

**ESTADO DEL ARTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE LA TECNOLOGÍA 5G
ENFOCADA A LA CAPA FISICA.**

MARÍA CAMILA BARRERA CORTÉS



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TUNJA

2021

**ESTADO DEL ARTE DE LA INFRAESTRUCTURA DE LA TECNOLOGÍA 5G
ENFOCADA A LA CAPA FISICA.**

MARÍA CAMILA BARRERA CORTÉS

Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniera Electrónica

DOCENTES DIRECTORES

ING. ANGELICA MARÍA SALAZAR MADRIGAL

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS SECCIONAL TUNJA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

TUNJA

2021

EXONERACIÓN DE RESPONSABILIDADES

Las ideas expresadas en este trabajo de grado son responsabilidad exclusiva del autor.

NOTA DE ACEPTACIÓN

Observaciones

Firma Decano

Firma Primer Jurado

Firma Segundo Jurado

Firma directora

Tunja, diciembre del 2021

DEDICATORIA

A mis padres Gustavo Barrera y Elena Cortes por su incondicional amor y entrega en pro de mi desarrollo personal y profesional, a mi hermana Valentina Barrera por ser mi motor de vida y mi motivación.

A mis abuelos ya que con sin su apoyo, comprensión y cariño no habría sido posible dar este paso tan importante en mi vida.

A todos mis familiares que de alguna manera estuvieron involucrados en mi proceso de desarrollo profesional brindándome apoyo y siendo guías en cada paso.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a Dios por sus constantes bendiciones, fortaleza y compañía en cada una de las etapas de mi vida.

A mis padres y familiares por su incondicional apoyo y confianza en mis capacidades para culminar este ciclo tan importante en mi vida, por ser ejemplo y motivación.

A mis amigos y compañeros que me acompañaron a lo largo de este proceso, por todo el aprendizaje e incondicional apoyo.

A mis docentes los cuales pusieron día a día todo su empeño y cariño para ser una profesional integra.

A mi directora de proyecto y jurados por su tiempo, dedicación y compromiso para culminar de manera exitosa este primer escalón de mi vida profesional.

A la facultad de ingeniería electrónica por acogerme y permitirme ser parte de ella, y brindarme el conocimiento necesario para mi enriquecimiento personal y profesional.

TABLA DE CONTENIDO

NOTA DE ACEPTACIÓN.....	4
DEDICATORIA	5
AGRADECIMIENTOS	6
RESUMEN	13
1 INTRODUCCIÓN	14
2 JUSTIFICACIÓN	15
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
2.1 FORMULACIÓN DE PREGUNTAS	16
2.2 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	16
2.3 DELIMITACIÓN DEL PROBLEMA	17
4 OBJETIVOS	18
4.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
5 MARCO REFERENCIAL.....	19
5.1 MARCO TEÓRICO.....	19
5.1.1 TECNOLOGÍA 1G Y 2G	19
5.1.2 TECNOLOGÍA 3G.....	19
5.1.3 TECNOLOGÍA 3.75G.....	19
5.1.4 TECNOLOGÍA 4G.....	20
5.1.5 TECNOLOGÍA 5G.....	20
5.1.6 UIT	21

	8
5.1.1 3GPP.....	22
5.2 MARCO CONCEPTUAL.....	22
5.2.1 COMUNICACIONES INALÁMBRICAS	22
5.2.2 MULTIPLEXACIÓN	23
5.2.3 ASPECTOS DE DISEÑO DE 5G	24
5.2.4 CAPA FÍSICA.....	25
5.2.5 SEGURIDAD 5G	27
5.2.6 E2E	27
5.2.7 BLOCKCHAIN.....	28
5.2.8 REVISIÓN DEL ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA 5G EN COLOMBIA.....	28
6 DISEÑO METODOLÓGICO.....	31
7 ANÁLISIS INFRAESTRUCTURA 4G, LTE- ADVANCED Y 5G.....	33
7.1 ARQUITECTURA LTE Y LTE ADVANCED.....	33
7.1.1 ARQUITECTURA DE LOS SISTEMAS 3GPP.....	34
7.1.2 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE.....	35
7.1.3 CAPA FÍSICA (CALLE & JIMÉNEZ, 2014)	37
7.1.4 ARQUITECTURA DEL SISTEMA LTE-A.....	41
7.2 ARQUITECTURA DE LA TECNOLOGÍA 5G	48
7.2.1 ARQUITECTURA NSA Y SA.	49
7.2.2 CORE NETWORK.....	51
7.2.3 CAPA FÍSICA 5G.....	52

7.2.4	AGREGACIÓN DE PORTADORA, BANDA ANCHA Y CONECTIVIDAD DUAL LTE-NR.	54
7.2.5	MIMO EN 5G.	54
7.2.6	PDCCH.....	55
7.2.7	PDSCH.....	55
7.3	COMPARATIVO 4G, LTE-ADVANCED Y 5G.....	55
8	ANÁLISIS DEL ESTADO DEL ARTE: TECNOLOGÍA 5G ENFOCADA A LA CAPA FÍSICA.....	63
8.1	NSA VS SA	67
8.1.1	CONCEPTOS DE 5G SA NR Y 5G NSA NR.....	67
8.1.2	ANÁLISIS DE SA VS NSA	68
8.2	TECNOLOGÍAS EMERGENTES 5G	71
8.2.1	ONDAS MILIMÉTRICAS.	71
8.2.2	BEAMFORMING.	75
8.2.3	MIMO MASIVO.	76
8.2.4	COMUNICACIÓN FULL – DÚPLEX	79
8.2.5	DIVISIÓN DE LA RED 5G (NETWORK SLICING).....	83
8.2.6	SEGURIDAD TECNOLOGÍA 5G.....	98
8.3	CASOS DE USO TECNOLOGÍA 5G Y FUTURAS GENERACIONES	111
8.3.1	BANDA ANCHA MÓVIL MEJORADA (EMBB)	112
8.3.2	COMUNICACIÓN ULTRA CONFIABLE Y DE BAJA LATENCIA (URLLC).....	114

8.3.3	COMUNICACIÓN MASIVA DE TIPO MÁQUINA (MMTC).....	115
8.3.4	IOT	116
8.3.5	V2X	118
8.3.6	B5G/6G.....	119
9	CONCLUSIONES	124
10	REFERENCIAS.....	130

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Ancho de banda de los canales	52
Tabla 2: Canales y señales 5G	53
Tabla 3: Comparación 4G, LTE-A y 5G.....	57
Tabla 4: Canales físicos NR.....	61
Tabla 5: Canales físicos LTE y LTE-A	62
Tabla 6: Lista MR-DC	65
Tabla 7: NSA vs SA.....	66
Tabla 8: Velocidades de bits RRU y BBU.....	97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Evolución de las tecnologías móviles.....	21
Figura 2: Fases de diseño metodológico.....	31
Figura 3: Arquitectura general LTE y LTE-A	34
Figura 4: Arquitectura general de los sistemas 3GPP.....	35
Figura 5: Arquitectura de los sistemas LTE.....	36
Figura 6: Agregación de la portadora	44
Figura 7: Arquitectura 5G.....	49
Figura 8: Arquitectura SA.....	50
Figura 9: Arquitectura NSA.....	51
Figura 10: Arquitecturas para NR.....	64
Figura 11: Espectro 5G.....	74
Figura 12: Arquitectura SDN.....	86
Figura 13: Arquitectura redes inalámbricas basadas en SDN.....	87
Figura 14: Modelo de red celular.....	88
Figura 15 : Arquitectura NFV.....	92
Figura 16: Arquitectura C-RAN	95
Figura 17: Uso de blockchain en LSA.....	110
Figura 18: Casos de uso 5G	112
Figura 19: Arquitectura IoT 5G	117
Figura 20: Arquitectura propuesta para la migración 6G	120

RESUMEN

El desarrollo de este trabajo de grado tiene como objeto la construcción del estado del arte de la tecnología 5G enfocado a la capa física, de manera que se dé a conocer las diferencias existentes entre la nueva tecnología y las generaciones anteriores de comunicaciones móviles, así mismo los desafíos y soluciones planteados a nivel internacional y finalmente el futuro de las próximas generaciones. Para el proceso de desarrollo se llevó a cabo la metodología de investigación mediante revisión documental de las divulgaciones realizadas internacionalmente, de manera que se tuviera un acercamiento a los avances desarrollados hasta ahora.

1 Introducción

Las comunicaciones móviles se encuentran en constante evolución, trayendo consigo nuevas exigencias y requerimientos, cada una de las generaciones móviles existentes han ofrecido servicios según las necesidades de la época; La generación 1G y 2G permitían la comunicación mediante voz y mensaje, luego de esto apareció 3G ofreciendo servicios mejorados añadiendo servicio de internet, teleconferencia entre otros; La llegada e implementación de 4G prometía mayor velocidad que las generaciones anteriores y servicios de internet en tiempo real, por último llega el despliegue de 5G que resulta ser la más prometedora ya que además de contar con mayor calidad en la experiencia de usuario, permite la conexión de diferentes dispositivos (IoT) aplicables a diferentes campos como la medicina, industrias, educación, etc.

El siguiente documento tiene como finalidad dar a conocer al lector los principales requerimientos de la tecnología 5G, principios de funcionamiento y desafíos y soluciones presentados a nivel internacional. Este se encuentra dividido en dos partes, la primera ofrece un panorama de las diferencias existentes entre las generaciones 4G , 4G+ y 5G a nivel de arquitectura, capa física, entre otros; por otro lado la segunda parte se expone en análisis del estado del arte frente a 5G, las tecnologías emergentes requeridas para alcanzar las características esperadas, de igual manera aspectos en seguridad, casos de uso exigidos por 3GPP para la tecnología 5G y por último una breve descripción de las generaciones próximas a 5G.

2 Justificación

Las comunicaciones móviles son un aspecto importante en la tecnología ya que la llegada de cada una de las generaciones trajo consigo diferentes servicios y posibilidades que va requiriendo el mercado; Sin embargo las generaciones de 1G – 4G no contaban con los diferentes casos de uso y campos de aplicación que abarca la nueva tecnología 5G; La llegada de esta trae consigo nuevos sistemas tales como IoT (Internet of things), SDN/VFN (Redes definidas por software / Funciones de red virtual) , MIMO masivo, entre otras las cuales son fundamentales para el correcto funcionamiento de la tecnología. (Orlando, R. R,2019)

Teniendo en cuenta lo anterior se llega a la necesidad de realizar el estado del arte de la infraestructura de la tecnología 5G enfocada principalmente en la capa física siendo esta parte fundamental para el correcto funcionamiento e implementación de 5G, ya que al ser una tecnología con mayor orientación a los servicios que las generaciones anteriores debe contar con una arquitectura con características específicas tales como adaptabilidad y flexibilidad (Carmen, U. S.,2018), de modo que es indispensable el análisis de las transformaciones realizadas y aquellas que se encuentran en su fase de desarrollo, así mismo los retos y soluciones establecidas actualmente.

3 Planteamiento del problema

2.1 Formulación de Preguntas

- ¿Cuáles son las principales problemáticas establecidas actualmente frente a la infraestructura de la tecnología 5G?
- ¿Cuáles son los aspectos más estudiados en la literatura a nivel internacional y que soluciones plantean?
- ¿Qué cambios en la infraestructura tiene la tecnología 5G en comparación de las anteriores generaciones?
- ¿Cuáles son las tecnologías emergentes necesarias para el funcionamiento de la tecnología 5G?

2.2 Definición del Problema

En la actualidad la tecnología se encuentra en constante evolución lo que representa grandes cambios en la sociedad y adaptación al medio; en este cambio constante entran las comunicaciones móviles digitales convirtiéndose en un servicio casi que indispensable para las personas; Hoy en día existen diversos dispositivos que permiten el intercambio de información de diferentes maneras como llamadas, mensajes de texto, videollamadas, entre otros, todo esto conlleva a la implementación de nuevas generaciones de comunicaciones que permitan y se acondicionen a las exigencias de la vida diaria.

A nivel mundial diversos países desarrollaron planes para la implementación de esta tecnología teniendo diferentes parámetros como parte fundamental de la transición de 4G a 5G encontrando así, aspectos como uso del espectro, pruebas piloto, cobertura y capacidad, seguridad y privacidad de usuario, etc.

En función de lo planteado el problema del proyecto de investigación se centra en el estudio del estado del arte de la infraestructura de la tecnología 5G, teniendo en cuenta que ciertos aspectos cuentan con mucha deficiencia para la implementación de la misma, a pesar de que se han realizado diferentes investigaciones en ámbitos como espectro compartido, MIMO masivo, Blockchain, entre otros, es importante establecer una nueva línea de investigación que permita conocer y entender con mayor profundidad esta tecnología.

2.3 Delimitación del Problema

- Delimitación del espacio: El diseño del estado del arte se llevará a cabo tomando referentes teóricos planteados internacionalmente en países tales como China, Francia, Estados Unidos, Ecuador, Finlandia, UK, Pakistan, Italia, India y Egipto con respecto a investigaciones realizadas de infraestructura de la tecnología 5G, específicamente en la capa física de dicha tecnología.
- Delimitación temporal: La investigación se realizará en una ventana de tiempo desde el 2018 año en donde aparece la tecnología 5G en el mercado hasta la actualidad.

4 Objetivos

4.1 Objetivo General

Realizar el levantamiento del Estado del Arte sobre la infraestructura de la tecnología 5G enfocado a la capa física con el fin de identificar las principales transformaciones materializadas y en fase de desarrollo en comparación a generaciones anteriores, determinando los principales retos y deficiencias establecidos en la literatura, mediante el estudio y análisis de los aspectos técnicos de la capa física establecida para la tecnología 5G a partir de la documentación de carácter técnico de los países en los que dicha tecnología se encuentra en fase de implementación e investigación.

4.2 Objetivos Específicos

- ✓ Analizar la infraestructura utilizada en 4G, LTE-Advanced y 5G estableciendo un comparativo en las principales diferencias y necesidades presentadas en la capa física para el correcto funcionamiento de la tecnología 5G, a través de del estudio de las investigaciones llevadas a cabo específicamente en dicha capa.
- ✓ Presentar los retos y posibles soluciones presentados a causa de los requerimientos para el funcionamiento de la tecnología 5G enfocado en la capa física, con el fin de establecer los más importantes y aquellos que no cuentan con un avance investigativo considerable expuesto en literatura, mediante el análisis de artículos científicos.
- ✓ Estudio de los casos de uso para la tecnología 5G y futuras generaciones con el fin de identificar ventajas y desventajas de estas mediante el estudio de las investigaciones llevadas a cabo hasta ahora expuestos en artículos científicos.

5 Marco Referencial

5.1 Marco Teórico

5.1.1 Tecnología 1G y 2G

Las comunicaciones móviles nacieron mediante el lanzamiento de Ericsson el sistema NMT450 el cual hacía uso de canales analógicos para su funcionamiento con una frecuencia de aproximadamente 450 MHz; Para lograr mayor número de receptores se hizo la transición a la frecuencia de 900MHz; Este sistema funcionaba mediante modulación de frecuencia.

Por otra parte, nace 2G trayendo consigo nuevos sistemas para ofrecer un mejor servicio, tales como D-AMPS y GSM, a diferencia de 1G esta nueva generación empleaba canales digitales lo que mejoraba aspectos como velocidad y seguridad en las señales transmitidas.

5.1.2 Tecnología 3G

La generación 3G llegó con retos diferentes a las generaciones anteriores ya que en esta se buscaba que no solo se permitiera la comunicación por voz y mensaje, si no también servicios como internet, teleconferencias, por este motivo el uso de frecuencia está entre 850 y 1900MHz (En Colombia), mejorando así la velocidad de transmisión y la seguridad, por otra parte nace 3GPP una organización muy importante a nivel mundial ya que es la encargada del manejo de los estándares de comunicaciones.

5.1.3 Tecnología 3.75G

Uso de tecnología de evolución a largo plazo (LTE) y WIMAX es el futuro de los servicios de datos móviles; Estas ofrecen la posibilidad de contar con un gran número de usuarios

con la posibilidad de acceder a diferentes tipos de servicios, además de ofrecer un potencial para la capacidad de la red. (A Gupta, R. K., 2015)

5.1.4 Tecnología 4G

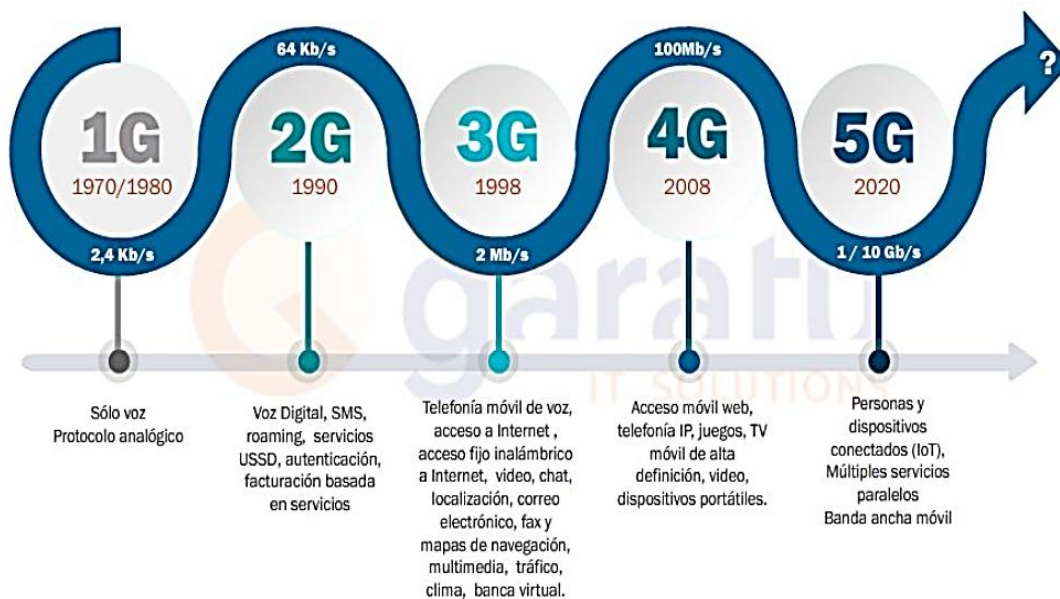
Para el año 2007 ya aparecía la cuarta generación de las comunicaciones, se caracteriza por contar con mayor velocidad de subida y de bajada e implementar nuevas tecnologías como Wii Max y LTE/Advanced; Estas avanzadas características permitieron erradicar diversos problemas que se presentaban en las comunicaciones como la interferencia multiusuario además de permitir la transmisión de señales de baja potencia sin que estas generen un mayor costo en las instalaciones.

5.1.5 Tecnología 5G

Esta tiene como fin cambiar la manera en la que se manejan las redes actualmente de manera que se logre implementar el internet de las cosas permitiendo así que los dispositivos puedan conectarse a la red.

Esta pretende tener mayor velocidad que las generaciones que lo preceden gracias al uso del espectro milimétrico teniendo frecuencias que oscilan entre valores de 30 a 300GHz. Conceptualmente, la 5G constituye una visión de un ecosistema de redes capaces de satisfacer la demanda de datos móviles proyectados. Es decir, esta generación va más allá de buscar mayores velocidades en la transmisión de datos y busca un ecosistema capaz de entregar eficientemente servicios inalámbricos entre máquinas, cosas y personas. (Carmen, 2018).

Figura 1: Evolución de las tecnologías móviles



Fuente: Mundo, T. (2020). Qué es la tecnología 5G: beneficios y rumores. Obtenido de <https://www.tvmundogt.com/tecnologia/que-es-la-tecnologia-5g-beneficios-y-rumores>.

5.1.6 UIT

Organización internacional de las telecomunicaciones es el ente encargado de las telecomunicaciones en las naciones unidas, la fundación de este organismo se hizo con el fin de garantizar la conectividad internacional de la red de comunicaciones.

Esta organización cuenta con una organización por sectores en donde se evalúan diferentes aspectos de las comunicaciones llevando a cabo diferentes sesiones de conferencias y reuniones con el fin de establecer parámetros equitativos; En cuanto a la tecnología 5G se estableció en el 2015 un sector de dialogo sobre los aspectos en la red para IMT en el año 2020 y

cómo será la interacción para la nueva tecnología y cuales cambios se requieren para que esta funcione correctamente en los diferentes dispositivos.

Por otra parte, en el año 2018 se realizó un nuevo análisis llevando a cabo así la divulgación de un nuevo documento en donde se establecen los retos y oportunidades que trae 5G en cuanto a los proveedores de redes y los entes reguladores, entre estos aspectos algunos establecidos son: i) Calidad y servicio de derechos de usuario, ii) regulación orientada a la seguridad y privacidad de servicios y aplicaciones (UIT,2018).

5.1.1 3GPP

El proyecto de asociación de tercera generación (3GPP) esta conformado por siete organizaciones las cuales son las encargadas del desarrollo de los estándares para el campo de telecomunicaciones, todo esto con el fin de generar informes con las respectivas especificaciones de cada una de las tecnologías que hacen parte de 3GPP. Este abarca campos tales como telecomunicaciones celulares, acceso por radio y capacidades de servicio. (3GPP, 2021)

5.2 Marco Conceptual

5.2.1 Comunicaciones inalámbricas

Se conocen como comunicaciones inalámbricas aquellas que no hacen uso de medios físicos para establecer conexión entre diferentes dispositivos, por el contrario, el sistema se basa en el envío de datos mediante modulación de ondas electromagnéticas teniendo como referencia un área específica. (Vaca, 2016)

Para establecer la conexión las ondas utilizadas deben cumplir con requisitos específicos tales como uso de espectro, ondas de radiofrecuencia de baja potencia y una banda de frecuencia

específica; Casos como la conservación de la señal sin licencia permite casos de uso como la conexión de las computadoras a las redes inalámbricas siendo un parámetro con considerable incremento en los últimos años.

5.2.2 Multiplexación

La multiplexación es un método que permite que varios dispositivos o varios flujos de información puedan compartir un único medio para la transmisión. (P.L.S.C Leslie Fernanda Monter, 2021). Las señales de radio a veces suelen ser complicado su manejo, es por esto, que en campo de las comunicaciones móviles se utilizan tres métodos diferentes con el fin de que el usuario final tenga un aprovechamiento máximo de la frecuencia dada. (P.L.S.C. Leslie Fernanda Monter Martínez, 2021)

- **FDMA:** Acceso múltiple por división de frecuencias, consiste en la división del ancho de banda en canales que son utilizados para transportar señales de voz o control. Por lo general cada canal que es asignado a un usuario tiene un valor de 30KHz simplex. (P.L.S.C Leslie Fernanda Monter, 2021)
- **TDMA:** Acceso múltiple por división de tiempo consiste en darle a cada usuario un determinado tiempo para su conversación. Comúnmente TDMA ofrece 3 fracciones de tiempo en un canal de 30KHz. (P.L.S.C. Leslie Fernanda Monter Martínez, 2021)
- **CDMA:** Acceso múltiple por división de código, brinda la posibilidad al usuario de tener acceso en todo momento al espectro, diferencia de FDMA y TDMA, este utiliza canales de 1.25MHz lo que permite tener aproximadamente 128 llamadas de manera simultánea. (P.L.S.C Leslie Fernanda Monter, 2021)

5.2.3 Aspectos de Diseño de 5G

Uno de los principales retos establecidos para el diseño de la tecnología 5G es la experiencia de usuario, ya que debe cumplir con aspectos tales como manejo de altas tasas de datos, manejo de información en tiempo real, entre otras (García, 2019).

- Latencia reducida: Este aspecto es importante en diferentes casos de uso como realidad aumentada, internet táctil, etc. La disminución de la latencia permitirá a la tecnología manejar grandes cantidades de datos proporcional a tiempos rápidos de respuesta (García, 2019).
- Mayor velocidad: A diferencia de las anteriores generaciones 5G planea mejorar la experiencia de usuario con respecto a video juegos, servicios en la nube y comunicaciones M2M (Maquina a Maquina) lo que conlleva a mejorar una mayor velocidad de datos de un aproximado de 10Gbps (García, 2019).
- IoT: Con la llegada de 5G se espera que el número de dispositivos conectados a la red incrementen considerablemente, esto teniendo en cuenta que llegan sistemas de red como internet de las cosas que permiten abarcar diferentes sectores como el médico, industrial, agrícola, etc.; Por consiguiente, se genera una necesidad de una mayor movilidad del usuario sin depender de las células existentes en su entorno (García, 2019; García, 2019).
- Eficiencia energética: Debido a la cantidad de aplicaciones y casos de uso que abarca 5G se espera que los dispositivos compatibles con 5G que funcionan con batería sean optimizados y de esta manera se prolongue su vida útil dando como resultado un funcionamiento satisfactorio al dispositivo y la red (García, 2019).
- Resistencia y robustez: Se espera que la tecnología 5G cuente con una adaptabilidad a los requerimientos y avances que puedan surgir con el paso de los

años, de esta manera debe contar con sistemas de seguridad en aspectos tales como redes inteligentes, salud y seguridad pública (Garcia, 2019).

5.2.4 Capa física

El estándar establecido internacionalmente para el manejo de la capa física de los diferentes dispositivos es el IEEE 802.15.4; Esta capa cuenta con una características esenciales para el funcionamiento de las comunicaciones ya que ofrece una interfaz de control al medio (MAC, médium Access control) y el canal de radio, a través del firmware y el hardware de radio frecuencia; Adicional a esto ofrece cualidades específicas como el uso de bandas de frecuencia y sus respectivos canales, transmisión y selección de canal. (Siverio, 2018)

5.2.4.1 Tecnologías que Funcionan con 5G.

Núcleo

- SDN: Control separado y plano de datos que permite una infraestructura flexible y programable para 5G, con un control detallado de las aplicaciones y servicios.
- NFV: Son aquellas que tienen la posibilidad de implementarse en cualquier lugar de la red sin depender de un software especializado; esto permite que funcionen múltiples redes en una sola infraestructura.
- Infraestructura de la nube: Permite que la red sea más flexible, ágil y escalable.

Edge

- Cloud RAN: Resuelve aspectos como la capacidad y cobertura mediante el uso de cloud computing.
- Multi-access Edge: Ofrece procesamiento de los datos más cerca del usuario con el fin de que la red ofrezca una baja latencia requerida por algunas aplicaciones.
- Massive MIMO: Usa una matriz de antena sobre 100 elementos provenientes de la multiplexación espacial.
- mmWave: Usa banda de alta frecuencia (30GHz) proviniendo del incremento de la velocidad de datos.
- Full-Dúplex: Incrementa la capacidad del sistema para transmitir y recibir datos de manera simultánea sobre la misma banda de frecuencia.
- Device to Device: Permite la comunicación de los dispositivos directamente a una baja latencia, alta velocidad de datos y cobertura.
- Ultra-densification: La meta de usar pequeñas celdas es con el fin de incrementar el número de células por kilómetro cuadrado; Esto incrementa considerablemente la reutilización de la capacidad y frecuencia.

