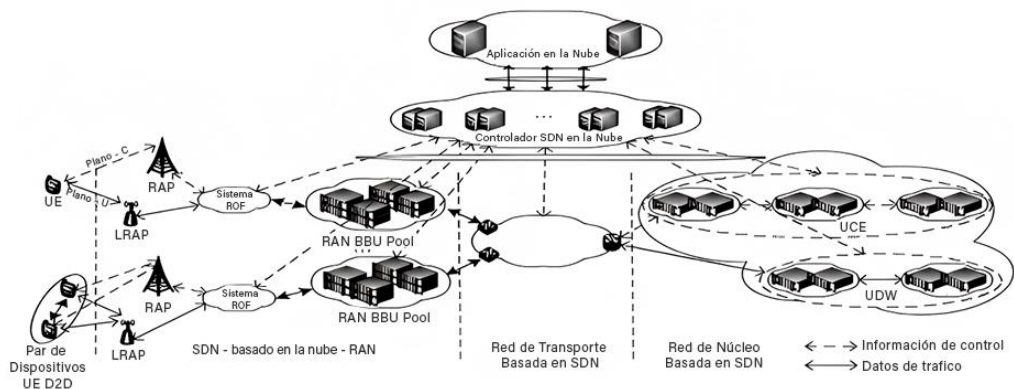


Figura N°6: Arquitectura de red.

La red central basada en SDN consiste en una entidad de control unificada (UCE) y una puerta de enlace de datos unificada (UDW) UCE junto con el controlador SDN administra el protocolo de túnel general de servicio de radio por paquetes (GPRS) para el plano de usuario. La técnica de la nube tiene varios beneficios como:

- 1- La implementación centralizada de gran escala proporciona capacidad de procesamiento mucho más allá de una sola implementación.
- 2- La virtualización permite la separación lógica de software y hardware, lo que reduce la complejidad del procesamiento y amplía la capacidad del hardware
- 3- Nuevas soluciones de servicio para el despliegue de redes densas, como la red de acceso de radio como servicio (RANaaS). En la arquitectura, el servidor de aplicaciones, el controlador SDN, la RAN y la red central adoptan la implementación en la nube [18].

SDN desacopla el control de red de dispositivos de red individuales y lo migra a dispositivos informáticos accesibles, Por lo tanto, SDN puede responder rápidamente a los dispositivos de redes cambiantes, las necesidades comerciales o las demandas de los usuarios, etc. La arquitectura SDN consta de capa de aplicación, capa de control y capa de infraestructura. La interfaz entre la capa de aplicación y la capa de control son las interfaces de programación de aplicaciones (API) abiertas.

2.2.1. Técnicas facilitadoras.

a. Acceso múltiple no ortogonal y cuasi-ortogonal. El acceso múltiple no ortogonal (NOMA) [11] y el acceso múltiple de código disperso (SCMA) son los dos últimos miembros de la familia de técnicas de acceso múltiple inalámbrico para satisfacer la demanda futura de espectro de banda ancha móvil. NOMA multiplexa a varios usuarios en el dominio de potencia, mientras que SCMA explota códigos dispersos para lograr ese propósito.

b. MIMO masivo. El MIMO tradicional se ha estudiado ampliamente en sistemas 3G y 4G. Es congénito creer que la capacidad aumentaría linealmente con la escala de la matriz de antenas si el número de antenas aumenta en gran medida, es decir, órdenes de magnitud más altos que la corriente. configuración, incluso el simple detector de forzamiento cero (ZF) funcionaría bien, lo que lleva al llamado MIMO masivo, los sistemas de comunicación móvil de próxima generación se beneficiarían de MIMO masivo mediante la capacidad. Sea n_t y n_r el número de antenas transmisoras y receptoras, y γ ser la relación señal-ruido, delimitado por:

$$\log_2(1 + \gamma n_r) \leq C \leq \min(n_t, n_r) \cdot \log_2 \left(1 + \frac{\gamma \max(n_t, n_r)}{n_t} \right) \quad (1)$$

c. Dúplex completo. En los sistemas 4G, tanto el dúplex por división de frecuencia (FDD) como el dúplex por división de tiempo (TDD) requieren dos canales separados para realizar la transmisión y recepción ortogonal, lo que desperdicia la mitad de los recursos de radio. Full-duplex puede duplicar la eficiencia del espectro mediante la transmisión y recepción simultáneas en la misma frecuencia y recurso de tiempo. Además, dúplex completo también ayuda a reducir el retraso de paquetes E2E y mejorar la eficiencia de la red en las redes de contención al mitigar el problema del terminal oculto. Debido a la eficiencia de doble espectro, el dúplex completo es ampliamente considerado como una de las técnicas prometedoras en los sistemas 5G.

TABLA II
Resumen de las técnicas de cancelación y supresión de auto interferencias.

Solución	Características técnicas	Evaluación principal	Escasez
Cancelación de antena	-Dos antenas Tx y una Rx con la distancia adecuada entre antenas.	-Alrededor de 30 dB	-Dos Tx + un Rx; restricción de ancho de banda; ajustar manualmente la fase y amplitud.
Cancelación RF	-Recrear la señal de RF por señal de banda base digital T. -Utilizando un circulator, un atenuador variable y un desfasador con una antena general. -Reformulación convexa para la atenuación de giro y los parámetros de cambio de fase del cancelador SI analógico de etiquetas múltiples. -Transformador equilibrado/desequilibrado (balun).	-Alrededor de 40-65 dB. -Al menos 45 dB.	-Componentes adicionales para recrear la señal RF SI. -Las ganancias varían con el ancho de banda. -Estimación exacta del retardo, la atenuación y el cambio de fase -Una T + una Rx, resintonización de frecuencia, alta pérdida de inserción.
Antena + supresión	-Separación direccional, blindaje absorbente de RF y antena de polarización cruzada.	-Más de 70 dB.	-No es efectivo en la ruta de reflexión; selectividad FR.
Supresión de antena + supresión de RF	-Antena de alimentación dual con polarización dual y duplexor de equilibrio eléctrico.	-Ambos por encima de 50 dB, el tamaño del duplexor y la antena es pequeña.	-Alta pérdida de inserción Tx (3.4 dB) y ruido Rx en cascada (7 dB).

d. Celdas pequeñas. Es un término general para los nodos de acceso de radio de baja potencia controlados por el operador con un rango de cobertura de entre diez a varios cientos de metros, incluyendo con licencia y sin licencia (Wifi). Se pueden instalar en una variedad de áreas, acercando más estaciones base a los usuarios. Un gran número de estaciones base aumenta el número de personas que una red puede soportar, aumentando la densidad de red y mejorando el rendimiento es densificar el número de nodos inalámbricos, que tienen un rango de cobertura más pequeño que las estaciones base de macroceldas utilizadas en los sistemas heredados del 3G y 4G. Con celdas pequeñas, el tamaño de la celda se reduce, lo que significa que la red está más cerca del usuario. Además, el mayor número de puntos de transmisión de baja potencia permite un mejor uso de los recursos de frecuencia disponibles. Además, el

sistema 5G se construirá de manera heterogénea, donde las celdas macro y pequeñas se ubicarán o conectarán a través de enlaces de backhaul inalámbricos, lo que proporcionará mayores niveles de capacidad de red a través de la descarga de tráfico.

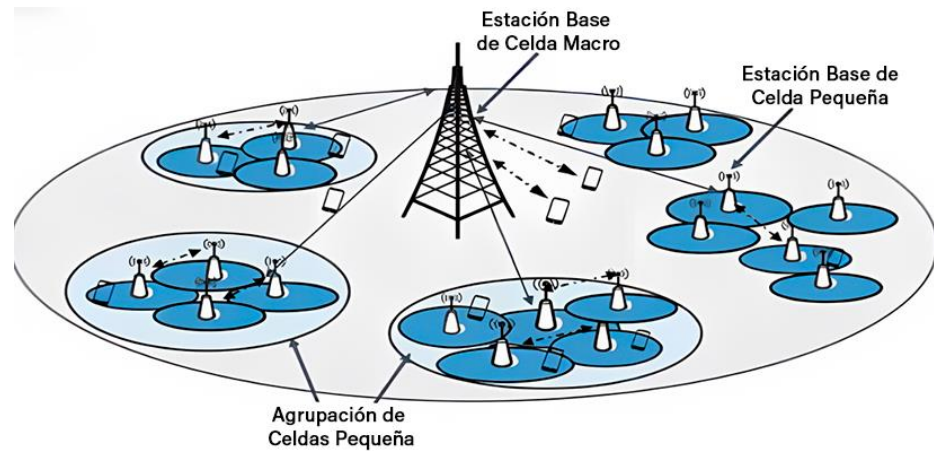


Figura N°7: Ilustración del despliegue de celdas pequeñas.

e. Comunicaciones de dispositivo a dispositivo. Las comunicaciones D2D basadas en la proximidad subyacentes a las redes celulares son una forma altamente eficiente de mejorar la capacidad del sistema. Además, los EE D2D (DUE) pueden actuar como relés de transmisión entre sí para configurar enlaces de comunicación de múltiples saltos. Por lo tanto, también ayuda a mejorar y ampliar la cobertura de la red mediante la retransmisión DUE. La ganancia de las comunicaciones D2D depende del número de pares DUE disponibles en varios escenarios de aplicación.

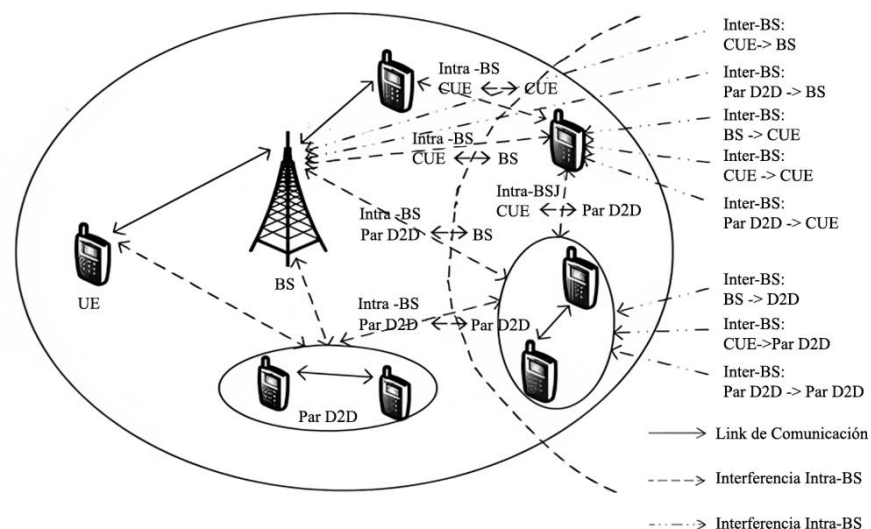


Figura N°8: Interferencia en las comunicaciones D2D full-duplex.

f. Comunicaciones de ondas milimétricas. Una de las formas eficientes de satisfacer el rápido aumento de las velocidades de datos, especialmente aquellas de hasta decenas de Gbps en sistemas 5G, es la expansión del ancho de banda. La mayoría de las redes celulares funcionan por debajo de 3 GHz, que ya ha sido completamente ocupada. La escasez de ancho de banda ha motivado la exploración del rico espectro de frecuencias de bandas milimétricas (mmWave) que oscila entre 3 y 300 GHz. Hay docenas potenciales de recursos de frecuencia disponibles en 28, 38, 45 y 60 GHz. Se espera que las ganancias de capacidad de red up a 10 veces se puedan obtener del espectro de frecuencia banda milimétrica, que es bastante atractivo para los sistemas 5G.

TABLA III
Ventanas de atenuación atmosférica.

Frecuencia (GHz)	3	23	31	60	78	119	127	183	214
Atmosférico	0.0075	0.194	0.100	15.17	0.357	2.04	0.862	28.36	2.7284
atenuación (dB/km)	106	88	03	285	43	379	55	202	8

TABLA IV
Coeficientes de reflexión a 28 GHz.

Medio ambiente	Ubicación	Material	Ángulo (°)	Reflexión coeficiente
Al aire libre	ORH	-Vidrio tintado	10	0.896
		-Hormigón	10	0.815
		-Vidrio transparente	45	0.623
Interior	MTC	- Paneles de yeso	10	0.740

TABLA V
Exponentes de pérdida de trayectoria.

Frecuencia (GHz)	28	38	40	60	72	2,55
Exponentes de pérdida de trayectoria (LOS)	2.55	2.0	—	0.8	—	—
Exponentes de pérdida de ruta (NLOS)	5.76	4.57	—	7.4	—	—

TABLA VI
Diferenciales de retardo rmS.

Frecuencia (GHz)	28	38	40	60	72
-RmS retardo spread (LOS)	0.878	1.2	—	0.8	—
(μ s)	47.2	23.6	—	7.4	—

-RmS delay spread (NLOS) (μ s)					
--	--	--	--	--	--

TABLA VII
Estadística de interrupciones a 38 GHz.

Ubicación de Tx	Altura (m)	Interrupción (%) para 160 dB PL sensibilidad	Interrupción (%) para 150 dB PL sensibilidad
TX1 ENS	36	18.9% dentro de 400 m, 0% dentro 200 metros	52,8% dentro de 400 m, 27,3% a menos de 200 m
TX2 WRW	18	39.6% dentro de 400 m, 0% dentro 200 metros	52.8% dentro de 400 m, 10% a menos de 200 m

g. Formaciones de haces. La formación de haces es un método para concentrar la potencia radiada omnidireccional de la antena. En el sistema 5G, la formación de haces se refiere a la transmisión de una señal en una forma más estrecha desde la estación base hasta el receptor. Durante la transmisión, el lóbulo principal del patrón de antena se dirige hacia una cierta dirección utilizando la fase y la amplitud de cada elemento de antena en una matriz. Este fenómeno se llama interferencia constructiva en el frente de onda.

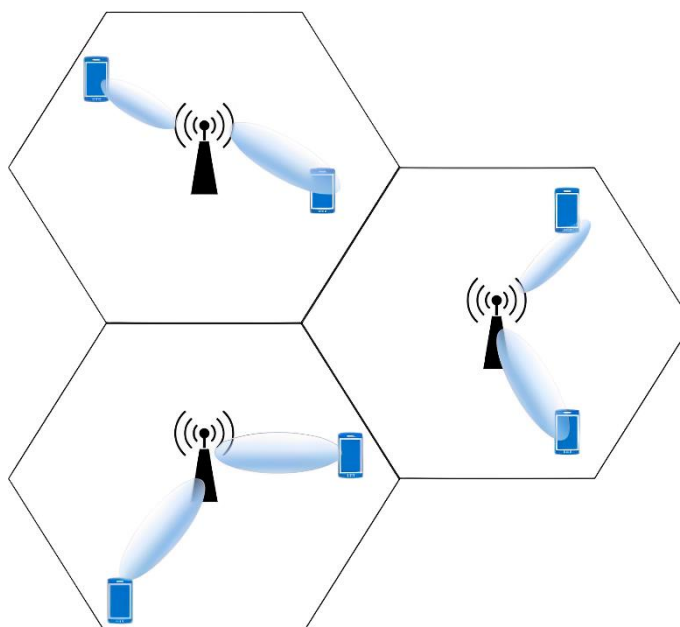


Figura N°9: Escenario típico de formación de haces dentro de una celda.

El Beamforming utiliza múltiples antenas para generar/recibir ondas electromagnéticas con un patrón de haz controlable. Como se muestra en la figura N°9, para hacer señales

de RF inclinadas específicas (por ejemplo: 20 grados), las señales de alimentación de cada antena tienen su propio retardo de señal designado que es proporcional al espacio de la antena y al ángulo inclinado.

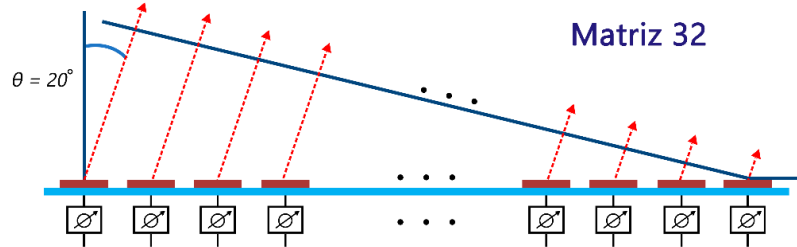


Figura N°10: Arquitectura de beamforming: (a) Beamforming ideal (b) Beamforming equivalente de desplazamiento de fase.

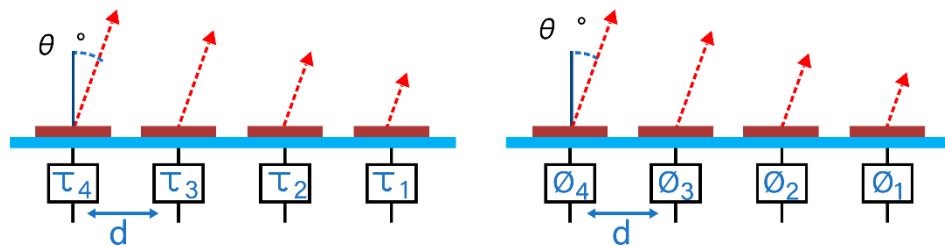


Figura N°11: Ejemplo de entrecerrar los ojos del haz con 32 elementos lineales de antena y dirección de haz de 200.

La formación de haces se puede hacer tanto en el lado del transmisor como en el lado del receptor. Se eligieron dos frecuencias para 5G (28 GHz y 300GHz) y una para 4G (2100 MHz). Si la distancia entre el transmisor y el receptor es d (km) y la frecuencia es f (GHz), entonces la pérdida de trayectoria de espacio libre (FSPL) en dB se puede calcular como:

$$FSPL = 92,4 + 20 \log (f \text{ en GHz}). \quad (2)$$

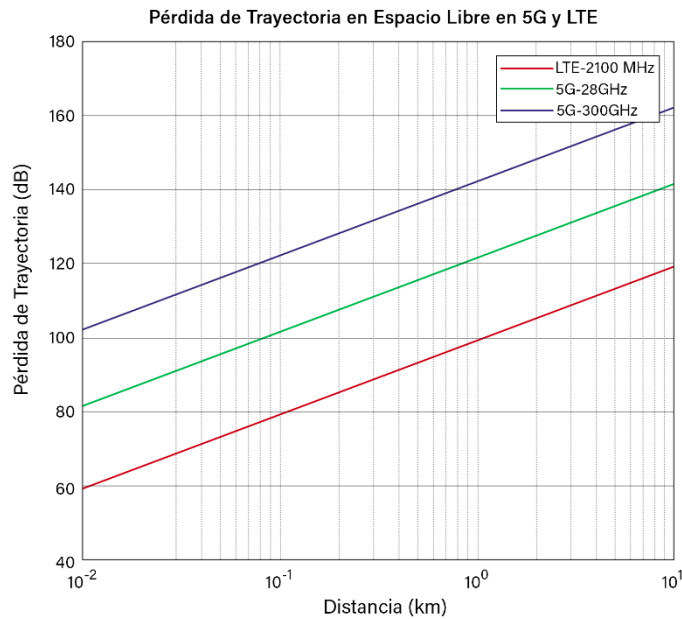


Figura N° 12: Pérdida de trayectoria en el espacio libre para diferentes frecuencias.

h. Comunicaciones ecológicas. Las redes de comunicación móvil a gran escala consumen energía debido a ello, la tecnología verde, es hasta un 90% más eficiente que la 4G en términos de consumo de energía. Las estaciones bases (BS) representan más del 50% del consumo de energía en los sistemas de telecomunicaciones considerándose la arquitectura e implementación de red mejoradas, gestión de recursos de radio verde, amplificador de potencia de eficiencia energética, y Sleeping para la BS.

2.3. Arquitectura del 5G. Con 5G es posible integrar elementos de diferentes generaciones en diferentes configuraciones, con una tecnología de acceso radioeléctrico de uso independiente y de múltiples tecnologías de acceso radioeléctrico de uso no independiente.

2.3.1. Arquitectura de red independiente (SA). Tiene una arquitectura de extremo a extremo en ondas mm y frecuencias subGHz, la red 5G NR utiliza una banda ancha móvil mejorada (eMBB), comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC) y comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) para proporcionar velocidades de datos en gigabits con mayor eficiencia y menores costos. La nueva interfaz del parametro next hop (NH) a la transmisión 5G Core (5GC), y en LTE el planificador de paquetes se implementa en eNB.

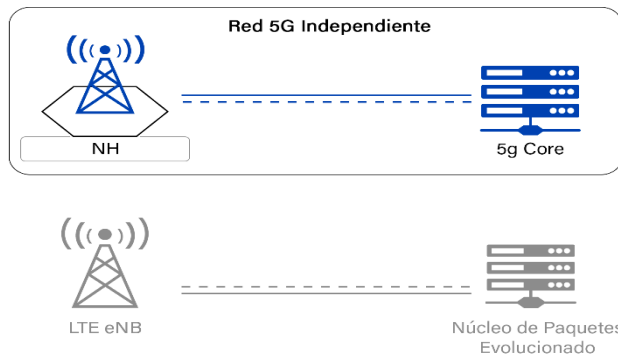


Figura N°13: Arquitectura de red 5G SA.

2.3.2. Arquitectura de red no independiente (NSA). La red 5G no independiente, por otro lado, se refiere a tener solo celdas 5G NR en su lugar con EPC como núcleo [24]. Los operadores desplegarán celdas 5G y dependerán completamente de la red LTE existente para todas las funciones de control y servicios adicionales. La arquitectura 5G NSA funciona en la estructura maestro-esclavo, donde el nodo de acceso 4G es el maestro y el nodo de acceso 5G es el esclavo. utilizando un EPC 4G con un NodeB 5G (gNB). Esta opción es más popular para los operadores móviles que buscan implementar rápidamente velocidades 5G utilizando implementaciones LTE existentes. Sin embargo, la opción 3 de NSA no permite verdaderas características 5G NR, como Network Slicing, URLLC y soporte de alta capacidad para IoT, como mMTC.