5.2.5 *Seguridad 5G*

Los principales desafíos expuestos por 3GPP para la tecnología 5G son los siguientes (Orlando, 2019):

- Tráfico en la red: El número de usuarios que harán uso de la red debido al internet de las cosas (IoT).
- Seguridad de las interfaces de radio: Los cifrados que se realizan de los canales de radio se hacen mediante canales que no cuentan con la seguridad adecuada.
- Integridad de usuario: No hay seguridad existente en el campo de plano de datos usuario.
- Seguridad en roaming: Las configuraciones establecidas para seguridad del usuario no se actualizan al establecer conexión con el dominio de una red por lo tanto genera un riesgo para la seguridad.
- Ataques DoS: Actualmente no existen medidas de seguridad que eviten el riesgo en el uso de sistemas operativos, aplicaciones y datos de configuración.

5.2.6 *E2E*

Uno de los campos con mayor impacto en 5G es el empresarial, estos son los más interesados en el manejo de la seguridad de la información, por lo tanto se postula el método E2E el cual ofrece diferentes ventajas como seguridad para diferentes servicios, arquitectura flexible para la seguridad entre otros. (Dr K Anitha Kumari, 2018)

El sistema E2E consiste en un cifrado de extremo a extremo de las partes que conforman la comunicación, el mensaje es convertido en secreto con ayuda de símbolos sin poder ser descifrado hasta que este llegue a su respectivo receptor; Esto evita que el mensaje pueda ser espiado por hacker e incluso por los proveedores de servicios de telecomunicaciones. (Dr K Anitha Kumari,2018)

5.2.7 Blockchain

El uso de diversas tecnologías como redes definidas por software, virtualización de funciones de red, machine learning y cloud computing generan diversos requerimientos ya que estas se encuentran dentro del funcionamiento de la tecnología 5G; Esto conlleva a elevar de manera considerable los retos como lo son transparencia, interoperabilidad, privacidad y seguridad. Blockchain es una solución planteada con el fin de abarcar temas como transparencia, encriptación de datos y distribución de arquitectura. (M. Tahir, M. H. Habaebi, M. Dabbagh, A. Mughees, A. Ahad and K. I. Ahmed, 2020)

5.2.8 Revisión del Estado del Arte de la Tecnología 5G en Colombia

En esta sección se realizará una breve revisión del estado del arte de la tecnología 5G llevado a cabo en Colombia, sabiendo que la migración de 3G a 4G se realizó en un periodo de tiempo temprano, se esperaría que en los próximos años inicie la migración hacia la tecnología 5G; Actualmente algunos operadores móviles como claro y movistar cuentan con aval del gobierno y asignación de frecuencias para desarrollar planes piloto referentes a la implementación de 5G. (MinTIC, 2019) (CRC,2020)

En el 2019, el MinTIC dio a conocer el plan 5G para Colombia en donde se abarcan aspectos como el manejo del espectro, seguridad y planes 5G desarrollados internacionalmente en

países como Estados Unidos, Unión Europea, Reino Unido, Alemania, Brasil, entre otros, en donde exponen los campos más relevantes para el correcto despliegue de 5G a nivel comercial y como este puede ofrecer beneficios en el posicionamiento económico de cada país; De igual manera se dio a conocer un cronograma en donde se espera que para el año 2021 se estén realizando asignación de frecuencias de 3500MHz.

(Beltran, 2020) en su monografía realiza una revisión documental en donde se formaliza los diferentes aspectos a tener en cuenta para la migración de 5G en Colombia, teniendo como referencia países en donde esta tecnología ya ha sido implementada, así mismo la parte del uso del espectro y las bandas de frecuencias que corresponden al funcionamiento de los casos de uso de la tecnología 5G. A nivel legislativo en Colombia la entidad encargada es CRC (Comisión de Regulación de Comunicaciones Colombia) la cual establece los lineamientos y requisitos que deben cumplir los operadores para la implementación de la tecnología, así mismo tomando como referencia países como Argentina y Portugal en el plan 5G diseñado en esos países.

(Córdoba, 2018) en su monografía da a conocer una recopilación documental en la que evidencia algunas problemáticas en la implementación de la tecnología 5G en Colombia y los primeros pasos que deben darse para que 5G sea una realidad en el país; Como conclusión se da a conocer que Colombia a diferencia de otros países desarrollados presentará mayores inconvenientes con respecto a legislación, inversión, manejo del espectro, entre otros; Sin embargo la llegada de 5G al país tendrá muchos beneficios a nivel social y económico, cabe resaltar que actualmente los operadores móviles se encuentran centrados en brindar cobertura 4G en todo el país para posteriormente realizar un análisis de migración a 5G.

(Suárez, 2017) Hace uso del método del prospectiva e innovación tecnológica con el objeto de tener un panorama más amplio del despliegue de la tecnología 5G en Colombia para el

año 2025; Da a conocer algunos de los aspectos importantes que requiere 5G para el funcionamiento tales como infraestructura, arquitectura, inversión realizada por las TIC y el uso eficiente de la energía, el manejo de todas estas de terminará si el despliegue de la tecnología resulta ser exitoso o no, así mismo mediante el modelo de estudio logró concluir que es importante el papel de los proveedores en este proceso y una posible alianza entre ellos.

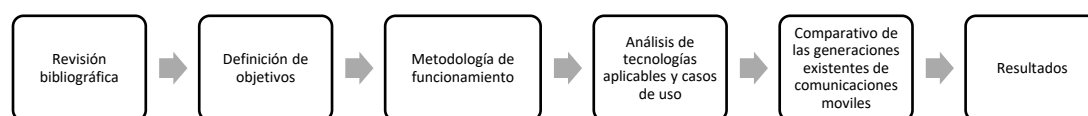
(Cortes, 2019) lleva a cabo una investigación desarrollada en la empresa de telefonía móvil Huawei Colombia mediante el desarrollo de pruebas con la implementación de antenas Massive MIMO para analizar el rendimiento en downlink y uplink; a lo largo del desarrollo del proyecto se expuso una breve investigación acerca de MIMO masivo y su uso a nivel internacional, por último el autor en los resultados da a conocer la gran diferencia el rendimiento en el enlace descendente, por otro lado se encontraron algunas deficiencias en el enlace de subida con el uso de metodologías como carrier aggregation y 256QAM ya que no cumple con las expectativas de rendimiento en este aspecto.

(Murillo, 2021) realizó un estudio de la cobertura de la tecnología 5G en zonas metropolitanas en la ciudad de Bogotá; este modelo se llevó a cabo haciendo uso de frecuencias de 3GHz hasta 100GHz lo que representa la implementación de ondas milimétricas aplicadas a dos escenarios claves en el desarrollo del estudio; El escenario A se encuentra ubicado en Teusaquillo, Bogotá, sin contar con línea de vista y el escenario B presenta línea de vista ubicado en el sector de chapinero, mediante los resultados se puso evidenciar mejor rendimiento del sistema en el escenario B ya que no presenta pérdida de señal tan elevada a comparación del escenario A, cabe resaltar que también se hizo uso de la tecnología MIMO masivo en el escenario B para medir el rendimiento de las antenas en comparación a las utilizadas convencionalmente.

6 Diseño Metodológico

El diseño del proyecto será llevado a cabo mediante el método de investigación documental, mediante la técnica exploratoria a través de la recopilación y análisis de información en documentos científicos publicados en las diferentes herramientas brindadas por el CRAI de la Universidad Santo Tomas Seccional Tunja, referentes a la infraestructura, nuevas tecnologías y casos de usos de la tecnología 5G. Este proceso cuenta con las fases presentados en la siguiente figura.

Figura 2: Fases de diseño metodológico



Fuente: Autor.

- Fase 1: Revisión bibliográfica

En la primera fase del desarrollo del proyecto se llevará a cabo una revisión bibliográfica de los documentos científicos publicados en plataformas como IEEE Xplore, Scopus, Google Scholar, entre otros, con el fin de lograr un acercamiento a la infraestructura de la tecnología 5G y familiarización con los diferentes aspectos planteados en dichos documentos, del mismo modo darle una orientación inicial al proyecto.

- Fase 2: Definición de objetivos

Como resultado de la ejecución de la primera fase se establecen los objetivos los cuales se plantea lograr con el desarrollo de la investigación teniendo como principales aspectos en análisis de la infraestructura, generaciones anteriores y futuras de las comunicaciones móviles, problemáticas planteadas en la literatura y posibles soluciones.

- Fase 3: Metodología de funcionamiento

Para el desarrollo de la investigación se debe hacer una investigación a fondo de la arquitectura de red, virtualización, entre otros, que tiene implementado la tecnología 5G.

- Fase 6: Análisis de tecnologías aplicables y casos de uso

En esta fase se desarrolla un análisis de cada una de las tecnologías presentes en la capa física que permiten el funcionamiento de la tecnología 5G, de igual manera los principales campos en donde es aplicable dicha tecnología.

- Fase 5: Comparativo de las generaciones existentes de comunicaciones móviles

Se establecen los cambios que se realizaron a nivel de infraestructura, aplicaciones posibles y como afecta estos funcionamientos a las generaciones futuras.

- Fase 4: Resultados:

Como parte final se presentarán los resultados obtenidos mediante la investigación; De esta manera se expondrán los principales aspectos investigados a nivel internacional y así mismo se plantearán los referentes teóricos que requieren de mayor investigación o se encuentran en su etapa de estudio para posteriormente orientar la continuación de la investigación a alguno de dichos elementos.

7 Análisis Infraestructura 4G, LTE- Advanced y 5G

La tecnología móvil 4G es la siguiente después de la tecnología 3G, ofreciendo a los usuarios nuevos usos como el acceso a internet de banda ultra ancha; Esta tecnología promete la transmisión de datos con una velocidad de 100Mbps ofreciendo así una mayor velocidad y un rango de posibilidades mayor en cuanto aplicaciones y casos de uso. (Lenovo, 2021)

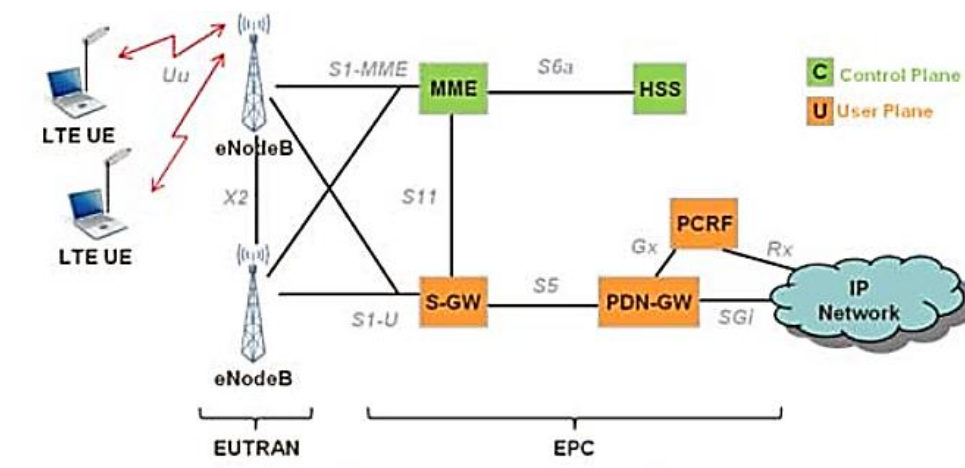
Algunas tecnologías que se incluyeron en la infraestructura de 4G fue el uso de antenas de entrada y salida múltiple con el fin de mejorar de manera considerable el rendimiento de las comunicaciones, así mismo se hace uso de enlaces adaptativos que permiten la corrección de los posibles errores convirtiendo así en una red con un mínimo de fallos. (Lenovo, 2021)

7.1 Arquitectura LTE y LTE Advanced

Con la llegada de la cuarta generación se prometían velocidades casi inalcanzables para la tecnología en sí, por lo tanto, el 3GPP desarrollo una nueva tecnología la cual sería la evolución a largo plazo de UMTS (Sistema universal de telecomunicaciones móviles), con el fin de ofrecer a los usuarios un servicio de acceso a la banda ancha móvil; Por otra parte, se tiene una versión mejorada de LTE llamado LTE Advanced con unos requerimientos establecidos por el IMT-Advanced. Cabe resaltar que LTE se encuentra estandarizado en la versión 8 del 3GPP y LTE Advanced con la versión 10, ambas tecnologías cuentan con arquitecturas E-UTRAN (Red

de acceso especificada), EPC (Evolved packet core), IMS (Subsistema multimedia IP), y equipo de usuario. (Cáceres, 2013)

Figura 3: Arquitectura general LTE y LTE-A



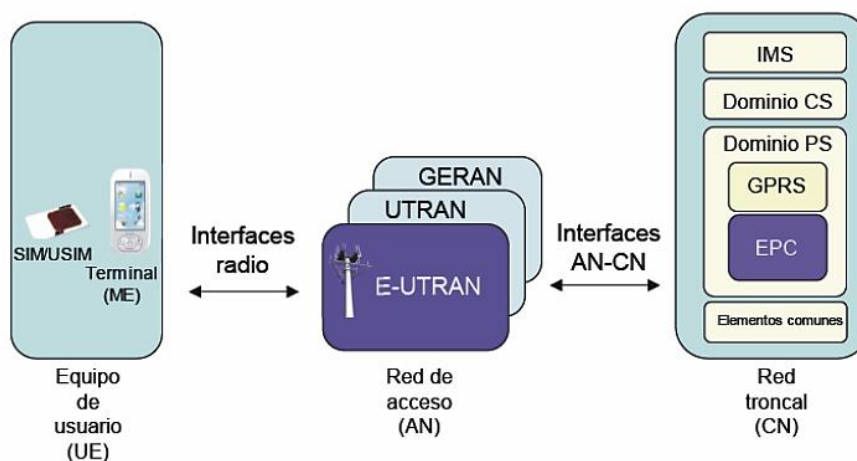
Fuente: Go, I. (2014). Tutorial LTE. Obtenido de

http://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.php

7.1.1 Arquitectura de los Sistemas 3GPP

Los sistemas 3GPP cuentan con una arquitectura universal la cual permite su funcionamiento, está conformado por tres componentes fundamentales los cuales son: equipo de usuario, red de acceso, y red troncal, los cuales se pueden observar en la figura 3; Para que exista la comunicación entre el usuario y la red de acceso es primordial que se haga uso de la interfaz de radio. (Cáceres, 2013)

Figura 4: Arquitectura general de los sistemas 3GPP



Fuente: Jiménez, C. A., & Rizo, F. R. (2013). Arquitectura general del sistema LTE.

Revista digital de las tecnologías de la información y comunicaciones, 81-90.

El primer bloque que hace referencia al equipo de usuario contiene incorporado lo que sería aspectos como el terminal móvil y la SIM; por otra parte, se tiene el bloque correspondiente a la red de acceso en el cual se puede encontrar tres redes funcionales E-UTRAN (Evolved UTRAN), UTRAN (UMTS Terrestrial radio Access Network) y GERAN (GSM/EDGE Radio Access Network), cada una de estas redes establece la interfaz de radio para establecer la comunicación con los equipos de usuario.

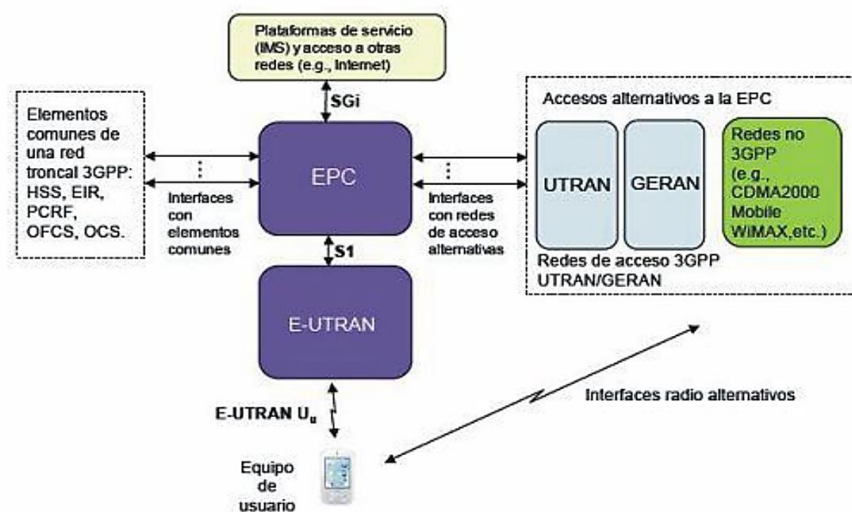
7.1.2 *Arquitectura del Sistema LTE*

Una de las principales características de los sistemas LTE es que cuentan con una gran flexibilidad en el uso del espectro, esto debido a que hace uso de dos sistemas de transmisión de doble cara, FDD (Frequency Division Duplex) y TDD (Time Division Duplex), adicionalmente posee tecnologías de acceso de radio OFDMA para downlink y para uplink una tecnología de

aprovechamiento espacial MIMO (Múltiple Input Multiple Output). (Jimenez & Rizo, 2013); Esta tecnología opera con un rango de frecuencias entre los 800MHz – 3.5GHz.

Los elementos que hace los sistemas LTE diferentes a los convencionales es que estos cuentan con la red de acceso E-UTRAN, red de Core EPC, y evolución de IMS, estos sistemas están basados en la transferencia de información basados en paquetes IP. La interfaz E-UTRAN admite la transmisión de información mediante el canal de radio entre eNB y el usuario. El eNB une todas las funciones de red de acceso, por lo tanto, allí terminan todos los protocolos de la interfaz de radio.

Figura 5: Arquitectura de los sistemas LTE



Fuente: Jiménez, C. A., & Rizo, F. R. (2013). Arquitectura general del sistema LTE.

Revista digital de las tecnologías de la información y comunicaciones, 81-90.

- E-UTRAN: Esta es conocida como red de acceso, se encuentra conformada principalmente por eNBs (Evolved node B), los cuales cumplen la función de

ofrecer la conectividad entre dos partes fundamentales las cuales son el equipo de usuario y EPC.

- EPC: Se encuentra conformado en el núcleo por tres componentes fundamentales los cuales cumplen la función de provisionar el servicio de conectividad IP, MME (Mobility Management Entity), Serving Gateway (S-GW) y Packet data network gateway (P-GW).
- IMS: Es una arquitectura que se encuentra implementada en el centro de la red LTE, se encuentra sobre una infraestructura con diferentes componentes como servidores, bases de datos, lo que permite tener mecanismos de control para provisionar los servicios de tipo multimedia basados en IP a los usuarios de red, es decir, ofrece el acceso a internet y diferentes servicios como voz y video.
La creación de IMS cumple ciertos objetivos tales como tarificación y provisionamiento de QoS en las sesiones multimedia en tiempo real.
- Equipo de usuario: Como su nombre lo indica es aquel dispositivo que permite el acceso a internet al usuario.

7.1.3 Capa Física (Calle & Jiménez, 2014)

La capa física es la encargada de ejecutar el proceso de transmisión mediante el canal de radio. Está conformada por procesos como modulación, codificación de canal y procesado correspondiente a las técnicas de múltiples antenas de recepción y transmisión.

Entre los principales servicios que ofrece la capa física se encuentra la transferencia de esta a la capa MAC, las cuales se denominan canales de transporte; La capa física cuenta con dos métodos de transmisión para enlace ascendente y descendente, FDMA y OFDMA, respectivamente.

Los esquemas establecidos para operar en la capa física son: QPSK, 16QAM y 64QAM para el funcionamiento del enlace descendente y para el enlace ascendente: QPSK y 16QAM. eNB cuenta con requerimientos específicos entre ellos un mínimo de elemento de información que puede ser asignado a un terminal móvil, este es denominado como PRB (Physical resource block), PRB cuenta con unas características específicas que le permiten operar en el sistema tales como:

- Ancho de banda de 180KHz, dicho en otras palabras, cuenta con 12 señales subportadoras separadas por 15KHz entre ellas en donde transmiten alrededor de 7 símbolos OFDMA.
- El tiempo de duración es de aproximadamente de 0,5m, este tiempo es llamado slot o ranura temporal.
- El número de las señales portadoras corresponden a una relación de 12 veces el número de PRBS más una, la última es utilizada para la sincronización de frecuencia.

Para cumplir todos los objetivos que se planteaban con la implementación de LTE, se introdujeron nuevas tecnologías que permitieron tener mayor eficiencia y capacidad en la utilidad de los recursos de radio.

- OFDM: Es un esquema de modulación de señales multi portadoras (Calle & Jiménez, 2014), con el fin de enviar información y datos en un ancho de banda específico. Este cuenta con características tales como ortogonalidad de las señales subportadoras lo que permite la transmisión de manera simultánea de todos los datos requeridos y al mismo tiempo haciéndose cargo de la recepción de estos con su respectiva organización.

- OFDMA: Consiste en la modulación de la señal multi portadora y en el acceso múltiple por división de frecuencia; Las señales asignadas a cada uno de los usuarios depende directamente del servicio con el que cuente cada uno de ellos, de igual manera las señales subportadoras son asignadas de manera indistinta, la asignación de estas señales brinda diferentes mejoras en el servicio tales como velocidad de transmisión y calidad del servicio.
- SC-FDMA: En este se cumple la función de compartir un símbolo específico de un usuario mediante un grupo de señales subportadoras de manera simultánea. La incorporación de este esquema de modulación ofrece ventajas específicamente en uplink ya que este reduce de manera considerable el PAPR (Peak to Average Power Ratio), el cual es encargado de medir la relación existente entre la potencia instantánea de la señal compartida con la potencia media.
- MIMO: “MIMO o Multiple Input Multiple Output es una tecnología que se refiere específicamente al uso de múltiples señales que viajan simultáneamente y a la misma frecuencia por un solo canal de radiofrecuencia y que aprovecha la propagación multi-camino para incrementar la eficiencia espectral de sistemas de comunicación inalámbrico” (Cáceres, 2013)

Con el fin de mejorar de manera significativa el uso del espectro se implementa MIMO en LTE ya que este para su funcionamiento utiliza el método de multiplexación espacial en donde la circulación de datos de diferentes usuarios es enviada de manera simultánea.

En LTE se establecen siete modos de funcionamiento de MIMO con el fin de contar un excelente rendimiento en downlink:

1. Puerto antena simple: Implementado en sistemas inalámbricos sencillos en donde la circulación de datos es enviada por una antena y recibida por

otra, SISO (Single input single output), más de una antena SIMO (Single input multiple output).

2. Diversidad de transmisión: Este sistema entra en funcionamiento cuando el envío de la información cuenta con el mismo flujo de datos por lo tanto se realiza mediante múltiples antenas; La información es codificada de manera desigual en las antenas, este sistema recibe el nombre de SFBC (Space frequency block codes). Generalmente en LTE se le da un uso por defecto en caso de canales comunes como lo son broadcast o control.
3. Multiplexación espacial de lazo abierto: Presentan dos circulaciones de información que son enviadas mediante dos o más antenas; Este sistema es uno de los más importantes dentro la tecnología MIMO utilizado en LTE.
4. Multiplexación espacial de lazo cerrado: Se presenta dos flujos de información enviado mediante dos palabras con un número determinado de antenas (máximo 4), en este método existe mayor eficiencia en el rendimiento de LTE ya que cuenta con un sistema de retroalimentación que ofrece la posibilidad de que el transmisor pre- codifique los datos.
5. Multi – Usuario MIMO: La circulación de información se encuentra destinada a diferentes terminales, por consiguiente, se tiene la posibilidad de que varios usuarios hagan uso compartido de los recursos. Generalmente utilizado cuando se presenta una sobrecarga en la red LTE.
6. Lazo cerrado de grado 1 con pre – codificación: Consiste en la transmisión de una palabra código mediante una capa espacial única.

7. Puerto de antena única: Una palabra código es enviada mediante solamente una capa; Durante el proceso son añadidas señales de referencia las cuales genera implicaciones como el uso de un puerto de antena adicional y envío de información de más de 4 antenas.

7.1.4 Arquitectura del Sistema LTE-A

LTE – Advanced es estandarizado por 3GPP como una mejora al estándar LTE. (Ramos, 2013) , entre los principales beneficios que ofrece el servicio LTE Advanced se encuentra que es un sistema con la capacidad de sacar ventaja de las diferentes topologías de red, es decir, se tiene como resultado el uso de redes heterogéneas con macros con nodos de menor consumo de pico celdas, femtoceldas y nodos para la retransmisión.

7.1.4.1 Principales Características Mejoradas de LTE-A.

Algunas de las especificaciones requeridas para el funcionamiento de LTE – Advanced son:

- Tasa de datos: Debe contar con un máximo manejo de tasa de datos; El enlace descendente maneja un valor de 1Gps y el enlace ascendente 500Mbps.
- El uso del espectro debe contar con una eficiencia 3 veces mayor que la manejada en LTE; En enlace descendente con un valor de 30bps/HZ y enlace ascendente 15bps/HZ.
- El rendimiento ofrecido al usuario correspondiente al borde de la célula debe ser mayor 2 veces al utilizado en LTE.

- Sistema adaptable, es decir, cuenta con funcionalidad en sistemas anteriores como LTE y 3GPP.
- Soporte para el uso del ancho de banda.
- Algunas funciones diferentes a LTE es que en este sistema se hace uso de CA (Carrier aggregation), uso enriquecido de técnicas de la multiantena y soporte para RN (Relay nodes). (Ramos, 2013)

7.1.4.2 Arquitectura LTE – A.

Teniendo como referencia la arquitectura establecida por 3GPP para los sistemas de comunicaciones, el sistema LTE-Advanced en términos generales cuenta con la misma arquitectura LTE presentada en la figura 4. Los componentes principales son la red E-UTRAN, el dominio de paquetes EPC que hace parte de la red troncal y el sistema IMS mejorados; Estos son creados con el fin de sobrellevar las funciones de telecomunicaciones a través del sistema de conmutación de paquetes; A diferencia de LTE, LTE – Advanced cuenta con un elemento adicional que hace parte de la red conocidos como relay nodes. (Contreras, 2017)

7.1.4.3 Capa Física LTE – A.

La capa física corresponde a la más baja del modelo OSI, como se mencionó anteriormente cumple la función de procesar las señales que son transmitidas o recibidas a través de un medio físico.

Las características que fueron añadidas a nivel físico para que LTE-Advanced fuera considerado la versión actualizada de LTE son:

- Agregación de portadora

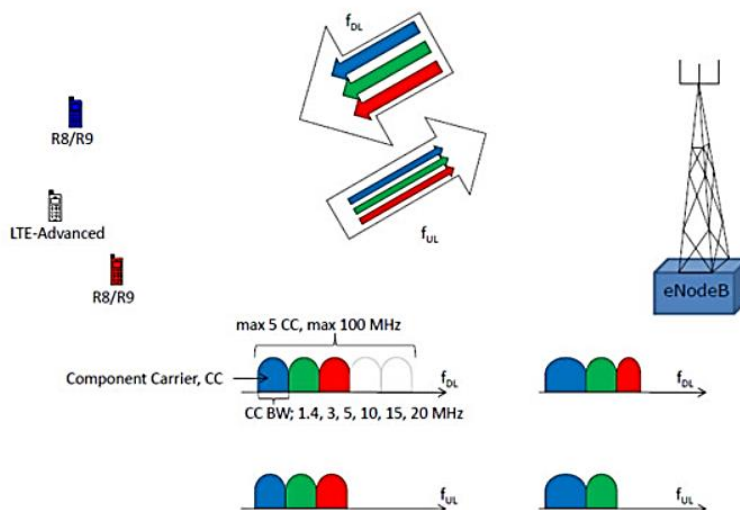
- Transmisión de múltiples antenas para Downlink mejorado
- Transmisión de múltiples antenas para el uplink
- CoMP (Coordinated multipoint transmission and reception)
- Relaying

7.1.4.3.1 Agregación de portadora.

Este método incorporado a LTE-Advanced cumple la función de aumentar de manera considerable el ancho de banda a nivel global. En el modelo habitual de LTE se hace uso de un componente CC (Component Carrier) lo que brinda un valor de ancho de banda máximo de 20Mhz, por consiguiente, la agregación de portadoras cuenta con 5 componentes de portadoras en sí, con el fin de lograr un ancho de banda de transmisión mayor.

El proceso utilizado consiste principalmente que el número de componentes de la portadora para uplink debe ser menor para los utilizados en downlink, dando como resultado uso del espectro fragmentado y ofreciendo mayor eficiencia a los operadores de red. Una de las características principales de CC es que puede tomar un valor diferente de ancho de banda para la transmisión en cada uno de ellos, con valores de 1.4, 3, 5,10,15 y 20 MHz.

Figura 6: Agregación de la portadora



Fuente: 3GPP, J. W. (Junio de 2013). *3GPP a global initiative*. Obtenido de <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>

Para la correcta agregación de las portadoras se seleccionó el método más sencillo el cual consiste en poner las portadoras de manera seguida con la misma banda de frecuencia operativa, esto se conoce como intrabanda contigua, por otra parte, existen casos en donde es necesario realizar asignación de frecuencias por lo tanto el método descrito anteriormente no es funcional, en este caso se aplica intrabanda no contigua, en donde se ubican las portadoras en la misma banda de frecuencia operativa pero separadas por un espacio de frecuencia. Es necesario que, para que la agregación de portadoras sea funcional existan diversas celdas de servicio disponibles para cada uno de los componentes de la portadora.

7.1.4.3.2 MIMO Mejorado.

En comparación a las generaciones anteriores LTE-Advanced busca mejorar el uso del espectro, por consiguiente, se establece el uso de antenas MIMO 8x8 y MIMO 4x4, esto con el

fin de que el sistema pueda sobrellevar la eficiencia espectral que se espera en downlink y uplink, 30bps/Hz y 15 bps/Hz, respectivamente.

Se denominan dos elecciones:

- Single – site MIMO: Consiste en el uso de una sola estación base para la transmisión de datos; En su funcionamiento hace uso de haces de radiación para un usuario determinado.
- Multi – site MIMO: Se establecen diversas estaciones base las cuales pueden participar en el proceso de transmisión de un flujo de información exclusivo, esto con el fin de mejorar la productividad del borde de la celda con el uso del método de multiplexación espacial de diferentes estaciones base que ponen en común los recursos espectrales, lo cual conlleva al uso de otra técnica llamada Co – operative MIMO.

MIMO en Downlink

Para LTE-A se establecen dos métodos para la transmisión de información llamados SU-MIMO y MU-MIMO. En la metodología MU-MIMO en downlink cuenta con un intercambio entre las dos técnicas y mejoras considerables en la transmisión de canal PDSCH, por otra parte, en SU-MIMO se cuenta con el uso de ocho capas espaciales y 2 codewords lo que permite mejorar considerablemente la velocidad en transmisión.

Teniendo en cuenta que se mejora LTE-A para SU-MIMO, es necesario realizar una mejora en las señales de referencia utilizadas, en LTE se hace uso de señales CRSs y en LTE-A se hace uso de señales DM-RS (Downlink Reference Signals for Demodulation) y CSI-RS (Channel State Information Reference Signals).

MIMO en UPLINK

En este aspecto se presenta un cambio considerable ya que se incorpora el modelo de transmisión SU-MIMO, el cual, como se había mencionado anteriormente se desarrolla mediante 4 capas espaciales con el fin de incrementar la velocidad de transmisión, se establecen dos opciones de transmisión:

- Transmisión 1 PUSCH: El método de transmisión se hace mediante una sola antena.
- Transmisión 2 PUSCH: El método de transmisión se realiza mediante varias antenas, es decir, el UE puede ser configurado de tal manera que pueda hacer uso de hasta cuatro antenas.

7.1.4.3.3 CoMP (Coordinated multipoint transmission and reception).

La inclusión de operación coordinada multipunto en LTE – Advanced tiene como finalidad mejorar la eficiencia de la red en los bordes de la celda, esto debido a que CoMP ofrece puntos de transmisión y recepción coordinada, es decir, los puntos de transmisión y recepción pueden ser ubicados en diferentes lugares y brindar cobertura a diferentes sectores.

Algunos de los principales convenientes presentados en LTE-Advanced es la interferencia que se ocasiona en las celdas, al hacer uso de operación coordinada multipunto se logra tomar la interferencia como una señal útil para el sistema, es decir, la transforma en una interferencia intercelda.

7.1.4.3.4 *Relaying.*

Relaying consiste en el uso de una red con relay nodes, lo que ofrece beneficios tales como complemento de macro celdas permitiendo que se aumente la cobertura y capacidad de la red. Los relays pueden ser considerados como repetidores ya que cumplen la función de amplificar la señal que es recibida en la estación base, por lo tanto, su principal campo de aplicación es en sectores rurales o en donde se presenta un flujo de datos leve.

Una de las diferencias más importantes entre un repetidor y un RN, es que RN realiza el procesamiento de la señal que recibe antes de realizar el envío de esta, esto conlleva la intervención de la capa 1, 2 o 3. La arquitectura de relaying se encuentra conformada por los siguientes elementos:

- Direct link (Uplink – Downlink): El direct downlink Hace referencia al enlace existente entre donor eNB y UE, por otra parte, el direct uplink al enlace entre UE y donor eNB.
- Donor eNB: Cumple la función de comunicar los RNs mediante el enlace backhaul y UE mediante el direct link.
- Donor cell: Hace referencia a la zona de cobertura que brinda donor eNB.
- Backhaul link: Se conoce como backhaul uplink al enlace entre RN y donor eNB, y backhaul downlink al enlace entre donor eNB y RN.
- Relay node (RN): Permite establecer la conexión entre los componentes de donor cell con los de relay cell.
- Relay cell: Zona de cobertura dada por RN.
- Access link: Access uplink permite la conexión entre UE y RN y Access downlink conexión entre RN y ER.

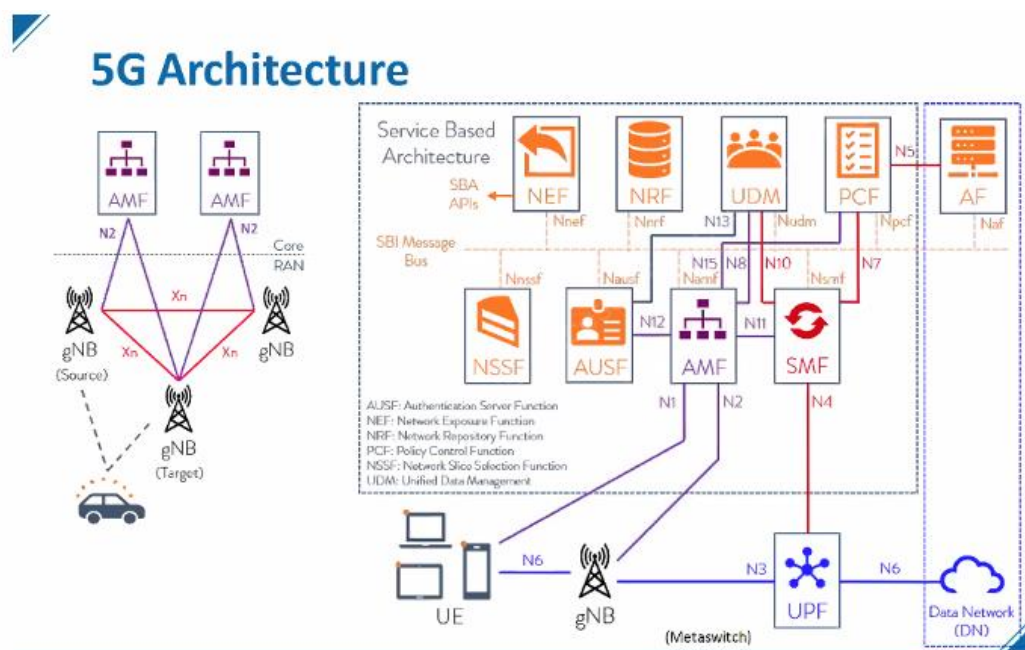
7.2 Arquitectura de La Tecnología 5G

5G es una tecnología diferente a las generaciones antecesoras ya que esta se encuentra orientada principalmente a la parte de servicios, trayendo consigo diferentes tecnologías emergentes que permiten su funcionamiento; De igual manera que las generaciones anteriores se establecieron los retos y cambios necesarios para cumplir con los requerimientos de 5G, 3GPP en el lanzamiento 15 establece algunas de las especificaciones de la arquitectura de la tecnología en su primera fase basado en el funcionamiento de 5G con LTE, se establecen los principales conceptos:

- El uso independiente de las funciones del plano de usuario del plano de control, con el fin de lograr una escalabilidad y mayor evolución del sistema.
- Definición de los procesos en casos de que se requiera.
- Disponer de las funciones de red y cada uno de sus servicios con el fin de poder interactuar con otros NF (Network Function).
- Disminuir la dependencia existente entre la red de acceso (AN) y el centro de la red (CN). La arquitectura se encuentra definida con una red convergente con una AN en común.
- Soporte de un framework de autenticación unificado.
- Habilitar todas las funciones de red y sus respectivos servicios de funciones con otras NF, de igual manera los servicios de red que se encuentren directa o indirectamente conectados en un servicio de comunicaciones proxy, solo si es necesario.
- Soportar servicios como baja latencia y acceso a las redes de datos locales.
- Soporte de tráfico enrutado local como tráfico de ruptura local.

Uno de los aspectos más importantes de la arquitectura 5G es que la red de acceso (Access network) no solo se puede conectar al centro de la red (Core network), sino también al centro de la red 4G (LTE), esto se conoce como arquitectura NSA.

Figura 7: Arquitectura 5G



Fuente: Ing. Yezid E. Donoso Meisel, P. (14 de septiembre de 2021). Arquitectura, Nuevos servicios y Ciberseguridad en Redes 5G. Bogotá.

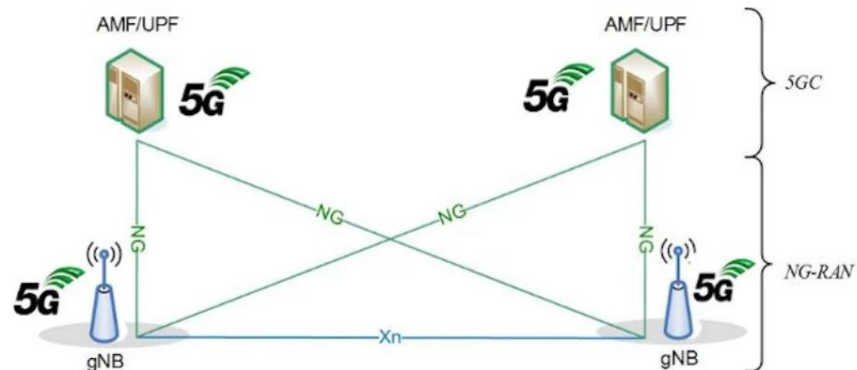
7.2.1 Arquitectura NSA y SA.

Para el diseño de la arquitectura 5G se establecieron dos opciones para el despliegue de esta, en donde se encuentra la arquitectura NSA (Non - Stand Alone) y SA (Stand – Alone), de las cuales se dará una breve descripción del funcionamiento a continuación:

- SA: En esta arquitectura se puede encontrar una única configuración, la cual consiste en la conexión entre NR (New Radio) con 5G CN, esto permite el

soporte del conjunto de servicios establecidos para 5G; Esta arquitectura también se conoce como el desarrollo completo de 5G sin necesidad de hacer uso de algún componente de la red 4G para su funcionamiento.

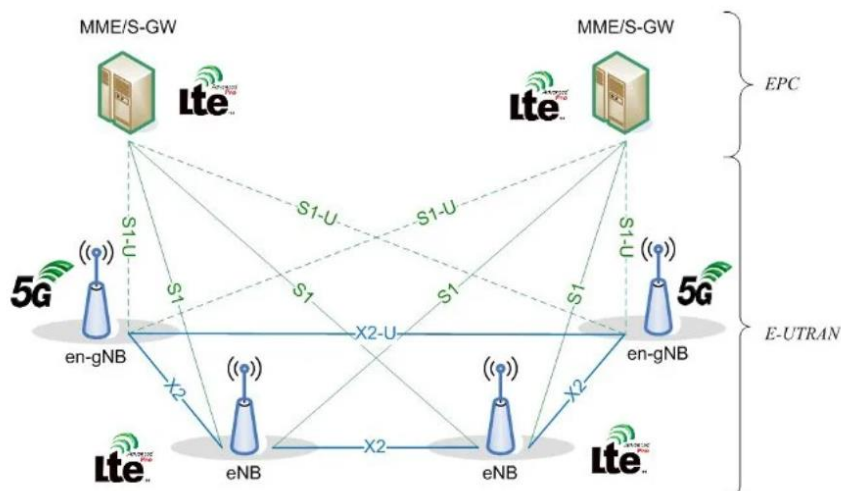
Figura 8: Arquitectura SA



Fuente: 23.501, 3. T. (2021). *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects: System architecture for the 5G System (5Gs) Release 17*. Valbonne, Francia.

- NSA: En esta arquitectura se encuentra localizada Radio Access Network (AN) y New Radio (RN) la cual es utilizada en conjunto con la infraestructura existente de LTE y EPC, correspondiente a 4G, esta tecnología mantiene la red disponible sin necesidad de reemplazarla. Uno de los aspectos más relevantes es que dicho sistema permite conectividad dual de la red 4G (E-UTRA) y 5G (NR), conocido comúnmente como EN-DC.

Figura 9: Arquitectura NSA



Fuente: 23.501, 3. T. (2021). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects: System architecture for the 5G System (5Gs) Release 17. Vallbona, Francia.

7.2.2 Core Network.

En la arquitectura SA el sistema 5G este compuesto por 3 elementos equipo de usuario (User equipment), Red de acceso (Access network) y núcleo de red (Core network o 5GC). La arquitectura 5G se basa en marcos llamados SBA (Service – Based Architecture), consiste en el funcionamiento de frameworks convencionales que cumplen la función de ofrecer servicios de red a los consumidores ofreciendo beneficios como reutilización de estos.

Algunas de las funciones esenciales con las que cuenta la arquitectura 5G son:

- Equipo de usuario (UE).
- Red de acceso por radio [(R)AN].
- Función del plano de usuario (UPF).

- Datos de red.
- Las funciones más relevantes de las funciones de red son:
 - Función de aplicación (AF).
 - Función de administración de acceso y movilidad (AMF).
 - Función de administración de sesión (SMF).

7.2.3 Capa Física 5G.

El funcionamiento de la capa física en 5G respecto a numerologías, formas de onda y estructura de marco es similar al del sistema LTE, se hace uso del sistema ODFM con un prefijo cíclico (CP – Cyclic Prefix) utilizado generalmente en downlink (DL), de igual manera ODFM es utilizado en NR para la dirección uplink. Con el fin de lograr las implementaciones deseadas para 5G esta acepta una diversa cantidad de frecuencias portadoras y anchos de banda para canales.

Tabla 1: Ancho de banda de los canales

Rango de frecuencia	Rango de frecuencia	Canales soportados en las bandas (MHz)
FR1	410 – 7125 MHz	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 93, 100
FR2	24250 MHz – 52600 MHz	50, 100, 200, 400

Fuente: 23.501, 3. T. (2021). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects: System architecture for the 5G System (5Gs) Release 17. Vallbona, Francia.

Para mayor flexibilidad en el funcionamiento 5G usa una estructura flexible, son diferentes señales subportadoras con valores posibles de 15,30,60,120, y 240 KHz. Con respecto al dominio del tiempo este se encuentra dividido 10ms marcos de radio, cada uno con 10 sub-marcos con un valor de 10ms.

Las especificaciones de los canales y señales para la capa física están dadas de la siguiente manera:

Tabla 2: Señales 5G NR

DL/UL	Señal Física	Nombre de la señal física
DL/UL	DM-RS	Demodulation reference signals
DL/UL	PT-RS	Phase – tracking reference signals
DL	CSI-RS	Channel – state information reference signal
DL	PSS	Primary synchronization signal
DL	SSS	Secondary synchronization signal
UL	SRS	Sounding reference signal

Fuente: 23.501, 3. T. (2021). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects: System architecture for the 5G System (5Gs) Release 17. Vallbona, Francia.

7.2.4 Agregación de Portadora, Banda Ancha y Conectividad Dual LTE-NR.

Para NR el valor de banda ancha máximo en una subportadora es de 100MHz para el rango de frecuencias 1 y para el rango de frecuencias 2 es de un valor de 400MHz. Para lograr un mayor ancho de banda se permite agregar alrededor de 16 señales portadoras las cuales pueden ser soportadas por NR.

En NR se establece un nuevo concepto denominado parte de ancho de banda (Bandwidth BWP), el cual hace referencia que un UE tiene la posibilidad de ser configurado con cuatro BWP por cada portadora para downlink y uplink.

Por otra parte, se tiene una función importante en EN-DC las transmisiones de uplink mediante LTE y NR pueden ser realizadas, aun si se presentan inconvenientes en casos de bandas de frecuencias combinadas la transmisión para ambos sistemas al mismo tiempo puede ser realizada sin ningún problema.

7.2.5 MIMO en 5G.

MIMO es utilizado con el fin de mejorar el rendimiento de la tecnología 5G, ya que su arquitectura se encuentra conformada por múltiples antenas que funcionan como transmisor y receptor, esto con el fin de poner a disposición una multicapa para la transmisión de datos, una de las características más importantes de NR es que tiene la capacidad de soportar una transmisión multicapa para un único equipo (Single - user MIMO) de usuario estableciendo un número máximo de ocho transmisiones para downlink y cuatro para uplink; De igual manera existen casos de transmisiones de múltiples usuarios a diferentes capas llamados multi-user MIMO con un número máximo de 12 transmisiones para downlink y uplink.

7.2.6 PDCCH

Utilizado generalmente para llevar la información correspondiente al control en downlink (DCI). Su funcionamiento consiste en que cada uno de los dispositivos monitorean el número de PDCCH, generalmente se encuentran uno por espacio, sin embargo, existe la posibilidad de configurar más de uno si se necesita soportar tráfico que cuente con baja latencia, estos son transmitidos en conjuntos de fuentes de control llamados CORESETs.

7.2.7 PDSCH

Cumple la función de transmitir uno o dos bloques de transporte (TBs), este es decodificado según la información que es recibida en PDCCH, estos cuentan con 8 capas que funcionan para la transmisión de información y las transmisiones son procesadas usualmente con una duración de 2 a 14 símbolos.

7.3 Comparativo 4G, LTE-ADVANCED y 5G

Teniendo como base el análisis y revisión bibliográfica realizada en los puntos anteriores correspondientes a 4G LTE, 4G LTE-A y 5G, se realiza una breve comparación de las tres generaciones.

En la capa física de los sistemas LTE y LTE-A se utiliza el sistema de multiplexación OFDMA como procedimiento para el acceso a la comunicación correspondiente en downlink; Por otra parte, en uplink se realizan mejoras en LTE-A ya que se implementa la metodología de agregación de portadoras lo que permite aumentar el ancho de banda utilizado, de igual manera en la tecnología 5G se utiliza el esquema OFDMA en NR para uplink, se establece una diferencia ya que en NR agregan un complemento a la forma de onda que cuenta con una potencia de pico promedio más baja con el fin de mejorar la cobertura, es decir, se utiliza OFDM

con una pre - codificación realizada mediante la transformada discreta de Fourier. Algunas de las señales que son definidas únicamente en NR son las expuestas en la siguiente tabla:

Con el fin de mejorar el uso del espectro se implementa la utilización de MIMO en LTE específicamente en downlink, para LTE-A también utiliza MIMO pero difiriendo en un aspecto ya que para este se hace uso de un sistema mejorado con uso de antenas 4x4 y 8x8 para downlink y uplink, ofreciendo dos opciones según la aplicabilidad Single – site MIMO y Multi – site MIMO, por último se tiene MIMO en 5G, en la fase 1 expuesta por 3GPP se establece transmisión multicapa para la transmisión de datos, así mismo en reléase 16 se expone el uso de MIMO masivo para soportar la cantidad de dispositivos conectados a la red.

En cuanto a la arquitectura de red de LTE y LTE-A dejan atrás el sistema de conmutación de paquetes para migrar a una plataforma basada en IP que cumple su funcionamiento desde eNB hasta el núcleo de paquetes evolucionados, estos sistemas utilizan una arquitectura similar, con una diferencia en que LTE-A implementa un sistema en E-UTRAN conocido como relay node con el fin de aumentar la cobertura, rendimiento y capacidad de red; En su arquitectura cuentan con plano de usuario y plano de control que funcionan de manera conjunta cada una con sus respectivas funciones las cuales se basan en el envío de paquetes IP y control y gestión de las interfaces, respectivamente.

Por otro lado, la arquitectura de red 5G busca mejorar la EPC de la arquitectura LTE incluyendo 3 aspectos importantes: Servicios basados en arquitectura, soporte NS y un Split o división de plano de control y usuario, dicha división se realiza con el fin de asignar un ancho de banda a cada plano sin afectar al otro; La arquitectura en sí se basa en la implementación de porciones de red que sirven a un usuario específico utilizando de manera combinado las funciones requeridas, todas estas funciones se encontrarán trabajando en una misma línea física de red y

radio pero para el usuario estas serán vistas como diferentes redes. A diferencia de la arquitectura LTE eNB son reemplazados por gNB. (Juan Aranda, 2021)

7.3.1 Tabla comparativa 4G, LTE-A y 5G

Tabla 3: Comparación 4G, LTE-A y 5G

PARÁMETRO		LTE	LTE-ADVANCED	5G	ANOTACIONES
INFRAESTRUCTURA	ARQUITECTURA	Arquitectura EPC, LTE	Arquitectura EPC, Radio LTE.	5GC, 5G RAN.	La arquitectura 5G presenta cambios que permiten soportar bajas y altas frecuencias brindando aplicabilidad en diferentes casos de uso. (Remmert, 2021)
	ESTACIÓN BASE	eNBs (Evolved node B)	eNBs (Evolved node B),	gNB (gNodeB)	gNB es una evolución de los nodos a nueva generación.
	AN	Conformada por E-UTRAN	E-UTRAN mejorada con relay nodes.	5G AN	En el caso de 5G las estaciones gNB cuentan con una conexión mediante la interfaz NG la cual está basada y funciona de manera similar que la interfaz S1 en LTE, sin embargo, 5G busca centralizar todas las gNB en una gNB centralizada lo que permite mayor rendimiento de la red.

PARÁMETRO		LTE	LTE-ADVANCED	5G	ANOTACIONES
INFRAESTRUCTURA	CN	EPC	EPC	5GC	<p>Como se puede ver 5GC ofrece mayores beneficios en cuanto a servicios ya que se encuentra dividido por segmentos llamados NF, de igual manera la implementación de network slicing lo que permite mayor flexibilidad en el Core y asignación de recursos a cada una basada en QoS, tasa de bits y latencia.</p> <p>(23.501, 3. T.,2021)</p> <p>(23.501, 3. T.,2021)</p>
		Ofrece el servicio de conectividad IP mediante el acceso de redes 3GPP y No 3GPP. (Cáceres, C. I., 2013)	Ofrece el servicio de conectividad IP mediante el acceso de redes 3GPP y No 3GPP. (Cáceres, C. I., 2013)	En SA, 5GC cuenta con una arquitectura basada en servicio, en donde cada uno de los elementos son definidos como funciones de red (NF). (23.501, 3. T.,2021)	
VELOCIDAD		100 Mbps	150 Mbps	10.000 Mbps	<p>El núcleo de 5G permite el funcionamiento de cada función de manera independiente, de tal manera que cada uno de los nodos de la red son flexibles y descentralizados.</p> <p>(Remmert, 2021)</p>

PARÁMETRO		LTE	LTE-ADVANCED	5G	ANOTACIONES	
BANDA ANCHA SOPORTADA		20MHz	100MHz	400MHz	El uso de ondas milimétricas en el funcionamiento de 5G permite hacer uso de mayor ancho de banda. (Núñez, 2018)	
LATENCIA		50ms	30ms	1ms	Mediante el uso de tecnologías como full dúplex y pequeñas células 5G cuenta con una menor latencia.	
CAPA FÍSICA	MULTI- PLEXA CIÓN	DL	OFDMA	OFDMA	CP-OFDMA	NR a diferencia de las generaciones anteriores soporta una amplia gama de frecuencias y canales de banda ancha. (23.501, 3. T.,2021)
		UL	SC-FDMA	DFT-S-OFDMA	CP-OFDMA DFT-S-OFDMA	

PARÁMETRO		LTE	LTE-ADVANCE D	5G	ANOTACIONES
CAPA FÍSICA	CÉLULAS	Macro células	Macro células	Macro células y células pequeñas	El uso de macro células permite establecer conexión a mayor distancia, sin embargo, este puede ser lento e incrementar el rendimiento de la batería, el uso de células pequeñas permite tener mayor velocidad y capacidad en la red, para la integración de 5G y 4G se hace uso de ambas de manera que se tengan los beneficios de ambos sistemas. (2.0, 2021)
SERVICIOS		La red 4G ofrece una amplia gama de servicios a comparación de su generación antecesora, ya que permite el acceso a internet de banda ancha lo que da paso a videoconferencias, juegos y mayor velocidad en la navegación.	Sabiendo que la red 4G y LTE-A cuentan con características similares lo cual abarca las mismas alternativas de servicio, sin embargo, este cuenta con mayor velocidad y descarga casi instantánea de archivos multimedia.	Una de las características más novedosas de la tecnología 5G es que no solo ofrece servicios mejorados de comunicación es móviles, sino que también se encuentran tecnologías como IoT que permiten mejorar la calidad de vida.	Las generaciones anteriores cuentan con un patrón similar respecto a los servicios que ofrecían al usuario, voz, datos, internet, por otro lado, 5G no solo ofrece mejorar la experiencia de usuario con los servicios convencionales, sino que también ampliar su campo de aplicación.

PARÁMETRO	LTE	LTE-ADVANCED	5G	ANOTACIONES
MIMO	Es implementado en LTE con el fin de mejorar el rendimiento y amplia capacidad de transmisión. En el caso de DL tiene la capacidad de soportar 4 puertos de antenas haciendo uso de SU-MIMO 4x4. (Calle, C., & Jiménez, M. S, 2014)	Implementa MIMO mejorado en donde DL puede soportar un arreglo de 8x8 y 4x4 en UL, adicional a esto LTE hace uso de 7 modos de uso de MIMO y LTE-A hace uso de 9. (Calle, C., & Jiménez, M. S, 2014).	Hace uso de MIMO masivo lo que permite obtener mayor rendimiento de 5G, haciendo uso de alrededor de 156 antenas que permitirán trabajar en el rango de frecuencias esperadas para la tecnología. (Digitales, 2021)	En cuanto a rendimiento de la red y transmisión y recepción de datos de altas densidades la arquitectura de 5G es mejor frente a las generaciones anteriores, la implementación de mMasivo ofrece beneficios considerables en cuanto a la red y experiencia de usuario.