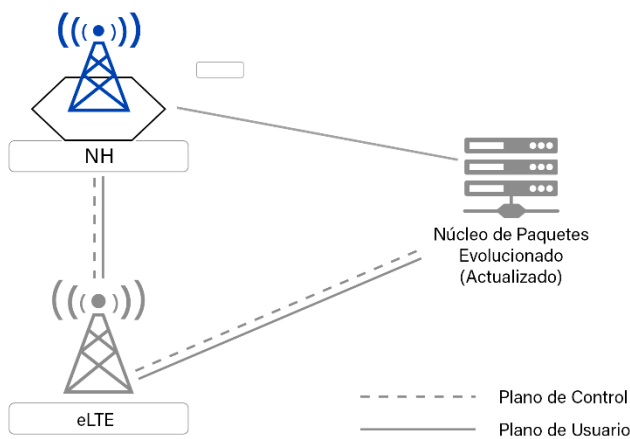


Figura N°14: Arquitectura de red 5G NSA.

2.4. Latencia en 5G. Las industrias verticales de latencia como robots y herramientas interactivas de Internet y computadoras, así como el internet de las cosas (IoT). En particular, incluyendo la latencia y la capacidad de respuesta de extremo a extremo (E2E), la robustez de la red y el rendimiento, los cuales desempeñan un papel importante en el nivel de servicio requerido para cumplir con dichos objetivos, la red de próxima generación está moviendo los estándares 5G a diversas áreas, como la velocidad de datos, la latencia, la eficiencia, etc.,

dispositivo/red de consumo de energía, tasa de volumen de tráfico, accesibilidad y velocidad de enlace. Las redes actuales de cuarta generación (4 G) no son capaces de satisfacer todas las especificaciones tecnológicas para estas últimas tecnologías. Para alcanzar una baja latencia, es necesario realizar ciertas mejoras en el diseño de la red, por lo que deben aplicarse. Como la latencia más grande es la conexión de la red de acceso radioeléctrico (RAN) y la red central junto con el backhaul entre la RAN y la red de mineral c, la topología de red actual que comprende el software que especifica la red (SDN) es la computación perimetral móvil. (MEC)/almacenamiento en caché, la función virtualizada de red (NFV) se puede utilizar para minimizar en gran medida la latencia. Sucederá con el potencial de beneficiarse con la tecnología de dispositivos que ha sido implementada por las organizaciones. Además, una nueva interfaz aérea física de paquetes pequeños, diferentes formas de onda, intervalos de tiempo cortos y esquemas de codificación y modulación modernos son los campos esenciales de investigación para lograr una baja latencia. La optimización de la distribución de los recursos radioeléctricos, como mMIMO, da prioridad a la transmisión de datos, la agregación de portadoras utilizada en ondas milimétricas debe discutirse, la convergencia estable y efectiva con los servicios LTE actuales es esencial para las redes 5G para empezar, ya que eso permitiría que las tecnologías 5G funcionen aún más rápido y de manera más efectiva cuando se integren y estén listas para el uso del cliente.

2.4.1. Parámetros de QoS. La calidad de varios parámetros de servicio juega un papel clave en el diseño de redes. Para cumplir con el requisito de varias aplicaciones que consumen muchos datos en las redes inalámbricas, lo más importante es proporcionar garantías de QoS para estas aplicaciones. Estos son los parámetros de QoS que se utilizan con frecuencia en las redes inalámbricas [25]:

a. Ancho de banda. Es uno de los parámetros que permite satisfacer la demanda de aplicaciones futuristas de próxima generación. El ancho de banda es directamente proporcional a la cantidad de datos transmitidos o a la capacidad del canal, es decir, la capacidad de la red de acceso radioeléctrico) que se mide en bits/s.

b. Rendimiento. El éxito de la red depende del valor del rendimiento. Un rendimiento más alto representa el número máximo de bits que se transmiten correctamente del número total disponible de bits en toda la antigüedad del desorden por unidad de tiempo. Los dispositivos de hardware, el ancho de banda, la relación señal-ruido (SNR) y otras cosas afectan el valor del rendimiento [26].

c. Jitter. Es un parámetro que dificulta toda la comunicación al introducir un retraso entre los paquetes, denominada variación de retardo de paquetes (PDV) para una perfecta transmisión de paquetes debe ocurrir un mínimo retraso entre paquetes.

- d. Tasa de error de bits.** Este es el parámetro que identifica el error que se produce en el número de bits del número total disponible de bits transferidos, denominada como relación de error de bits. Es la relación entre el número de errores de bits y el número total de bits transferidos, la tasa de error de bits (BER) debe minimizarse para cumplir con la necesidad de las aplicaciones de datos de próxima generación.
- e. Relación de entrega de paquetes (PDR).** Como su nombre indica, esta es la relación entre el número de paquetes entregados y el número total de paquetes enviados a través de la red. PDR decide la eficiencia de la red de próxima generación.
- f. Tiempo de descubrimiento de rutas.** El tiempo necesario para determinar una ruta desde el origen hasta el destino se conoce como tiempo de descubrimiento de ruta. En el caso de una red móvil ad hoc, la red cambia con frecuencia debido a los movimientos de los nodos. El algoritmo de enrutamiento descubre la ruta adecuada antes de transmitir. El tiempo de ruta debe ser mínimo para conectar diferentes nodos. Se necesitan algoritmos de enrutamiento inteligentes para lograr tiempos mínimos de descubrimiento de rutas para aplicaciones de próxima generación.
- g. Latencia.** El retraso que se produce en una red de comunicación se conoce como latencia. Hay dos tipos de delay: low delay y high delay. El delay entre los dos extremos desde el origen hasta el destino es conocido como delay extremo a extremo (EED) [26].

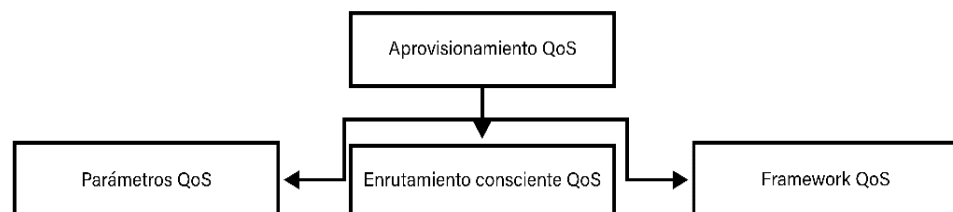


Figura N°15: Aprovisionamiento de QoS.

La latencia depende de cuatro componentes, que se explican siguiendo la ecuación matemática [25]:

$$\text{Latencia} = P.T + T.T + Q.T + P.D. \quad (2)$$

Dónde

- P.T. es tiempo de propagación
- T.T. es tiempo de transmisión
- Q.T. es tiempo de cola

- P.D. está procesando retrasos

Para habilitar ciertos servicios relacionados con internet, se requiere un nivel mínimo de confiabilidad y latencia. como el tiempo que se tarda en transferir un paquete determinado o una parte de la información de una determinada fuente a un destino, los datos se miden desde el momento en que se transmiten y sellan por el origen hasta el destino. Para cumplir con los exigentes requisitos de latencia, se aplican varias mejoras, por lo que la transmisión inalámbrica debe acortarse significativamente. Se propone reducir el intervalo de tiempo de transmisión que es de 1 ms en LTE a 0.1-0.25 ms o menos. Además, la forma de onda tiene que soportar paquetes cortos y de baja latencia. sistemas de comunicación de banda ancha que tenemos hoy en día, ya que la mayoría se basan en OFDM debido a la robustez de los canales multi-path. Sin embargo, para lograr transmisiones de baja latencia en el orden de un milisegundo, la transmisión física debe tener paquetes muy pequeños, lo que requiere una transmisión unidireccional de la capa PHY de varios microsegundos, la numerología en conjunto con el diseño de los símbolos de referencia, la estimación del canal y la codificación del canal requiere una revisión significativa del PHY celular para las aplicaciones de Internet táctil en sistemas 5G[20], Una forma de superar estas limitaciones para lograr latencias de 1 ms en sistemas basados en OFDM es cambiar la numerología de OFDM, es decir, la duración del símbolo, el espaciado de la subportadora, etc., junto con la longitud de la subtrama, y permitir altos niveles de diversidad y estimación rápida del canal junto con una decodificación rápida del canal. Se ha demostrado que un sistema basado en OFDM con numerología OFDM modificada puede lograr una baja latencia..

2.4.2. Requisitos técnicos de rendimiento para 5G. Los requisitos de rendimiento técnica se detallan a continuación:

TABLA VIII
Requisitos de rendimiento técnico de la URLLC.

Rendimiento técnico requisito	DL	UL	Comparación con las IMT avanzadas requisito
Latencia del plano de usuario	1 ms	1 ms	> 10 veces en comparación con las IMT- avanzado
Latencia del plano de control	20 metros	20 metros	> 5x en comparación con las IMT avanzadas

Interrupción de la movilidad en hora	0	0	Muy reducido
Fiabilidad	99.9999% dentro de 1 ms.	99.9999% dentro de 1 ms.	-

2.4.3. Fuentes de latencia en una red celular. En el sistema de red celular la latencia se puede dividir en latencia del plano de usuario (plano en U) y en latencia del plano de control (plano C). La medición de la latencia del plano de usuario es solo por un tiempo de transmisión direccional de un paquete que estará disponible en la capa IP entre el borde / UE de la red de acceso de radio terrestre UMTS evolucionado (E-UTRAN) y el nodo UE / E-UTRAN. Por otro lado, definimos la latencia del plano de control como el tiempo de transición de un UE para cambiar del estado inactivo al estado activo. En el estado de inactividad, una UE no está conectada con el control de recursos de radio (RRC). Después de configurar la conexión RRC, la UE cambia del estado inactivo al estado conectado y luego se convierte en estado activo después de pasar al modo dedicado, el plano en U es el principal foco de interés para comunicación de baja latencia, dado que el rendimiento de la aplicación depende principalmente de la latencia del plano en U [28]. El retraso de la transmisión de un paquete en una red celular se puede lograr combinando la RAN, el backhaul, la red central y el centro de datos / Internet.

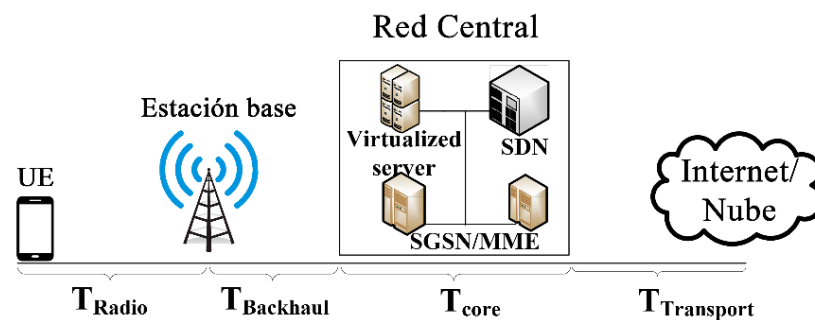


Figura N°16: Latencia en el retardo E2E de la transmisión de paquetes.

Después de analizar la figura, el tiempo total de transmisión unidireccional [28] del sistema celular actual se puede escribir como:

$$T = T_{radio} + T_{backhaul} + T_{core} + T_{transport} \quad (3)$$

Donde:

- T_{radio} es el tiempo de transmisión de un paquete entre eNB/gNB y UEs y se debe principalmente a la comunicación de la capa física. Es aportado por eNBs/gNBs, UEs y entorno. Consiste en tiempo de transmisión, tiempo de procesamiento en eNB/UE, retransmisiones y retardo de propagación. El retraso de procesamiento en el eNB implica codificación de canales, coincidencia de velocidad, codificación, conexión de verificación de redundancia cíclica (CRC), precodificación, asignador de modulación, mapeador de capas, mapeador de elementos de recursos y generación de señal OFDM.

- $T_{backhaul}$ es el momento para construir conexiones entre eNB/gNB y la red central (es decir, EPC/CN). Generalmente, la red central y eNB/gNB están conectadas por cables de cobre o microondas o fibras ópticas. En general, el microondas implica una latencia más baja, mientras que las fibras ópticas vienen con una latencia comparativamente más alta. Sin embargo, la limitación del espectro puede reducir la capacidad de microondas [28].

- T_{core} es el tiempo de procesamiento que toma la red central. Es contribuido por varias entidades de red central, como la entidad de gestión de movilidad (MME), el nodo de soporte GPRS (SGSN) y SDN / NFV. Los pasos de procesamiento de la red central incluyen la seguridad del NAS, el control del portador de EPS, anclaje de movilidad, la asignación de direcciones IP de Ue, el manejo de la movilidad de estado inactivo y el filtrado de paquetes:

- $T_{transport}$ es el delay en la comunicación de datos entre la red central e Internet/nube. En general, la distancia entre la red central y el servidor, el ancho de banda y el protocolo de comunicación afectan a esta latencia.

Entonces, el retardo E2E, T_{E2E} está entonces aproximadamente dado por $2 \times T$. La T_{radio} es la suma del tiempo de transmisión, la latencia de propagación, la estimación del canal de tiempo de procesamiento, el tiempo de codificación y decodificación por primera vez) y el tiempo de retransmisión (debido a la pérdida de paquetes). En particular, la T_{radio} para un usuario programado se puede expresar como:

$$T_{radio} = T_Q + T_{FA} + T_{tx} + T_{bsp} + T_{mpt} \quad (4)$$

Donde:

- T_Q es el retraso de cola que depende del número multiplexado de usuarios que en los mismos recursos.

- T_{FA} es el retardo para la alineación del marco que depende de estructura y modos de dúplex (modo FDD, modo TDD).

- T_{tx} procesamiento de transmisión T_{tx} y transmisión de carga útil que utiliza al menos una ITT dependiendo de la condición del canal de radio, el tamaño de la carga útil, los recursos disponibles, los errores de transmisión y la retransmisión;
- T_{bsp} es el retraso de procesamiento en la estación base.
- T_{mpt} retraso en el procesamiento del terminal del usuario de. Tanto el delay de BS como el de UE, depende de las capacidades de BS y del usuario respectivamente.

2.4.4. Capa física URLLC en 5G NR. A diferencia de los sistemas 4G LTE, los requisitos de latencia, confiabilidad y rendimiento deben considerarse conjuntamente en 5G NR para que haya un cambio fundamental en la arquitectura de la capa física (paquete, ranura y trama). Específicamente, una estructura de paquetes sensible a la latencia para el proceso de decodificación rápida y una estructura de trama flexible. Además, cuando se inicia el servicio URLLC, el paquete URLLC se transmite instantáneamente sin demora. Para lograr eso, necesitamos tener un esquema de programación que ayude a minimizar la latencia de transmisión del paquete URLLC. Por lo tanto, dado que el requisito de latencia no se satisface con la retransmisión HARQ, a menos que la TTI de un paquete sea muy corta, se utiliza este tipo de mecanismo que reduce significativamente la latencia de retransmisión. Las soluciones de capa física para URLLC, incluida la estructura de paquetes y tramas para minimizar la latencia, esquemas de multiplexación para superponer el servicio URLLC en banda ancha móvil mejorada y mMTC servicios y enfoques para hacer frente a los problemas ya existentes. Observamos que la mejora de la fiabilidad y la reducción de la latencia son iguales. Sin embargo, ha habido un consenso en la reunión del estándar 3GPP NR de que la latencia es una prioridad [30].

a. Estructura de paquetes. El problema clave en el diseño de paquetes URLLC es minimizar la latencia de procesamiento T_{proc} y la latencia de tiempo de transmisión T_{itt} . Tenga en cuenta que T_{proc} consiste en el tiempo para recibir paquetes, adquirir información de canal, extraer información de control (programación), decodificar data paquetes y verificar errores. en los sistemas 5G NR, como tenemos un paquete no cuadrado extendido en el eje de frecuencia, se utiliza como línea de base, la estructura minimiza la latencia de transmisión T_{itt} . Además, para la reducción de la latencia T_{proc} , los 3 componentes de un paquete (parte de datos, piloto, control) deben reunirse todos juntos para realizar un procesamiento canalizado de la adquisición del canal, detección de datos, decodificación del canal de control. En 5G NR, el código de comprobación de paridad de baja densidad (LDPC) y el código Polar se adoptan para mejorar el canal

de datos y control, respectivamente. A lo largo de los años, se han realizado muchos esfuerzos para mejorar el rendimiento de la decodificación y la complejidad computacional de estos códigos, como la decodificación sucesiva de la lista de cancelación del código polar y la decodificación LDPC no binaria [35]

- b. Programación sensible a la latencia y estructura de tramas.** El diseño de una estructura de marco unificada para cubrir una amplia gama de bandas de frecuencias y varias categorías de servicios es uno de los principales objetivos en 5G NR, con este fin se ha introducido un mecanismo flexible de programación de marcos.
- c. Marco flexible para URLLC.** Una opción directa para reducir la latencia de tiempo de transmisión es reducir el período de símbolos. Cuando la banda de frecuencia por encima de 6 GHz (onda milimétrica), debido a la pérdida de trayectoria, el radio celular sería mucho menor que el de los sistemas celulares convencionales y así será el diferencial de retardo del canal. Sin embargo, cuando se utiliza la banda de frecuencia por debajo de 6 GHz, esta opción podría no ser deseable debido a la gran propagación de retardo. En este caso, considerar la reducción de la T_{itt} del paquete. Como ejemplo, el uso de mini slot nivel de trama (3-4 símbolos), también la transmisión de nivel de ranura (7 símbolos), significa que, al controlar el número de símbolos y el período de símbolos en un paquete, se puede lograr una velocidad menor de 1 ms. Para soportar esta estructura de marco flexible, se necesita un receptor avanzado [35].

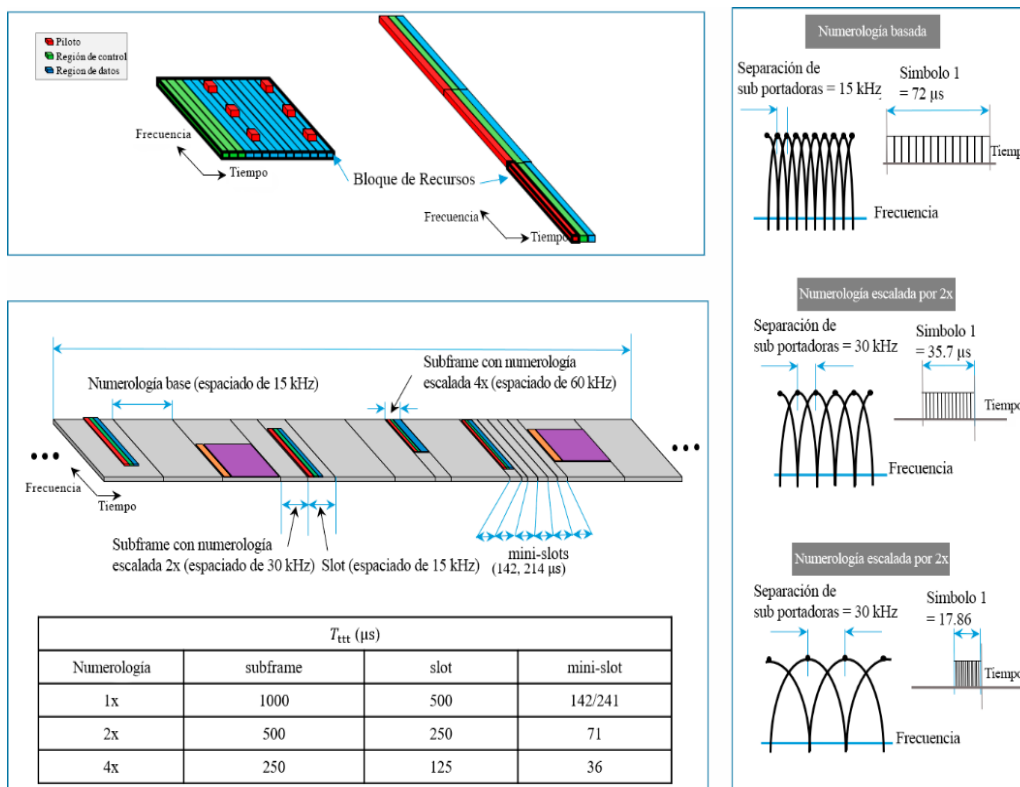


Figura N°17: Estructura de paquetes y tramas para URLLC: a) estructura de paquetes; b) estructura del bastidor; (c) numerologías admitidas para 5G NR.

Esquema de programación instantánea. la transmisión de datos en curso se interrumpe para iniciar el paquete URLLC. Este protocolo es efectivo para reducir el tiempo de acceso URLLC, pero podría causar una degradación notable en el rendimiento, por lo tanto, necesitamos mitigar para mitigar la degradación del rendimiento al tener un enfoque de servicios continuos.

Esquema de programación basado en reservas. la reserva de recursos URLLC tiene la prioridad de programación de datos. Dos tipos de esquemas de reserva son reservas semiestáticas y dinámicas en el esquema de reserva semiestática, la estación base transmite con poca frecuencia la configuración de la estructura del marco, como la numerología de frecuencia y el período de servicio. Mientras que, en el esquema de reservación dinámica, la información sobre el recurso URLLC se actualiza con frecuencia utilizando el canal de control de un usuario programado. Por ejemplo, si un paquete MBB consta de 14 símbolos, entonces se utilizan 10 símbolos para la transmisión eMBB y el resto se reservan para URLLC la desventaja de esto de que cuando no hay transmisión URLLC en el período programado los recursos reservados para el URLLC será un desperdicio. En comparación con el esquema de reserva semi

o semiestática, la reserva dinámica requiere una sobrecarga de control adicional para indicar la información de la reserva.

2.4.5. Métricas de evaluación para los requisitos de URLLC.

a. Latencia del plano de usuario. La latencia del plano de usuario (L) se define como el tiempo necesario para entregar un paquete de capa de aplicación desde el punto de entrada de la capa de protocolo de radio hasta el punto de salida de la capa de protocolo de radio tanto en UL como en DL por las direcciones de la interfaz de radio, donde ni el dispositivo ni la recepción de la estación base están restringidos por la recepción discontinua. Es la contribución de la red de radio al tiempo desde que el origen envía un paquete hasta que el destino lo recibe en ms. Como el tiempo unidireccional que se tarda en entregar un packet/mensaje de la capa de protocolo de radio 2/3 punto de entrada SDU al punto de salida SDU de capa de protocolo de radio 2/3 SDU de la interfaz de radio en cualquiera de los enlaces descendentes/ascendentes. La evaluación de la latencia del plano de usuario 3GPP 5G NR se basa en tener en cuenta el caso de la retransmisión. Si se asume que la latencia para la transmisión inicial es T_0 , la latencia para la transmisión inicial y la retransmisión única es T, y la latencia para la transmisión inicial más la retransmisión n-tiempo es T, la latencia esperada del plano de usuario viene dada por las condiciones, suponiendo que la estación móvil esté en el estado activo. Se puede aplicar un método de evaluación similar para URLLC. Sin embargo, una diferencia es que, para la URLLC, generalmente se requiere el 99.999% de la relación de transmisión exitosa. Si el diseño de la interfaz aérea garantiza que la transmisión inicial alcance una relación de éxito del 99,999%, entonces se puede suponer que no hay retransmisión. Si, el retraso medio puede ser aproximado por el retraso de la transmisión inicial [28].

$$T(1) = P_0T_0 + P_1T_1 + \dots + P_NT_N \quad (5)$$

donde P_n es la probabilidad de retransmisión n-veces (n = 0 significa transmisión inicial solamente), y

$$P_0 + P_2 + \dots + P_n = 1 \quad (6)$$

La probabilidad de retransmisión está relacionada con SINR, esquema de codificación, orden de modulación, etc. Se observa aquí que el valor exacto de T(1) depende de l, que es el índice del símbolo OFDM en una ranura cuando llega el paquete de datos. Esto es obviamente cierto para la banda TDD ya que, si el paquete de datos DL llega a una ranura UL, por supuesto necesita más tiempo de espera para la próxima ranura DL que el caso de llegar a la ranura DL. Para NR, esta dependencia

también es válida para FDD. Esto se debe a que NR permite el procesamiento de subcapa, y si el paquete llega a la parte posterior de la ranura, es posible que deba esperar hasta el comienzo de la siguiente ranura para continuar, mientras que, si el paquete llega en la primera parte de la ranura, probablemente pueda proceder dentro de la ranura. Para eliminar la dependencia, es útil un valor promediado de la latencia del plano de usuario. Esto se define de la siguiente manera:

$$T_{UP} = \frac{1}{14 \times N} \sum_{I=1}^{14 \times N} T(I) \quad (7)$$

donde N es el número de ranuras que constituye un período del patrón DL/UL, y 14 es el número de símbolos OFDM en una ranura. Por ejemplo, para FDD, N = 1, y para el patrón TDD "DDDSU", N = 5. T_{UP} se utiliza en la evaluación. Las definiciones y los cálculos son los mismos que en la evaluación de latencia del plano de usuario de DL. Se puede ver en el procedimiento anterior que, para el sistema TDD, existe un tiempo de alineación de tramas que se utiliza para esperar el recurso de tiempo disponible (intervalo de tiempo) para la dirección de enlace deseada. Esto resultaría en un mayor retraso de la transmisión de datos del plano de usuario DL y UL. Especialmente, si se utiliza la estructura de trama dominante de enlace descendente, la latencia del plano de usuario del enlace ascendente será pobre. El mecanismo de desacoplamiento DL/UL será útil en este caso [26].

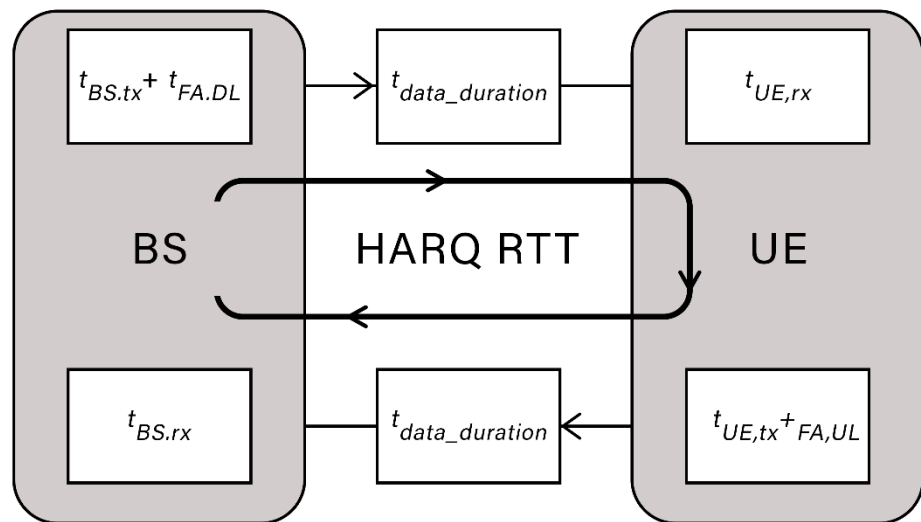


Figura N°18: Procedimiento del plano de usuario para la evaluación.

b. Latencia del plano de control. La latencia del plano de control se refiere al tiempo de transición de un estado más "eficiente de la batería" (estado inactivo) al inicio de la transferencia continua de datos (estado activo). Para 3GPP 5G NR, la latencia

del plano de control se puede evaluar de RRC_INACTIVE estado a RRC_CONNECTED estado. La figura N°20 proporciona el flujo del plano de control empleado en la evaluación. La hipótesis detallada de cada paso, como se muestra en la figura N°20, figura en la tabla IX. La evaluación es para la transferencia de datos UL. Cabe señalar que el tiempo de espera para el recurso de tiempo de enlace descendente o ascendente disponible para la dirección de enlace deseada debe calcularse en los pasos 2, 4, 6 y 8. Depende de la composición detallada de DL/UL. Una vez más, si la estructura de trama dominante de enlace descendente se utiliza en una banda TDD, la latencia del plano de control puede ser grande. El mecanismo de desacoplamiento DL/UL será útil en este caso [26].

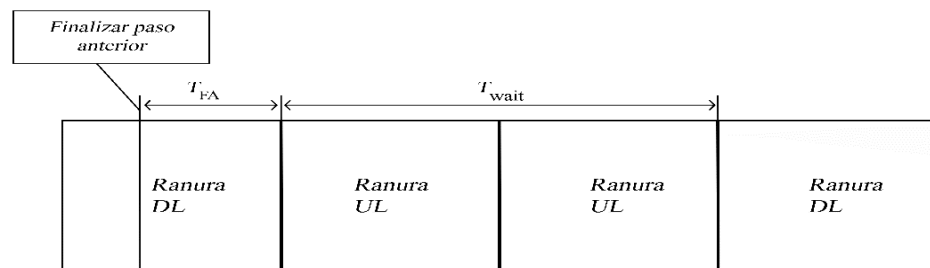


Figura N°19: Procedimiento de plano de usuario para la evaluación.

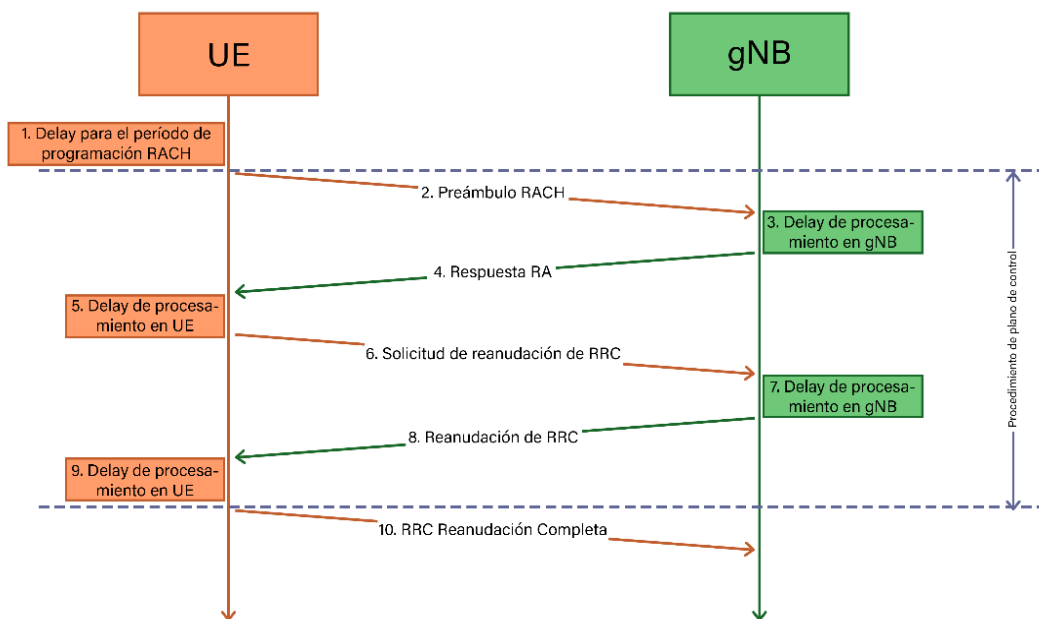


Figura N°20: Procedimiento del plano C empleado en la evaluación de la latencia del plano de control.

c. Fiabilidad. La confiabilidad se relaciona con la capacidad de transmisión de un tráfico dentro de una duración de tiempo ya determinada con una gran probabilidad de éxito. La confiabilidad es la transmisión de probabilidad exitosa en un paquete

de capa 2/3 dentro de un tiempo predeterminado requerido, que es el tiempo que se tarda en entregar un pequeño paquete de datos desde el punto de entrada SDU de capa de protocolo de radio 2/3 SDU al punto de salida de la capa de protocolo de radio 2/3 SDU de la interfaz de radio a una cierta calidad de canal [29]. Este requisito se define a efectos de evaluación en el escenario de uso de URLLC. El requisito mínimo de confiabilidad es de $1-10^{-5}$ probabilidad de éxito de transmitir una unidad de datos de protocolo de capa (PDU) de 32 octetos dentro de 1 ms en calidad de canal de borde de cobertura para el entorno de prueba urbana macro-URLLC, asumiendo datos de aplicaciones pequeñas.

d. Movilidad. La movilidad es la velocidad máxima de la estación móvil a la que se puede lograr una QoS definida (en km/h). Se definen las siguientes clases de movilidad: Estacionario: 0 km/hora; Peatonal: 0 km/hora a 10 km/hora; Vehicular: 10 km/hora a 120 km/hora; y, Vehículo de alta velocidad: 120 km/h a 500 km/h. Vehículos de alta velocidad de hasta 500 km/hora son principalmente para trenes de alta velocidad [22].

e. Tiempo de interrupción de la movilidad. El tiempo de interrupción de la movilidad es la duración de tiempo más corta admitida por el sistema durante la cual un terminal de usuario no puede intercambiar paquetes de plano en U con ningún BS durante las transiciones. El tiempo de interrupción de la movilidad puede incluir el tiempo necesario para ejecutar cualquier procedimiento RAN, protocolo de señalización RRC u otros intercambios de mensajes entre la UE y la RAN, según corresponda al candidato RIT/SRIT. Este requisito se muestra como evaluación en los escenarios URLLC y eMBB, uso el requisito mínimo de tiempo de interrupción de la movilidad es de 0 ms.

f. Velocidad de datos máxima. La velocidad de datos máxima es la velocidad de datos máxima alcanzable bajo condiciones ideales (en bit/s), que son los bits de datos recibidos asumiendo la condición de cero errores asignables a un MS, cuando todos los recursos de radio para el enlace correspondiente se utiliza la dirección (es decir, excluyendo las señales de referencia o pilotos, los recursos de radio que se utilizan para la sincronización de la capa física, las bandas de protección y los tiempos de guardia). La definición de velocidad de datos máxima es para un solo MS o UE. En una banda, se relaciona con la eficiencia espectral máxima en esa banda. Así que W_B definido como (ancho de banda del canal) y S_{PSP} es el pico de eficiencia espectral en esa banda. la velocidad de datos máxima del usuario R_{peak} viene dada por:

$$R_{peak} = w_B \times S_{PSP} \quad (8)$$

el ancho de banda disponible y la eficiencia espectral máxima pueden tener diferentes valores en varios rangos de frecuencia. En el caso de que agreguemos el ancho de banda a través de diferentes bandas, la velocidad de datos máxima se sumará sobre las bandas. Por lo tanto, si el ancho de banda se agrega a través de las bandas Q, entonces la velocidad de datos máxima total es

$$\sum_{i=1}^Q W_{B_i} \times S_{PSP_i} \quad (9)$$

donde W_{B_i} y S_{PSP} ($i = 1, \dots, Q$) son los anchos de banda de los componentes, las eficiencias espectrales respectivamente. Este requisito se define para la necesidad de evaluación de eMBB en el escenario de uso. Los requisitos mínimos para la velocidad de datos máxima son 20 Gbps para la velocidad de datos máxima del enlace descendente; y 10 Gbps para la velocidad de datos máxima del enlace ascendente.

2.4.6. Restricciones y enfoques para lograr una baja latencia. Las compensaciones fundamentales entre capacidad, cobertura, latencia, confiabilidad y eficiencia espectral en una red inalámbrica son fundamentales en una métrica optimizada para la degradación de otra métrica. Si la latencia está asociada con la sobrecarga de control que ocupa una parte importante del tiempo de transmisión de un paquete (aproximadamente 0.4 ms), no es prudente considerar un paquete con un tiempo de transmisión radio inferior a 1 ms. El diseño de un paquete con tiempo de transmisión es de 0.5 ms, más del 60% de los recursos serán utilizados por sobrecarga de control, además, la retransmisión por transmisión de paquetes toma alrededor de 8 ms, y la eliminación de la retransmisión será afectar significativamente el error de paquete. Se propone tres enfoques para lograr una baja latencia en 5G detallado en la figura N°22.

a. Soluciones RAN. Las soluciones RAN incluyen estructura de trama o paquete nueva/modificada, diseños de forma de onda, técnicas de acceso múltiple, modulación banda milimétrica y esquemas de codificación, refuerzo de Qos y QoE, esquemas de transmisión, mejoras en los canales de control, detección de símbolos de baja latencia, agregación, RAN en la nube y técnicas de comunicación conscientes de la ubicación. Minimización de latencia consciente de la energía, Por otro lado, se proponen nuevas entidades SDN, NFV, MEC y red de niebla junto con nuevas soluciones basadas en backhaul para el CN. La solución de almacenamiento en caché se puede subdividir en entrega de contenido, almacenamiento en caché centralizado, colocación de almacenamiento en caché y almacenamiento en caché de distribución TED, mientras que las soluciones en backhaul se pueden dividir en banda milimétrica y backhaul general.

Estructura de trama/paquete. En las soluciones RAN, la modificación en la interfaz aérea física se ha considerado como una opción atractiva., la mayoría de las soluciones propuestas se encuentran en las capas de control de acceso medio (MAC). Y físico En la red celular LTE, la duración de la trama de radio es de 10 ms. Un marco se divide en 10 subtramas de tamaño 1 ms que se divide en unidades de 0.5 ms que se denominan bloque de recursos (RB). Cada RB abarca 0.5 ms (6 o 7 símbolos OFDM) en el dominio del tiempo y 180 KHz (12 subportadoras consecutivas, cada una de las cuales 15 KHz) en el dominio de la frecuencia. En base a esto, el espaciado de la subportadora (Δf es de 15 KHz, la duración del símbolo OFDM T_{ofdm} es $1/\Delta f = 66.67\mu s$, el tamaño FFT es 2048, la frecuencia de muestreo f_s es:

$$\Delta f \times N_{IFFT} = 33.72 \text{ MHz} \quad (10)$$

y el intervalo de muestreo T_s es de $1/f_s$.

Por lo tanto, para reducir la ITT para lograr una baja latencia, el espaciado de la subportadora Δf se puede cambiar a 30 KHz. Esto da como resultado que la duración del símbolo OFDM correspondiente T_{ofdm} sea de $33.33 \mu s$ y el tamaño de FFT N_{fft} se convierta en 1024, mientras que la frecuencia de muestreo f_s se mantiene 30.72 MHz similar a sistemas LTE. La duración del fotograma $T_s = 10 \text{ ms}$ se puede dividir en 40 subtramas en los que cada duración de la subtrama T_{sf} es de 0.25 ms y contiene 6 o 7 símbolos. Se pueden emplear dos tipos de prefijos cyclic (CP) en esta configuración con duraciones.

$$T_{cp1} = \frac{5}{64} \times N_{IFFT} \times T_s \approx 2.604 \mu s \quad (11)$$

$$T_{cp2} = \frac{4}{64} \times N_{IFFT} \times T_s \approx 2.083 \mu \quad (12)$$

Modulación y codificación de canales. Aunque el uso de paquetes pequeños es un enfoque potencial para lograr una baja latencia, se requiere una modulación y codificación adecuadas para la transmisión de paquetes pequeños para una confiabilidad aceptable. En la literatura, se proponen principalmente tres tipos de esquemas de codificación para 5G. Como se presenta en, el (LDPC) o los códigos polares y de comprobación de paridad de baja densidad tienen un mejor rendimiento en comparación con los códigos turbo en los paquetes pequeños, pero los paquetes grandes o medianos, lo contrario es cierto. Si bien para las aplicaciones de baja latencia el paquete pequeño es un requisito, se deben investigar otros aspectos como el rendimiento de la implementación en las pruebas prácticas, la complejidad y la flexibilidad. En código polar se ha probado en campo para 5G considerando varios

escenarios: interfaz aérea, marco, estructura, configuración para paquetes grandes y pequeños, OFDM y formas de onda OFDM filtradas (f-OFDM). En todos los casos, el código polar funcionó mejor que los códigos turbo, lo que lo convierte en un esquema de codificación de canal candidato para 5G. La comparación entre los esquemas se ilustra en la tabla N°9. En [29], se propone una arquitectura altamente paralela para la decodificación turbo sensible a la latencia mediante la combinación de dos algoritmos paralelos: el algoritmo tradicional de ventana sliding y el algoritmo de ventana paralela cruzada (CPW) [32].

TABLA IX
Comparación entre esquemas de codificación de canales para baja latencia.

Casos	Codificación turbo	LDPC-PEG	Convolucional Codificación	POLAR CÓDIGOS
Complejidad del algoritmo para codificar 1/3 de 40bits con respecto al turbo códigos.	100%	98%	66.7%	1.5%
Complejidad del algoritmo para codificar 1/3 de 200 bits con respecto a códigos turbo.	100%	98%	66.7%	110.7%
Rendimiento en paquetes cortos.		x		x
Rendimiento en paquetes medianos.	x		x	

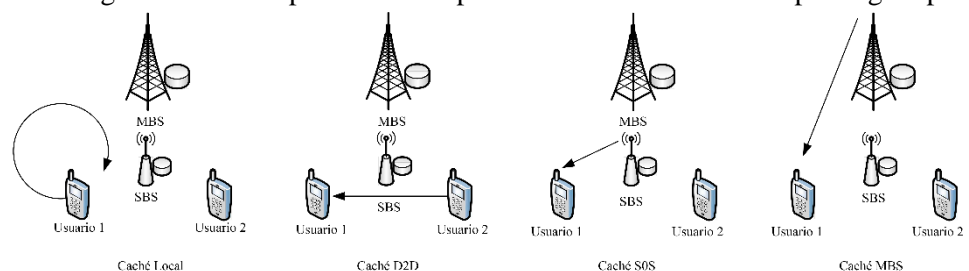
Adaptación del transmisor. se introduce una arquitectura de sistema de conmutación basada en ondas milimétricas en la que las señales de control utilizan una formación de haz digital de baja resolución (con el fin de permitir la multiplexación de paquetes pequeños control) con formación de haz analógico en el plano de datos (para permitir la modulación de orden superior). Esto reduce significativamente la sobrecarga debido a la señalización de control, lo que resulta en más recursos para la transmisión de datos. Los avances recientes en la comunicación dúplex completo (FD) se presentan con la ventaja de multiplicar la capacidad por dos, también el mecanismo de latencia y la prueba de la retroalimentación, al mismo tiempo que se mantiene una seguridad constante de la capa física.

C-RAN y otros aspectos. La red de acceso de radio en la nube (CRAN) la figura N°22 se introduce para 5G. Las CRAN combinan unidades de procesamiento de banda base de un grupo de estaciones base en un servidor central que conserva el front-end de

radio en los lados de la celda. Sin embargo, esto requiere enlaces de conexión con un retraso de $250 \mu\text{s}$ para admitir servicios de baja latencia 5G. Con el fin de cumplir con los estrictos requisitos de latencia en CRAN, dos optimizaciones, los resultados experimentales demuestran claramente la efectividad de los enfoques para la optimización de la latencia. Los resultados prometedores afirman que los servicios críticos de latencia en 5G pueden ser compatibles con CRAN. Aunque banda milimétrica será el principal contribuyente en el logro de los objetivos de 5G, el espectro por debajo de 6 GHz es siempre la opción principal debido a una menor atenuación, soporte de larga duración y compatibilidad de antena. Además, las redes celulares convencionales generalmente se implementan dentro de las costosas bandas con licencia y utilizan redes centrales confiables que están optimizadas para proporcionar servicios sensibles al retardo de bajo volumen, como la voz [28]. Se propone un esquema de asignación de espectro dinámico e inteligente impulsado por QoE que puede admitir la asignación de espectro a nivel de celda y dispositivo. Esta técnica mejora no solo la utilización del espectro, sino que también puede mantener la QoE deseada, incluido el aspecto de latencia.

b. Soluciones de red principales. Para cumplir con la visión de 5G que abarca la latencia ultrabaja, además de las mejoras en la RAN, también se proponen cambios drásticos en la red central. La nueva red central incluye algunas entidades nuevas como SDN, MEC y NFV, así como nuevas técnicas de backhaul, estas mejoras tienen como objetivo reducir el tiempo de procesamiento, evitar varias capas de protocolo y garantizar un funcionamiento sin problemas. Las soluciones de red principales para baja latencia se revisan con más detalle en el resto de esta sección.

c. Soluciones de almacenamiento en caché. Además de la escasez del espectro radioeléctrico, la capacidad insuficiente de los enlaces de backhaul puede considerarse un cuello de botella para la comunicación de baja latencia. El largo retraso puede deberse a las solicitudes de demasiados usuarios en las horas pico de tráfico. Por lo tanto, la reducción de la latencia es crucial para la QoS y QoE de los usuarios en las redes 5G. El almacenamiento en caché y en una categoría más general, las redes centradas en la información se pueden asumir como una de las tecnologías candidatas prometedoras para diseñar un cambio de paradigma para



la reducción de la latencia en los sistemas de comunicación de próxima generación, presentamos una detallada descripción general de los conceptos de almacenamiento en caché para la red celular seguidos de límites fundamentales y soluciones existentes [28].