Fuente: Autor.

Tabla 4: Canales físicos NR

DL/UL	CANAL FÍSICO	NOMBRE DEL CANAL FÍSICO	MODULACIÓN
DL	PDSCH	Canal físico compartido	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
DL	PBCH	Canal físico de difusión	QPSK
DL	PDCCH	Canal físico de control en enlace descendente	QPSK

UL	PUSCH	Canal de tráfico	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM.
UL	PUCCH	Canal físico de control en enlace ascendente	BPSK, QPSK.
UL	PRACH	Canal físico de acceso aleatorio	N/A

Fuente: 23.501, 3. T. (2021). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects: System architecture for the 5G System (5Gs) Release 17. Vallbona, Francia.

Tabla 5: Canales físicos LTE y LTE-A

DL/UL	CANAL FÍSICO	NOMBRE DEL CANAL FÍSICO	MODULACIÓN
DL	PDSCH	Canal físico compartido	QPSK, 16QAM, 64QAM
DL	PBCH	Canal físico de difusión	QPSK
DL	PDCCH	Canal físico de control en enlace descendente	QPSK
UL	PUSCH	Canal de tráfico	QPSK, 16QAM, 64QAM
UL	PUCCH	Canal físico de control en enlace ascendente	BPSK, QPSK.

Fuente: 23.501, 3. T. (2021). 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects: System architecture for the 5G System (5Gs) Release 17. Vallbona, Francia.

8 Análisis del Estado del Arte: Tecnología 5G Enfocada a La Capa Física

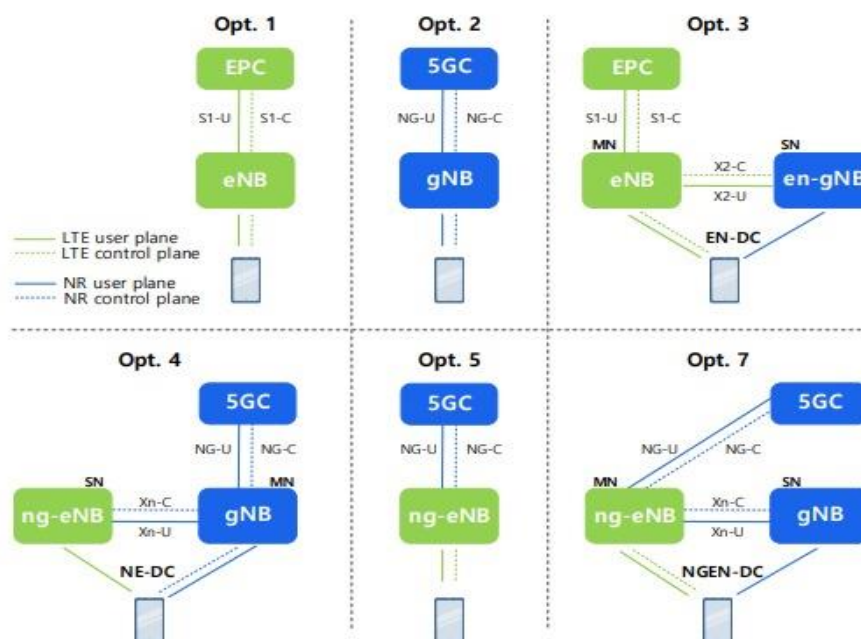
En el capítulo anterior se realizó una breve comparación de las comunicaciones móviles 4G y 4G + con la tecnología 5G NSA, a continuación, se hará una breve descripción de las dos versiones 5G dadas a conocer por 3GPP en los lanzamientos 15 y 16.

3GPP establece dos propuestas para la implementación de la nueva tecnología 5G con respecto al acceso 5G NR debido a que no se ha tomado la decisión si de utilizar este sistema de radio de manera dependiente llamado NSA, en donde la tecnología toma un rol de maestro mientras que la otra opera como sistema secundario, por otro lado, se tiene el manejo de manera independiente llamado SA. (RHAYOUR & MAZRI, 2019)

El 3GPP espera como fase inicial a la migración de 5G el despliegue de la arquitectura NSA ya que esta es compatible con LTE y ambos sistemas cuentan con funcionalidades adaptables con la primera etapa de implementación, algunas características esperadas para 5G se adaptan a esta arquitectura tales como servicio de banda ancha mejorada eMBB, servicios de baja latencia ultra confiables (URLLC).

Se establecen seis arquitecturas para la implementación de la tecnología 5G las cuales se pueden observar en la figura 8; Las opciones 1, 2 y 5 hacen referencia a las arquitecturas establecidas para SA, por otro lado, las 3, 4 y 7 corresponden a NSA. En cuanto a la opción 1 no es considerada para la implementación NR ya que como se puede ver es la arquitectura de 4G, en donde E-UTRAN NodeB (eNB) se encuentra conectado a EPC. (Samsung, 2021)

Figura 10: Arquitecturas para NR



Fuente: Samsung. (2021). 5G Standalone Architecture.

En la arquitectura NSA la conexión dual Multi – radio (MR-DC) proviene del equipo de usuario con conexión simultáneas de la generación RAN de dos nodos diferentes, en este caso, eNB-gNB; Para MR-DC el plano de control tiene la posibilidad de comunicarse con un nodo secundario (SN) mediante un nodo maestro al equipo de usuario, por otro lado, para el plano de usuario el equipo de usuario también puede conectarse con cualquier configuración MN/CN directamente o mediante nodo secundario vía nodo maestro. (Samsung, 2021) Algunas de las configuraciones de MR-DC están dadas en la siguiente tabla:

Tabla 6: Lista MR-DC

Lists	Associated CN	Associated Option	Note
E-UTRA-NR Dual Connectivity (EN-DC)	EPC	Option 3	eNB acts as an MN and en-gNB acts as a SN.
NR-E-UTRA Dual Connectivity (NE-DC)	5GC	Option 4	gNB acts as an MN and ng-eNB acts as a SN
NG-RAN E-UTRA-NR Dual Connectivity (NGEN-DC)	5GC	Option 7	ng-eNB acts as an MN and gNB acts as a SN
NR-NR Dual Connectivity (NR-DC)	5GC	Option 2	One gNB acts as an MN and another gNB acts as a SN

Fuente: Samsung. (2021). 5G Standalone Architecture

- Opción 2: Esta corresponde a una de las arquitecturas desplegadas para SA, en donde se encuentra una conexión entre gNB A 5GC; Esta arquitectura ofrece características importantes tales como conexión del equipo de usuario a gNB sin necesidad de una red heredada, lo que permite el despliegue de una red 5G completa con los servicios requeridos como eMBB, mMTC y URLLC.
- Opción 3 – 3a – 3x: Todas las versiones lanzadas para la arquitectura opción 3 son realizadas en la red LTE por consiguiente no se requiere la presencia de 5GC. Los servicios seleccionados para 5G son desplegados mediante el uso de EN-DC con LTE, está funcionando como nodo maestro y NR como nodo secundario. Esta opción se encuentra dividida según el método utilizado para la división del tráfico.
- Opción 4 – 4a: Esta versión hace parte de las opciones ofrecidas para la implementación de la arquitectura NSA, en donde al igual que la opción 2, gNB se encuentra conectado a 5GC y adicional existe conexión entre gNB y ng-eNB.

- Opción 5: Corresponde a la arquitectura SA, en esta ng-eNB se encuentra conectada a 5GC mediante la interfaz NG, sin contar con una conexión dual con los sistemas NR; En la opción 5 se reemplazan algunos componentes como EPC ya que toma lugar 5GC. Una de las deficiencias con las que cuenta esta opción es que no hace uso de los beneficios con los que cuenta la interfaz aérea en 5G NR, múltiples numerologías y flexibilidad en las estructuras de los marcos.
- Opción 7 – 7a – 7x: Estas versiones hacen parte de la arquitectura NSA, eNB se encuentra conectado a 5GC, y tanto eNB como gNB se encuentran conectados entre sí. Tiene la capacidad de soportar la conectividad dual (NGEN-DC) con el fin de añadir el tráfico existente de LTE y NR.

Tabla 7: NSA vs SA

Items	NSA		SA
	Option 3	Option 4, Option 7	Option 2
Associated DC	EN-DC	Opt.4: NE-DC Opt.7: NGEN-DC	NR-DC (Not Mandatory)
Required CN	EPC	5GC	5GC
Required RAN	eNB, en-gNB	ng-eNB, gNB	gNB
Feasibility of 5G spectrum	Sub-6GHz, mmWave	Sub-6GHz, mmWave	Sub-6GHz (Desirable), mmWave
Required Time for 5G Deployment	Short	Long	Long
LTE Upgrade	Major upgrade	Major upgrade	Minor upgrade
Alignment with LTE	Preferred	Preferred	Not Required
Interworking with LTE	Tight interworking between LTE and NR	Tight interworking between LTE and NR	CN-level interworking (Inter-RAT mobility)
Control Anchor	LTE	Opt.4: NR Opt.7: LTE	NR
Supporting 5G Service	eMBB	Support at gNB side (eMBB, URLLC, mMTC, Network Slicing)	Full support (eMBB, URLLC, mMTC, Network Slicing)
Supporting Voice Service	VoLTE	VoNR (VoLTE by fallback is possible when VoNR is unavailable)	VoNR (VoLTE by fallback is possible when VoNR is unavailable)
Multi-vendor interoperability	Not Easy	Not Easy	Easy

Fuente: Samsung. (2021). 5G Standalone Architecture.

8.1 NSA vs SA

En el artículo científico titulado “5G Deployment: Standalone vs Non – Standalone from the Operator Perspective (Liu, Huang, Chen, Liu, & LI, 2020), se expone una breve comparación entre las arquitecturas SA y NSA, en donde se abarca de manera específica las opciones 2 y 3 (Figura 3), ya que son las idóneas para el los servicios ofrecidos por los operadores; De esta manera se toman aspectos como concepto, análisis de arquitectura, capacidad de la red, rendimiento de dispositivos, consumo de energía, inter funcionamiento de 4G/5G y avance de las arquitecturas, los cuales serán expuestos brevemente a continuación:

Teniendo en cuenta que la principal diferencia existente entre NSA y SA es la dependencia con LTE para su funcionamiento, sin embargo, es necesario realizar un análisis para establecer cuál de las dos arquitecturas es más viable para los operadores teniendo en cuenta que la migración a 5G se encuentra en su fase inicial.

8.1.1 *Conceptos de 5G SA NR y 5G NSA NR.*

Comúnmente, la arquitectura NSA hace referencia a un sistema que hace uso de LTE/Envolved (eLTE), mientras que SA es un sistema basado completamente en 5G que cuenta con sistemas como NR y 5GC. En la primera parte del despliegue de SA NR, es necesario el funcionamiento entre EPC y 5GC con el fin de brindar una garantía en el servicio y que este pueda ser continuo.

La arquitectura SA cuenta con componentes lo que permite funcionar para 5G o 4G, pero no de manera simultánea, es decir, cuando un dispositivo se encuentra en el rango de cobertura de NR este se encuentra arraigado por 5GC por consiguiente la cobertura en cuanto a movilidad es manejado por este mismo, por otro lado, si el dispositivo se encuentra fuera de cobertura NR es

tomado por la red LTE/EPC teniendo la conexión original del sistema LTE. La implementación de SA NR ofrece beneficios como acceso y transmisión de datos, división de red, entre otros.

Con base a la arquitectura NSA, NR es utilizado como un camino de datos adicional cuando la cobertura se encuentra disponible, al contrario, cuando el dispositivo se encuentra fuera de rango hace uso únicamente de LTE, es decir, la movilidad para la arquitectura NSA se encuentra completamente monitoreada por el sistema LTE, teniendo en cuenta lo anterior desde la perspectiva del dispositivo se presentan desventajas frente a la vida útil de la batería ya que estos requieren que el dispositivo tenga la capacidad de soportar una conexión dual (Transmisión LTE y NR), adicional a esto al tener transmisiones de manera simultánea puede generar interferencia lo que causaría problemas en la experiencia de usuario y calidad del servicio.

8.1.2 *Análisis de SA vs NSA*

En (Liu, Huang, Chen, Liu, & LI, 2020) se da a conocer al lector los aspectos para tener en cuenta en el momento de realizar la selección de la arquitectura de red que se va a utilizar, los detalles del análisis realizado serán expuestos en este ítem.

8.1.2.1 Cobertura.

Desde la perspectiva de los operadores, la cobertura es un aspecto clave ya que este determina la calidad del servicio a brindar; Por tal motivo, los operadores decidieron hacer el despliegue de una manera más sencilla reutilizando los sectores de LTE con el fin de tener calidad en el servicio.

Teniendo presente que NR de SA y NSA comparten protocolos similares correspondientes a las capas 1 y 2, se podría decir que el rendimiento de los canales de datos o los canales de equipos de usuario son los mismos, sin dejar a un lado que la

desigualdad presentada en los canales está dada por aquellos que son comunes como canal de control, broadcast, entre otros, esto teniendo presente que el canal común es transmitido por LTE y 5G NR.

Una de las tecnologías implementadas en 5G para mejorar la cobertura fue MIMO masivo, lo que ofrece al sistema una ganancia en la cobertura de aproximadamente 10 dB/5 dB para DL y UL, respectivamente. En cuanto a la frecuencia de funcionamiento, se toma como referencia los avances realizados en china, en donde se adoptó una frecuencia de 2.6 GHz para TD-LTE en áreas urbanas; De esto se pudo observar que 3.5GHz 5G NR ofrece mejor cobertura que la red 4G en áreas urbanas con lugares 4G.

8.1.2.2 Capacidades de la red.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente se entiende que la red NSA no cuenta con las mismas capacidades que SA, sin embargo, uno de los principales objetivos del despliegue de NSA como primera fase es la aptitud de la red para soportar la demanda que representa la implementación de eMBB. Uno de los cambios hechos en 5GC es el diseño de un servicio basado en arquitectura con el fin de implementar SDN y NFV para contar con características como flexibilidad, rapidez y actualización de software.

Por otro lado, se tiene QoS (Quality of service) este en NSA es alineada con 4G, por lo tanto, es controlada por el núcleo de red la cual en NSA es EPC, por otro lado, en SA QoS se encuentra alineado con 5G.

8.1.2.3 Rendimiento del dispositivo.

En cuanto a la experiencia de usuario se tienen diferentes formas de manejo en SA y NSA. NSA cuenta con dos enlaces de radio para LTE y NR lo que brinda ventajas como una alta

velocidad de transmisión de datos, sin embargo, NSA cuenta con influencia de las bandas portadoras lo que quiere decir que en el servicio puede presentarse interferencias, por el contrario, en SA, NR y LTE no trabajan de manera simultánea lo que permite que no exista afectación en el dispositivo 5G.

8.1.2.4 Consumo de energía.

Para realizar la evaluación del consumo de energía los autores tomaron en consideración tres aspectos claves que determinan este aspecto, modo inactivo, modo conectado y modo de transmisión de datos.

- Modo inactivo: En este modo se puede decir que el dispositivo recibe información mínima, por lo tanto, se determina que el consumo de energía para este modo en la arquitectura NSA y SA sería la misma.
- Modo transmisión de datos: Para este modo se considera una frecuencia de 100MHz para NSA y SA, así mismo se tiene en consideración UL con la participación de DL en modo de realimentación y viceversa, adicional a esto se realizan las pruebas en un ambiente con mala cobertura ya que de esta manera el dispositivo utilizará la mayor energía para realizar la transmisión; De esta manera se logra obtener la comparación de consumo de energía para los dispositivos. Los resultados arrojados sobre las pruebas realizadas son que el dispositivo que funciona con SA consume menos que NSA tomando como referencia la transmisión en modo DL, en este caso específico se podría decir que NSA cuenta con mayor consumo ya que necesita el funcionamiento de NR y LTE, sin embargo, desde la perspectiva del usuario el uso de arquitectura SA implica mayor consumo de energía.

8.1.2.5 Funcionamiento 4G/5G.

Para la arquitectura NSA no existe un funcionamiento 4G/5G ya que el servicio se encuentra relacionado directamente con LTE, por otra parte, SA si cuenta con funcionamiento de 4G/5G debido a que al estar dentro de la zona de cobertura se toma el servicio 5G NR, al estar fuera de cobertura inicia el funcionamiento de la red LTE, el funcionamiento de las dos se da mediante la interfaz N26. Finalmente se llega a la conclusión que NSA cuenta con un mejor rendimiento ya que el funcionamiento ya está realizado por un sistema interno de LTE, el rendimiento de la arquitectura SA es similar al de LTE.

8.2 Tecnologías Emergentes 5G

La tecnología 5G trae consigo la implementación de nuevas tecnologías con el fin cumplir con los requerimientos de esta; Cada una de ellas cumplen funciones específicas en diferentes sectores de la arquitectura de la tecnología tales como core, núcleo, Edge y acceso por radio; Dichas tecnologías se mencionaron anteriormente como parte fundamental del despliegue de 5G, en esta sección se abarcará cada una de ellas exponiendo aspectos como funcionamiento, retos de implementación y arquitectura.

8.2.1 Ondas milimétricas.

Uno de los principales requerimientos para el correcto funcionamiento de la tecnología 5G es el soporte en el incremento de flujo y velocidad de los datos, de esta manera una de las soluciones planteadas es el uso de ondas milimétricas con el fin conseguir una ampliación en el espectro disponible. (Chen W. C., 2014). Estas ondas se caracterizan por contar con una longitud de onda de 1 a 10 mm y un rango de frecuencias de 30 a 300 GHz; Abarcar bandas de frecuencias más altas que las que se utilizan comúnmente trae ciertas ventajas como una disponibilidad mayor

del ancho de banda y la posibilidad de utilización de antenas de menor tamaño con mayor ganancia lo que permite su implementación en zonas rurales sin ningún inconveniente.

8.2.1.1 Desventajas de las Ondas Milimétricas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se sabe que las ondas milimétricas hacen posible el uso de mayor espectro, a pesar de esto, cuentan con ciertos obstáculos que impiden que la transmisión y recepción se realice de manera exitosa, se encuentran inconvenientes como: absorción atmosférica, pérdida de línea de vista y dispersión.

- **Absorción atmosférica:** Uno de los principales inconvenientes de las ondas milimétricas es que la atmosfera absorbe las ondas generando una limitación en la transmisión, elementos como la lluvia, niebla y humedad presente en el aire eleva la probabilidad de atenuación de la señal.
- **Pérdida de línea de vista:** Se encuentran casos en donde no existe una ruta de línea de vista existente en el transmisor y receptor, por consiguiente, las señales pueden ser transmitidas por métodos como difracción, reflexión, o flexión, sin embargo, al tratarse de ondas milimétricas estas no pueden usar el método de difracción por su longitud de onda. (Núñez, 2018)
- **Dispersión:** Las ondas milimétricas presentan problemas en presencia de la lluvia ya que estas tienen el mismo tamaño que las gotas, lo que causa la dispersión de la señal.

8.2.1.2 Arquitectura de Redes con Ondas Milimétricas.

La implementación de arquitecturas que hacen uso de ondas milimétricas ofrece mejoras en el sistema como la transformación de los enlaces direccionales en enlaces de alta ganancia que

permiten conexión entre la estación base de radio y el terminal móvil, adicional a esto elimina considerablemente la presencia de interferencia en las celdas.

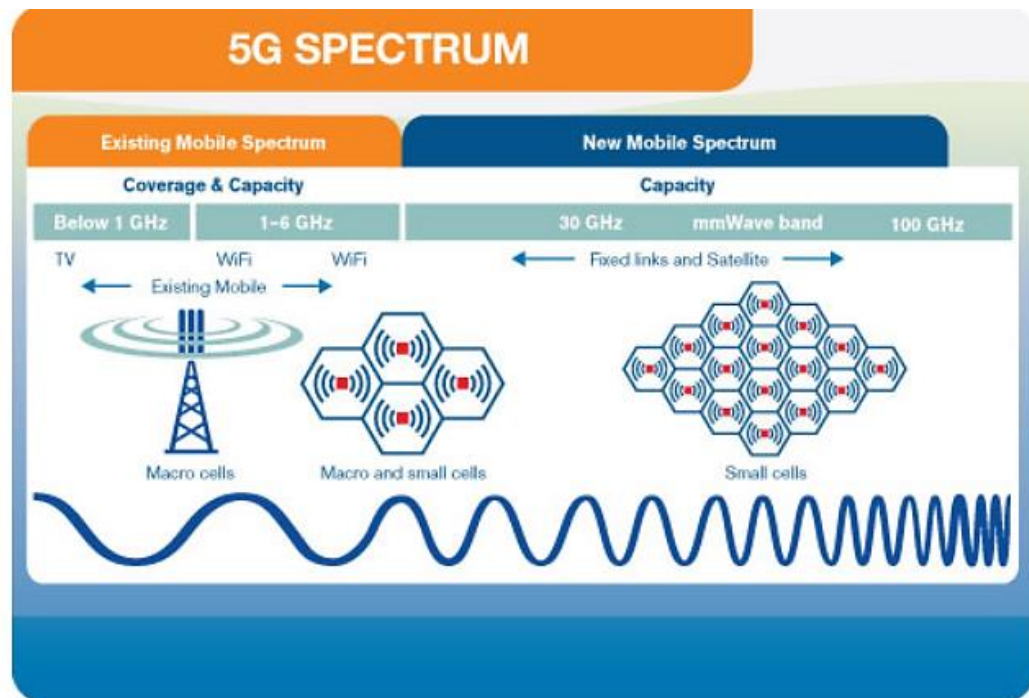
La arquitectura de redes con ondas milimétricas permite que los enlaces de backhaul puedan hacer intercambio del mismo espectro, lo que beneficia en la velocidad del despliegue de nuevos componentes del sistema y mayor conectividad de red mediante la estación base de radio. (Campos, 2017). Adicionalmente ofrece una característica importante la cual hace referencia a la heterogeneidad de la red lo que permite el uso de diferentes arquitecturas y espectro.

8.2.1.3 Aplicación de Ondas Milimétricas a 5G.

Como se pudo observar en las secciones anteriores la aplicación de ondas milimétricas ofrece múltiples beneficios en el uso de mayor ancho de banda, sin embargo, estas deben ser sometidas a diversas mejoras para que puedan ser usadas en la tecnología:

- **Redes direccionales:** Sabiendo que las ondas milimétricas tienen deficiencias en aspectos como propagación, pérdida de trayectoria y dispersión, las redes deben contener en su arquitectura antenas direccionales con una alta ganancia de directividad con el fin de cumplir las medidas de transferencia en los datos.
- **Reutilización espacial:** La presencia de las altas pérdidas en la propagación y el uso de Antenas direccionales que cuentan con potencias bajas tienen como resultado la disminución de la interferencia, lo que da paso a la reutilización espacial de la frecuencia de transmisión lo que permite mejorar considerablemente la velocidad de los datos.
- **Redes con pequeñas células:** Las arquitecturas deben extenderse en forma de celdas pequeñas de esta manera logran proporcionar capacidades y velocidades altas en los datos lo que favorece las aplicaciones multimedia.

Figura 11: Espectro 5G



Fuente: 2.0, E. E. (2021). EMF Explained 2.0. Obtenido de <http://www.emfexplained.info/spa/?id=25916>

- Falla de conexión: Teniendo en cuenta que las ondas milimétricas presentan dificultad en la penetración de ciertos materiales y baja difracción, existe una alta probabilidad de que se presenten problemas de conexión en áreas con una alta densidad de población.
- Redes heterogéneas: Sabiendo que 4G ofrece confiabilidad y buenos servicios debido al uso de bandas frecuencias bajas, se busca aprovechar los beneficios de generaciones anteriores, por consiguiente, se hace uso de una arquitectura heterogénea 4G con ondas milimétricas logrando mayores velocidades especialmente en las aplicaciones de multimedia.

8.2.1.4 Descripción del Sistema.

En el artículo (Chen, W. C., 2014) el autor realiza una breve descripción del funcionamiento del sistema con el uso de ondas milimétricas, en donde se expone que para obtener una arquitectura con un buen rendimiento debe ser adoptada una arquitectura super heterodino. Su funcionamiento en la parte del transmisor consiste en que la señal modulada de banda base es convertida a una frecuencia intermedia, posteriormente es transformada en una frecuencia de ondas milimétricas, por otro lado, se tiene la parte del receptor la cual funciona de manera similar, ya que, la señal de frecuencia es convertida hacia abajo en una frecuencia intermediaria en una frecuencia para luego ser convertida en banda base para mayor procesamiento de señales digitales.

Las frecuencias intermedias se encuentran en un rango de valores de 70MHz a 6GHz, estas tienen la capacidad de soportar 5G sub-6GHz, adicional a esto cuentan con un reloj único con el fin de soportar la sincronización múltiples chips (MCS) para la agregación múltiple de frecuencias intermedias en una banda ancha de 100MHz.

8.2.2 *Beamforming.*

Beamforming se conoce como un proceso que cumple la función de dirigir las señales generadas desde una matriz de antenas transmisoras a una dirección angular deseada. (Buckley, 1998), cumple la función de enviar los mismos símbolos de conformación de haces sobre cada una de las antenas transmisoras con un factor de escala ponderado; Por otra parte, en el receptor, recibe las señales las cuales son combinadas de una manera específica haciendo uso de un factor se escala que permita ampliar las señales SNR (Signal-to-noise ratio).

La implementación de un sistema híbrido en formación de haces se basa principalmente en que el número de cadenas de RF (Frecuencias de radio) se encuentra condicionado por el número de flujo de datos que son transmitidos, en tanto que la ganancia de formación de haces y el orden de diversidad vienen dados por el número de elementos de antena. (Irfan Ahmed, 2018), por otra parte, para beamforming digital el procesamiento se hace mediante un procesador de señal digital, lo que ofrece ventajas como mayor número de grados de libertad que sirven para implementar algoritmos más eficientes; La arquitectura utilizada para la conformación de haces digital es compleja y hace uso de mayor cantidad de energía ya que esta necesita una cadena de frecuencias de radio separadas para cada una de las antenas. Para el proceso análogo de conformación de haces las piezas que hacen parte de la antena pueden ser utilizados mediante elementos de retardo de tiempo o realizando el desfase de la señal antes de la conversión ascendente de las frecuencias de radio. (Irfan Ahmed, 2018)

En conclusión, la finalidad de la implementación de beamforming híbrido es lograr la reducción del hardware y la complejidad del procesamiento de la señal lo que permitiría tener un mejor rendimiento. (Jia Liu, 2019)

8.2.3 MIMO Masivo.

La revisión bibliográfica realizada para la tecnología MIMO Masivo aplicada a 5G es desarrollada mediante la investigación de artículos científicos publicados en países como Colombia, Dinamarca, India, Estados Unidos, Ecuador y China, los cuales se han enfocado en el estudio de las tecnologías emergentes que permiten el funcionamiento de 5G, de esta manera se realizan pruebas y estudios que permitieron determinar retos y soluciones en MIMO masivo.

Teniendo en cuenta lo anterior como parte inicial se expone el significado conceptual de la tecnología MIMO masivo el cual consiste en una matriz antena la cual contiene cientos de

antenas, las cuales están al mismo tiempo y ranuras de frecuencia que les sirven a diversas terminales de usuarios, MIMO masivo es una tecnología envolvente de nueva generación que cuenta con energía eficiente, robusta y uso seguro y eficiente del espectro (A. Gupta, R. K. 2015).

El funcionamiento de esta tecnología depende de la multiplexación espacial que depende también de la información del estado del canal se encuentre en la estación base; En los sistemas MIMO convencionales la estación base realiza el envío de las formas de onda piloto a los terminales y en base a eso se realiza la estimación del canal, lo cuantifica y realimenta a la estación base (A. Gupta, R. K. 2015).

MIMO masivo trabaja en un ambiente MIMO multiusuario en donde UL y DL se conocen como canales de difusión o broadcast Channel, y canal de acceso múltiple (MAC), en MAC los flujos de datos de los usuarios se encuentran de manera independiente para cada antena receptora presente en la estación base, por consiguiente el sistema multiusuario para UP es equivalente al sistema MIMO mono usuario, al tenerse una sola antena en cada UE, por otra parte, para DL el manejo de los flujos de datos se realiza de manera diferente, en donde la estación base realiza la transmisión del flujo de datos multiusuario para realizar una difusión mediante los equipos de usuario, estos deben realizar el proceso de detección y decodificación para obtener la información. (Guefry Leider Agredo, 2015)

Esta tecnología es esencial para el despliegue de las bandas de frecuencias sub-6 GHz, mediante la formación y seguimiento de haz inteligente, esto habilita la posibilidad de reutilizar los sectores de células existentes y realizar la transmisión de potencia a las nuevas redes de macro células que cuentan con funcionamiento en frecuencias más altas. (Engobo, 2019)

8.2.3.1 Desafíos MIMO Masivo.

(Albreem, Juntti, & Shahabuddin, 2019) exponen los principales desafíos en el procesamiento de señales para la implementación de la tecnología MIMO masivo:

- Estimación de canal: Sabiendo que la estimación de canal es uno de los aspectos más relevantes de la tecnología en cuanto a rendimiento del sistema inalámbrico; Esta información debe ser exacta para ser enviada a la estación base con el fin de sacar el mayor provecho a MIMO masivo, teniendo en cuenta lo anterior se resalta un gran inconveniente y es que es complejo el proceso de obtención de estimación de canal para un gran volumen de canales como se tiene en este caso, adicional a esto la estimación de canal cuenta con una problemática que es la contaminación piloto lo que generaría en la transferencia que las células se contaminen entre sí.
- Pre - codificación: Este proceso se realiza en DL por la estación base, cuando se quiere enfatizar en el flujo de datos espaciales para la ubicación de los usuarios; En caso de los sistema MIMO convencionales se debe realizar una pre-codificación a pequeña escala lo que permite realizar modificaciones en amplitud y fase en la banda base, por consiguiente cada uno de los elementos que componen la antena requiere de transceptores lo que representa un aumento elevado en los costos para MIMO masivo. En algunas investigaciones se han planteado soluciones como implementación de pre - codificación envolvente constante lo cual disminuye gastos en hardware, pero aumenta el nivel de pérdida en el rendimiento, por otro lado, se propuso técnica de pre - codificación de sobres múltiples.

- Detección de señal: Como se mencionó anteriormente es importante obtener una estimación de canal perfecta y en tiempo real para la estación base con el fin de realizar pre – codificación en DL y detección en UL. Los filtros adaptados simples funcionan correctamente en ambientes de pocos usuarios, por otro lado, en canales que se encuentran correlacionados que buscan mejorar considerablemente la eficiencia espectral deben contar con herramientas más avanzadas, lo cual representa un problema para MIMO masivo ya que se debe tener un equilibrio en rendimiento y complejidad.

8.2.4 Comunicación Full – Dúplex

El sistema de comunicación full – dúplex cuenta con la capacidad de transmitir y recibir en la misma frecuencia al mismo tiempo, así mismo cuenta con el potencial de contar con una eficiencia espectral doble en la capa física debido a que se elimina una banda por división de tiempo para la transmisión UL y DL; Actualmente los estudios comprueban que el uso de FD es mucho más eficiente y soporta mayor cantidad de flujo de datos que los sistemas de comunicación half-duplex.

Teniendo en cuenta que se requiere baja potencia de transmisión con el fin de reducir el efecto SI y comunicaciones de corto rango la implementación de full – dúplex es idónea para sistemas como D2D y M2M. (Hassan, 2015), el sistema FD promete características como mejoras en el rendimiento y reducción de latencia en un 100% con respecto a los sistemas half – dúplex. (Nurul H. Mahmood, 2017)

8.2.4.1 Cancelación de auto interferencia (SI).

Una de las soluciones planteadas para la eliminación de SI (Self – interference) es la combinación de cancelación de antena, cancelación de interferencia RF y cancelación de interferencia digital; Para la implementación de full - dúplex en 5G existen dos fenómenos que requieren de máxima atención, la saturación en el receptor y auto interferencia no lineal; La saturación presente en el receptor puede solucionarse mediante la cancelación de la señal de interferencia en la radio frecuencia antes de que esta sea recibida en el amplificador de bajo ruido y por otro lado la interferencia no lineal se elimina mediante algoritmos de cancelación digital presentes en la banda base. (Vaca A. E., 2016)

Por otro lado, (Zhongshan Zhang, 2015) expone las técnicas comunes de eliminación de auto interferencia las cuales se dividen en eliminación pasiva y activa.

✓ *Eliminación pasiva SI*

Este método consiste en la atenuación de la señal de potencia aplicada por la trayectoria perdida por la separación física existente entre el transmisor y receptor de las antenas presentes en un mismo dispositivo; Este método cuenta con dos técnicas:

- **Supresión direccional:** Los dispositivos que son compatibles con la comunicación FD cuentan con una separación pequeña entre las antenas lo que hace posible la eliminación de SI frene la interfaz RF del receptor.
- **Separación de antena y cancelación de SI:** Consiste en aumentar considerablemente la señal de potencia presente entre el transmisor y receptor lo que permite obtener un método eficiente para eliminar SI.

✓ *Eliminación activa SI*

En algunas investigaciones realizadas previamente se desarrollaron diferentes pruebas que permitieron probar el funcionamiento de la eliminación activa de SI, las características utilizadas en dichas pruebas fueron rangos de comunicación FD de 6m y una transmisión típica de comunicación inalámbrica WiFi en donde se pudo comprobar que la interferencia disminuyó 50 y 40 dB. Esta técnica se encuentra dividida en dos:

- **Cancelación análoga:** Los algoritmos utilizados son basados en el dominio del tiempo, es decir, tiene la capacidad de hacer uso de SISO (Single Input Single Output) y MIMO (Multiple Input Multiple Output). Los métodos utilizados comúnmente basados en el dominio del tiempo suelen ser utilizados para determinar la fuga de SI para ser cancelada posteriormente, por otra parte, se tiene un modo adicional que hace uso del sistema MIMO en donde son aprovechadas las matrices con el fin de ofrecer un mayor rango de posibilidades para eliminación de SI con el uso eficiente de las antenas.
- **Cancelación digital:** Este método toma lugar teniendo en cuenta que la cancelación análoga no cuenta con 100% de efectividad y existe un SI residual después de dicho proceso el cual debe ser eliminado mediante cancelación digital; Uno de los métodos más comunes de cancelación digital es ZigZag el cual ofrece beneficios como mayor ganancia en los sistemas FD.

8.2.4.2 Protocolos de la capa MAC (Medium Access control)

Teniendo en cuenta que para la tecnología 5G se busca una mejora en la capa física, se ha realizado investigaciones (Achaleshwar Sahai, 2011), con el fin de implementar nuevos

protocolos en la capa MAC lo que hace referencia a un sistema FD-MAC esto con el fin de mejorar la eficiencia y rendimiento de la red y ampliar la accesibilidad a los nodos que conforman la infraestructura de red, todo esto haciendo uso de métodos como SBR (Shared random back-off) snooping y resolución de contenido virtual.

8.2.4.3 Pequeñas celdas 5G full – duplex

En esta sección se abarcan diferentes artículos científicos en donde se exponen las investigaciones desarrolladas con respecto a la comunicación full – dúplex implementado en la tecnología 5G pequeñas celdas, así mismo como los retos y soluciones planteadas frente a la eliminación de auto interferencia presente en el sistema de comunicación.

(Nurul H. Mahmood, 2017) exponen en el artículo científico titulado “Full Duplex Communications in 5G Small Cells” que los sistemas full dúplex cuentan con capacidades que permite la implementación en los sistemas celulares actuales habilitando puntos de acceso (AP) y equipos de usuario half-duplex; Adicionalmente se realiza una evaluación del rendimiento del sistema en donde es comparado el sistema full dúplex con el escenario half dúplex de referencia.

El uso de pequeñas celdas en la infraestructura 5G permite hacer uso de redes heterogéneas (Het-Net) en donde las macro células utilizadas comúnmente cumplen la función de ofrecer cobertura a los dispositivos mientras que las pequeñas celdas se encargan de funciones como alto rendimiento y descarga, sin embargo, uno de los inconvenientes de este sistema es su alto costo de implementación y altas interferencias. (Ejaz, y otros, 2020)

Las primeras pruebas desarrolladas fueron con respecto al rendimiento de celdas aisladas en donde se logró observar como primera instancia que la mejora del rendimiento y el incremento del tráfico son variable tienen una relación directamente proporcional, adicionalmente se encontró

que FD ofrece una mejora en el tiempo de transmisión y disminuye considerablemente la latencia, por consiguiente, FD es considerado una tecnología clave para los sistemas 5G.

Por otra parte, se encuentra el segundo escenario de pruebas el cual es realizado en una oficina interior, en donde se pudieron observar diferentes aspectos como:

- Las CDF (Cumulative density function) son similares en el sistema half- dúplex y full dúplex.
- En pruebas de bajo tráfico FD y HD cuentan con un rendimiento similar.
- FD tuvo un rendimiento de aproximadamente 15% (Tráfico medio) y 35% para tráfico alto en las transmisiones de red.

En conclusión, se logró evidenciar mediante las pruebas descritas anteriormente que FD cuenta con mejor rendimiento en condiciones de celda aislada y tráfico completo, por consiguiente, el sistema de comunicación FD puede ser implementado en 5G con una estructura de red diseñada de manera meticulosa.

8.2.5 División de la red 5G (Network Slicing)

Uno de los cambios más revolucionarios que presenta la tecnología 5G es la división de la red o 'Network slicing' ya que pretende ofrecer un nuevo sistema en donde cada dispositivo aproveche al máximo las necesidades que requiera dependiendo el servicio, es decir, sabiendo el amplio campo de aplicación de la tecnología cada uno de ellas tiene características específicas lo cual conlleva a que se tengan diferentes necesidades, como latencia, ancho de banda, entre otros, esto permite tener mayor eficiencia en la red y ampliación de operaciones de tipo comercial en una misma infraestructura física, todo esto se logra mediante la virtualización de la red.

En el artículo científico “Network Slicing and softwarization: A survey on principles, Enabling Technologies, and solutions” (Ibrahim Afolabi, 2018), exponen las tecnologías necesarias para habilitar los segmentos de red y los principales requerimientos en el que se basa esta división:

- Automatización: Permite la división de red sin necesidad de intervención manual.
- Aislamiento: Se encarga de garantizar la seguridad de la red para terceros, este abarca el plano de control y plano de usuario.
- Personalización: Garantiza que los recursos destinados para un usuario en específico cumplan con los aspectos de calidad en funcionamiento necesarios.
- Elasticidad: Esta función se encuentra directamente relacionada con los servicios asignados a cada porción de red con el fin de asegurar el servicio bajo los parámetros de condiciones de radio y red, cantidad de usuarios y servicios, área de servicio geográfica.
- Programabilidad: Permite a personas externas realizar un control en los recursos seleccionados para cada red (Nube y red) mediante el uso de API.
- Extremo a extremo: Encargado de asegurar el envío de datos desde el usuario final hasta el cliente, es decir, cumple una función específica en una división de red que funciona de extremo a extremo lo que brinda una capa de servicio superpuesta, lo que da como resultado una convergencia de servicios.

- Abstracción jerárquica: Aplicado a la segmentación de la red, en donde se utiliza un método estándar de manera jerárquica en cada nivel lo que permite tener un alcance más amplio.

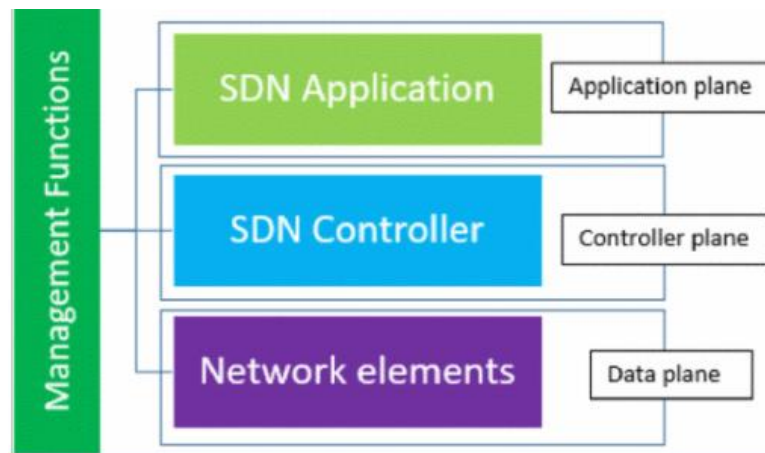
8.2.5.1 SDN (Software Defined Network).

Las redes definidas por software buscan como principal objetivo la separación del plano de control y usuario con el fin de iniciar a implementar redes heterogéneas programables para de esta manera llegar a una rápida evolución; El plano de control cumple funciones esenciales como gestión y configuración de la red, ya que este cuenta con un panorama global de toda la red (Sahrish Khan Tayyaba, 2017).

La arquitectura SDN se encuentra conformada por 3 capas:

- i. Capa 1: Plano de datos: Cumple la función de reenvío de datos mediante dispositivos tales como enrutadores e interruptores.
- ii. Capa 2: Plano de control: Administra la red y determina las normas para el manejo de flujo de datos provenientes desde la primera capa.
- iii. Capa 3: Aplicación: Es la encargada de manejar todas las necesidades de los usuarios, esta tiene conexión a la segunda capa mediante API (Application Programming Interfaces).

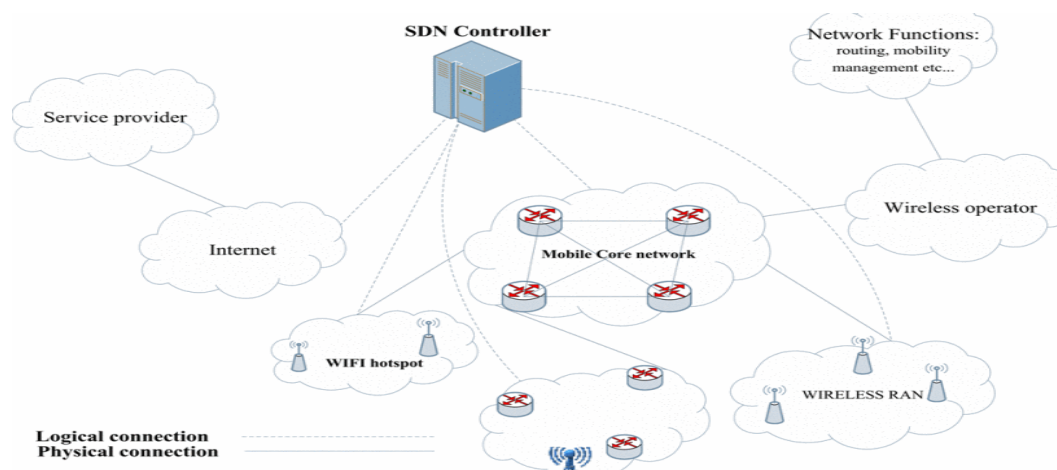
Figura 12: Arquitectura SDN



Fuente: Muhammad Nauman Irshad, L. D. (2019). A Hybris Solution of SDN Architecture for 5G Mobile Communication to Improve Data Rate Transmission. China: IEEE.

(Wei Wang, 2016) en su artículo científico exponen la implementación de SDN en redes inalámbricas, en donde la administración de la red es realizada por el controlador centralizado (Capa 2) obteniendo como resultado altas velocidades de datos y baja latencia; La gestión del plano de datos es hecho mediante una interfaz de programación y protocolos inalámbricos como WiFi y LTE. (Sahrish Khan Tayyaba, 2017)

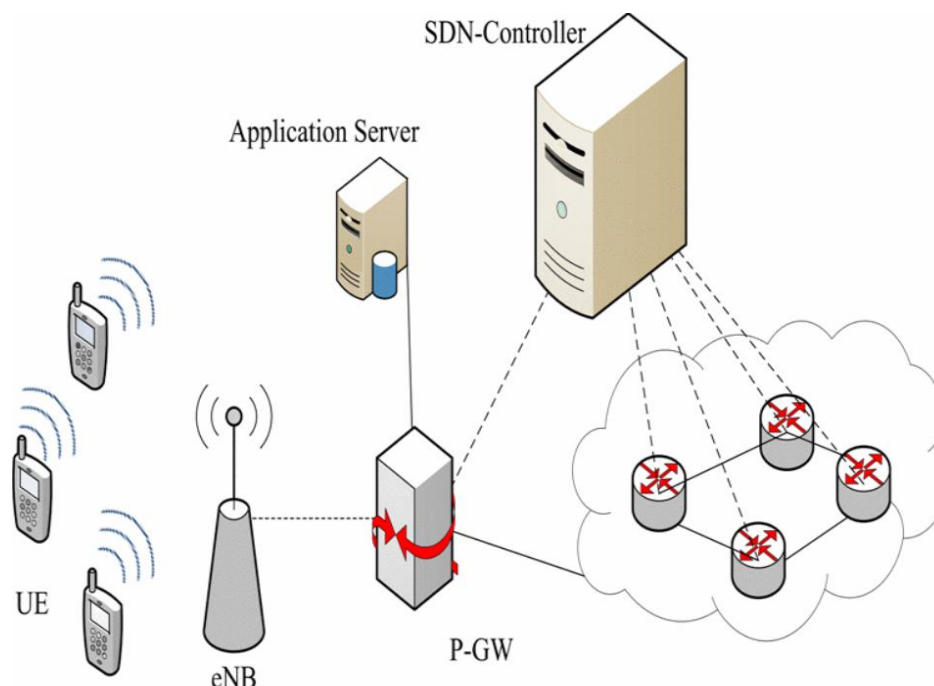
Figura 13: Arquitectura redes inalámbricas basadas en SDN.



Fuente: Sahrish Khan Tayyaba, M. A. (2017). 5G Cellular network integration with SDN: Challenges, issues and beyond. Pakistan: IEEE.

Por otra parte, se tiene la arquitectura celular basada en el sistema SDN; La tecnología 5G busca la implementación de QoS (Quality of service) en redes hiperconectadas mediante dominios de red; (Sahrish Khan Tayyaba, 2017) mencionan en su artículo científico que el elemento principal para que las redes celulares funcionen correctamente es una red de acceso inalámbrico que cuente con características como espectro variable y una red heterogénea, es decir, compatible con WIFI, LTE, WiMAX y red 3G/4G. Para la red 5G específicamente en los módulos M2M se necesita de implementación de tecnologías que ya existan, lo que implica el aumento de retos en el despliegue de 5G.

Figura 14: Modelo de red celular



Fuente: Sahrish Khan Tayyaba, M. A. (2017). 5G Cellular network integration with SDN: Challenges, issues and beyond. Pakistan: IEEE.

Una de las principales problemáticas presentadas para el despliegue de 5G son los costos que esto representa debido a las tecnologías emergentes, cambios en infraestructura, entre otros; Haciendo referencia a SDN como una solución para mayor flexibilidad y economía en la tecnología 5G, (Muhammad Nauman Irshad, 2019) exponen los puntos críticos de la implementación de dicha tecnología , así como el análisis de su infraestructura con el fin de que cumpla las expectativas específicamente en el aspecto de transmisión de datos, el estudio realizado se dará a conocer brevemente a continuación:

- Arquitectura híbrida SDN: Para cumplir todos los requerimientos de funcionamiento de la tecnología 5G se utilizaron diferentes tecnologías como MIMO masivo, Multi-RAN Architecture los cuales tienen un

principio de funcionamiento basado en diferentes nodos, sin embargo, dichas implementaciones no resultaron ser suficientes para cumplir con la velocidad de los datos. Algunas de las tecnologías y métodos planteados para un modelo híbrido en el artículo son:

- Plano de datos y control separado
- Virtualización y funciones de red
- Control programático de la red
- Protocolos de configuración basados en estándares
- Mecanismo unificado para recursos de hardware y de software

El modelo expuesto por el autor es llamado ONU el cual contiene en su infraestructura una integración de red óptica y red inalámbrica; Este modelo cumple la función de conectarse a las estaciones base para luego ser desplegada a las antenas 5G. Como resultado se obtuvo un aumento en la velocidad de datos en 5G híbrida basada en SDN en comparación a la velocidad manejada en LTE.

Actualmente se han realizado investigaciones referentes a la implementación de SDN a la red 5G, sin embargo, los modelos propuestos hasta ahora son basados en la adaptación de esta tecnología a LTE para después ser mejorado e implementado a 5G, (Abdulaziz Abdulghaffar, 2021) propone un diseño SDN limpio basado exclusivamente en la arquitectura 5G, en donde se puede encontrar que este hace uso de todas las funciones de red sobre el controlador SDN obteniendo un comportamiento de aplicación, por otro lado el plano de datos se incluye en la infraestructura como un conmutador SDN. Todo este sistema hace uso del protocolo OpenFlow lo que permite que existe interoperabilidad entre los dispositivos que conforman la red. Este modelo fue puesto a prueba mediante simuladores de red en Python con el fin de evaluar su rendimiento en aspectos como procesamiento en el controlador, función de red, procesamiento del

conmutador, tiempo de procesamiento de la estación base y retardo de propagación; Como resultado se obtuvo algunos inconvenientes como cuello de botella presente en la estación base, por otro lado al realizar un comparativo de la red 5G tradicional y el modelo propuesto se puso a observar que el segundo obtuvo un mejor rendimiento en aspectos como comunicaciones de extremo a extremo, en conclusión a pesar de que el sistema arrojó resultados favorables frente al funcionamiento, hay algunos aspectos que no se tomaron en cuenta como la escalabilidad de los controladores por lo tanto es un factor que sigue en fase de desarrollo para la tecnología 5G con el fin de solventar inconvenientes como QoS.

(Catherin Nayer Tadros, 2020) en su artículo científico propone una arquitectura llamada gestión de controladores lógicamente centralizada-distribuida físicamente (LC-PD); Existen 3 arquitecturas diseñadas para el plano de control SDN las cuales son centralizado, distribuidos y LC-PD; El plano de control centralizado consiste en el uso de un solo controlador que cumple la función de administrar toda la red, esta arquitectura cuenta con ciertas ventajas como por ejemplo que al ser un solo controlador tiene una visión general de toda la red, sin embargo al hacer uso de un solo controlador que pueden presentar diversas fallas y problemas de congestión y escalabilidad, por otro lado se encuentra la arquitectura distribuida la cual a diferencia de la anterior cuenta con múltiples controladores denominados dominios SDN lo que permite tener escalabilidad en la red, sin embargo, cuenta con deficiencias como distribuciones de carga y debe estar en constante sincronización debido a la carga tan alta de datos a la que se encuentran sometidos los controladores, adicional a esto la implementación de esta arquitectura representa un incremento considerable en costos de implementación, finalmente se tiene la arquitectura LC-PD la cual presenta características similares a las arquitecturas anteriores, ya que hace uso de los beneficios de utilizar múltiples controladores juntamente con el uso de un solo controlador, dicho esto en otras palabras todos los controladores presentes tienen una visión general de la red por lo

tanto cuentan con sincronización de datos, esta ofrece beneficios tales como reducción del tiempo de flujos de datos para cada solicitud.

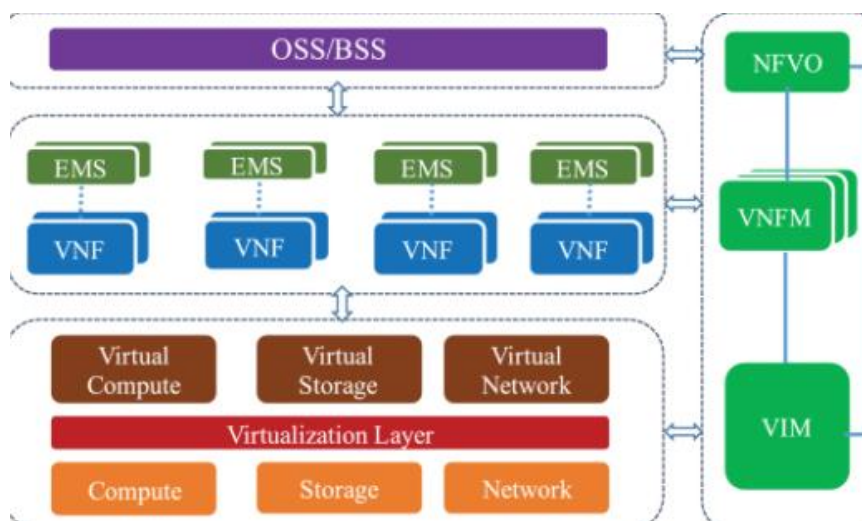
Teniendo en cuenta lo anterior se realizaron pruebas de simulación para la arquitectura LC-PD en donde se pudo observar mejoras ya que presenta mayor rendimiento de la red en comparación a las otras arquitecturas, esto ofrece diferentes ventajas en redes inalámbricas utilizadas para casos de uso de 5G como IoT, red móvil y sensores.

8.2.5.2 NFV (Network Function Virtualization)

La virtualización de funciones de red es una funcionalidad que tiene como objetivo reemplazar dispositivos de hardware que conforman la red como routers y firewalls con dispositivos de red basados en software que trabajan como máquinas virtuales en los servidores. (Santos, 2018), al hacer uso de NFV cada una de las funciones de la red se usan en máquinas virtuales.

NFV es una tecnología adicional a SDN la cual ofrece beneficios no solo a nivel de infraestructura, sino también en costos debido a que funciona con COTS (Servidores comerciales) de gran volumen. Una de las principales aplicaciones de NFV es el núcleo de paquete virtual evolucionado (vEPC), en donde EPC se ejecuta en COTS en lugar de hardware propietario, esto da como resultado beneficios como tales como núcleo flexible, robusto y manejable. (Lusani Mamushiane, 2017), por otra parte, se tiene otro caso de uso importante para NFV el cual es la implementación de esta en C-RAN ya que cumple la función de reunir todos los recursos de procesamiento en la banda base para después realizar el proceso de centralización de estos en un hardware.

Figura 15 : Arquitectura NFV



Fuente: Van-Giang Nguyen, A. B.-J. (2017). SDN/NFV-Based Mobile Packet Core Network Architectures: A Survey. Iran: IEEE.