Figura N°21: Diferentes tipos de almacenamiento en caché en 5G.

Se sugieren diferentes arquitecturas para diseñar la red central del 5G, conforme se detalla en la tabla X.

TABLA X
Visión general de las técnicas en la red central para baja latencia.

Caso/área	Acercarse	Resumen
ARQUITECTURA DE RED PRINCIPAL	BASADO EN SDN	La arquitectura del 5G se propone en base a SDN con visión 5G para cumplir con un gran rendimiento, conectividad masiva y baja latencia
	BASADO EN NFV	NFV invalida la dependencia de la plataforma de hardware y facilita la implementación de las funciones PEC, así como el intercambio de recursos en la RAN, esto puede reducir la latencia E2E con rendimiento mejorado
	Basado en MEC/FOG	MEC/fog proporciona computación y almacenamiento near user end y también separa el plan de datos del plan de control, esto reduce la latencia

Para una mejora comprensión de las soluciones sugeridas para una baja latencia se presenta:

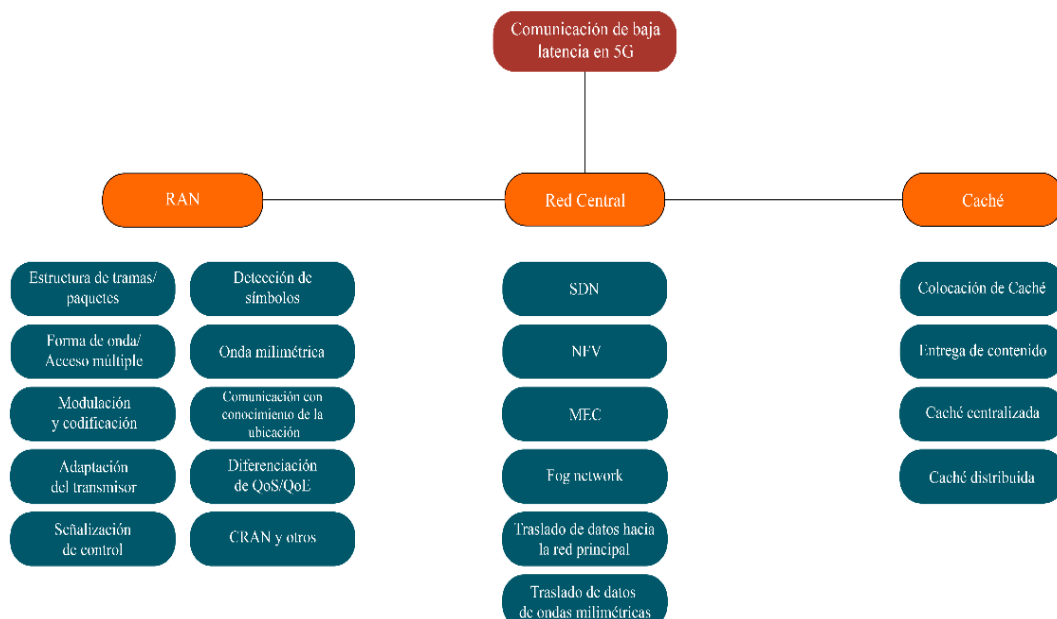


Figura N°22: Categorías de diferentes soluciones para lograr baja latencia en 5G.

2.5. Indicador clave de rendimiento para el diseño de forma de onda 5G NR. Las características de 5G NR incluyen velocidades de datos extremas, anchos de banda de canal grandes, condiciones de propagación severas, requisitos de URLLC, deterioros severos de RF, estaciones base de tamaño pequeño, el número de antenas es masivo y para implementaciones de TDD. El 3GPP identificó indicadores clave de rendimiento (KPI) para el diseño de la forma de onda, incluyen [36]:

Eficiencia espectral: La eficiencia espectral es lo más importante para cumplir los requisitos de densidades de tráfico, velocidad de datos y conexión del usuario. En general, las frecuencias portadoras más bajas tienen mucha más importancia para el KPI de eficiencia espectral que a frecuencias más altas.

Compatibilidad MIMO: debido al incremento de la frecuencia portadora, el número de elementos de antena aumentaría tanto en el BS como en los UEs. El uso de diferentes esquemas para MIMO es importante para dar altas eficiencias espectrales y nos alegramos de la formación de haces aseguramos una mayor cobertura.

Low PAPR (Peak-to-Average-Power-Ratio): las transmisiones de bajo consumo de energía son importantes ya que un PAPR bajo es esencial para ello, desde los dispositivos especialmente para el lado del enlace ascendente (UE). A frecuencias muy altas, una PAPR baja se vuelve aún más esencial. Dado que los BS de bajo costo de pequeño tamaño se prevén a altas frecuencias, pero también, el PAPR bajo también podría ser importante para las transmisiones de enlace descendente.

Robustez a la selectividad de tiempo del canal: Los escenarios de alta velocidad se muestran en celdas grandes. Debido a los obstáculos de onda para las condiciones de propagación, las células grandes podrían no ser una buena opción a frecuencias muy altas, donde podría causar una limitación en la cobertura. Se espera que los despliegues vengan en forma de células pequeñas, a frecuencias muy altas, donde la movilidad no es una preocupación importante.

Complejidad de la banda base del transceptor: La complejidad de la banda base siempre es muy importante, especialmente desde el punto de vista del receptor. Para NR, la complejidad es incluso una consideración importante para las BS, ya que a altas frecuencias un BS puede ser un nodo de acceso de tamaño pequeño con capacidad de procesamiento limitada, para un procesamiento más rápido y que permite aplicaciones de baja latencia también es importante una baja complejidad de banda base.

Localización de tiempo: en modo TDD dinámico, la localización en el tiempo es crucial para que el modo admita aplicaciones de baja latencia. La frecuente conmutación de enlaces

del TDD que conmuta transmisiones de ráfaga corta es uno de los requisitos. También esto necesita una corta franja horaria de transmisión. Lo que ayuda a permitir una baja latencia, es uno de los requisitos clave tanto para el eMBB como para el URLLC. Para permitir transmisiones cortas una forma de onda que está confinada en el dominio del tiempo es adecuada.

Emisiones fuera de banda y localización de frecuencia: en modo FDD, la localización en frecuencia es útil para la multiplexación potencial y la utilización eficiente del espectro en diferentes aplicaciones 5G NR, utilizando varias numerologías de forma de onda a altas frecuencias, la localización de frecuencias no es un KPI importante donde hay grandes anchos de banda de canal disponibles. La localización de frecuencia puede ser útil tanto en el enlace ascendente como en el enlace lateral, lo que también es relevante para el acceso asincrónico.

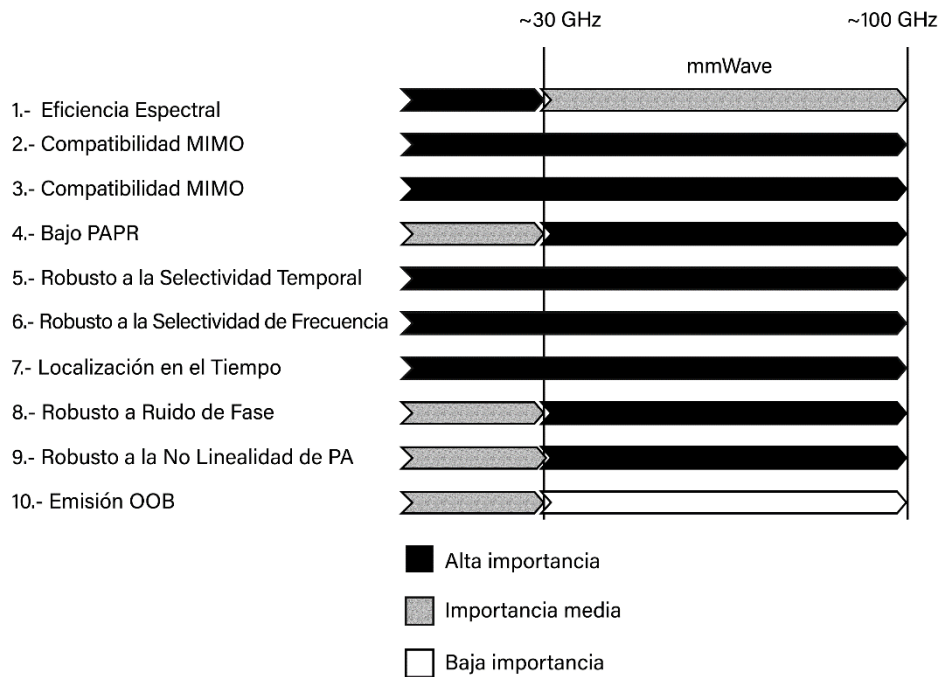


Figura N°23: Importancia de los indicadores de rendimiento de la forma de onda, especialmente para la baja latencia.

La figura N°23 muestra la importancia de los Indicadores Clave de Rendimiento de forma de onda para el NR en diferentes rangos de frecuencia. Podemos ver que para la comunicación banda milimétrica, se debe prestar especial atención a muchas más deficiencias de hardware y eficiencia energética, mientras que la localización de frecuencia no es de gran importancia.

2.5.1. Comparación de forma de onda para 5G NR.

TABLA XI
Resumen comparativo de las formas de onda multiportadoras.

Formas de onda MC	CP- OFDM	W- OFDM	UF- OFDM	FBMC- Qam	FBMC- OQAM
Eficiencia espectral	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
PAPR	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto
Robusto. al canal selectivo de tiempo	Medio	Medio	abrir	Bajo/ Medio	Bajo/ Medio
Compatibilidad con MIMO	Alto	Alto	Abrir	abrir	Bajo
Localización de hora	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Emisiones OOB	Alto	Medio	Medio	Bajo	Bajo
Emisiones OOB con PA	Alto	Alto/ Medio	Alto/ Medio	Alto/ Medio	Alto/ Medio
Complejidad	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
Flexibilidad	Alto	Alto	Alto	Alto	Alto

En esta comparación, se evaluaron diferentes candidatos a forma de onda, multiportadora y portadora única, Los resultados de la comparación de forma de onda se resumen en la tabla XI para formas de onda multiportadora seleccionadas. En esta tabla se ha utilizado el siguiente esquema de color: Green (gris claro en la versión impresa) se refiere a una característica deseable; el rojo (gris medio en la versión impresa) se refiere a una característica indeseable; el azul (gris oscuro en la versión impresa) se refiere a algún lugar entre característica deseable e indeseable. Además, “abierto”, significa que se requieren más investigaciones para sacar cualquier conclusión. Las investigaciones se basaron en métodos analíticos y simulaciones. Las simulaciones se realizaron bajo supuestos de evaluación comunes en los simuladores de forma de onda mmMAGIC, Los resultados detallados de la evaluación están disponibles en el informe del proyecto mmMAGIC, proporcionamos los resultados de comparación de forma de onda para KPI seleccionados (eficiencia energética, robustez de ruido de fase, localización de tiempo, complejidad de banda base) y refiere al lector a [30] para más detalles.

Eficiencia energética. Un inconveniente común de todas las formas de onda multi portadoras es su alto PAPR (y baja eficiencia energética). En la figura N°23, comparamos el PAPR de varias formas de onda, incluyendo CP-OFDM, W-OFDM, UF-OFDM, FBMC-OQAM y DFTS-OFDM (suponiendo 16 QAM y 1200

subportadores), se observa que todas las formas de onda multiportadoras tienen PAPR similar excepto UF-OFDM, que tiene una PAPR más alta. La precodificación basada en DFT en OFDM (DFTS-OFDM) reduce el PAPR y logra una mayor eficiencia energética que OFDM. Existen varios métodos bien conocidos para mejorar la eficiencia energética de OFDM [36].

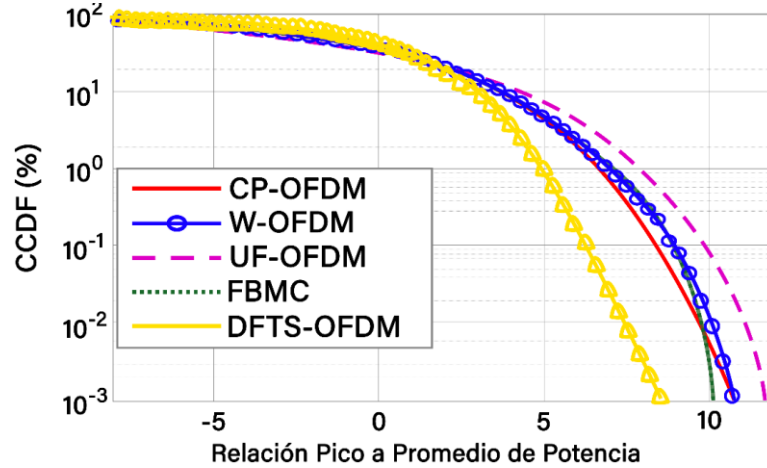


Figura N°24: Comparación de PAPR de formas de onda multiportadora y forma de onda DFTS-OFDM de portadora única.

Canal de desvanecimiento de variación del tiempo. Comparamos el rendimiento de varias formas de onda multiportadora (CP-OFDM, W-OFDM, UF-OFDM, FBMC-OQAM y FBMC-QAM) como se muestra en la figura N°24, en términos de la tasa de error del símbolo sobre un canal de fading variable en el tiempo con una velocidad UE de 60 km / h a una frecuencia portadora de 6 GHz (suponiendo el modelo de canal QuaDRiGa). Para todas las formas de onda, asumiendo un ancho de banda de señal de 120 MHz, 16-QAM y 512 subportadoras. Como se puede ver CP-OFDM tiene un mejor rendimiento en comparación con otras formas de onda en el desvanecimiento del canal variable en el tiempo.

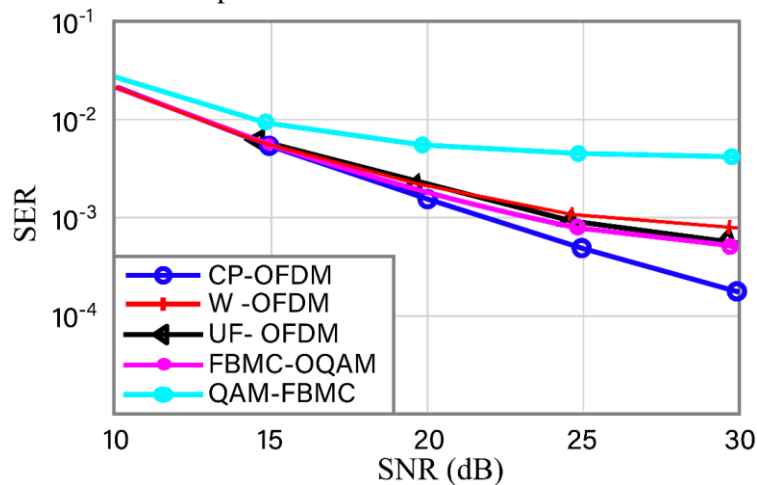


Figura N°25: Comparación de formas de onda multiportadora sujetas a un canal de desvanecimiento variable en el tiempo (velocidad UE de 60 km/h a una frecuencia portadora de 6 GHz).

Complejidad de la banda base. La multiportadora forma de onda la complejidad de la implementación en términos del número de multiplicaciones reales requeridas para la demodulación y la síntesis, sin los cálculos requeridos para la estimación del canal. Existen muchas técnicas para la estimación de canales utilizadas en la práctica con diversos grados de complejidad, comparamos la complejidad de las siguientes formas de onda multiportadora: OFDM. W OFDM F-OFDM, UF-OFDM y FBMC. Dado que las operaciones FFT / IFFT se utilizan mucho más en las implementaciones de todas estas formas de onda sugeridas, para mayor simplicidad denotaremos la complejidad de una operación FFT / IFFT de punto N con CFFT (N).

2.5.2. Idoneidad de OFDM para 5G NR. Para la forma de onda NR, los requisitos de diseño varían según el rango de frecuencia portadora y el tipo de enlace. Después de la investigación 3GPP de muchas formas de onda multiportadora/portadora única, se seleccionó la forma de onda CP-OFDM para NR después de considerar los criterios de requisitos para el diseño de NR, además, proporcionó una comparación de formas de onda de última generación. Por lo que discutiremos el CP-OFDM y lo evaluaremos en función de los KPI [36]:

Eficiencia espectral: la eficiencia espectral es conocida en la OFDM por su altura. La eficiencia espectral es esencial para cumplir con el requisito necesario para la velocidad de datos con NR. En general, como dijimos antes para frecuencias portadoras más bajas, la eficiencia espectral es más crucial que en frecuencias más altas debido a anchos de banda de canal potencialmente mucho más grandes en frecuencias portadoras más alta. La eficiencia espectral juega un papel importante tanto para el enlace ascendente como para el enlace descendente. Debido a la enorme cantidad de datos transferidos entre los BS, VANET también puede crear capacidad en escenarios tales como áreas urbanas densas con numerosos vehículos que transmiten señales periódicamente de manera asíncrona.

Compatibilidad MIMO: tecnología para aumentar la frecuencia portadora con NR, OFDM permite un uso directo de MIMO, el número de elementos de antena aumentaría en los BSs así como en los dispositivos. Al habilitar SU-MIMO/MU-MIMO El uso de varios esquemas MIMO es esencial para mejorar la eficiencia espectral y lograr una mayor cobertura a través de la formación de haces.

Relación de potencia pico-media (PAPR): el inconveniente de OFDM de que tiene un PAPR alto en comparación con otras formas de onda multiportadora, como se muestra en la figura N°24, Un PAPR bajo es esencial para las transmisiones eficientes de energía desde el enlace ascendente de las UE. Un PAPR bajo se vuelve aún más

importante a frecuencias muy altas donde la cobertura puede ser limitada. El PAPR bajo es tan importante para las transmisiones de enlace descendente a altas frecuencias portadoras porque se nota que se prevén BS de bajo costo de tamaño pequeño a altas frecuencias. Para NR, OFDM con reducción PAPR es una opción atractiva para el enlace ascendente y el enlace lateral. LTE usa DFTS-OFDM tanto para enlace ascendente como para enlace lateral debido a su PAPR más bajo. Sin embargo, DFTS-OFDM tiene ciertos inconvenientes en comparación con OFDM, como una menor flexibilidad para la programación y un receptor MIMO más complejo con un nivel de enlace degradado y un rendimiento a nivel de sistema. Para el enlace ascendente NR, el DFTS-OFDM es opcional y solo se puede usar para una transmisión de flujo único (sin MIMO). DFTS-OFDM no es una opción preferida para el uplink, ya que la transmisión MIMO es un componente clave de NR.

Robustez frente a la selectividad del tiempo del canal: OFDM se puede hacer robusto a la selectividad del tiempo del canal eligiendo el espaciado correcto de la subportadora depende de la condición y la aplicación, además, para el backhaul móvil previsto (por ejemplo: los nodos de acceso) en los vehículos, la robustez es mucho más relevante en escenarios de alta movilidad, los usuarios de alta velocidad son relevantes en celdas grandes, debido a las duras condiciones de propagación. Los despliegues de celdas grandes no se emplean ampliamente a frecuencias muy altas debido a la limitación de cobertura. Sin embargo, el vehículo a vehículo podría aplicarse a frecuencias muy altas, haciendo robusta la selectividad en el tiempo del canal donde la movilidad no es gran preocupación en este caso porque es básicamente fija.

Localización de tiempo OFDM: La localización en el tiempo ayuda de manera eficiente a aplicar el modo TDD para apoyar las aplicaciones de baja latencia, y la provisión de esta es esencial para todos los tipos de enlaces, especialmente los enlaces V2V y backhaul que necesitan requisitos más altos.

Robustez a los errores de sincronización: La existencia del prefijo cíclico (CP) hace que OFDM sea mucho más robusto a los errores en la sincronización de tiempo Robustez a los errores de sincronización, especialmente en los casos en que la sincronización es difícil de lograr, como en el enlace lateral. También puede ser importante si se permiten transmisiones asíncronas en el enlace ascendente. (donde LTE solo admite la transmisión síncrona de enlace ascendente, que se realiza a través de un avance de tiempo en el extremo del usuario).

Flexibilidad y escalabilidad: una elección adecuada del espaciado de la subportadora y el prefijo cíclico. Es lo que hace que OFDM sea una forma de onda flexible que puede soportar diversos servicios en una amplia gama de frecuencias, que lo que vamos a simular abajo, y mostrar cómo la forma de onda permite una baja latencia gracias a la flexibilidad del diseño de la forma de onda en la figura N°25. se muestra un resumen de los diferentes tipos de enlace para los requisitos de diseño de la forma de onda, Un requisito de enlace "Alto" para un KPI de forma de onda indica que el KPI dado es importante para el tipo de enlace dado en general. Además, en la tabla XII una evaluación de alto nivel de la OFDM. La evaluación ofdm "alta" significa que OFDM tiene un buen rendimiento en general para el KPI dado. Evaluamos los casos D2D y V2V por separado debido a los diferentes niveles de requisitos. Como ejemplo, la comunicación V2V en términos de movilidad, tiene un mayor requerimiento, y la capacidad del sistema, mientras que, para la eficiencia energética, hay requisitos más bajos, cuando V2V se compara con la comunicación UE-a-UE. Sobre la base de la evaluación general, se puede concluir que OFDM es una excelente opción para la interfaz aérea NR para todos los tipos de enlaces.