Como se puede observar en la figura 13 la arquitectura se encuentra conformada por NFVO (NFV MANO) el cual es el encargado de administrar VNF (VNFM) y NFVI mediante un administrador de infraestructura virtualizada (VIM). (Van-Giang Nguyen, 2017)

Como ya se ha mencionado antes NVF es un complemento de SDN, debido a que esta tiene la capacidad de virtualizar los controladores, de igual manera SDN ofrece beneficios a NVF como conexión a redes programables con el fin de optimizar el tráfico, a pesar de que estas ofrecen beneficios estas pueden operar de forma independiente sin afectar en ningún aspecto, sin embargo al implementarlas en conjunto ofrecen mayor rendimiento y flexibilidad en la red, características necesarias para la tecnología 5G.

- EPC basada en NFV: Todos los elementos presentes en la arquitectura EPC convencional son llevados mediante plataformas de hardware para

posteriormente ser incluidos en dispositivos de software ejecutados en máquinas virtuales o en la nube. Se han planteado algunas arquitecturas en donde la infraestructura sea completamente virtualizada o en otras en donde solo se aplique virtualización en el plano de control (MME y HSS), en caso del plano de usuario algunos componentes no pueden ser virtualizados como por ejemplo (SGW y PGW) por algunos requerimientos en el procesamiento de datos. (Van-Giang Nguyen, 2017)

(Alcardo Alex Barakabitze, 2020) expone mediante una investigación científica los beneficios que conlleva la implementación de SDN/VFN y así mismo los desafíos que requieren de atención antes de la implementación de dicho sistema en la tecnología 5G; Dichos desafíos serán expuestos brevemente a continuación:

- Intercambio y división de red en 5G: Uno de los beneficios que ofrece la implementación de SDN/VNF es la funcionalidad de diferentes servicios los cuales pueden ser utilizados con una infraestructura en común, por otro lado se planea la idea de iniciar proceso de compartir recursos con el fin de que el uso de la red sea más eficiente, sin embargo la implementación dichos métodos exige el uso de algoritmos de programación inteligentes, adicional a esto es importante identificar las problemáticas que puedan causarse con la ubicación de NF dentro de los segmentos de red, así mismo como la división y seguridad de los mismos.
- Orquestación y gestión de segmentos de un extremo a otro: Teniendo en cuenta que se tendría una migración de un red basada en hardware a software, se requiere un cambio en el manejo y administración de la red, a pesar de que se han hecho diferentes investigaciones y avances para adaptar a la infraestructura a este cambio y lograr resultados positivos, se presentan retos en cómo se debe hacer el

cambio de alto nivel del servicio al segmento de red, todo este cambio implica el uso de lenguajes de corte de descripción de recursos y servicios determinados que tengan la posibilidad de usar KPI, por otro lado uno de los casos de uso de la tecnología 5G es E2E son funcionales en 5G debido a los marcos que contiene NFV MANO, sin embargo el uso eficiente de los recursos sigue siendo una preocupación para cumplir los requerimientos de los casos de uso,

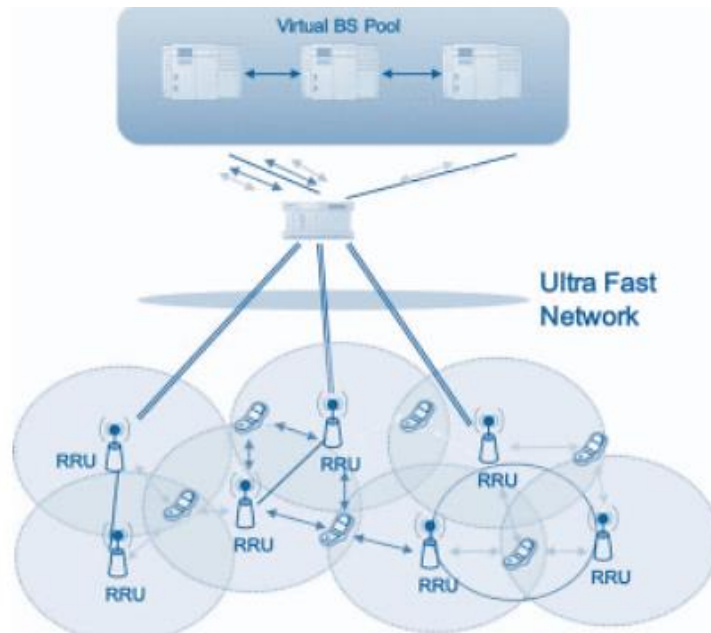
- Desafíos de seguridad y privacidad en la división de redes 5G: La acción de poder compartir recursos entre los segmentos generan grandes problemas de seguridad esto sabiendo que cada segmento maneja diferentes servicios, por consiguiente, cada servicio debe contar con políticas y manejo de privacidad diferentes.
- Desafíos de la virtualización RAN en la red 5G: La virtualización de RAN se encuentra en una fase de inicio, ya que la virtualización de la red 5G requiere de diferentes retos como separación de funciones de recursos de radios, mejora en procesamientos de multiplexación, personalización de servicio de red RAN, entre otros.

8.2.5.3 C – RAN

Se busca mejorar la red de acceso de radio distribuida (RAN) habitual presente en las generaciones anteriores mediante la virtualización de esta lo que se denominaría Cloud-RAN, dicho cambio presentaría mejoras considerables en la capacidad de dispositivos conectados, rendimiento, capacidad y latencia. C-RAN surge con el fin de solucionar problemáticas presentadas en RAN como la capacidad en el procesamiento de las estaciones bases las cuales solo pueden ser utilizadas por los usuarios, por otro lado, las técnicas implementadas para la

comunicación multipunto (CoMP) pueden causar interferencias, altos costos de implementación y falta de conjunción entre las estaciones base.

Figura 16: Arquitectura C-RAN



Fuente: Liljana Gavrilovska, V. R. (2018). *Flexible C-RAN: Radio technology for 5G* . Serbia : IEEE.

Alguno de los beneficios expuestos por (Ejaz, y otros, 2020) para la implementación de C-RAN son ahorro de costos ya que esta cuenta con un mantenimiento centralizado y menos consumo de energía, rendimiento mejorado de la red, software flexible, permitiendo la conexión de mayor dispositivos y eficiencia en las redes inalámbricas.

Asignación de recursos C-RAN

- Asignación de usuario: Uno de los campos de investigación que se encuentran actualmente es la asignación de usuarios de manera eficiente, ya que se debe

escoger un grupo determinado de usuarios en un tiempo específico con el objeto de mejorar el rendimiento de la red.

- Selección RRH (Remote Radio Heads): La función de los RRHs en la infraestructura de la red es funcionar como emisor y receptor de la señal, sin embargo, el proceso de selección de estos es una tarea compleja la cual afecta directamente en aspectos como la eficiencia espectral y energética presente en la red.
- Rendimiento: C-RAN tiene la capacidad de adoptar diferentes técnicas con el fin de garantizar el rendimiento de la red las cuales son codificación de la red, formación de haces y gestión de energía.
- Espectro: Con el fin de mejorar la eficiencia en el funcionamiento de C-RAN se debe hacer uso correcto del espectro con uso de bandas licenciadas y no licenciadas en los RRHs, una de las tecnologías emergentes aplicables a este campo es mmWave, sin embargo, la gestión del espectro es clave para el aprovechamiento de esta.
- Asignación de energía: Es un aspecto muy relevante que requiere bastante atención ya que en la infraestructura 5G los RRHs se encuentran posicionados con distancias cortas lo que abre las puertas a presencias de interferencias.

Los principales desafíos presentados por (Gavrilovska, Rakovic, Ichkov, Todorovski, & Marinova, 2018) para la implementación de C-RAN en la tecnología 5G.

- Red de transporte: La implementación de C-RAN representa un incremento exponencial de datos enviados hacia la nube, se prevé que es 50 veces mayor de lo que es habitualmente entre los enlaces de comunicación presentes entre RRU (Radio Remote Unit) y BBU (Centralized base band unit).

Tabla 8: Velocidades de bits RRU y BBU

Tecnología RAN	Tasa de bits
GSM	25.6 Mbps
TD – SCDMA	330Mbps
LTE	2.5 Gbps
LTE-A	13.8 Gbps

Fuente: Aleksandra Checko, H. L. (2015). *Cloud RAN for Mobile Networks - A Technology Overview*. Dinamarca: IEEE.

- **Diseño BBU:** Entre los principales beneficios que ofrece C-RAN es la adaptabilidad con la que cuenta frente a diferentes escenarios, con el fin de aprovechar todas estas funciones es necesario que las BBU tengan la capacidad de agruparse y trabajar de manera coordinada. Existe un campo amplio de investigación en donde se abarca temas como uso eficiente de la energía y excelente rendimiento, ya que las estaciones C-RAN deben ser escogidas de tal manera que la cantidad de unidades RRU/BBU activas sean optimizadas; Se han propuesto algunos modelos en investigaciones los cuales exponen algoritmos que permiten compartir recursos y un sistema de mapeo para C-RAN.
- **Virtualización:** Como ya se ha mencionado anteriormente uno del plus de C-RAN es la adición de la virtualización en su infraestructura, esta ofrece 3 campos de aplicación para las redes, i) virtualización de redes inalámbricos, ii) virtualización de hardware, iii) virtualización de recursos.

8.2.6 Seguridad Tecnología 5G

Sabiendo que 5G llega con un impacto fuerte en la sociedad, no solo se deben abarcar temas de funcionamiento, tecnologías emergentes, soluciones, entre otros, sino también aspectos en la seguridad y privacidad del usuario, ya que 5G cuenta con un amplio portafolio de servicios los cuales elevan de manera monumental los riesgos y desafíos que deben estudiarse frente a temas de seguridad.

8.2.6.1 Seguridad en 4G.

Como se pudo observar en los capítulos anteriores la arquitectura de 4G específicamente LTE-A esta conformado por dos componentes principales que permiten su funcionamiento EPC y E-UTRAN; Para estos sistemas 3GPP estableció un grupo de características de seguridad que son: i) Seguridad de acceso, ii) Seguridad de dominio de red, iii) Seguridad de dominio de usuario, iv) Seguridad de dominio de aplicación y por último v) Visibilidad y configurabilidad de la seguridad. (Ahmad, y otros, 2019)

Algunas de las especificaciones de 3GPP se centraron en la seguridad de la E-UTRAN, esto debido a que existen redes que no son de confianza, y UE debe hacer un paso de datos lo que representa una alta vulnerabilidad, adicional a esto se implementó sistema de claves jerárquicas con el fin de asegurar el paso en LTE. (Ahmad, y otros, 2019)

8.2.6.2 Seguridad en 5G.

(Ahmad, y otros, 2019) en su artículo expone los desafíos y soluciones en la tecnología 5G, así mismo como los desafíos en cuanto a seguridad en las tecnologías emergentes los cuales serán abarcados más adelante; Los retos en seguridad se miden teniendo en cuenta la arquitectura de red, por consiguiente, en análisis se realiza es 3 partes fundamentales:

- Redes de acceso
- Red de retorno
- Red central

8.2.6.2.1 *Redes de Acceso.*

Teniendo presente las características expuestas anteriormente sobre la tecnología 5G uno de los desafíos en la seguridad son los casos de usos que esta presenta y los requerimientos en cuanto a latencia, movimiento, etc.; En las redes ya existentes (LTE) existen bastantes deficiencias en el campo de la seguridad que no se han solucionado por ejemplo, dicha infraestructura es vulnerable a ataques mediante internet en los nodos (eNB), ahora con la llegada de 5G la cual implementa la unión de dispositivos IP dichas vulnerabilidades incrementan en un mayor porcentaje.

Se espera que 5G cuente con un alto número de dispositivos conectados en la red, por consiguiente, uno de los problemas se presenta en el número elevado de nodos que realizarán proceso de envío y transmisión de datos de manera simultánea, los ataques DoS son el principal problema; A pesar de que se han establecido medidas en la seguridad de la capa física estas no resultan suficientes para la capa física avanzada que presenta la infraestructura 5G.

Una de las soluciones planteadas para la seguridad en la capa física (Mukherjee, Fakoorian, & Swindlehurst, 2014), es hacer uso del manejo aleatorio que presenta en el ruido y los canales de comunicación con el fin de incorporar un control en la cantidad de información que puede ser descifrada por receptores no autorizados; En general la soluciones propuestas hasta ahora se basan en el uso de OFDM que permita realizar variaciones en la señal con el fin de incrementar la seguridad, y en dado caso que se presente un ataque sea un proceso más complejo.

8.2.6.2.2 Red de Retorno.

Las redes de retorno (Backhaul) cuentan con componentes de red y canales de comunicación presentes entre la estación base y red central; Esta a pesar de que también presenta vulnerabilidades no son tan relevantes como las presentes en la red de acceso, en este caso esta red se encuentra conformada por radio y el centro de la red, es decir, la seguridad debe implementarse en componentes como eNB y MME presentes en la red central.

Para el sistema LTE la metodología utilizada para disminuir el riesgo de seguridad en backhaul fue la implementación de túneles (GTP) basados en IPSec (Internet Protocol Security), estos se implementaron en la interfaz X₂ presente entre eNB y la interfaz S₁ entre eNB y MME. (Raza, 2013), sin embargo esto representa un desafío enorme ya que dichos túneles requieren de configuración en el momento que UE está activo o inicia sesión en un servicio diferente, esto representa un problema especialmente en IoT ya sé que se tendrán gran cantidades de dispositivos conectados en diferentes servicios lo que podría generar ataques DoS.

8.2.6.2.3 Red Central.

Como ya se ha mencionado anteriormente la red central de la tecnología 5G hace uso de tecnologías como NFV/SDN; Uno de los pilares de vulnerabilidad es la entrada masiva de protocolos IP presentes en el plano de control y de usuario, el aumento de servicios y dispositivos conectados lleva a tener niveles altos de volumen de datos con fines de señalización, es decir, los procesos para activación de portadores, actualización de ubicación y autenticación.

En comparación con LTE los cambios más relevantes que presenta la tecnología 5G son: la separación de plano de control y usuario, segmentación de la red, arquitectura de red basada en servicios e inter networking de acceso flexible sin uso de 3GPP, las tecnologías que permiten

todas estas funcionalidades son NFV/SDN las cuales presentan diferentes riesgos de seguridad que serán expuestos más adelante; Por otra parte (Cao, Yu, Ma, & Gao, 2019) presenta un modelo para realizar autenticación en el campo de IoT, consiste en agrupar los dispositivos IoT que presenten características similares generando un dispositivo cabeza del grupo que se encargue de añadir información confidencial de IoT para posteriormente ser enviada a la red central y luego verificar la información, este sistema obtuvo buenos resultados en cuanto a conservación de la privacidad de identidad, disminuir carga de autenticación y señalización de red central.

8.2.6.2.1 Seguridad en tecnologías emergentes

A) MIMO masivo

Es una de las tecnologías con mayor relevancia para el despliegue de la tecnología 5G, sin embargo, cuenta con ciertos problemas de seguridad como escucha pasiva y activa. (Wu, y otros, 2018) dan a conocer los diferentes escenarios presentados en MIMO masivo que compromete considerablemente la seguridad.

- Escenarios de escucha pasivo: Se presenta cuando un intruso pasivo trata de decodificar la información que se envía a un usuario en específico; con el fin de mejorar esto se han planteado diversos diseños en los cuales se plantea ocasionar a propósito ruido artificial y pre-codificación en el filtrado con el fin de dañar el canal del espía y brindarle protección al usuario.
- Escenarios intrusos activos: En este ítem (Wu, y otros, 2018) expone que generalmente en los trabajos realizados con respecto a la seguridad de la capa física se toma por sentado que el transmisor conoce completamente el canal del usuario, sin embargo no se tiene en cuenta aspectos como el proceso de obtención del canal; Este proceso se da cuando los usuarios envían señales piloto a la

estación base con el fin de lograr la estimación de canal para la transmisión de enlace siguiente, en este proceso el intruso tiene la capacidad de enviar las mismas señales e iniciar un ataque en esta fase lo que le permite tener mayor capacidad de escucha en el canal, esto se conoce como contaminación de piloto.

Algunas de las soluciones planteadas para la mitigación de este problema es la creación de claves seguras para MIMO masivo, por otro lado, se tiene un diseño en donde se plantea el uso de pre-codificación de filtros y generación de ruido artificial emparejados.

B) SDN

Como ya se mencionó en secciones anteriores la arquitectura SDN se encuentra conformada por 3 capas y tiene como objetivo centralizar las funciones de red, dicha centralización genera vulnerabilidades frente a los ataques DoS. (Ahmad, y otros, 2019) señalan los principales desafíos que enfrenta la seguridad en SDN dividido en tres categorías, seguridad en aplicaciones, seguridad en controladores, seguridad en el plano de datos y seguridad en las interfaces.

- Aplicaciones SDN: El funcionamiento general de SDN se basa en el manejo de todas las funciones mediante aplicaciones, es decir, en el momento de darle acceso a una aplicación dañina para el sistema puede generar daños serios en la red. En la literatura exponen diferentes investigaciones en donde se plantea recursos para la mitigación de ataques en las aplicaciones SDN, por ejemplo, (Wen, Chen, Hu, & Shi) proponen un sistema llamado PermOF el cual permite la autenticación de las aplicaciones, así como sus autorizaciones de accesibilidad a las diferentes funciones.

- Controladores: La infraestructura diseñada para SDN basa la toma de decisiones en el controlador comportándose este como el ente principal, por lo tanto, un ataque en el controlador podría tener grandes afectaciones en la red; Las principales vulnerabilidades a la que se encuentran expuestos es a ataques DoS y DDoS, por otra parte, en la relación existente entre controlador – aplicación tampoco se cuenta con medidas de seguridad óptimas para evitar ataques, estas deben contar con planes de seguimiento en el uso de recursos y autorizaciones en el uso de las aplicaciones. Con el fin de mejorar la seguridad en los controladores se diseña un controlador SE-Floodlight (Security-Enhanced Floodlight, 2018) el cual implementa medidas de seguridad entre las aplicaciones y plano de datos con el fin de verificar el flujo de datos que arrojan las aplicaciones.
- Plano de datos: Se encuentra conformado por dispositivos que se encargan de realizar reenvíos de las tablas de flujo, dichas tablas son utilizadas por los controladores para establecer normas en el reenvío del flujo de datos. Las tablas de flujo cuentan con un límite de almacenamiento, por consiguiente, en el momento que sean atacadas con flujos maliciosos estos cumplen la función de llenar las tablas para saturar el sistema, siendo esto un gran inconveniente ya que los controladores no cuentan con ningún sistema de identificación que le permita detectar un flujo bueno o malo. Teniendo presente que el principal inconveniente en el plano de datos son las aplicaciones ya que estas tienen la facultad de cambiar la configuración establecida previamente en el plano de datos, en la literatura se encuentran dos soluciones planteadas las cuales generan un control sobre las aplicaciones para que de esta manera no sean cambiadas las reglas FortNox y FlowChecher. (Porrás, y otros, 2012) (Al-Shaer & Al-Haj, 2010)

- Interfaces: El sistema cuenta con dos interfaces esenciales, interfaz con límite norte entre controladores y aplicaciones y por otro lado la interfaz límite sur entre controladores y conmutadores; La primera cuenta con un alto rango de desafíos ya que no cuenta con interfaces estandarizadas, por otro lado, la segunda cuenta con un uso opcional ya que utiliza métodos de configuración complejos, dejando esto como resultado un vacío de seguridad entre las dos interfaces.

C) NFV

Los desafíos de seguridad en NFV se presentan en cuatro aspectos diferentes (Ahmad, y otros, 2019):

- Sistemas virtuales: Es importante resaltar que la seguridad implementada en los dispositivos físicos no es la misma que debe implementarse en sistemas virtuales, teniendo en cuenta que NFV permite la migración de servicios y funciones de un lugar a otro lo que se considera como una ventaja y desventaja en el campo de la seguridad, debidos a que cada escenario presente en el sistema cuenta con un sistema de seguridad específico según su funcionamiento, al realizar el proceso de migración se genera una vulnerabilidad ya que puede que al lugar que llegue no cuente con el sistema de seguridad deseado. Teniendo en cuenta lo anterior en la literatura se han planteado sistemas que funcione como administrador de políticas en los entornos dinámicos de NFV, de esta manera cada usuario establece los requisitos de seguridad que necesita y estos se cumplirán dentro de la red. (Yang & Fung, 2016) (Basile, Pitscheider, Valenza, & Vallini, 2015)
- Hipervisores: Cumplen la función de dar funciones de la red a instancias lógicas o en algunos casos a hardware físico que hacen parte de la red, es decir, es el

encargado de modificar todas las características en las máquinas virtuales, una de las principales vulnerabilidades es el secuestro de este, abarcaría problemas como daño a un segmento de red, ataque DoS en máquina virtual, entre otros. Algunas de las soluciones planteadas frente a los posibles ataques que pueden sufrir los hipervisores es disminuir considerablemente la exposición de estos a las máquinas virtuales; La implementación de usuarios SDN es una de las soluciones más prometedoras ya que esta permite tener a los usuarios su control y plano de datos.

- **Desafíos en la dinámica:** El uso de máquinas virtuales trae grandes ventajas las cuales también son tomadas como desventajas para la implementación en 5G, ya que al ser virtuales pueden cambiar de lugar, modificarse, eliminar o crear, lo que genera un problema en el momento de tener una máquina virtual mala ya que su rastreo es más complejo con el uso de hipervisores; Para mitigar esto se ha planteado el uso de la flexibilidad que ofrece NFV de tal manera que se aislen los elementos de la red que se encuentran comprometidos, esta solución requiere de mayor investigación.
- **MVNO (Operadores de redes virtuales móviles):** Se esperaría que los dueños de las infraestructura de red den a conocer sus API en las plataformas de hardware de su dominio con el fin de que personas externas puedan hacer uso de sus servicios, esto conlleva grandes problemas ya que cada proveedor de servicio cuenta con políticas de seguridad diferentes lo que da paso a problemas de sincronización, de igual manera con el uso de máquinas virtuales será más complejo el tema de facturación ya que no se tendrá un panorama tan amplio del consumo de los recursos; Las soluciones planteadas en el campo de MVNO son pocas y las que se encuentran en la literatura se basan en el mejoramiento de la seguridad de NFV o el uso de NFV basadas en SDN.

D) Computación en la nube

El uso de computación en la nube permite tener mayor flexibilidad y datos en tiempo real; En el caso de 5G es utilizado principalmente en la RAN ofreciendo sistemas de baja latencia, mayores anchos de banda y mejor experiencia de usuario. Los desafíos frente a la seguridad en la computación en la nube están dados por (Ahmad, y otros, 2019):

- Amenazas de virtualización: El uso de máquinas virtuales es fundamental para el funcionamiento de computación en la nube, por consiguiente, esto da paso a ataques DoS y tratamiento nocivo en las máquinas virtuales; Las herramientas desarrolladas para la mitigación de estas amenazas han sido desarrolladas por empresas tales como IBM y XEN, dicha herramienta consiste en la migración de las medidas de seguridad utilizados en los equipos físicos a las máquinas virtuales, por otro lado XEN desarrolló un tipo de hipervisor que permite aislar las máquinas virtuales con el fin de evitar el traspaso de información. (Lindstrom, 2008) (Otros, 2005)
- Amenazas de seguridad del sistema ciber físico basados en la nube: Estos sistemas se caracterizan porque llevan a la virtualización componentes que hacen parte de la red mediante nubes ciber físicas; Algunos de los ataques realizados en este campo son realizados en protocolos de transferencia de hipertexto (HTTP) y lenguaje de marcado extensible (XML); Para mitigar estos ataques se planteó la solución de establecer control en el consumo de recursos computacionales y las solicitudes que llegan al sistema, teniendo en cuenta esto, se propuso un sistema llamado ENDER el cual tiene la capacidad de identificar un sistema legítimo y

uno ilegítimo de esta manera mediante el algoritmo de configuración es eliminado para evitar daños mayores en el sistema. (Chonka & Abawajy, 2012)

- Intrusión en la nube: Los ataques presentes en la nube afecta directamente la disponibilidad y confidencialidad de los servicios, el daño de este ataque depende de la calidad del intruso; Se han diseñado diferentes IDS (Sistema de detección de intrusiones) las cuales cumplen la función de controlar todas las actividades llevadas a cabo en la nube, actualmente existen diversas opciones de IDS relacionadas con los servicios en la nube.
- Ataques internos: Hacen referencia a las personas que trabajan y tienen acceso en las instalaciones de los proveedores de servicio los cuales pueden darle un mal manejo a datos de usuario.

E) División de red (Network Slicing):

(Mathew, 2020) da a conocer en su artículo científico los principales desafíos de la división de redes y soluciones planteadas hasta ahora; Con la llegada de 5G algunas tecnologías están obligadas a evolucionar, otras por otro lado son nuevas y su campo de estudio y aplicación se encuentran en desarrollo, network slicing es una de ellas, presentando diferentes retos en el campo de la seguridad y la implementación de la red de acceso; La segmentación de red presenta diferentes vulnerabilidades frente a los ataques de denegación de servicio (DoS), suplantación de identidad e inyección de tráfico, por otro lado, como se mencionó anteriormente uno de los desafíos también resulta ser la correcta implementación de RAN con el fin de lograr un aislamiento de red, una de las propuestas ya descritas, es el uso de ondas milimétricas y celdas pequeñas para lograr dicho aislamiento, sin embargo, estas tecnologías no cumplen con las expectativas deseadas.

A raíz de las problemáticas planteadas en el campo de la seguridad para la división de red se han llevado a cabo diferentes investigaciones con el fin de mitigar dichos riesgos, se da a conocer que la segmentación de la red en sí, puede utilizarse en pro de la seguridad debido a que al estar dividida cada segmento puede aislarse de tal manera que cada una de ellas puede contener sus medidas de seguridad, así mismo al momento de presentar un ataque a un segmento al estar aislados no afectaría directamente a los demás, por otro lado la infraestructura establecida para la tecnología 5G cuenta con la capacidad de transferencia lo que quiere decir que es posible aislar un elemento infectado. Con respecto a la red de acceso uno de los métodos más eficientes es el uso de criptografía centrada en componentes como equipo de usuario y estaciones bases.

F) Blockchain

La tecnología Blockchain consiste en una cadena de bloques que permite el manejo de datos sin la necesidad de intermediarios, es decir, es una base de datos distribuida y muy segura ya que cuenta con cifrado de la información almacenada (Pastor, 2017); Inicialmente esta tecnología se utilizó en el campo económico y financiero con el fin de tener un sistema de pagos y transacciones con mayor seguridad y control, sin embargo, debido a sus grandes ventajas y estructura de funcionamiento se han llevado a cabo diversas investigaciones en donde se plantea la incorporación de blockchain en 5G con el fin de tener mayor seguridad.

Blockchain cuenta con dos tipos de aplicación:

- Blockchain sin permisos: Conocido como una red pública, en donde los usuarios cuentan con la capacidad de realizar transacciones de manera anónima que quedan registrados en una base centralizada, por ejemplo, bitcoin. (Nour, Ksentini, Herbaut, Frangoudis, & Mounqla, 2019)

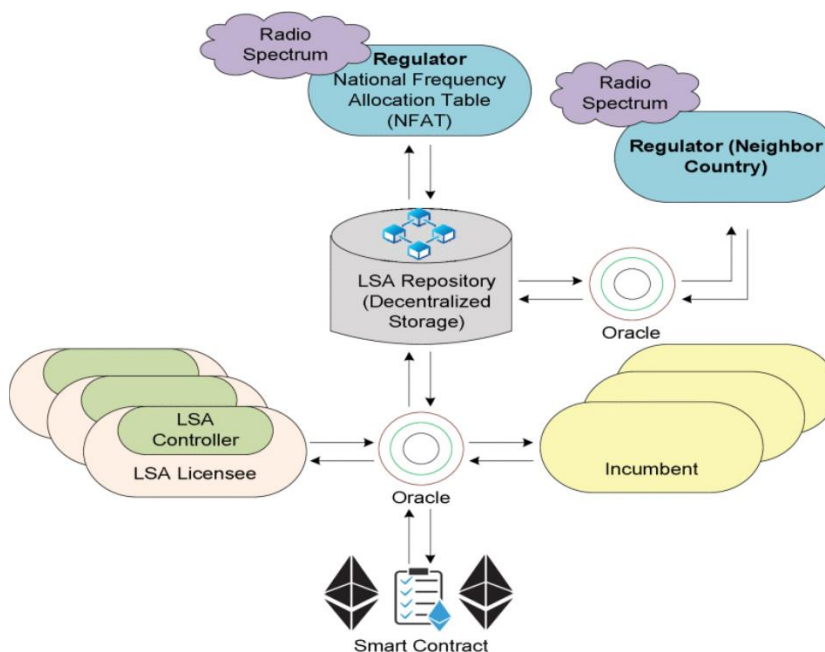
- **Blockchain autorizado:** Estas son utilizadas en entidades como el gobierno, en donde, solo cierto número de personas tienen acceso a la información de transacciones ya sea como consultar o añadir una nueva. (Nour, Ksentini, Herbaut, Frangoudis, & MOUNGLA, 2019)

(Chaer, Salah, Lima, Ray, & Sheltami, 2020) lleva a cabo un estudio y análisis detallado de las oportunidades de la implementación de Blockchain en 5G:

- **5G para crowdsourcing:** Crowdsourcing es una técnica que permite que un grupo de personas denominado inversores implementen nuevas torres en la infraestructura general de un operador, ese servicio debe contar con certificación y pagos por el uso de los recursos, por consiguiente, el uso de blockchain y sus contratos inteligentes permitiría tener un registro, gestión de recursos y facturación de manera segura y descentralizadas.
- **Uso compartido de infraestructura 5G:** El uso compartido de la red es una de las principales ventajas de 5G, en donde un operador de red cumple papel de vendedor ofreciendo diferentes servicios. Blockchain cumple un papel importante en este funcionamiento ya que permite tener mayor control sobre los recursos compartidos ya sean elementos activos o pasivos, mediante el uso de contratos inteligentes.
 - ✓ **Uso compartido del espectro:** Una de las problemáticas actuales es la escasez del espectro, ya que los operadores móviles deben pagar sumas de dinero elevadas para la adquisición de bandas de frecuencias que permitan ofrecer el servicio de cada de empresa. Una de las soluciones planteadas para el reducir el problema del espectro es esquema de acceso compartido de licencias (LSA), consiste en ofrecerle al titular una parte

del espectro que no se utiliza brindándole beneficios como titular de la licencia solo por su uso.

Figura 17: Uso de blockchain en LSA



Fuente: Chaer, A., Salah, K., Lima, C., Ray, P. P., & Sheltami, T. (2020). *Blockchain for 5G: Opportunities and Challenges*. USA: IEEE.

- Roaming internacional: Consiste en los intercambios internacionales entre operadores, dichos intercambios tienen algunos inconvenientes en procesos como i) punto único de falla, ii) recorte de ganancias, iii) actividades fraudulentas (Chaer, Salah, Lima, Ray, & Sheltami, 2020), dichos inconvenientes pueden mitigarse de manera considerable con el uso de los contratos inteligentes de blockchain.
- Rebanado de red: Como ya se ha mencionado anteriormente, en la implementación de 5G se plantea la división de red con el fin de que cada segmento cuente con servicios específicos y sus respectivos requerimientos, actualmente se hace uso de Network Slice

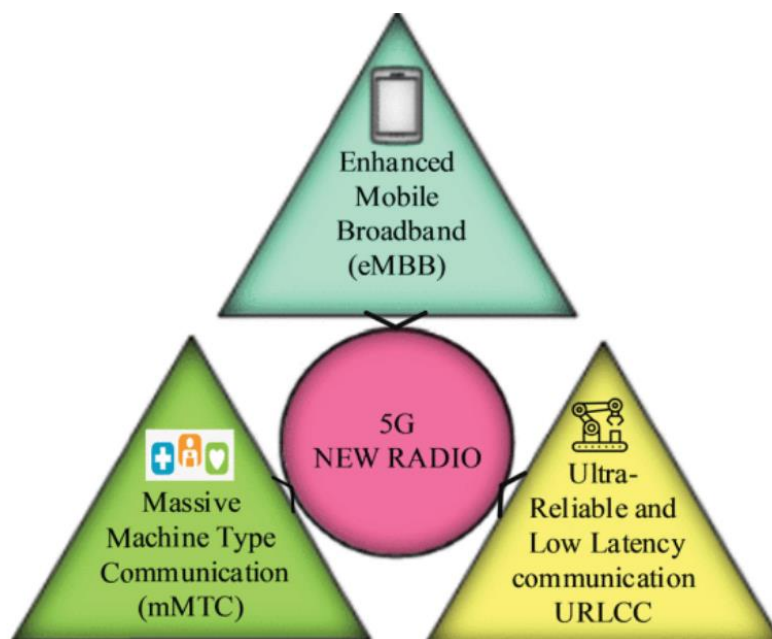
Broker (NSB) para la contratación de los servicios, blockchain podría reemplazar esta metodología haciendo el proceso más seguro y flexible.

A pesar de que blockchain cuenta con numerosos beneficios para la arquitectura 5G, este también presenta diferentes desafíos a la hora de la implementación como, por ejemplo, escalabilidad debido a que blockchain cuenta con la capacidad de realizar aproximadamente 14 transacciones por segundo, sin embargo la baja latencia es primordial en 5G, por lo tanto se debe considerar una infraestructura que permita tener mayor rendimiento; El uso de contratos inteligentes, es una técnica que ya ha sido implementada, sin embargo, al ser 5G una nueva tecnología requiere de la adaptación de los contratos para utilizarlos en 5G; La reglamentación debe estar adaptada para la implementación de blockchain en 5G ya que los contratos inteligentes no tienen regulación ni estandarización; Los costos es un tema importante ya que para la implementación de blockchain se requiere la contratación de servicios en la nube; Por último se tiene la privacidad de los datos siendo este el problema principal en todo el despliegue de 5G ya que los operadores cuentan con información sensible de los usuarios, con el uso de blockchain no se almacenan datos personales. (Chaer, Salah, Lima, Ray, & Sheltami, 2020).

8.3 Casos de Uso Tecnología 5G y Futuras generaciones

En esta sección se hará una revisión bibliográfica sobre los casos de uso que fueron establecidos por 3GPP como requisitos de rendimiento en la tecnología 5G, así mismo se analizan las futuras generaciones como 6G.

Figura 18: Casos de uso 5G



Fuente: Dogra, A., Jha, R. K., & Jain., S. (2020). A survey on beyond 5G Network with the advent of 6G. India: IEEE.

8.3.1 Banda ancha móvil mejorada (eMBB)

La implementación de eMBB en la tecnología de 5G es con el fin de que esta ofrezca alta capacidad y velocidades en los datos, así mismo una ampliación del ancho de banda en las conexiones inalámbricas; Este se conoce como una ampliación de los servicios ofrecidos en LTE obteniendo mejoras como por ejemplo, en el sistema 4G las resolución de los videos de 720 HD podían verse con un tiempo de interrupción de aproximadamente 50ms, por otro lado, con 5G NR se espera que sean admitidos con resolución full HD de 1080, 2k, 4k y 8k con una interrupción de menos de 1ms.

Este servicio ofrecerá beneficios como fiabilidad casi del 100% y latencia de 1ms, adicional a esto permitirá a los usuarios tener conexión fija a internet incluso en lugares con alta

densidad; para lograr el funcionamiento de eMBB se utilizan tecnologías como MIMO masivo y pequeñas celdas las cuales son dadas a conocer en la sección anterior.

Los casos de uso para eMBB que se encuentran en fase de investigación e implementación son Realidad aumentada asistida por la nube y posicionamiento en interiores. (Chocliourus, y otros, 2018)

- Realidad aumentada asistida por la nube: La realidad aumentada (RA) ofrece al usuario una visión combinada del panorama real y una escena virtual generada por computadores. La realidad aumentada asistida por la nube permite el acceso a los recursos en cualquier momento que sea necesario y ventajas en el almacenamiento; Los juegos utilizados tradicionalmente dependen de la unidad de procesamiento de gráficos para obtener los recursos, por otro lado, al hacer uso de la nube, los usuarios podrán realizar transmisiones desde servidores en la nube. En china se han realizado diferentes pruebas de funcionamiento, pero aún no se ha logrado cumplir con las expectativas del servicio.
- Posicionamiento de interiores (IPS): El funcionamiento de este sistema se basa en el posicionamiento de personas u objetos en un determinado lugar haciendo uso de ondas de radio, luces, entre otros, debido a que eso se lleva a cabo dentro de espacios cerrados se encuentran grandes desafíos como obstáculos, y movimiento de personas.

8.3.2 *Comunicación ultra confiable y de baja latencia (URLLC)*

Este es el caso de uso más decisivo de la tecnología 5G ya que con este se logrará la implementación de aplicaciones que requieren de características como baja latencia y precisión como lo son la automatización, conducción autónoma, telemedicina, entre otros.

Algunos de los requisitos que debe cumplir URLLC en 5G NR son (Dogra, Jha, & Jain., 2020):

- Latencia en plano de usuario: 1ms URLLC.
- Latencia en plano de control: 10 – 20 ms.
- Fiabilidad: 99%.
- Tiempo de interrupción de movilidad = máx. 1ms.

Uno de los desafíos encontrados en URLLC es lograr de manera sincrónica la baja latencia y ultra confiabilidad, por consiguiente, se han llevado a cabo investigaciones en donde se propone un modelo de conexión múltiple y el uso de MIMO masivo. Con el fin de lograr a baja latencia en URLLC (Chen, Wu, & Shimomura, 2018) se propuso un mini intervalo para la transmisión de datos URLLC que tienen características específicas tales como duración del intervalo más corto que el utilizado normalmente en la transición de datos en DL.

Para la multiplexación en URLLC y eMBB (Chen, Wu, & Shimomura, 2018) proponen un modelo de señal de referencia que permite realizar la multiplexación para eMBB y URLLC en una misma señal portadora para NR en DL, obteniendo como resultado la disminución de consumo de energía en PDCCH.

Por otra parte (Zhang, Guo, & Zhang., 2021) da a conocer un método de asignación de bloques de recursos (RB) para la coexistencia de URLLC y eMBB, en un caso de multiplexación de los dos servicios, esto teniendo en cuenta que ambos tienen funciones diferentes, por consiguiente, diferentes usuarios y servicios. Para comprobar su funcionamiento se generan diferentes usuarios para ambos casos de uso en un área determinada y determinado así que el modelo propuesto era satisfactorio en pruebas de simulación.

8.3.3 Comunicación masiva de tipo máquina (MMTC)

Este caso de uso consiste en establecer comunicación máquina – máquina sin la necesidad de intervención de mano de obra humana, es decir, este caso de uso de la tecnología aumenta considerablemente el número de dispositivos conectados a la red, algunas de las aplicaciones que hacen uso de MMTC son el monitoreo de salud, conducción autónoma, automatización, entre otros. Las principales características son (Dogra, Jha, & Jain., 2020):

- Alta densidad de conexión: $1\text{M}/\text{km}^2$.
- Alta cobertura.
- IoT bajo costo.
- Alta movilidad.

Teniendo en cuenta lo mencionado anteriormente uno de los principales desafíos presentados con MMTC es la posible congestión en la red debido a la cantidad de dispositivos que estarán haciendo uso de la red, por consiguiente, se han llevado a cabo investigaciones en donde se plantean modelos de algoritmos con el fin de solucionar dicho problema; (Tanab & Hamouda, 2019) propone en su artículo un algoritmo que permite destinar los recursos al usuario en el tiempo requerido, esto permite hacer uso eficiente de los recursos y de la energía.

(Lv, Ma, Zeng, & Mathiopoulos, 2018) por otro lado, proponen un modelo llamado NOMA que consiste en el uso de mmWave para MMTC, el cual consiste en el uso compartido de recursos en los usuarios destinados por la estación base, se pudo observar que el resultado de este sistema arroja beneficios como sobrecarga reducida y baja probabilidad de interrupción.

8.3.4 IoT

El internet de las cosas (IoT) es una tecnología que permite la interconexión de dispositivos y de esta manera establecer comunicación entre ellos generando así una funcionalidad de manera autónoma mediante el uso de internet. (Muteba, Djouani, & Olwal, 2020), teniendo en cuenta las ventajas y beneficios que trae el uso del internet de las cosas se han llevado a cabo investigaciones con el fin de encontrar la manera de que la red soporte la densidad de dispositivos que estarán conectados para hacer uso de este servicio esto debido a que los datos capturados por sensores deben ser examinados mediante el uso de recursos de nube. (Khurpade, Rao, & Sanghavi, 2018)

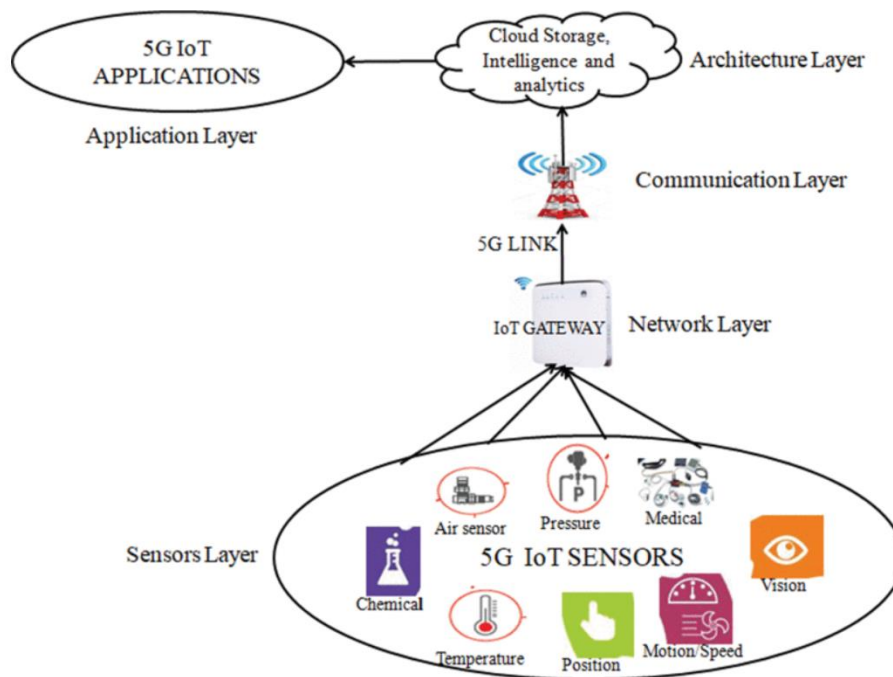
Con el despliegue de IoT se han categorizados ciertos tipos de comunicaciones de corto alcance como lo son WiFi, Bluetooth y Zigbee (Muteba, Djouani, & Olwal, 2020); Una de las aplicaciones más relevantes de IoT es NB-IoT (IoT de banda estrecha) presenta ventajas como bajo consumo de energía, vida útil mayor para las baterías y mayor cobertura.

(Chettri & Bera., 2019) dan a conocer los 7 desafíos principales en la implementación de 5G IoT:

- Velocidad de datos de 1 a 10 Gbps en tiempo real.
- Latencia menor a 10 ms.
- Ancho de banda alto y eficiencia de espectro.

- Bajo costo.
- Mayor densidad de dispositivos conectados.
- Consumo de batería y energía reducida

Figura 19: Arquitectura IoT 5G



Fuente: Chettri, L., & Bera., R. (2019). *A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems*. India: IEEE.

En la figura 19 se puede observar la estructura de la arquitectura IoT 5G, la cual consta de una capa de sensor en donde se encuentran ubicados sensores, dispositivos los cuales establecer conexión con la capa de red; En segundo lugar la capa de red en donde se tienen sistemas de comunicaciones como NB-IoT, ZigBee, entre otros; En tercer lugar la capa de comunicación la cual es considerada la más importante ya que cumple la función de enviar la

información a todas las capas de la arquitectura; En cuarto lugar se encuentra la capa de arquitectura la cual cuenta con funcionalidades como análisis de datos y computación en la nube; Por último se tiene la capa de aplicación la cual unifica todos los dispositivos e información mediante la conexión inalámbrica.

8.3.5 V2X

V2X se conoce como un estándar de comunicación posible entre máquinas; en este caso en particular se establece comunicación de un vehículo con cualquier dispositivo, lo que hace referencia la X. (Bejerano, 2021); Las investigaciones de este estándar se han llevado a cabo tanto para la implementación en 5G como en LTE, esto debido a que LTE cuenta con múltiples beneficios que permiten el funcionamiento de V2X, sin embargo, presenta diferentes desafíos ya que la capa física actual de los sistemas LTE no pueden soportar altas frecuencias en la señal portadora, ni velocidades altas de UE en vehículos lo que generaría un efecto Doppler; Se ha propuesta como solución el diseño de una capa física LTE V2X. (Gyawali, Xu, Qian, & Hu, 2020)

(Gyawali, Xu, Qian, & Hu, 2020) presenta algunos desafíos y soluciones frente a la implementación V2X LTE.

- Capa física: Como se había mencionado anteriormente la capa física actual de LTE no soporta altas frecuencias y velocidad UE; Debido a esto 3GPP tiene como objetivo mejorar las señales de referencia minimizando el tiempo existente entre ellas.
- Sincronización: Teniendo en cuenta que se tendrá una alta velocidad en UE, los dispositivos deberán cambiar de topología frecuentemente, como solución a esta

problemática se propone el uso de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) el cual permite tener la sincronización requerida.

- Asignación de recursos: Sabiendo que en V2X se tiene una transmisión de datos invariable en un espacio de alta densidad de tráfico es necesario la correcta asignación de recursos, en el caso de LTE D2D no soporta la cantidad de transmisiones, por lo tanto, como solución 3GPP propuso como solución mejorar este aspecto en D2D de tal manera que sea utilizado para V2X también.

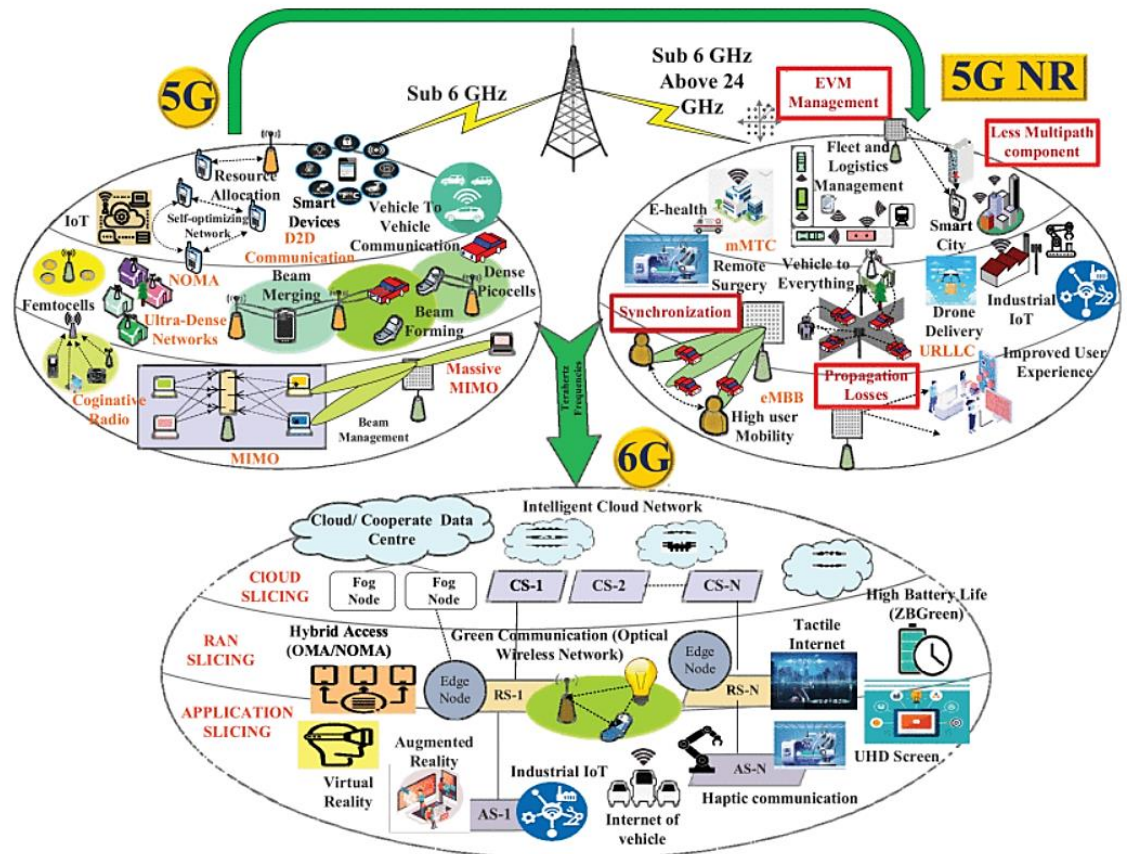
8.3.6 B5G/6G

Como se pudo observar en los capítulos anteriores 5G trae consigo diferentes desafíos de implementación y nuevas tecnologías; En la figura 18 se puede ver la arquitectura propuesta para la migración de 5G a 6G, a diferencia de 5G se espera que 6G funcione en frecuencias de terabits por segundo. Los aspectos principales de 6G serán súper IoT, inteligencia artificial y servicios de banda ultra ancha. (Dogra, Jha, & Jain., 2020)

UIT generó un grupo de investigación en el año 2018 que se enfoca en el estudio de la generación de comunicaciones más allá de 5G y el alcance que estas pueden tener en una proyección al 2030, adicional a esto la comisión europea de igual manera inicio un proceso para la motivación en el inicio de investigaciones de 6G y así poder determinar las tecnologías emergentes aplicables; Por otra parte, países como China, Alemania y Japón iniciaron el desarrollo de investigaciones con respecto a 6G.

Dicha arquitectura se encuentra conformada por 3 componentes primordiales capa de división de RAN, capa de división de nube inteligente y capa de división de aplicación, al presentar dicha arquitectura en capas ofrece beneficios tales como servicios táctiles lo que permite a los usuarios tener un control sobre los dispositivos en tiempo real.

Figura 20: Arquitectura propuesta para la migración 6G



Fuente: (Dogra, Jha, & Jain., 2020)

(Dogra, Jha, & Jain., 2020) da a conocer los desafíos de la tecnología 6G y su alcance a futuro dado que esta se encuentra en su fase inicial de desarrollo:

- Como se mencionó anteriormente se espera que 6G trabaje con frecuencias de THz, esta presenta inconvenientes debido a que dichas frecuencias son

vulnerables a bloqueos y pérdidas a causa de absorción, adicional a esto los dispositivos deben adaptarse para tolerar frecuencias tan altas.

- Los modelos que existen actualmente para los canales no resultan ser suficientes frente a la variación de frecuencias altas, por consiguiente, el rediseño de los canales es obligatorio para el funcionamiento de 6G.
- Con el fin de aumentar la cobertura y la movilidad para UE se piensa unir diferentes tipos de redes tales como satelitales y terrestres, esto representa un gran reto debido a que realizar dicha integración podría generar inconvenientes tales como el efecto Doppler.
- Uno de los principios de funcionamiento de 6G es la inteligencia artificial, esto quiere decir que se necesita el manejo de datos más difíciles y mayor fortaleza en los sistemas computacionales, de esta manera el uso eficiente de la energía es uno de los aspectos primordiales para la investigación.
- La seguridad en 6G es aún más crítica que para 5G, ya que esta tecnología cuenta con mayor volumen de datos lo que requiere de desarrollo de nuevos métodos de cifrado y seguridad en la capa física.

Anteriormente se dio a conocer de manera breve los 3 casos de usos que necesita la tecnología 5G para su funcionamiento URLLC, mMTC y eMBB, (Jiang, Han, Habibi, & Schotten, 2021) en su artículo dan a conocer que dichos casos de uso y sus requerimientos no son suficientes para la tecnología 6G, por lo tanto, proponen tres nuevos casos de uso:

- uMBB: Denominado MBB ubicuo, esto debido a que para permitir las comunicaciones con buena calidad y a nivel global, el servicio MBB debe estar en toda la tierra para 6G; Este cumple la función de mejorar la calidad de la red y la velocidad en la transmisión de los datos.

- **ULBC:** Comunicación de banda ancha de baja latencia ultra confiable, este caso de uso no solo permitirá la conexión de dispositivos URLLC, sino también de las nuevas tecnologías que usa 5G como comunicaciones holográficas (HTC), internet táctil, entre otros.
- **mULC:** Comunicación masiva ultra confiable de baja latencia, es una combinación de los beneficios brindados por URLLC y mMTC, con el fin de soportar todas las aplicaciones y casos de uso de 6G.

(Jiang, Han, Habibi, & Schotten, 2021) expone algunos de los facilitadores tecnológicos que permitirán el despliegue de 6G:

- **Nuevo espectro:** Se espera que las redes de nueva generación ofrezcan una excelente capacidad de tecnología de acceso de radio heterogénea (RAT), en donde se plantea la elaboración de una nueva capa RAN con el uso de pico células, similar al uso de mmWave en 5G; el uso de señales con longitud de onda menor permite aplicar mejoras en el sistema como uso de antenas más pequeñas y se amplía considerablemente el campo de aplicación para sistemas de corto alcance como en sistemas de seguridad, adicional a esto se han llevado a cabo investigaciones en donde se obtiene baja atenuación de las señales en determinadas frecuencias (35GHz, 94GHz, 140GHz y 220 GHz), sin embargo se presentan ciertos desafíos ya que el aumento del ancho de banda y la potencia de transmisión podrían provocar distorsiones en la señal, de igual manera estos sistemas cumplen su funcionamiento mediante LOS lo que incrementa el inconveniente ya que se pueden presentar pérdidas a causa de obstáculos.

Por otro lado, se tiene la implementación de las comunicaciones en THz, estas, de igual manera que mmWave presentan grandes pérdidas y cobertura reducida, aún así ofrece beneficios como mayor ancho de banda y latencia.