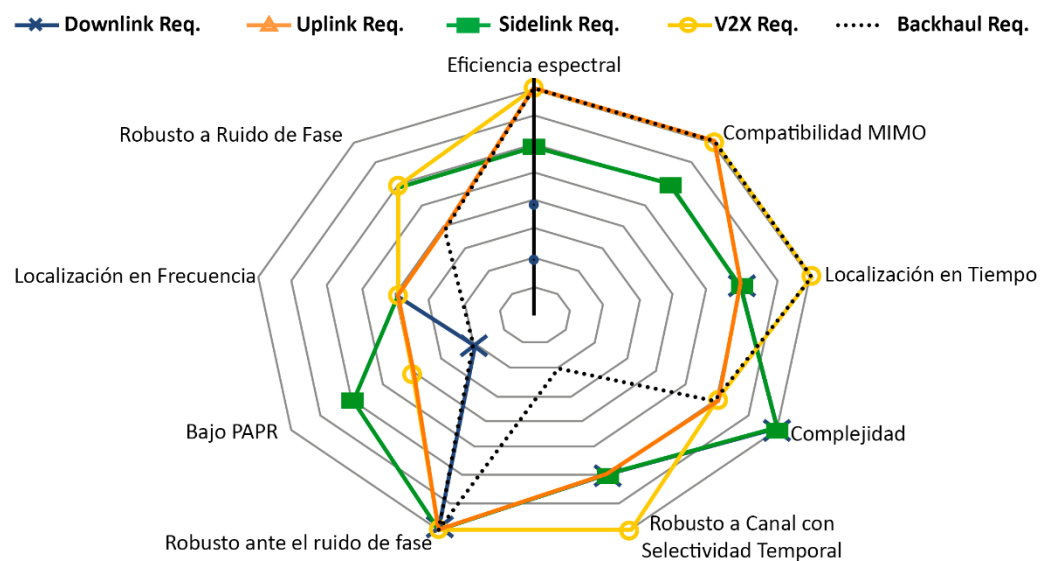


Figura N°26: Un resumen de alto nivel de los requisitos de diseño de forma de onda para diferentes tipos de enlaces: enlace ascendente, descendente, enlace lateral, enlace V2V y enlace de backhaul.

TABLA XII
Evaluación de alto nivel de la OFDM sobre la latencia.

Indicadores de rendimiento	Evaluación de ofDM
Eficiencia espectral	Alto

Compatibilidad con MIMO	Alto
Localización de hora	Alto
Complejidad de la banda base del transceptor	Bajo
Flexibilidad/Escalabilidad	Alto
Robusto. a chan selectivo en el tiempo	Medio
Robusto. para sincronizar. Errores	Medio
PAPR	Alto (se puede mejorar)

2.6. NOMA vs OMA. Después de comparar las formas de onda no ortogonales, ahora, trataríamos de ilustrar las principales diferencias entre el acceso múltiple no ortogonal (NOMA) y el acceso múltiple ortogonal (OMA).

2.6.1. NOMA. El acceso múltiple se encuentra en el corazón de los sistemas de comunicación celular. Se refiere a una técnica que permite a múltiples usuarios compartir un canal de comunicación. La primera generación (1G) a la cuarta generación (4G) de redes celulares han adoptado esquemas de acceso múltiple radicalmente diferentes con un tema común en mente: tener señales ortogonales para usuarios diferentes en la tabla XII del lado del receptor en [36]. En particular, las redes celulares 1G a 4G han adoptado uno o más de los siguientes accesos múltiples métodos:

- Acceso múltiple por división de frecuencias (FDMA).
- Acceso múltiple por división de tiempo (TDMA).
- Código division acceso múltiple (CDMA).
- Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal (OFDMA).
- Acceso múltiple por división espacial (SDMA).

Por ejemplo, en OFDMA, que se ha utilizado ampliamente en sistemas 4G, las señales de diferentes usuarios son ortogonales en los dominios de frecuencia y / o tiempo. En otras palabras, un bloque de recursos de multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) (180 kHz) no se puede asignar a más de un usuario. El acceso múltiple no ortogonal (NOMA) [37], por el contrario, permite que varios usuarios compartan los mismos elementos de recursos, ya sea en el dominio de tiempo, frecuencia, espacio o código. NOMA es actualmente un tema de investigación

candente para 5G y más allá de los sistemas, tanto en la academia como en la industria. Si bien se trata de la "no ortogonalidad" del acceso múltiple, parece que la comunidad de investigación está percibiendo este término de maneras algo diferentes. Debido a las diferentes interpretaciones, no existe un consenso sobre la aplicación de este término a algunas técnicas existentes bien conocidas, como una CDMA. Si bien la mayoría de los trabajos recientes ven CDMA como una técnica ortogonal de acceso múltiple (OMA), hay un grupo de otros documentos que lo clasifican como una técnica NOMA. A continuación, presentamos y discutimos diferentes puntos de vista utilizados para definir la no ortogonalidad en NOMA.

2.6.2. Escenario de dos usuarios de NOMA. Considere el ejemplo de dos usuarios [38]:

La estación base selecciona dos usuarios apropiados para emparejar, como se muestra en la figura.

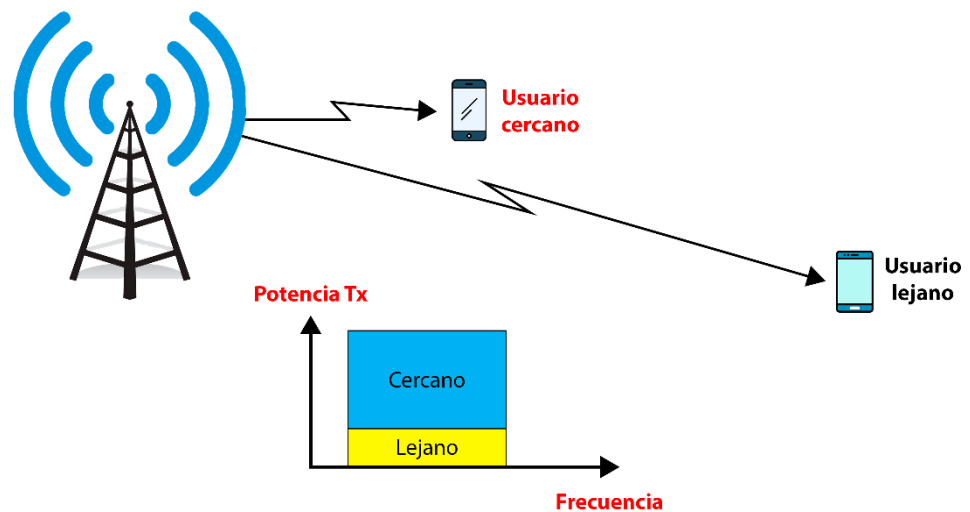


Figura N°27: Ejemplo de dos usuarios usando NOMA.

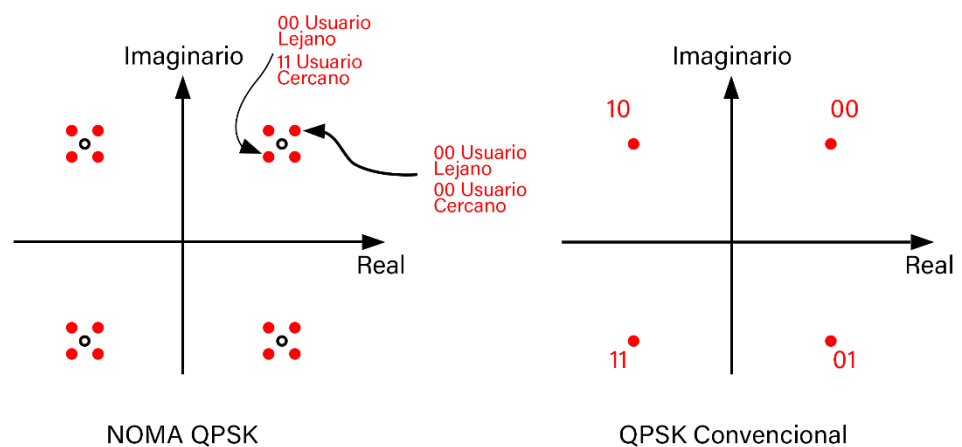


Figura N°28: Diagrama de constelaciones NOMA QPSK.

Donde el usuario cercano tiene (ganancia de canal fuerte) y el usuario lejano tiene (ganancia de canal débil) Donde el esquema de modulación de NOMA usando QPSK(QAM-4) es diferente de la modulación habitual QPSK como se muestra en la figura N°28

Observamos que:

- Servido en el mismo tiempo y frecuencia.
- TX Power se divide entre ellos.
- Alto consumo de energía para el usuario lejano.
- Bajo consumo de energía para el usuario cercano.

¡Así que típicamente la interferencia debería ocurrir!

2.6.3. Mecanismo de NOMA. La señal de usuario lejano tiene una pequeña interferencia de la señal de usuario cercano, y el usuario lejano decodifica su señal normalmente, como se muestra en la figura N°28. Pero sufre de una ligera interferencia adicional [38]:

- 1- La señal de usuario cercano tiene una gran interferencia de usuario lejano, el usuario cercano decodifica primero la señal de usuario lejano, como se muestra en la figura N°29.
- 2- Resta esta interferencia de la señal NOMA compuesta
- 3- Se cancela la interferencia del usuario lejano
- 4- El usuario cercano decodifica sus datos a partir de la señal limpia

Nota: el usuario lejano no puede cancelar la interferencia del usuario cercano porque es demasiado débil para ser decodificado.

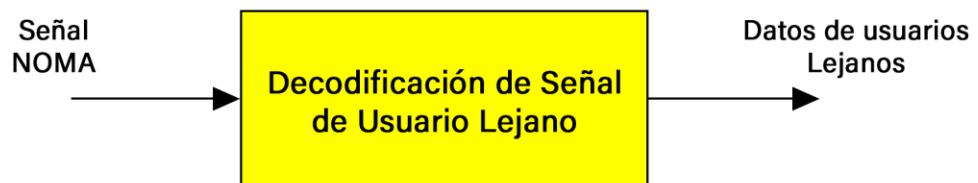


Figura N°29: Esquema de decodificación de usuario lejano.

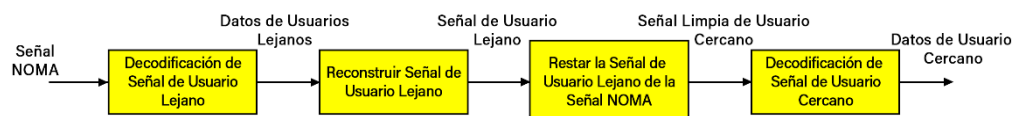


Figura N°30: Esquema de decodificación cercano al usuario.

La capacidad de NOMA es la principal ventaja sobre todas las ventajas de las técnicas de OMA, utilizando la ley de Shannon para la capacidad de evaluar la capacidad de NOMA.

$$C = w \times \log_2(1 + SNR) \text{ bit/s} \quad (13)$$

Donde el ancho de banda (w) tiene el mayor impacto en la capacidad. donde en NOMA, el ancho de banda se divide por el usuario cercano y el usuario lejano, como se muestra en la figura N°30, de lo contrario en NOMA el ancho de banda sigue siendo el mismo compartido con los dos usuarios.

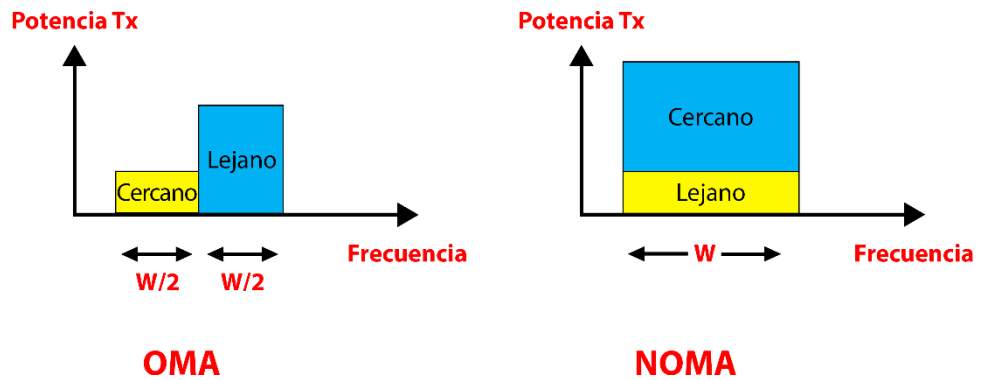


Figura N°31: OMA vs NOMA en la asignación de ancho de banda.

En OMA, cada usuario utiliza la mitad del ancho de banda, pero sin ninguna interferencia que asegure la fiabilidad de esta técnica [38]:

En OMA:

$$OMA_{SNR} = \frac{P_{near}}{noise} \quad (14)$$

$$SNR_{FAR} = \frac{P_{FAR}}{noise} \quad (15)$$

Podemos ver que, el NOMA casi usuario puede cancelar la señal de usuario lejano:

$$SNR_{near} = \frac{P_{near}}{noise} \quad (16)$$

pero noma el usuario lejano no puede cancelar la señal de usuario cercano, porque tenemos ruido adicional:

$$SNR_{FAR} = \frac{P_{FAR}}{P_{near} + noise} \quad (17)$$

Por lo tanto, la capacidad tanto de NOMA como de OMA sería:

$$C_{OMA} = \frac{w}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{near}}{noise} \right) + \frac{w}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P_{far}}{noise} \right) \text{ bits/s} \quad (18)$$

$$C_{NOMA} = W \log_2 \left(1 + \frac{P_{near}}{noise} \right) + W \log_2 \left(1 + \frac{P_{far}}{P_{near} + noise} \right) \text{ bits/s} \quad (19)$$

$$\text{Donde: } P_{far} + P_{near} = P_{total} = \text{constant} \quad (20)$$

TABLA XIII
Comparación NOMA vs OMA.

Características técnicas	NOMA	Oma
Formulario completo	Múltiple no ortogonal Acceso	Acceso múltiple ortogonal
Complejidad del receptor	Alto	Bajo
Consumo de energía	Más	Menos
Número de usuarios/clúster	Bajar	Superior
Número de pares de usuarios	Menos	Más
Rendimiento del sistema	Mayor	Menor

2.7. Estructura del marco de 5G NR. La capa física es la primera capa de la arquitectura del protocolo de interfaz radioeléctrica NR. La capa física proporciona servicios de transporte de datos a capas superiores. Se accede a los servicios de transporte a través de canales de transporte entre la capa física y la parte de control de acceso al medio (MAC) de la capa dos. El servicio de transporte de datos de la capa física incluye para una codificación ex amplia, modulación/demodulación, procesamiento multi antena y mapeo del canal de transporte codificado a los canales físicos correctos. Además de la capa dos, la capa física también interactúa con la parte de control de recursos de radio (RRC) de la capa tres. El NR utiliza la multiplexación por división de frecuencia ortogonal (OFDM) como forma de onda tanto en el enlace ascendente como en las direcciones de transmisión del enlace descendente. OFDM proporciona un esquema flexible de acceso múltiple, donde el ancho de banda disponible (BW) se divide en subportadoras mutuamente ortogonales, que se pueden compartir entre múltiples usuarios sin interferencia intracelular. OFDM es hoy en día una tecnología ampliamente adoptada que es adecuada también para el NR debido a los méritos como la baja complejidad, la estimación de canales simples y la fácil integración de múltiples entradas y múltiples salidas (MIMO). Además, el esquema de transmisión de enlace ascendente también tiene la posibilidad de utilizar la transformada discreta de Fourier (DFT) -OFDM precodificada como forma de onda. El OFDM precodificado DFT se utiliza para obtener una mayor eficiencia del amplificador de potencia. Sin embargo, DFT-precoded OFDM se utiliza sólo como un soporte complementario, debido al uso de los diversos inconvenientes. La precodificación DFT aumenta la complejidad de los receptores MIMO y restringe la programación en el dominio de la frecuencia [40]. Con una sola numerología

OFDM, el NR no pudo cumplir con los requisitos de rendimiento de la amplia gama de aplicaciones, dispositivos y frecuencias portadoras. Por esta razón, el NR admite múltiples numerologías OFDM con una gama de espaciados de subportadora (SCS). Los espaciados de subportadora admitidos son 15, 30, 60, 120 y 240 kHz, pero 240 kHz solo es compatible con el bloque de señal de sincronización (SSB), que se describe con más detalle en la sección 2.7.2. La numerología flexible se basa en el escalado, donde el espaciado de la subportadora de 15 kHz es la línea de base. Se eligió la línea de base de 15 kHz, de modo que el NR soporta la coexistencia eficiente con LTE. El escalado del espaciado de la subportadora desde la línea de base se define como

$$\Delta f = 2^{\mu} \times 15 \text{ kHz} \quad (21)$$

Donde:

$$T_u = \frac{1}{SCS} \quad (22)$$

$$SCS = \Delta f \quad (23)$$

Donde la configuración de espaciado de la subportadora μ es un entero entre 0-4 y proviene del parámetro de capa superior Subcarrier Spacing [41]. El espaciado de la subportadora con símbolo proporcional y duraciones de prefijo cíclico (CP) se presenta en la tabla XV,

TABLA XIV
Espaciado de subportadora soportado con símbolo proporcional y duraciones CP.

Configuración de espaciado de la subportadora (μ).	Δf [kHz]	Duración del símbolo [μs]	Duración del prefijo cíclico [μs].
0	15	66.7	4.7
1	30	33.3	2.3
2	60	16.7	1.2
3	120	8.33	0.59
4	240	4.17	0.29

Las transmisiones NR están organizadas en marcos de 10 ms de largo. Cada fotograma se divide en diez subchasis y se dividen en ranuras. Cada ranura consta de 14 símbolos OFDM en el dominio del tiempo y 12 subportadoras en el dominio de la frecuencia. Una excepción a esto es el espaciado de la subportadora de 60 kHz con un CP extendido, donde cada ranura consta de 12 símbolos OFDM y 12 subportadoras. El CP extendido para 60 kHz se puede utilizar cuando sea necesario para reducir la duración y el retraso de la ranura mientras se mantiene un CP similar a 15 kHz. En el dominio del tiempo, la longitud de la ranura en milisegundos se define como:

$$\text{Slot length} = 1 \text{ ms}/2^{\mu} \quad (24)$$

Donde μ es la configuración de espaciado de la subportadora. Basado en la longitud de la ranura. El número y la longitud de las ranuras con los SCS admitidos se presentan en la tabla XVI. Cuando se duplica el espaciado de la subportadora, también se duplica el número de ranuras dentro de una subtrama [40].

TABLA XV
Número y longitud de las ranuras con el espaciado de la subportadora soportada.

Configuración de espaciado de la subportadora (μ)	Número de símbolos en una ranura	Número de ranuras en una subtrama	Número de ranuras en un marco	Longitud de la ranura [ms]
0	14	1	10	1
1	14	2	20	0.5
2	14 (PC normal) 12 (CP extendido)	4	40	0.25
3	14	8	80	0.125
4	14	16	160	0.0625

5G NR permite transmisiones a través de diferentes anchos de banda del sistema dependiendo del rango de frecuencia. El rango de frecuencia 1 (FR1) se define de 450 MHz a 6 GHz y permite anchos de banda del sistema de 5, 10, 15, 20, 25, 40, 50, 60, 80 o 100 MHz. Rango de frecuencia 2 (FR2) se especifica de 24,25 GHz a 52,6 GHz y permite anchos de banda de 50, 100, 200 o 400 MHz. La combinación de una subportadora asignada en un símbolo OFDM se define como un elemento de recurso. Un grupo de 12 subportadoras consecutivas en el dominio de frecuencia se define como bloque de recursos. Sobre la base de todos estos parámetros, un ejemplo ilustrativo de la estructura de encuadre para la numerología $\mu = 0$ se muestra en la figura N°30. El esquema de multiplexación por división de tiempo (TDM) en el NR es más flexible que, por ejemplo, TDM en LTE, los símbolos OFDM en una ranura se clasifican como 'enlace ascendente', 'enlace descendente' o 'flexible'. La ranura flexible es una combinación de símbolos de enlace ascendente y descendente, la UE asume que la transmisión del enlace descendente se produce solo en símbolos de enlace descendente o "flexible" y, por lo tanto, transmite solo en símbolos de enlace ascendente o "flexible" [42]. Además de los tres tipos de ranuras configuradas, el NR admite las llamadas mini ranuras. Los mini lotes se pueden usar para admitir transmisiones más cortas, ya que una mini ranura puede ser tan corta como un símbolo OFDM en el tiempo. Una mini ranura también puede comenzar en cualquier momento dentro de una ranura para permitir una posición de inicio más flexible en el dominio del tiempo. Para obtener una baja latencia, el

inicio de la ranura también se puede cargar frontalmente con señales de control y referencia (RS). Debido a la estructura de tiempo flexible de las mini-ranuras, se pueden utilizar, por ejemplo, en escenarios de baja latencia, donde la transmisión debe comenzar de inmediato. En el dominio de la frecuencia, los bloques de recursos físicos (PRBs) son las unidades básicas de programación del NR. Un PRB se compone de 12 subportadoras, que tienen el mismo espaciado de subportadora y sobrecarga CP dentro de un PRB. Cada elemento individual, agrupado en una subportadora del PRB, se denomina elemento de recurso (RE). El RE es la unidad más pequeña en la red de recursos. Corresponde a un recurso físico formado por un símbolo OFDM en el tiempo y una subportadora en frecuencia. Por lo tanto, un PRB se compone de 12 REs y se identifican de forma única en el dominio de frecuencia / tiempo del PRB. En la figura N°31 se presenta un ejemplo de la estructura del marco NR con el espaciado de la subportadora de 15, 30 y 60 kHz. Ilustra cómo duplicar el SCS duplica el ancho de banda y reduce a la mitad la duración de la ranura. Como se puede ver, con un SCS más alto, caben más ranuras en una subtrama [42].

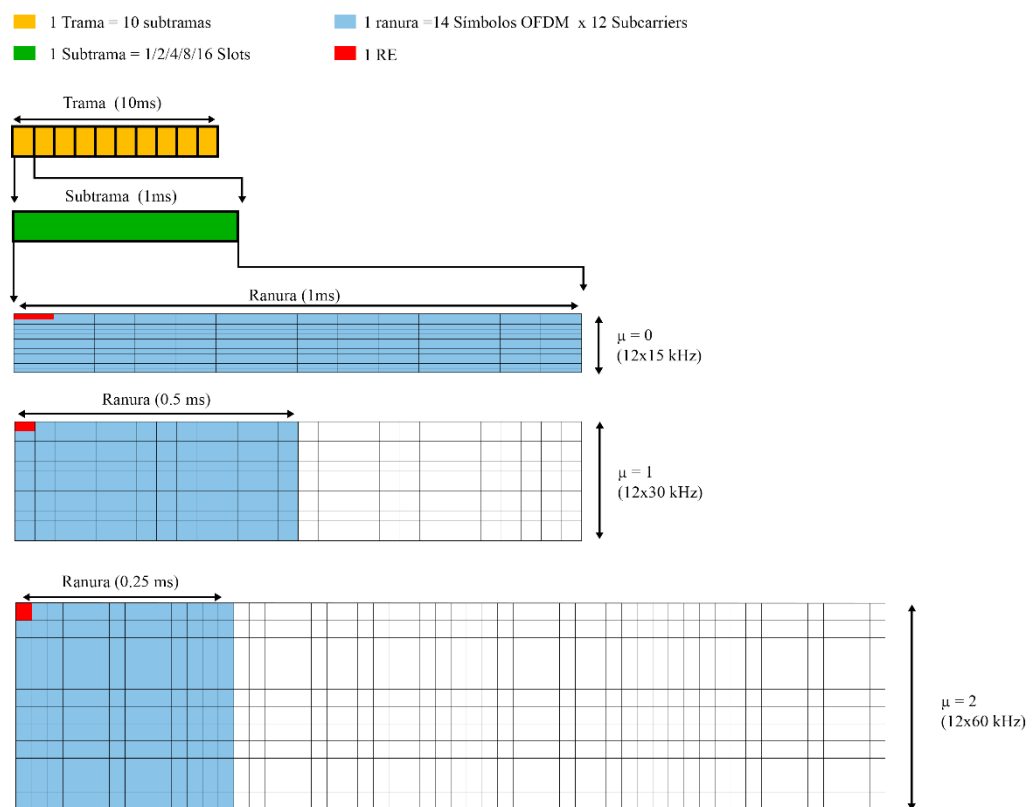


Figura N°32: Estructura del marco NR.

2.7.1. Canales físicos y señales 5G NR. El contenido de control y datos se asigna en la estructura de trama 5G NR descrita para transmisiones de enlace descendente y enlace ascendente gracias al uso de canales y señales físicas. Dado que el alcance de esta tesis de maestría se centra en el lado del enlace descendente, solo se describen en esta subsección los canales físicos y las señales transmitidas desde la estación base (NB) a

la UE. El conjunto de canales físicos y señales de enlace descendente se muestra en la figura N°32 [43].

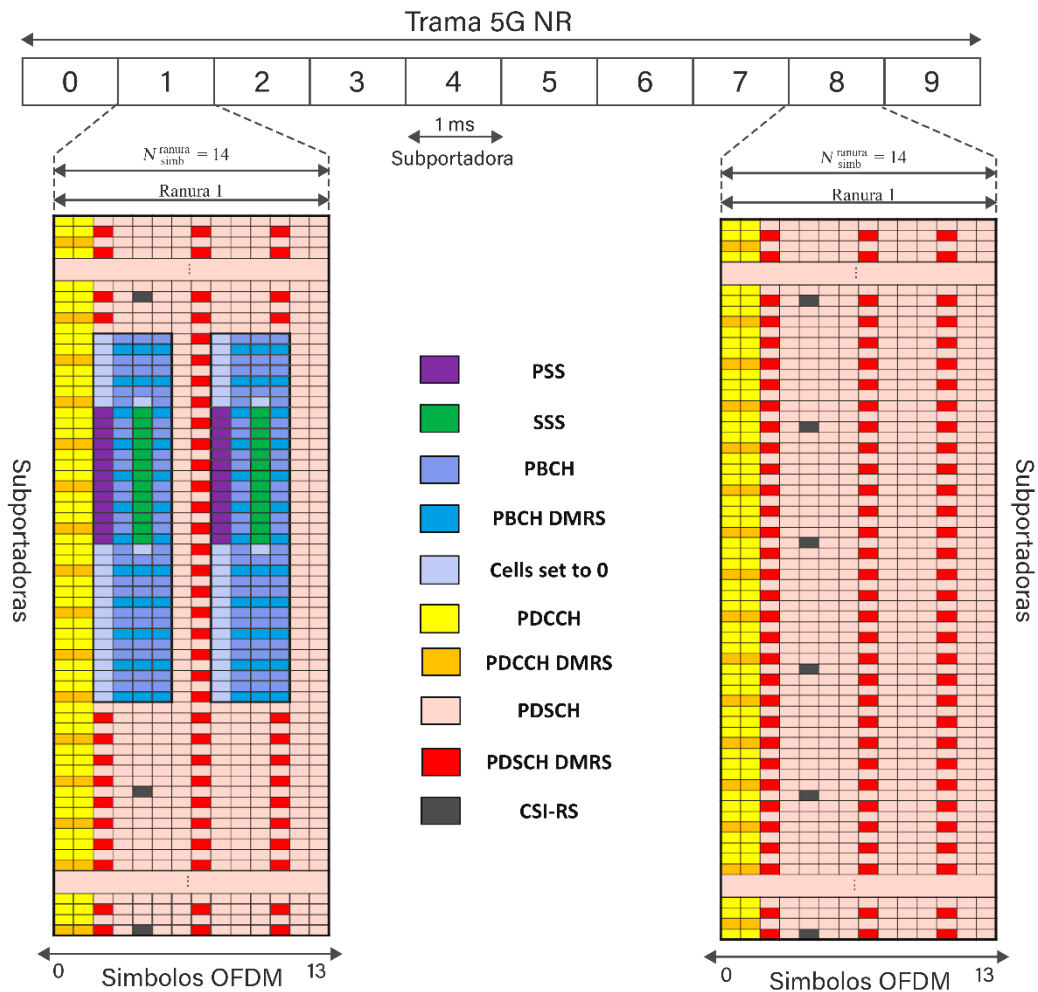


Figura N°33: Estructura de fotogramas para SFI = 0 (10 subtramas, 100% downlink).

2.7.2. Canales físicos compartidos.

A. Canal compartido de enlace descendente físico: PDSCH se utiliza para la transmisión de datos de usuario de DL, información de capa superior específica de UE, información del sistema y paginación. Para la transmisión de un bloque de transporte DL (carga útil para la capa física), primero se anexa un bloque de transporte CRC para proporcionar detección de errores, seguido de una selección de gráfico base LDPC. podemos encontrar gráficos base LDPC que admite el NR, el primero está optimizado para bloques de transporte pequeños y el segundo se usa básicamente para bloques de transporte más grandes una vez. A continuación, se realiza la segmentación del bloque de transporte en bloques de código y conexión CRC de bloque de código. Donde se codifica cada bloque de código, en segundo lugar, los bloques codificados LDPC son la tasa n separadamente emparejada. Finalmente, la concatenación de

bloques de código se realiza para crear una palabra de código para la transmisión en el canal PDSCH, admite la transmisión de hasta 2 palabras clave simultáneamente en el PDSCH. El contenido de cada palabra clave se codifica y modula para generar un bloque de símbolos de modulación de valor complejo. Los símbolos se asignan en hasta 4 capas MIMO. Un PDSCH puede tener dos palabras clave para admitir una transmisión de hasta 8 capas. Las capas se asignan a los puertos de la antena de una manera transparente especificada, que es básicamente un libro no basado en códigos, luego explicar cómo se realiza la operación de formación de haz o pre-codificación MIMO depende de la transparencia y la implementación de la red para el usuario final. Para cada uno de los puertos ex: capas utilizadas para la transmisión del PDSCH, los símbolos se asignan a los bloques de recursos RB [44]. El procesamiento de capas físicas para NR PDSCH se resume en la parte izquierda de la figura N°33.

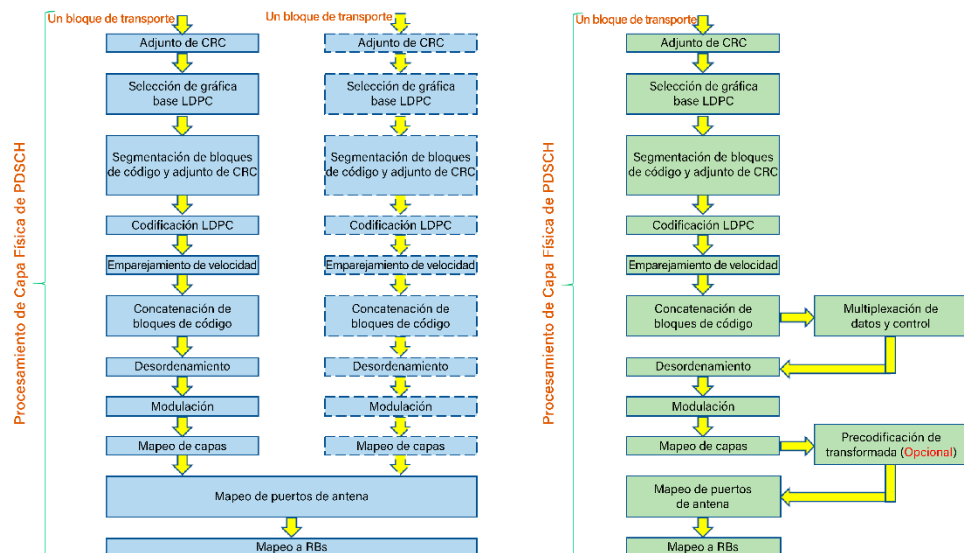


Figura N°34: Ilustración de 5G NR PDSCH.

B. Canal compartido de enlace ascendente físico: PUSCH se utiliza para la transmisión de canal compartido UL (UL-SCH) e información de control de capa 1/2. El UL-SCH es el canal de transporte utilizado para transmitir un bloque de transporte UL. El procesamiento de la capa física de un bloque de transporte UL es similar al procesamiento de un bloque de transporte DL, como se resume en la parte derecha de la figura N°33 [44]. El contenido de la palabra clave se codifica y modula para generar un bloque de símbolos de modulación de valor complejo. Los símbolos se asignan a una o varias capas. PUSCH admite una sola palabra clave que se puede asignar hasta 4 capas. En el caso de una transmisión de una sola capa, la pre-codificación de transformación DFT se puede aplicar opcionalmente si está habilitada. Para el mapeo de capas a puertos de antena, tanto la transmisión no basada en libros de códigos como

la transmisión basada en libros de códigos son compatibles con el UL. Para cada uno de los puertos de antena utilizados para la transmisión del canal físico, los símbolos se asignan a RB. A diferencia de LTE, el mapeo se realiza en frecuencia antes de tiempo para permitir la decodificación temprana en el receptor.

2.6.3. Canales de control físico.

A. Canal de control de enlace descendente físico: PDCCH se utiliza para llevar DCI, como asignaciones de programación de enlace descendente y subvenciones de programación de enlace ascendente. Una ilustración de NR PDCCH se da en la parte superior de la figura N°35. Los canales NR PDCCH están hechos de una manera especial para transmitir en un conjunto de recursos de control configurable (CORESET). Donde un CORESET es análogo a la región de control en LTE, pero se generaliza en los términos que el grupo de RBs y el conjunto de símbolos OFDM en el que se encuentra podrían ser configurables con los correspondientes espacios de búsqueda PDCCH. Esta configuración de las flexibilidades de las regiones de control puede incluir numerologías, frecuencia, tiempo y puntos de funcionamiento, que permiten a NR abordar varios casos de uso. Un PDCCH se limita a un CORESET y se transmite con su propia señal de referencia de demodulación (DMRS), lo que permite una formación de haz UE específica del canal de control. Un PDCCH es transportado por 1, 2, 4, 8 o 16 elementos de canal de control (CCE) para acomodar diferentes tamaños de carga útil DCI o diferentes velocidades de codificación. Cada CCE consta de 6 REGs. El mapeo CCE-a-REG para un CORESET puede ser intercalado (para la diversidad de frecuencias) o no intercalado (para la formación localizada de haces). Una UE está configurada para monitorear ciegamente una serie de candidatos PDCCH de diferentes formatos de DCI y diferentes niveles de agregación [43].

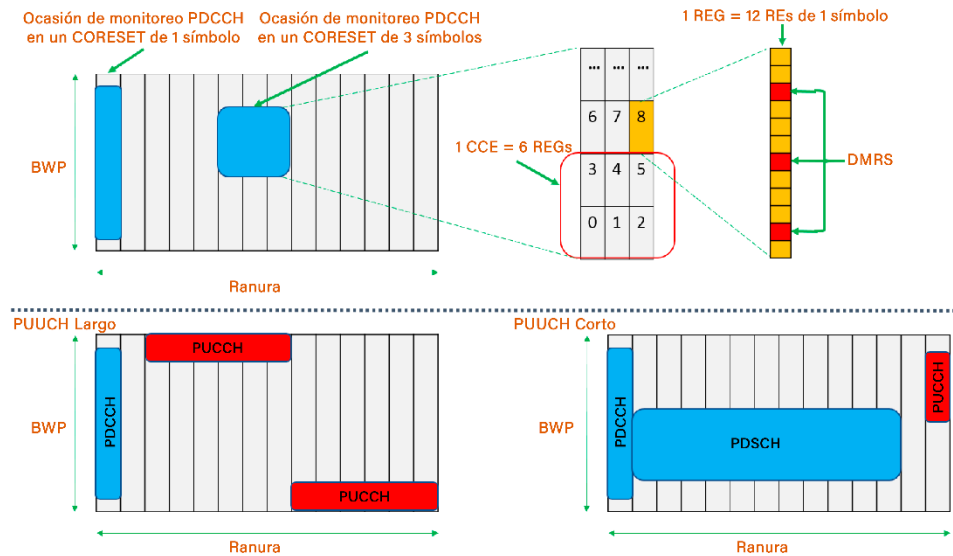


Figura N°35: Ilustración de 5G NR PDCCH y PUCCH. Para el enlace descendente, el esquema de modulación es de esta forma.

TABLA XVI
Esquemas de modulación admitidos para el enlace descendente.

Esquema de modulación	Orden de modulación Q_m
QPSK	2
16QAM	4
64QAM	6
256QAM	8

B. Canal de control de enlace ascendente físico: PUCCH se utiliza para transportar información de control de enlace ascendente (UCI), como la solicitud de programación (SR), información de estado de canal (CSI), retroalimentación de solicitud de repetición automática híbrida (HARQ) y Una ilustración de NR PUCCH se muestra en la Figura N°35, A diferencia de LTE PUCCH que se encuentra en los bordes de la portadora, NR PUCCH es flexible en su asignación de tiempo y frecuencia. Eso permite apoyar a los usuarios que tienen capacidades de ancho de banda más pequeñas en un operador NR y un uso eficiente de los recursos con respecto a la capacidad y la cobertura. El diseño de NR PUCCH se basa en 5 formatos de PUCCH. Los PUCCH cortos utilizan formatos (0 y 2), usan 1 o 2 símbolos OFDM mientras que para los PUCCH largos utiliza formatos PUCCH (1, 3, 4) y puede usar 4 a 14 símbolos OFDM. Los formatos PUCCH 0 y 1 llevan cargas útiles UCI de 1 o 2 bits, mientras que otros formatos se utilizan para transportar cargas útiles UCI de más de 2 bits. En los formatos PUCCH 1, 3 y 4, los símbolos con DMRS son multiplexados por división de tiempo con

símbolos UCI para mantener una baja relación de potencia pico a promedio (PAPR), mientras que en el formato 2, DMRS se multiplexa en frecuencia con subportadoras portadoras de datos. Para la modulación en enlace ascendente [27], la ficha ilustra, tanto en la recodificación deshabilitada como habilitada.

TABLA XVII
Esquemas de modulación admitidos para el enlace ascendente.

Transformación de la recodificación deshabilitada		Transformación de recodificación habilitada	
Esquema de modulación	Orden de modulación Q_m	Modulación de esquema	Orden de modulación Q_m
		$\pi/2$ -BPSK	1
QPSK	2	QPSK	2
16QAM	4	16QAM	4
64QAM	6	64QAM	6
256QAM	8	256QAM	8

2.7.4. Señales de referencias físicas. El diseño de la señal de referencia sigue los principios de la portadora esbelta: las señales de referencia son bajo demanda cuando es posible, y sus distribuciones de tiempo y frecuencia son configurables para que los requisitos se puedan cumplir con una sobrecarga mínima. Para servir a la reducción del consumo de energía y la interferencia intercelular a una carga baja, la transmisión de la señal de referencia puede ser extremadamente escasa. el principio bajo demanda y la alta flexibilidad del diseño y también dar como resultado un grado de compatibilidad hacia adelante. Mientras que en LTE, múltiples funciones están vinculadas al CRS siempre activo. En NR, estas funciones son compatibles con múltiples señales de referencia configuradas específicamente por varios usuarios [45].

A. Señales de referencia de demodulación de enlace descendente y enlace ascendente (DMRS): DMRS es utilizado por el receptor para producir estimaciones de canal para la demodulación del canal físico asociado. El diseño de DMRS es específico para el canal físico de almacenamiento en caché: PBCH, PDCCH, PDSCH, PUSCH y PUCCH. Podemos notar que, un DMRS es específico para cada UE, y solo se transmite bajo demanda, y en caso normal no se extiende fuera del recurso físico programado del canal que soporta. En la secuela, cuando se usa CP-OFDM, prestamos atención a PUSCH y dmRS para PDSCH. Una amplia gama de escenarios es compatible con el PDSCH / PUSCH DMRS, casos de uso y capacidades finales de

usuario. Se puede configurar la cantidad de símbolos DMRS en un PDSCH y la duración del PUSCH; esto permite admitir una movilidad de UE muy alta, pero también reduce la sobrecarga de DMRS cuando el escenario lo permite. De la misma manera, en el dominio de la frecuencia y la densidad de DMRS es configurable para permitir una sobrecarga optimizada. La primera instancia de DMRS llega temprano en la transmisión PDSCH o PUSCH, esto permite al receptor realizar una estimación del canal de arte a antes, como consecuencia reduce la latencia de procesamiento [44].

B. Señales de referencia de seguimiento de fase de enlace descendente y enlace ascendente (PTRS): el seguimiento de la fase del oscilador local en el receptor y el transmisor se realiza mediante el uso de PTRS. Esto lleva a eliminar el error de fase común y el ruido de fase, particularmente importante en altas frecuencias portadoras, en el dominio de frecuencia PTRS puede tener baja densidad pero en el dominio del tiempo puede tener alta densidad debido a las propiedades del ruido de fase, PTRS se puede mostrar tanto en el enlace ascendente (canal PUSCH) como en el enlace descendente (canal PDSCH), donde un PTRS solo está asociado con un puerto DMRS y se limita al ancho de banda programado y la duración de PDSCH/PUSCH si se transmite. Las densidades de frecuencia y tiempo de PTRS se adaptan a la programación del ancho de banda y la relación señal-ruido (SNR) [44].

C. Señales de referencia de información de estado de canal (CSI-RS): NR CSI-RS es utilizado para la adquisición de CSI de enlace descendente, de manera similar a la contraparte LTE. Más allá de este caso de uso, CSI-RS en NR también podría admitir mediciones de potencia recibida de señal de referencia (RSRP) para la gestión y movilidad del haz, el seguimiento de frecuencia y tiempo para la demodulación, y precodificación basada en reciprocidad UL. Para la configuración CSI-RS, el NR admite un alto grado de flexibilidad. Un recurso se puede con hasta 32 puertos y la densidad es configurable. En el dominio del tiempo, un recurso CSI-RS puede comenzar en cualquier símbolo OFDM de una ranura y abarca 1, 2 o 4 símbolos OFDM dependiendo del número de puertos configurados. CSI-RS puede ser periódico, semi persistente o aperiódico (DCI activado) [43].

D. Señales de referencia de sondeo (SRS): Para el sondeo del canal de enlace ascendente se utiliza el SRS. El diseño admite la programación y adaptación de enlaces ascendentes, pero en la operación de reciprocidad también la selección del precodificador de enlace descendente, la programación y adaptación de enlaces, por ejemplo: para MU-MIMO masivo. A diferencia de LTE, al hacer de NR-SRS un extremo de usuario específicamente configurado.

III. RESULTADOS

3.1. Simulación. La capacidad de la estructura de trama 5G para habilitar URLLC se debe a las varias modificaciones en la capa física, una de las modificaciones más significativas es la flexibilidad de la estructura de trama como se demuestra en el capítulo 3 y evaluado la forma de onda utilizando los KPI requeridos para el trabajo, en la simulación haremos utilizar el MATLAB como su fuerte capacidad para estudiar el procesamiento de señales, así como su biblioteca para 5G y también su precisión en términos de resultados, en el primer paso simularemos el tiempo de ráfaga de las formas de onda más significativas y veremos cómo afecta a la latencia, en la segunda parte nos centraremos en simular las numerologías de 5G y cómo gestionar la decodificación de alto ancho de banda para dispositivos pequeños utilizando la técnica de parte de ancho de banda.

3.2. Simulación de la duración de la ráfaga para candidatos 5G. Como primera parte de este trabajo, seleccionamos CP-OFDM, UFMC y FBMC para estudiar la eficiencia espectral que depende del tiempo de ráfaga para los candidatos de forma de onda 5G más destacados, en los que tendríamos los siguientes parámetros:

TABLA XVIII
Parámetros de SIMULACIÓN para la duración del tiempo de ráfaga.

Bits por subportadora	6
Tamaño FFT	4096
Número de prefijo cíclico	43
Longitud del filtro	43

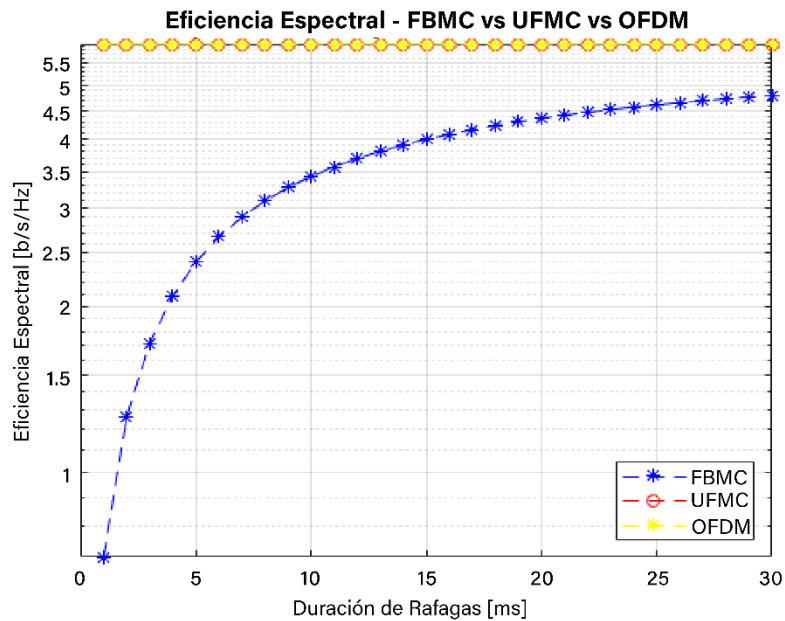


Figura N°36: Eficiencia espectral y duración de ráfaga para los candidatos destacados de 5G.

UFMC tiene una ventaja en comparación con el OFDM por su mayor eficiencia espectral, la capacidad de filtrar las sub-bandas tiene un impacto en la reducción de las bandas de protección entre las sub-bandas y, por lo tanto, reduce la longitud del filtro, lo que lo hace bueno para ráfagas cortas, mientras que también es mejor que FBMC porque este último lleva mucho tiempo en el filtrado, ya que filtra cada subportadora sola. El gráfico anterior explica que la eficiencia espectral depende de la duración de los candidatos a forma de onda resaltados, ya que tenemos tanto el número CP como la longitud del filtro iguales tanto para OFDM como para FBMC, se superponen entre sí durante la ráfaga, también notamos que FBMC aumenta su eficiencia espectral por el incremento de la duración de la ráfaga, ya que se necesita una ráfaga larga para alcanzar una buena eficiencia espectral lo que hace que no sea adecuado para aplicaciones de baja latencia ya que depende de la duración de la ráfaga.

3.3. Simulación de la estructura del marco de 5G. En la segunda fase de la simulación, nuestro enfoque principal es ver cómo 5G permite una baja latencia con una confiabilidad, este trabajo podría separarse en muchas partes como se menciona en el capítulo 2, latencia RAN & CORE, en nuestro trabajo, vamos a simular tramas 5G y BWP para diferentes casos para ver cómo podría la flexibilidad de trama y ancho de banda habilitar una gran parte de la latencia. Nuestro plan de simulación incluye simulación de ancho de banda y estructura de trama para un enlace descendente con distribución de símbolos en diferentes numerologías, también simularemos EVM (magnitud de vector de error) del modelo de prueba NR para enlace descendente, por el lanzamiento 15, tenemos dos rangos de frecuencia FR1 y FR2, FR1 está entre [50 MHz; 100 MHz] para frecuencias inferiores a 6GHZ.

FR2 está entre [100 MHz; 400 MHz] para frecuencias banda milimétrica.

vamos a utilizar NR-FR1-TM3.1 & NR-FR2-TM3.1.

Parámetros de simulación:

TABLA XIX
Parámetros de SIMULACIÓN para la estructura del marco.

Frecuencia	FR1 < 6 Ghz		FR2 >> 6 Ghz (banda milimétrica)	
MODULACIÓN	QAM64	QAM64	QAM64	QAM64
Ancho de banda del canal	02 MHz	100 MHz	200 MHz	400 MHz
Espaciado de la subportadora (SCS)	15 KHz	30 KHz	60 KHz	120 KHz

Modo dúplex	TDD/FDD	TDD/FDD	TDD/FDD	TDD/FDD
-------------	---------	---------	---------	---------

CP-OFDM se utiliza en 5G NR con espaciado de subportadora variable por lo que, podría reducir la velocidad de símbolos, así como se beneficia de la ventaja de la ortogonalidad que es la fiabilidad de la transmisión, en nuestro resultado, tenemos 8 tablas en TDD ya que dos se utilizan para la sincronización del demodulador y 10 tablas en FDD y vamos a simular canales, PARTE DE ANCHO DE BANDA.

3.3.1. Canales.

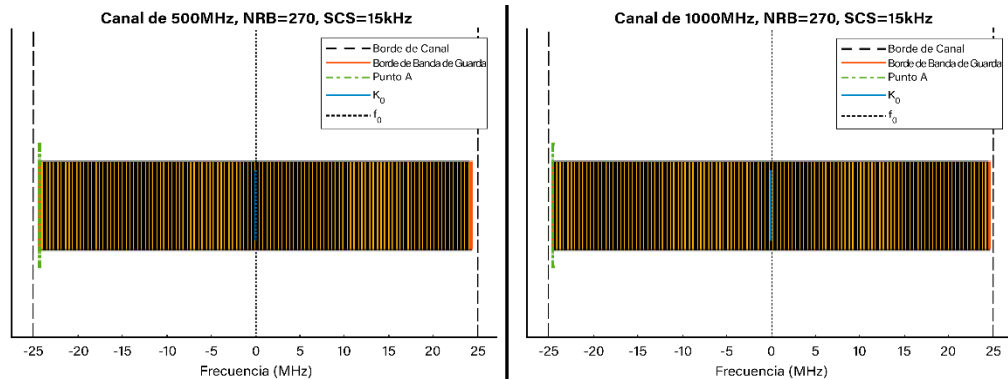


Figura N°37: Canales de enlace descendente FR1 (TDD/FDD).

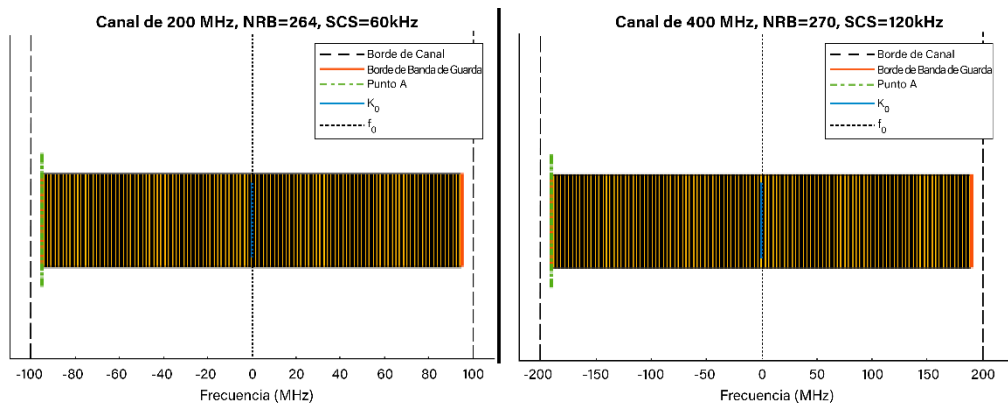


Figura N°38: Canales de enlace descendente FR2 (TDD/FDD).

3.3.1.1. Resultados y comentarios. En el resultado anterior, tenemos dos tipos de canales, principalmente el canal de enlace descendente, FR1 pertenece al sub-6 Ghz, y el FR2 es para el ancho de banda de los canales banda milimétrica, como podemos ver, el ancho de banda máximo permitido para FR1 es de 100mhz, donde para FR2 podríamos alcanzar hasta 400mhz, estos aspectos físicos nos hicieron profundizar más en el mapeo de datos y símbolos en el canal .siempre se necesita una banda de guardia para hacer aislamiento,

mientras que también utilizamos bordes de canal, en su mayoría de 20mhz, que introduce un nuevo término llamado el ancho de banda nominal o el ancho de banda utilizable para los datos.

3.3.2. DÚPLEX DE DIVISIÓN DE TIEMPO (TDD).

3.3.2.1. Piezas de ancho de banda (BWP).

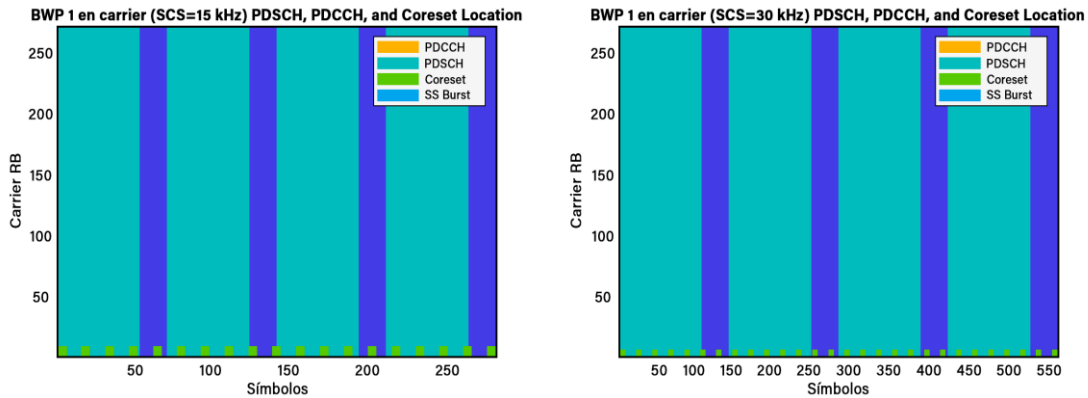


Figura N°39: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR1 (TDD).

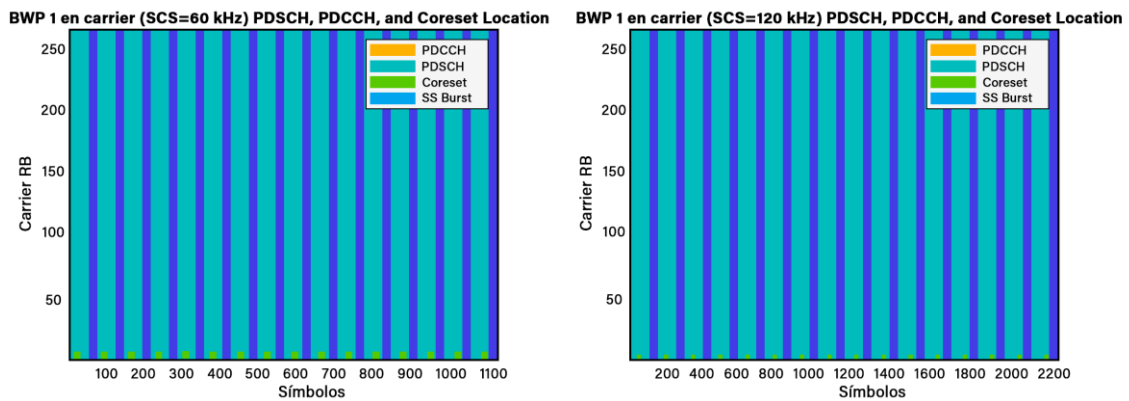


Figura N°40: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR2 (TDD).

3.3.2.2.1. Resultados y comentarios.

Las especificaciones (TS 38.141-2) definen FR2 NR-TM solo para TDD, pero este ejemplo también permite crear formas de onda FDD. NR tiene una flexibilidad similar, con la capacidad de programar transmisiones tan cortas como de downlink de dos símbolos (palabras clave) /uplink de un símbolo. En 5G, ya que usamos un ancho de banda mucho más alto, UE no tiene que decodificar todo el ancho de banda como en LTE, cuando UE está en modo inactivo, lee la información para otras partes de ancho de banda (BWP), que existe en la parte de ancho de banda inicial. Para el dúplex, FDD y TDD son dos modos dúplex dominantes aplicados para espectro emparejado y espectro no emparejado, ya que TDD utiliza toda la ráfaga a la vez, podemos dedicar un canal completo para un usuario, esta opción hizo que

TDD fuera muy flexible con banda milimétrica y banda grandewidth en comparación con FDD, mientras que TDD se puede configurar para ambos enlaces subtrama, pero debido al requisito de sincronización, la configuración es relativamente lenta y la solución a abordar este problema, utilizamos un dúplex flexible, esta solución se sugiere para 5G pero aún no está estandarizada. Para TDD, el espaciado de la subportadora, la capacidad de monitoreo y los tiempos de procesamiento admitidos. NR TDD con subtramas autónomas puede ofrecer una latencia más baja que las configuraciones TDD tradicionales compatibles con LTE, Para la portadora TDD de alta frecuencia, la configuración de relación de intervalo de tiempo (TS) DL / UL solo debe tener en cuenta las estadísticas de tráfico DL / UL a largo plazo para garantizar la eficiencia de explotación del espectro DL.

3.3.2.2. Símbolos / Marcos.

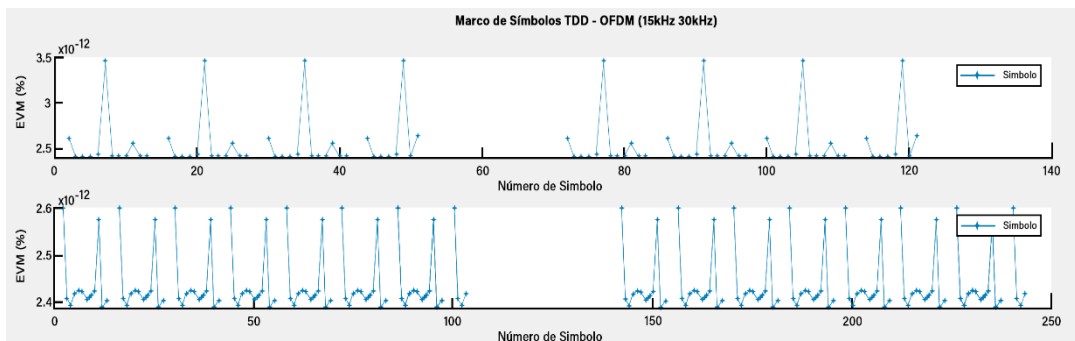


Figura N°41: Simulación de fotogramas para FR1 (TDD).

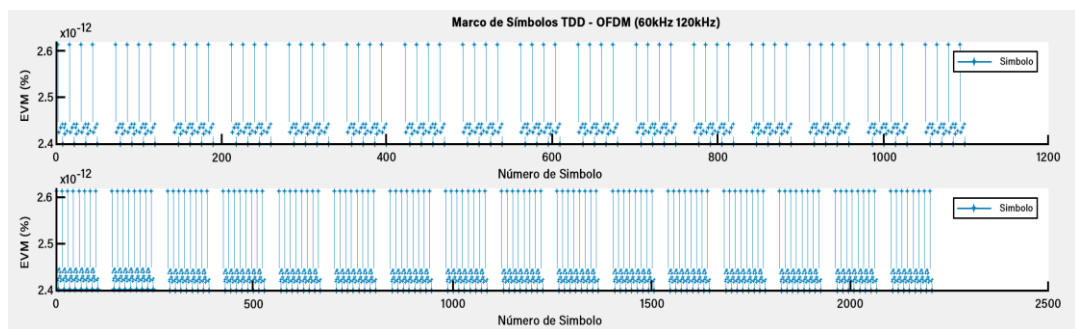


Figura N°42: Simulación de fotogramas para FR2 (TDD).

3.3.3. Dúplex por división de frecuencia (FDD).

3.3.3.1. Parte de ancho de banda (BWP).

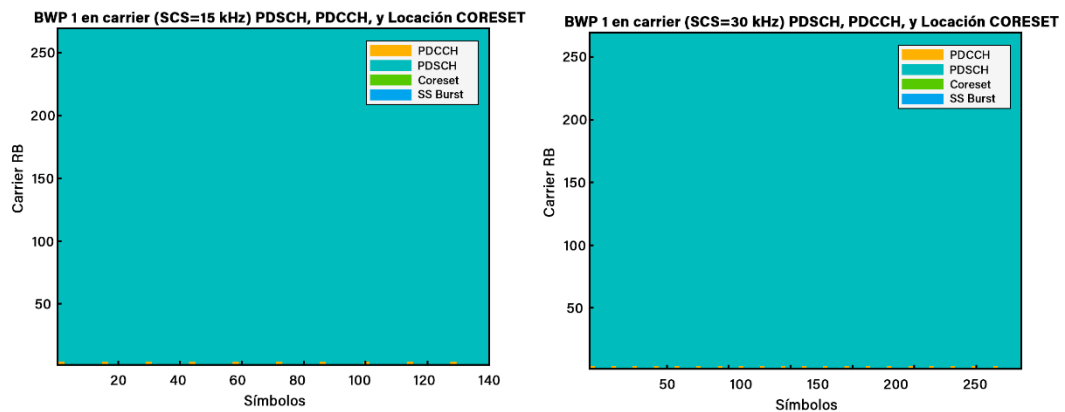


Figura N°43: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR1 (FDD).

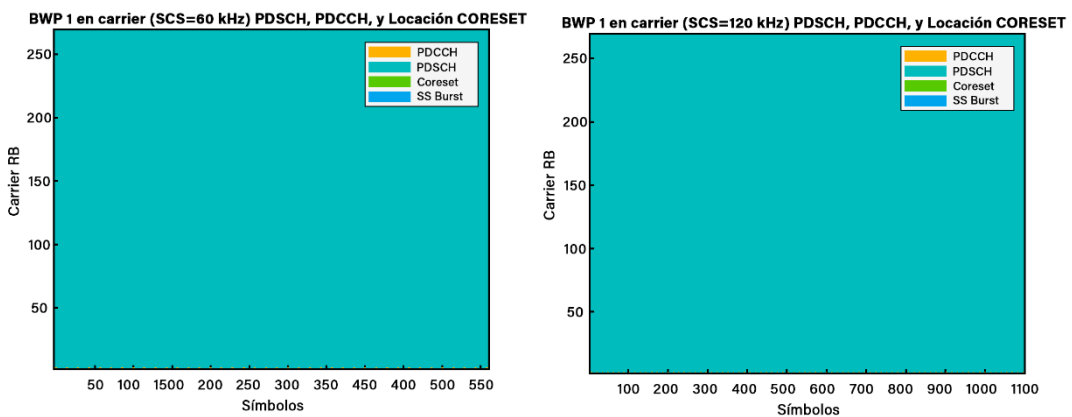


Figura N°44: Parte del ancho de banda para el espaciado de la subportadora FR2 (FDD).

3.3.3.1.1. Resultados y comentarios. En el modo dúplex, el canal de enlace descendente podría soportar tanto FDD como TDD, FDD podría usar dos para FDD, debido al mayor desequilibrio entre la carga del downlink y el uplink, los anchos de banda simétricos DL/UL en FDD dan como resultado una forma no efectiva de usar el espectro UL, Debido al dúplex flexible, hay una estructura de trama muy flexible para NR y cada símbolo en la ranura se puede configurar de manera flexible como transmisión de enlace descendente o ascendente en principio. Con un mayor espacio posible de la subportadora, la latencia puede, por lo tanto, reducirse significativamente. El rendimiento de NR para URLLC dependerá en gran medida de si se utiliza FDD o TDD y de la configuración. Una UE se puede configurar con hasta cuatro partes de ancho de banda en el enlace descendente, con una sola parte de ancho de banda de enlace descendente activa a la vez dentro de un SCS en particular, esta configuración está hecha para una mayor simplicidad

de implementación del concepto, bwp se caracteriza por su SCS y prefijo cíclico, Compatible con capacidad de ancho de banda UE reducida es especialmente útil para dispositivos con capacidad de RF limitada o aquellos que no son capaces de bandwidth.as de portadora completa, así como Admite un consumo de energía UE reducido para perfiles de tráfico intermitentes y de ráfaga. y durante el modo conectado, UE podría cambiar a diferentes bwp de SCS. Además, en 5GNR, DC se modula porque en concepto de parte de ancho de banda, cada bwp necesita ser centralizado dentro de su frecuencia portadora.

3.3.3.2. Símbolos/Marcos.

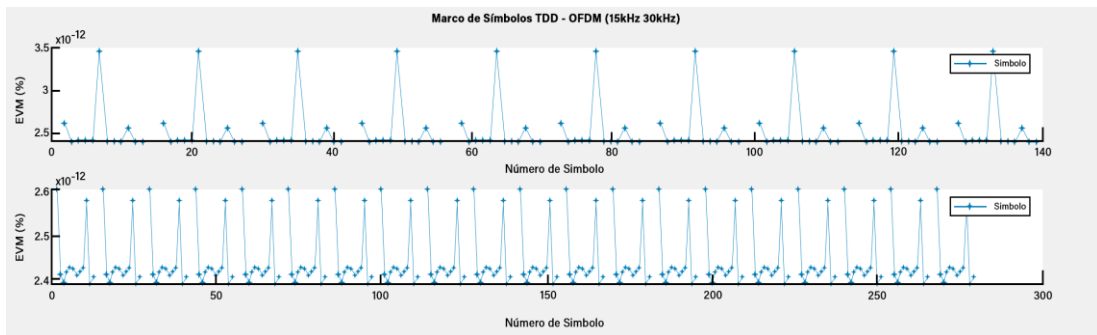


Figura N°45: Simulación de tramas para FR1 (FDD).

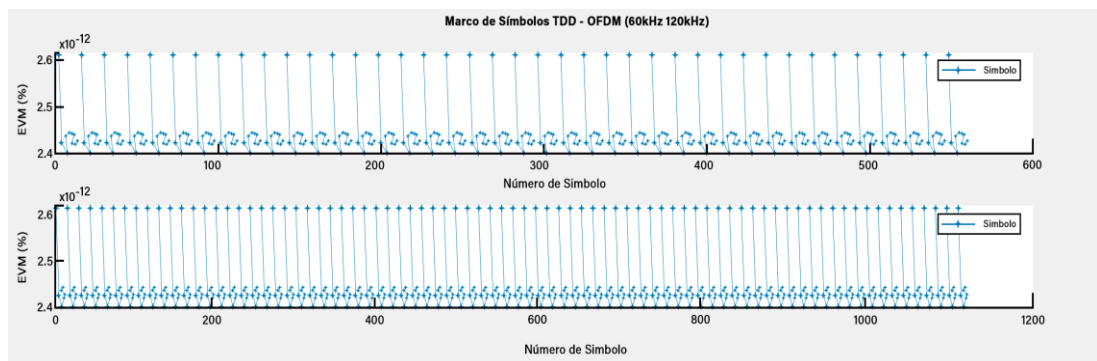


Figura N°46: Simulación de trama para FR2 (FDD).

3.4. Resultados y comentarios. 5G NR admite un marco flexible que conduce a una duración de símbolo flexible De acuerdo con la estructura del marco de 5G NR, 30 Khz SCS reducirá la longitud del símbolo en un 50%, y 60 kHz SCS puede reducir la longitud en un 75%. Esto ayudaría a reducir la latencia de los pasos relacionados con la transmisión de la interfaz aérea tanto para la latencia del plano de usuario como para la latencia l del plano de control tenemos diferentes SCS para diferentes casos de uso. Se utilizó la medición de EVM de magnitud de vector de error en una estructura de fotograma, sin utilizar ningún deterioro, (EVM) se puede utilizar como un método eficaz y eficiente para evaluar el rendimiento de RF de aquellos

sistemas de comunicación modulados digitalmente, donde el EVM se define como la longitud del vector entre el símbolo recibido y el símbolo transmitido, Para una correcta demodulación es necesario para saber qué símbolo se ha enviado. Tanto LTE como 5G NR asumen en sus algoritmos de medición EVM que el símbolo transmitido es el que está al lado del recibido. La duración flexible del marco se debe a la estructura flexible de la subtrama, donde cada subtrama tiene número de ranuras, las ranuras en 5G NR no son las mismas que en LTE (en las ranuras LTE se fijan en el tiempo a 1 ms), en este caso, el marco podría tomar un gran número diferente de símbolos en una duración de marco fija porque del espaciado más ancho de la subportadora, lo que conduce a una menor duración del símbolo. La duración del fotograma en 5G NR es de 10 ms, donde la duración de cada fotograma es de 1 ms, y donde el número de ranuras en cada subtrama es flexible, lo que conduce a un número flexible de símbolos, lo que significa una duración de símbolo flexible. Como se menciona en la figura N°44 y la figura N°45, así como en la figura N°40 y la figura N°41.

-15KHZ SCS: tenemos una ranura por subtrama, cada ranura tiene 14 símbolos OFDM, la duración de 10 ranuras es de 10 ms, (la duración de la ranura es de 1 ms).

- 30KHz SCS: tenemos dos ranuras por subtrama, cada ranura tiene 14 símbolos OFDM, la duración de 20 ranuras es de 10 ms (la duración de la ranura es de 0,5 ms).

- 60KHz SCS: tenemos dos ranuras por subtrama, cada ranura tiene 14 símbolos OFDM, la duración de 40 ranuras es de 10 ms (la duración de la ranura es de 0,25 ms).

- 120KHz SCS: tenemos dos ranuras por subtrama, cada ranura tiene 14 símbolos OFDM, la duración de 80 ranuras es de 10 ms (la duración de la ranura es de 0,125 ms).

Después de este resultado, podemos ver que el formato de subtrama flexible conduce a una duración de símbolo muy baja que permite una baja latencia, como aplicaciones de tiempo crítico, podemos usar SCS más amplio para que los usuarios les proporcionen una duración de símbolo de latencia ver y baja. Además, notamos que en FR2, usamos banda milimétrica y 60khz es una especie de alta frecuencia para que los usuarios la traten, como solución a esto, 5G NR propone la parte de ancho de banda, que permite al usuario decodificar solo una parte para el ancho de banda como se menciona en la figura N°38 y N°39, así como en la figura N°42 y N°43, la diferencia es que en TDD el simulador simula solo 8 frames, y otros dos son para la sincronización. Se puede asignar minicapa (2,4 o 7 símbolos) para transmisiones más cortas, donde las ranuras también se pueden agregar para transmisiones más largas.

Nota: podemos notar que solo hay 12 símbolos, los otros dos se suprimen para el prefijo cíclico (generalmente el primero y el último)

3.4.1. Otros datos interesantes sobre 5G NR. La codificación de canales NR es diferente de otras generaciones, usamos tanto la potencia LDPC para altas velocidades de datos como el código polar para las transmisiones cortas, ya que LDPC tiene la ventaja de la latencia de decodificación y el código polar muestra la ventaja de rendimiento cuando se usa para el canal de control.

IV. DISCUSIÓN

La reducción de la latencia en las redes 5G es un desafío crítico para el desarrollo tecnológico. En este contexto, se presentarán tres discusiones clave sobre este tema, abordando aspectos fundamentales para su implementación efectiva.

La reducción de la latencia es esencial para aplicaciones críticas en 5G, como telemedicina y automatización industrial. Sin embargo, se enfrenta desafíos significativos en términos de infraestructura y conectividad. La falta de cobertura de fibra óptica y la dispersión geográfica complican la implementación de redes 5G de baja latencia. Para abordar esto, es necesario un esfuerzo conjunto entre el gobierno y las empresas de telecomunicaciones para expandir la infraestructura de banda ancha y mejorar la conectividad en áreas rurales. La inversión en torres de comunicación y enlaces de fibra óptica será fundamental para reducir la latencia.

La reducción de la latencia en 5G tiene un gran potencial para impulsar sectores clave, como la agricultura y el turismo. Sin embargo, es esencial identificar aplicaciones específicas que generen un impacto positivo en la economía local. Se deben promover proyectos piloto que demuestren los beneficios de 5G en aplicaciones agrícolas, como la monitorización de cultivos y la gestión del riego. Además, se pueden desarrollar soluciones de realidad aumentada para mejorar la experiencia turística en la región.

La baja latencia en 5G permitirá una mayor interconexión de dispositivos y sistemas, lo que plantea desafíos de seguridad y privacidad. La protección de datos y la ciberseguridad serán aspectos críticos. Para abordar estos desafíos, se deben establecer regulaciones claras y protocolos de seguridad. Además, la educación y concienciación sobre la seguridad cibernética serán esenciales tanto para las empresas como para los ciudadanos.

La reducción de la latencia en las redes 5G, representa una oportunidad significativa para el desarrollo tecnológico y económico de la región. Sin embargo, superar los desafíos de infraestructura, identificar aplicaciones locales relevantes y abordar problemas de seguridad son pasos esenciales para aprovechar al máximo esta tecnología.

V.CONCLUSIONES

Hasta ahora, como hemos visto, la estructura del marco para la comunicación descendente tiene muchos parámetros, que van desde la forma del canal hasta la distribución de símbolos en el marco. Mientras utilizamos un tiempo de ranura fijo y un número diferente de símbolos según el ancho de banda (espaciado de subportadora) que utilizamos, mediante la evaluación de las tres principales formas de onda candidatas utilizadas para 5G, cada una de las técnicas de acceso múltiple tiene sus propias ventajas, pero carecen de flexibilidad. Por ejemplo, (FBMC) es bueno para paquetes grandes, pero no maneja la latencia en paquetes pequeños, (NOMA) es bueno para la latencia, pero no es fiable. La fiabilidad también está relacionada con la latencia, se define como si la latencia de transmisión de una sola vez se puede reducir, y puede haber oportunidad de tener más repeticiones dentro del presupuesto de latencia. La fiabilidad puede, por lo tanto, mejorarse.

Para la versión 15 y para la nueva capa física NR, se ha elegido CP-OFDM como la forma de onda para ambos enlaces, mientras que se ha realizado una pequeña modificación en el OFDM mediante la introducción de DFT-S-OFDM en la comunicación ascendente debido a su capacidad de cobertura, así como al bajo consumo de energía para los dispositivos de usuario final. La elección de CP-OFDM es la solución óptima después de varias pruebas entre las candidatas de formas de onda. El uso del prefijo cíclico permite el uso de ecualización de un solo toque en el dominio de la frecuencia después de la modulación y también ayuda en la robustez contra problemas de multipercurso debido a la duración, además de ser mucho más eficiente en términos de costos y complejidad.

La implementación del espectro 5G varía de un país a otro, pero según los estándares introducidos por 3GPP, podemos obtener fácilmente un ancho de banda de 100 MHz en la frecuencia sub-6 GHz, lo que es un ancho de banda eficiente en comparación con el 4G, que tiene un ancho de banda máximo de 20 MHz. Además, el uso de múltiples numerologías permite diferentes escenarios y aplicaciones, como URLLC, eMBB, mMTC, para ser desplegadas. Las subportadoras estrechas permiten al usuario un menor consumo de batería y son eficientes en modo de espera (por ejemplo, 15 kHz) y en modo activo asignamos al usuario un SCS más amplio y, como resultado, una duración de símbolo más corta.

Satisfacer las necesidades del mundo en telecomunicaciones en general o en la red celular en particular se basa en valorar el trabajo y la colaboración de cada individuo. Una pequeña modificación u optimización, ya sea en la optimización de la latencia o en el rendimiento o cualquier entidad, realmente puede marcar la diferencia en el cumplimiento del requisito teórico del sistema 5G. Creemos que la clave para el viaje de la innovación comienza con la comprensión de la tecnología. En nuestro trabajo nos enfocamos en brindar los detalles más importantes de

cómo funciona la latencia y los aspectos significativos de la misma, desde RAN hasta el transporte, como se explica en el capítulo tres. La latencia se divide en muchas secciones y cada parte tiene la necesidad de ser optimizada y hacerla mucho más confiable. Muchas tecnologías son posibles ahora debido a los trabajos en diferentes industrias, como la codificación LDPC que era un sistema antiguo pero gracias a la tecnología de hardware, ahora es posible utilizar sus características en 5G, lo mismo ocurre con el beamforming que ya se había descubierto en lo analógico y se había utilizado en muchas tecnologías antiguas, también, SDN y NFV son posibles ahora debido a la gran capacidad y velocidad de procesamiento, lo que hizo que las tareas de software fueran tan rápidas como el hardware. Con estos conceptos, ya no tenemos que fabricar circuitos integrados específicos de la aplicación (ASIC) y desecharlos o reciclarlos después de unos años. El software nos facilitó la construcción de cualquier tipo de arquitectura de red y monitorear/controlar nuestro sistema con mucha más precisión y a un costo más bajo.

La estructura del marco tiene un impacto significativo en la latencia en 5G y fue traído por los flujos realizados en el 4G, así como la nueva capacidad de utilizar los recursos que tenemos, como el ancho de banda masivo de banda milimétrica. La idea de numerologías variables dejó su huella en el aspecto de la latencia, ya que hay una relación recíproca entre altas frecuencias y, por lo tanto, la duración del símbolo se hace más corta. Sin embargo, debido a las frecuencias más altas, enfrentamos muchos otros problemas, especialmente la posibilidad de que un dispositivo IoT o de bajo consumo de energía descodifique todo el ancho de banda, es aquí donde surge la idea de la parte de ancho de banda, el UE recibe solo una parte del ancho de banda y luego lo descodifica con facilidad. Otro aspecto es el mini-slot, donde enviamos 2, 4 o 7 símbolos para un usuario en lugar de 14 símbolos OFDM, esto ayudaría a las aplicaciones que dependen más de la latencia que del rendimiento.

Aunque este tema todavía está en investigación y se pueden hacer muchas sugerencias para optimizar la latencia total en el sistema 5G, muchos tipos de investigaciones se centran en técnicas de programación para la estructura del marco en RAN y en algoritmos de programación en la nube en la RED CENTRAL, el almacenamiento en caché ayuda a minimizar la ruta desde UE hasta la nube, lo que hace que esta idea también sea más fácil de aplicar y útil.

Sugerimos que la próxima contribución se haga en la latencia de la red central o en ideas de almacenamiento en caché para una mayor optimización y comprensión del aspecto de la latencia.

VI. RECOMENDACIONES

Considerando la importancia de la reducción de la latencia en las redes 5G para el desarrollo de las ciudades de la costa peruana, se presentan tres recomendaciones clave que deben abordarse en futuros proyectos para maximizar el potencial de esta tecnología en la región.

Es esencial realizar una investigación exhaustiva sobre las aplicaciones específicas que pueden beneficiarse de la baja latencia. Esto implica colaboraciones entre instituciones académicas, empresas locales y el gobierno para identificar las necesidades y oportunidades locales. Se recomienda la creación de un grupo de trabajo multidisciplinario que se enfoque en identificar casos de uso prácticos en sectores como la agricultura, el turismo y la salud. Esta investigación permitirá una implementación más enfocada de las redes 5G.

La infraestructura de comunicaciones debe ser mejorada para admitir la baja latencia en 5G. Esto incluye la expansión de la cobertura de fibra óptica, la instalación de torres de comunicación y la optimización de la red existente. Se recomienda que las empresas de telecomunicaciones colaboren con el gobierno local para desarrollar un plan de expansión de infraestructura a largo plazo. Esto asegurará la preparación para la implementación de redes 5G de baja latencia.

Con la mayor interconexión de dispositivos y sistemas que trae consigo la baja latencia en 5G, es fundamental abordar los desafíos de seguridad cibernética. Se debe priorizar la educación y concienciación sobre ciberseguridad en la comunidad. Se recomienda la creación de programas de capacitación en ciberseguridad dirigidos tanto a empresas como a ciudadanos. Además, se debe promover la adopción de estándares de seguridad en todas las implementaciones de 5G en la región.

VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] V. Figueroa, “5G wireless technology that will change the world fully”, Universidad Estatal del Sur de Manabi, vol. 6, no. 3, 2022.
- [2] E. Medina, “Desarrollo de antenas miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G”, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, 2019.
- [3] e. a. H. Hussien, “Coexistence of TV white space devices and DTV services in Ethiopian geolocation white space spectrum database”, IEEE 24th International Workshop on Computer Aided Modeling and Design of Communication Links and Networks, pp. 1-5, 2019.
- [4] E. Medina, Desarrollo de antena miniatura UWB con aplicación en sistemas de comunicaciones móviles 5G, tesis maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, pp. 1957-1962, 2019.
- [5] M. Ruilova, Estudio y análisis de tecnologías habilitadoras 5G y sus factibilidades para el desarrollo del internet de las cosas, Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, pp. 145-148, 2018.
- [6] J. Luque, Simulación y evaluación de los modelos de pérdidas de propagación de gran escala en entornos urbano-densos para la red de comunicaciones móviles de quinta generación (5G) para las bandas de 28 y 73 GHz, tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2020.
- [7] A. Barakabitze, "Evolution of LTE and Related Technologies towards IMT- Advanced", Evolution of LTE and Related Technologies towards IMT-Advanced, pp. 1-4. 2015.
- [8] H. Holma y A. Toskala. “LTE Advanced”, Hoboken, 2012.
- [9] M. Vaezi, Z. Ding y H. Poor, “Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond”, 2019.
- [10] C. Hoymann, D. Astely, M. Stattin, G. Wikstrom, J. Cheng, A. Hoglund y F. Gunnarsson, “LTE release 14 outlook”, IEEE Communications Magazine, vol. 54(6), pp. 44-49, 2016.
- [11] Z. Ma, Z. Zhang, Z. Ding, P. Fan y H. Li, “Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives”, Science China Information Sciences, vol. 58(4), pp. 1-20, 2015.
- [12] E. Dahlman, S. Parkyall y J. Skold, “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology (1re ed.)”, Chennai, india: Academic Press, 2018.

- [13] H. Holma, A. Toskala y T. Nakamura, “5G Technology”, Hoboken, NJ, Etats-Unis: Wiley, 2019.
- [14] 3GPP releases 16 & 17 overview – the 5G NR evolution, 2020.
- [15] O. Yilmaz, “Key innovation areas of 3GPP Rel-17”, 2020.
- [16] E. Dahlman, S. Parkvall y J. Skold, “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology (1re ed.)”, Chennai, india: Academic Press, 2018.
- [17] 3GPP reléase 15 overview, 2015.
- [18] V. Nguyen, G. Do, T. X. y Y. Kim, “SDN and Virtualization-Based LTE Mobile Network Architectures: A Comprehensive Survey”, *Wireless Personal Communications*, vol. 86(3), pp. 1401-1438, 2015.
- [19] P. Meerasri, P. Uthansakul y M. Uthansakul, “Self-Interference Cancellation-Based Mutual-Coupling Model for Full-Duplex Single-Channel MIMO Systems”, *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 1-10, 2014.
- [20] M. Liyanage, I. Ahmad, A. Abro, A. Gurtov y M. Ylianttila, “A Comprehensive Guide to 5G Security (1re ed.)”, finland, finland: Wiley, 2018.
- [21] L. Wei, R. Hu, Y. Qian, et al. “Enable device-to-device communications underlying celular networks: challenges and research aspoects”, *IEEE Commun Mag*, vol. 52, pp. 90-96, 2014.
- [22] K. Kim, J. Hong Kang, J. Hwang y K. Ahn, “Hybrid Beamforming Architecture and Wide Bandwidth True-Time Delay for Future High Speed Communications 5G and Beyond 5G Beamforming System”, 2018 IEEE 3rd International Conference on Integrated Circuits and Microsystems (ICICM), pp. 1-3, 2018.
- [23] Ahmed, Samir, “Beamforming management and beam training”, 2019.
- [24] H. Ekstrom, “Non-standalone and Standalone: two paths to 5G”, 2019.
- [25] M. Bennis, M. Debbah y H. Poor, “Ultrareliable and Low-Latency Wireless Communication: Tail, Risk and Scale, *Proceedings of the IEEE*, vol. 106(10), pp. 1834-1853, 2018.
- [26] W. Lei, A. Soong, L. Jianghua, W. Yong, B. Classon, W. Xiao, D. Mazzaresse, Z. Yang y T. Saboorian, “5G System Design: An End to End Perspective”, 2020.
- [27] 3GPP TR38.913, “Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies”, jun, 2017.

- [28] I. Parvez, A. Rahmati, I. Guvenc, A. Sarwat y H. Dai, “A Survey on Low Latency Towards 5G: RAN, Core Network and Caching Solutions”, *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 20(4), pp. 3098-3130.
- [29] C. She, C. Yang y T. Quek, “Radio Resource Management for Ultra-Reliable and Low-Latency Communications”, *IEEE Communications Magazine*, vol. 55(6), pp. 72-78.
- [30] H. Ji, S. Park, “Ultra Reliable and Low Latency Communications in 5G Downlink: Physical Layer Aspects, Samsung Electronics, Korea. Dept. of Electrical and Computer Engineering, Seoul National University, Korea Samsung Electronics, Korea, 2018.
- [31] Radiocommunication sector of ITU, “Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s)”, 2017.
- [32] I. Jang y G. Jo, “Study on the latency efficient IFFT design method for low latency communication systems”, en *Proc. Int. Symp. Intell. Signal Process. Commun. Syst. 8ISPACS*, oct, 2016.
- [33] S. Dutta, M. Mezzavilla, R. Ford, M. Zhang, S. Rangan y M. Zorzi, “MAC layer frame design for millimeter wave cellular system”, pp. 117-121, 2016.
- [34] 3GPP Technical Specifications 38.211, “Technical Specification Group Radio Access Network, NR (Release 15)”, 2017.
- [35] R. Gerzaguet, N. Bartzoudis, L. Baltar, V. Berg, J. Doré, D. Kténas, O. Font-Bach, X. Mestre, M. Payaró, M. Färber, K. Roth, “The 5G candidate waveform race: a comparison of complexity and performance”, *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2017, ene, 2017.
- [36] A. Zaidi, F. Athley, J. Medbo, G. Durisi, U. Gustavsson, y X. Chen, “5G Physical Layer”, Maarsen, Pays-Bas: Elsevier Gezondheidszorg, 2018.
- [37] M. Vaezi, Z. Ding y H. Poor, “Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond”, *Multiple Access Techniques for 5G Wireless Networks and Beyond*, 2018.
- [38] Dr. Essam Sourour, P. S. B. A. U., “Non Orthogonal Multiple Access as a Candidate for 5G (1)”, 2019.
- [39] NOMA vs. OMA, “Difference between NOMA and OMA”, 5G. (s. d.), 2020.
- [40] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, “5G NR: The Next Generation Wireless Access Technology”, Academic Press, pp. 466, 2018.

- [41] J. Lahdenperä, “FEASIBILITY OF THE UE POWER SAVING SIGNAL FOR THE 5G NEW RADIO”, 2019.
- [42] A. Zaidi, R. Baldemair, M. Andersson, S. Faxér, V. Molés-Cases y Z. Wang, “5G New Radio: Designing for the future, Ericsson technology Review”, Ericsson AB, Sweden, Stockholm, 2017.
- [43] J. Cárcel, “DESIGN AND PERFORMANCE EVALUATION OF A 5G NEW RADIO BROADCAST MODE FOR SINGLE FREQUENCY NETWORKS”, 2018.
- [44] X. Lin, A. Grovlen, K. Werner, J. Li, R. Baldemair, J. Cheng, S. Falahati, “5G New Radio: Unveiling the Essentials of the Next Generation Wireless Access Technology”, IEEE Communications Standards Magazine, 2019.