- **Nuevas redes:** De igual manera que 5G se espera implementar la virtualización y softwarización de la red con el fin de lograr flexibilidad en la misma; Como se ha mencionado anteriormente en 5G el uso de NFV es primordial para lograr las características y funcionamientos requeridos del sistema, sin embargo NFV presenta ciertos inconvenientes en cuanto a la asignación de recursos lo que genera inconvenientes para aplicaciones como la inteligencia artificial, debido a esto se ha planteado la posibilidad de hacer uso de los beneficios de VFN junto con inteligencia artificial y machine learning, por otro lado, el uso de SDN también es un aspecto muy importante en el paso de 5G a 6G, sin embargo cuenta con ciertas ausencias en el campo de la investigación para su implementación como por ejemplo la ubicación del controlador en B5G.
- **RAN abierto:** La alianza O-RAN implemento este concepto de RAN abierto con el fin de que el sistema sea más flexible a futuras generaciones de red, por consiguiente, presentaría características como hardware y código abiertos.
- **Seguridad post – cuántica:** Tanto en 5G como en 6G la seguridad sigue siendo un tema decisivo ya que se presentan numerosas vulnerabilidades, ahora teniendo en cuenta el alcance de 6G se aumentan considerablemente los riesgos y desafíos que deben superarse en cuanto a la seguridad, algunas de las propuestas para dar solución a este problema es el uso de inteligencia artificial con el fin de implementar sistemas de seguridad para de esta manera proteger la red.

9 Conclusiones

A lo largo de la comparación realizada se logró identificar que la implementación de la tecnología 5G a nivel mundial trae consigo impactos en aspectos tecnológicos, económicos, sociales y diferentes beneficios que prometen mejorar de manera considerable la calidad de vida, dicha tecnología se encuentra en auge por esta razón diferentes países se encuentran en proceso de investigación de manera que se pueda aprovechar al máximo los beneficios tales como menor latencia, aumento de velocidad, estas características mejoran la experiencia de usuario además de brindar nuevas tecnologías como IoT e inteligencia artificial haciendo de esta aún amigable para su uso diario, de igual manera al momento de mejorar el funcionamiento e infraestructura de la tecnología se presentan diversos riesgos que deben ser solventados de modo que se cumplan con los requerimientos de funcionamiento establecidos por entes regulatorios; algunas soluciones planteadas actualmente se encuentran soportadas mediante la implementación de diversas tecnologías emergentes las cuales se dieron a conocer en el desarrollo del documento, cada una de estas cumple una función primordial en el funcionamiento de la tecnología 5G, si bien es cierto que algunas de ellas ya se encontraban implementadas en sistemas de comunicaciones móviles como MIMO y Full – Dúplex estas deben ser mejoradas para ser utilizadas por otra parte, se presentan nuevas tecnologías que deben ser investigadas aún más como Network Slicing y Cloud RAN.

Como parte inicial del desarrollo del proyecto fue primordial realizar un análisis y comparación de la arquitectura y funcionamiento de las generaciones anteriores a 5G, específicamente 4G y 4G-A, y de esta manera lograr identificar los principales cambios que debe tener la arquitectura de funcionamiento de las comunicaciones móviles; Como fase inicial de implementación de la tecnología 3GPP dio a conocer la arquitectura 5G NSA la cual hace uso de los beneficios de 5G y 4G, esto ofrece ventajas en el campo de la investigación ya que todo el

campo de estudio inicia a partir del funcionamiento de 4G, adicional a esto la operación en conjunto requiere del uso de redes heredadas lo que da paso a las redes heterogéneas, eso es considerado un plus ya que al contar con este tipo de redes la red es adaptable a variación de arquitectura y espectro, sin embargo el uso de 4G para la implementación a 5G puede ser contraproducente ya que el proceso de implementación de 5G SA se vería retrasado significativamente y no se abarcarían problemáticas exclusivamente de 5G; de igual manera 5G hace uso de metodologías iguales a 4G como es OFDMA, un mejoramiento en las estaciones base, y MIMO mejorado con el fin de soportar la densidad de dispositivos conectados; Actualmente, China se encuentra posicionado como el pionero en ofrecer servicios comerciales de 5G ya que cuenta con un avanzado campo de investigación frente a tecnologías, plantas y procesos de circuitos integrados, adicional a esto la cultura en países como Corea tolera el despliegue sin un consentimiento aprobado anteriormente por entes gubernamentales (Vara, 2020) todo eso permitió acercarse más rápido a la implementación de 5G SA, la cual se conoce como una infraestructura 5G pura.

Uno de los cambios más radicales encontrados en las arquitecturas fue la separación de plano de control y usuario que permitirá independizar las funcionalidades de cada uno permitiendo de esta manera que la red sea más flexible, para LTE el plano de control y de usuario se encuentran unidos de manera que permitan ofrecer un control sobre las interfaces y envío de paquetes, teniendo en cuenta que para 5G se implementó la idea de manejar una infraestructura en divisiones la división de los planos tiene como objetivo la asignación de un ancho de banda a cada uno con el fin de que trabajen de manera independiente y ofrezca mayor flexibilidad a la red, de esta manera, se obtienen beneficios como el uso de recursos de manera autónoma, esto presentaría una mejora para los operadores ya que cada usuario haría uso de los recursos específicos que necesita para cada aplicación, sin afectar a los demás.

Cada una de las tecnologías emergentes utilizadas en 5G trae consigo diferentes retos de implementación y desafíos que deben tener estricto cumplimiento con el fin de lograr los requerimientos de la tecnología, sin embargo, a lo largo de la revisión bibliográfica se logró observar que cada uno de dichos inconvenientes están siendo investigados de manera práctica y mediante simulación, inconvenientes tales como interferencia, incumplimiento de latencia, pérdida de señal, costos de implementación, compatibilidad entre tecnologías, etc, la mayoría de ellos resultan ser propuestas a futuro ya que la tecnología se encuentra en fase de implementación y mejoramiento, así mismo algunos campos de investigación se encuentran abiertos para la adopción de estas como C-RAN la cual es una tecnología relativamente nueva la cual requiere de mayor estudio, sin embargo según los avances realizados a nivel internacional la mayoría de dichas problemáticas se tienen solucionadas con la infraestructura utilizada hasta ahora.

Como se ha mencionado anteriormente se espera que el manejo de frecuencias para 5G sea diferente que las generaciones antecesoras, en casos de uso como IoT, zonas urbanas y rurales se espera operación con frecuencias menores a 1GHz, por otro lado para ofrecer servicios de comunicaciones móviles habituales como cobertura y capacidad se tiene en un rango de frecuencias de 3,3 a 3,8GHz y por último las frecuencias por encima de 6GHz las cuales serán utilizadas para aumentar la velocidad esperada en banda ancha para 5G (GSMA, 2016), sabiendo esto las implementaciones realizadas hasta la fecha se han realizado en bandas de frecuencias menores a 3,5GHz, específicamente 2,6GHz en china ya que se logró comprobar que es la más viable frente a velocidad y alta cobertura, la implementación masiva de antenas ha representado un gasto considerable en implementación de la tecnología 5G ya que de esta manera no se presentan pérdidas de señal, adicional a esto se propone la implementación de la banda 700MHz con el fin de incrementar la cobertura, a nivel tecnológico representa beneficios y grandes avances, sin embargo a nivel social y económico esto figura enormes costos de implementación y problemáticas de compatibilidad de los dispositivos con 5G y sus frecuencias (5G, 2021).

Empresas tales como ZTE, China Mobile y Microsoft Azure se encuentran actualmente trabajando en conjunto para el despliegue total de la arquitectura 5G SA ofreciendo todos los beneficios de 5G, incluyendo el uso de la red por divisiones lo cual ha dado el resultado esperado y virtualización de la red lo que permite que la red sea adaptable, se espera para china que el despliegue total de SA se cumpla en el año 2025, por ahora se encuentra en fase de implementación y expuesto a mejoras frente a fallos, por otra parte la conexión con aplicaciones industriales se encuentra aún en fase de desarrollo; En Latinoamérica, el primer país en realizar pruebas de funcionamiento de esta arquitectura es Brasil en estaciones pequeñas, se espera el despliegue en todo el país próximamente. (5G O. N., 2021) (HUAWEI, 2021) (Rui, 2020)

Por otra parte, se encuentra uno de los puntos con el menor campo de investigación y más crítico como lo es la seguridad y privacidad ya que cada una de dichas tecnologías presenta riesgos de seguridad al momento de transmitir información e implementación, se han llevado a cabo investigaciones con el fin de mitigar dichos riesgos y hacer uso de los beneficios SDN/VFN brindar mayor protección a la red, sin embargo, esta es una de las principales preocupaciones de los países que lideran el despliegue 5G como lo son Unión Europea, Estados Unidos y China y es uno de los aspectos que representa mayor retraso en el avance de implementación de 5G; A pesar de que 4G contaba con vulnerabilidades en el campo de la seguridad la dimensión y funcionamiento de la red permitían tener determinado control sobre la misma en tiempo real, sin embargo al ser 5G una red más amplia y con mayor densidad el sistema de monitorización es más complejo, esto debido a que 5G cuenta con un amplio número de puntos de enrutamiento, adicional a esto según lo descrito anteriormente en el uso de LTE como parte inicial de 5G se tendría un conjunto de vulnerabilidades heredadas de dicha red como los ataques DoS, adicional las nuevas presentes en la infraestructura de 5G a pesar de que esta ofrece un sistema de cifrado mejorado la implementación de nuevas tecnologías y forma de funcionamiento incrementa

considerablemente los riesgos (Iulio, 2021), lo que abre paso a una necesidad de creación de nuevos métodos y protocolos para mitigar dichos riesgos.

A pesar de que 5G se encuentra en una fase inicial de implementación en algunos países, las investigaciones apuntan a las tecnologías posteriores a 5G (B5G), esto sabiendo que la llegada de 5G represento un cambio drástico a los sistemas de comunicaciones móviles habituales y su infraestructura, dando paso a el funcionamiento en conjunto de varias tecnologías permitiendo así ir ampliando el campo de aplicación a lo largo de los años, 6G promete mejoras en su infraestructura ya que se espera que cuente con mayor densidad de dispositivos conectados que 5G, por lo tanto, se da pie para el uso de tecnologías como internet táctil, internet de las cosas industrial, realidad aumentada, entre otros, sin embargo el despliegue de tecnologías B5G no se tienen planeadas todavía ya que es necesario el funcionamiento total de 5G SA, sabiendo que la arquitectura que se encuentra funcionando actualmente es una propuesta realizada por ZTE en donde hace uso de todas las generaciones de comunicaciones móviles que permiten el funcionamiento de las características esperadas.

En Latinoamérica algunos países como Chile, México y Brasil ya ofrecen cobertura de 5G o se encuentran en desarrollo de pruebas pilotos por parte de algunos operadores como es el caso de Colombia; Actualmente Colombia se encuentra en una fase de despliegue de 4G con el cual se busca cumplir con el 100% de cobertura en el país, adicional a esto el gobierno realizó una inversión considerable en el paso de 3G a 4G, por consiguiente el despliegue de 5G se encuentra un poco lejano teniendo presente el proceso y costo de implementación llevado a cabo en china y estados unidos, esto debido a que los requerimientos de 5G exigen la implementación y mejoramiento de diferentes servicios e infraestructura en el caso de la cobertura requiere la implementación de múltiples antenas con el fin de evitar interferencias y el manejo eficiente del espectro con el fin de evitar perdida de señal y que estas tengan la capacidad de traspasar

obstáculos como edificios; De esta manera el despliegue de 5G NSA representaría menor costo, sin embargo esta arquitectura no brinda todos los beneficios de 5G, aún así presenta mejoras en cuanto a velocidad y cobertura. En las fases iniciales de despliegue de dicha arquitectura se pudo observar que no era necesario realizar una reconstrucción de la infraestructura 4G, ni trasladar la información de usuarios o cambio de SIM, todo lo anterior mejoraría considerablemente la experiencia de usuario y el costo de implementación sería menor frente a la implementación de 5G SA, en cuanto al manejo de la seguridad de igual manera que otros países la normativa y metodologías resultan ineficientes para el amplio campo de aplicación de la tecnología 5G.

10 REFERENCIAS

Ashutosh Dutta, E. H. (2020). 5G Security Challenges and Opportunities: A System Approach. USA: IEEE.

Carmen, U. S. (2018). Estudio de la tecnología 5G y el impacto que tendrá en el país. Guayaquil.

COMMISSION, E. (2019). Cybersecurity of 5G networks. Strasbourg.

Commission, E. (2019). Member States publish a report on EU coordinated risk assessment of 5G networks security. Brussels.

Dr K Anitha Kumari, D. G. (2018). Approach for End-to-End (E2E) Security of 5G Applications. India.

Europea, C. (2020). Despliegue seguro de 5G en la UE - aplicación de la caja de herramientas de la UE. Bruselas.

GSMA. (2020). 5G y el Rango 3,3-3,8 GHz en América Latina. Londres: GSMA.

Orlando, R. R. (2019). Nuevos desafíos en seguridad para 5G. Bogotá.

A. Gupta, R. K. (2015). A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies. IEEE.

Garcia, J. D. (2019). Estudio del estado del arte de la telefonía móvil. Piura, Perú: Universidad Nacional de Piura.

M. Tahir, M. H. (2020). A review on application of blockchain in 5G and beyond networks: Taxonomy, Field-Trials, Challenges and Opportunities.IEEE.

MinTIC. (2019). Plan 5G Colombia.

Siverio, E. H. (2018). Seguridad de la capa física para redes inalámbricas. Santa clara.

Vaca, A. e. (2016). Análisis del estado del arte e innovación en las tecnologías de sistemas de comunicaciones inalámbricas 5G. Quito.

23.501, 3. T. (2021). *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects: System architecture for the 5G System (5Gs) Release 17*. Valbonne,Francia.

3GPP. (Ocubre de 2021). *3GPP*. Obtenido de <https://www.3gpp.org/about-3gpp>

3GPP, J. W. (Junio de 2013). *3GPP a global initiative* . Obtenido de <https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/97-lte-advanced>

A. Gupta, R. K. (2015). *A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies* . IEEE.

Abdulaziz Abdulghaffar, A. M.-A. (2021). *Modeling and Evaluation of Software Defined Networking Based 5G Core Network Architecture* . Arabia Saudita: IEEE.

Achaleswar Sahai, G. P. (2011). *Pushing the limitis of full - duplex: Desing and Real-time Implementation*. Texas, USA: Technical Report TREE1104.

- Ahmad, I., Shahabuddin, S., Kumar, T., Okwuibe, J., Gurtov, A., & Ylianttila, M. (2019). *Security for 5G and Beyond*. Finlandia: IEEE.
- Albreem, M. A., Juntti, M., & Shahabuddin, S. (2019). *Massive MIMO Detection Techniques: A Survey*. Finlandia: IEEE.
- Alcardo Alex Barakabitze, A. A. (2020). *5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges*. Irlanda: Computer Networks .
- Aleksandra Checko, H. L. (2015). *Cloud RN for Mobile Networks - A Technology Overview* . Dinamarca: IEEE.
- Al-Shaer, E., & Al-Haj, S. (2010). *FlowChecker: Configuration analysis and verification of federated OpenFlow infrastructures*.
- Basile, A. L., Pitscheider, C., Valenza, F., & Vallini, M. (2015). *A novel approach for integrating security policy enforcement with dynamic network virtualization*.
- Bejerano, P. G. (Junio de 2021). *ThinkBIG: Cellular V2X: Así conseguirá el 5G que los coches<<hablen>> entre sí* . Obtenido de <https://blogthinkbig.com/cellular-v2x-asi-conseguira-el-5g-que-los-coches-hablen-entre-si>
- Beltran, Ó. L. (2020). *Términos de referencia para la migración de LTE a 5G en colombia*. Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Buckley, B. D. (1998). *Beamforming: A versatile approach to spatial filtering* . IEEE .

- Cáceres, C. I. (2013). *Estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías 4G long term evolution (LTE) y LTE Advanced* . Ecuador.
- Calle, C., & Jiménez, M. S. (2014). *Estudio y análisis técnico comparativo entre las tecnologías LTE y LTE Advanced* . Quito, Ecuador .
- Campos, L. (2017). *Estudo das características de ondas milimétricas para os sistemas 5G* . Niterói - RJ.
- Cao, J., Yu, P., Ma, M., & Gao, W. (2019). *Fast authentication and data transfer scheme for massive NB-IoT devices in 3GPP 5G network*. IEEE.
- Catherin Nayer Tadros, M. R. (2020). *Software Defined Network- Based management architecture for Enhanced 5G Network Services* . Egipto: IEEE .
- Contreras, I. D. (2017). *Estudio comparativo entre redes LTE Advanced y LTE a nivel de core* . Santiago, Guayaquil.
- Córdoba, F. A. (2018). *Comparativo entre la tecnología de redes 4G y 5G y los beneficios de su implementación en Colombia* . Santiago de Cali: Universidad Santiago de Cali.
- Cortes, J. C. (2019). *Análisis de la tecnología Massive MIMO para las redes 5G en Colombia* . Bogotá: Universidad Santo Tomás .
- Chaer, A., Salah, K., Lima, C., Ray, P. P., & Sheltami, T. (2020). *Blockchain for 5G: Opportunities and Challenges* . USA: IEEE.

- Chen, H., Wu, J., & Shimomura, T. (2018). *New Reference Signal Design for URLLC and eMBB Multiplexing in New Radio Wireless Communications*. Italia: IEEE.
- Chen, W. C. (2014). *5G mmWAVE Technology Desing Challenges and Development Trends*. Taiwan: IEEE.
- Chettri, L., & Bera., R. (2019). *A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems*. India: IEEE.
- Chocliourus, I. P., Spiliopoulou, A. S., Kostopoulus, A., Arvanitosis, D., Yi, N., Chen, T., . . . Spada, M.-R. (2018). *Use Cases for Developing enhanced Mobile Broadband Services for the Promotion of 5G*. Italia.
- Chonka, A., & Abawajy, J. (2012). *Detecting and mitigating HX-DoS attacks against cloud Web services*. IEEE.
- CRC. (2020). Estudio sobre las condiciones regulatorias para favorecer la adopción de la tecnología 5G en Colombia. Colombia.
- Diana Carolina Ortíz Casallas, J. J. (2016). *Estudio de carrier aggregation para optimizar el uso del espectro asignado a los operadores móviles en Colombia*. Bogotá : Universidad Piloto de Colombia.
- Dogra, A., Jha, R. K., & Jain., S. (2020). *A survey on beyond 5G Network with the advent of 6G*. India: IEEE.

- Ejaz, W., Sharma, S. K., Saadat, S., Naeem, M., Anpalagan, A., & Chughtai, N. (2020). *A comprehensive survey on resource allocation for CRAN in 5G and beyond networks*. Canada: Science Direct.
- Engobo, S. (2019). *Las nuevas tecnologías de radio para el despliegue de la 5G. Principales requerimientos tecnológicos y dificultades de implementación*. Santa Clara.
- García, J. D. (2019). *Estudio del estado del arte de la telefonía móvil*. Piura, Perú : Universidad Nacional de Piura .
- Gavrilovska, L., Rakovic, V., Ichkov, A., Todorovski, D., & Marinova, S. (2018). *Flexible C-RAN: Radio technology for 5G*. Serbia: IEEE.
- Go, I. (2014). *Tutorial LTE* . Obtenido de http://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.php
- Guefry Leider Agredo, P. e. (2015). *Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: para la 5G inalámbrica* . Cali.
- Gyawali, S., Xu, S., Qian, Y., & Hu, R. Q. (2020). *Challenges and Solutions for Cellular Based V2X Communications*. Estados Unidos: IEEE.
- Hassan, E. H. (2015). *5G Cellular: Key Enabling Technologies and Research Challenges* . Canada: IEEE.
- Ibrahim Afolabi, T. T. (2018). *Network Slicing and Softwarization: A survey on Principles, Enabling Technologies, and solutions* . Finlandia : IEEE.

Ing. Yezid E. Donoso Meisel, P. (14 de Septiembre de 2021). *Arquitectura, Nuevos servicios y Ciberseguridad en Redes 5G*. Bogotá .

Irfan Ahmed, H. K. (2018). *A survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G: Architecture and System Model Perspectives* . IEEE.

J. M. Hamamreh, E. B. (2017). *OFDM-subcarrier index selection for enhancing security and reliability of 5G URLLC services*. IEEE.

Jia Liu, E. S. (2019). *Hybrid - Beamforming - Based Millimeter - Wave Cellular Network Optimization*. IEEE.

Jimenez, C. A., & Rizo, F. R. (2013). *Arquitectura general del sistema LTE* . *Revista digital de las tecnologías de la información y comunicaciones* , 81-90.

Juan Aranda, E. J. (2021). *5G Networks: A review from the perspectives of architecture, business models, cybersecurity, and research developments*. Bogotá, Colombia.

Khurpade, J. M., Rao, D., & Sanghavi, P. D. (2018). *A Survey on IoT and 5G Network* . India: IEEE.

Lenovo. (01 de 09 de 2021). *Lenovo* . Obtenido de <https://www.lenovo.com/co/es/faqs/pc-vida-faqs/que-es-4g/>

Lindstrom, P. (2008). *The Laws of Virtualization Security: Baselinemag.com Driving Business Success With Technology*.

- Liu, G., Huang, Y., Chen, Z., Liu, L., & LI, Q. W. (2020). *5G Deployment: Standalone vs Non-Standalone from the Operator Perspective*. Beijing : IEEE.
- Lusani Mamushiane, S. D. (2017). *Leveraging SDN/VNF as key stepping stones to the 5G era in emerging markets*. Sur áfrica : IEEE.
- Lv, T., Ma, Y., Zeng, J., & Mathiopoulos, P. T. (2018). *Millimeter-wave NOMA transmission in cellular M2M communications for Internet of Things*. IEEE.
- M. Tahir, M. H. (2020). *A review on application of blockchain in 5G and beyond networks:: Taxonomy, Field-Trials, Challenges and Oportunities*. . IEEE.
- Ma, T., Zhang, Y., Wang, F., Wang, D., & Guo, D. (2020). *Slicing Resource Alloaation for eMBB and URLLC in 5G RAN*. China.
- Mathew, A. (2020). *Network Slicing in 5G and the Security Concerns*. India : IEEE.
- Muhammad Nauman Irshad, L. D. (2019). *A Hybris Solution of SDN Architecture for 5G Mobile Communication to Improve Data Rate Transmission*. China: IEEE.
- Mukherjee, A., Fakoorian, S. A., & Swindlehurst, J. H. (2014). *Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: A survey*. IEEE.
- Murillo, O. P. (2021). *Estudio de cobertura de la tecnología 5G para las zonas metropolitanas de la ciudad de Bogota D.C*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia .

- Muteba, K., Djouani, K., & Olwal, T. (2020). *Opportunistic Resource Allocation for Narrowband Internet of Things: A literature Review*. Turkia : IEEE.
- Nour, B., Ksentini, A., Herbaut, N., Frangoudis, P. A., & Mounsla, H. (2019). *A Blockchain-Based Network Slice Broker for 5G Services*. Fracia: IEEE.
- Núñez, C. J. (2018). *Caracterización de las ondas milimétricas para determinar su posible aplicación en la Quinta generación de comunicaciones inalámbricas*. Guayaquil, Ecuador.
- Nurul H. Mahmood, M. G. (2017). *Full Duplex Communications in 5G Small Cells*. IEEE.
- Otros, R. S. (2005). *sHype: Secure hypervisor approach to trusted virtualized systems*.
- P.L.S.C Leslie Fernanda Monter, P. D. (2021). *Comunicaciones en redes*. Obtenido de http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/24_multiplexacin.html
- P.L.S.C. Leslie Fernanda Monter Martínez, P. D. (2021). *Comunicaciones en redes*. Obtenido de http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/241_tcnicas_de_multiplexacin.html
- Pastor, J. (Noviembre de 2017). *Xataka* . Obtenido de <https://www.xataka.com/especiales/que-es-blockchain-la-explicacion-definitiva-para-la-tecnologia-mas-de-moda>
- Plokiko. (2 de Agosto de 2019). *Xakata*. Obtenido de [xataka.com/moviles/que-significa-que-existan-dos-tipos-de-5g-diferencias-compatibilidades-5g-nsa-5g-sa](https://www.xataka.com/moviles/que-significa-que-existan-dos-tipos-de-5g-diferencias-compatibilidades-5g-nsa-5g-sa)

- Porras, P., Shin, S., Yegneswaran, V., Fong, M., Tyson, M., & Gu, G. (2012). *A security enforcement kernel for OpenFlow networks*.
- Ramos, O. C. (2013). *Descripción del estándar LTE-Advanced* . Santa Clara .
- Raza, H. (2013). *A brief survey of radio access network backhaul evolution: Part II*. IEEE.
- RHAYOUR, A. E., & MAZRI, T. (2019). *5G Architecture: Deployment scenarios and options*. Roma, italia : IEEE.
- Sahrish Khan Tayyaba, M. A. (2017). *5G Cellular network integration with SDN: Challenges, issues and beyond*. Pakistan : IEEE.
- Samsung. (2021). *5G Standalone Architecture* .
- Santos, A. (16 de Enero de 2018). *Ciena* . Obtenido de https://www.ciena.com.mx/insights/what-is/What-is-Network-Functions-Virtualization_es_LA.html
- Security-Enhanced Floodlight*. (2018). Obtenido de <http://www.sdncentral.com/education/toward-secure-sdn-control-layer/2013/10>
- Siverio, E. H. (2018). *Seguridad de la capa física para redes inalámbricas* . Santa clara.
- Suárez, L. L. (2017). *Estudio de Prospectia en el uso de la tecnología 5G en Colombia al 2025*. Bogotá : Universidad Santo Tomás.
- Tanab, M. E., & Hamouda, W. (2019). *Machine to Machine communications with massive access: Congestion control* . IEEE.

- Van-Giang Nguyen, A. B.-J. (2017). *SDN/NFV-Based Mobile Packet Core Network Architectures: A Survey*. Iran: IEEE.
- Wei Wang, Y. C. (2016). *A software-defined wireless networking enables spectrum management architecture*. China: IEEE.
- Wen, X., Chen, Y., Hu, C., & Shi, C. W. (s.f.). *Towards a secure controller platform for OpenFlow applications*. Proc. 2nd ACM SIGCOMM Workshop Hot Topics Softw. Defined Netw.
- Wu, Y., Khisti, A., Xiao, C., Caire, G., Wong, K.-K., & Gao, X. (2018). *A survey of Physical Layer Security Techniques for 5G Wireless Networks and Challenges Ahead*. China: IEEE.
- Yang, W., & Fung, C. (2016). *A survey on security in network functions virtualization*. IEEE.
- Zhang, X., Guo, X., & Zhang, H. (2021). *RB Allocation Scheme for eMBB and URLLC Coexistence in 5G and Beyond*. China: Telmo reis Cunha.
- Zhongshan Zhang, X. C. (2015). *Full Duplex techniques for 5G Networks: Self - Interference cancellation, Protocol Design and Relay Selection*. China: IEEE.
- Liu, G., Huang, Y., Chen, Z., Liu, L., & LI, Q. W. (2020). *5G Deployment: Standalone vs Non-Standalone from the Operator Perspective*. Beijing : IEEE
- Chen, W. C. (2014). *5G mmWAVE Technology Desing Challenges and Development Trends*. Taiwan: IEEE.

Campos, L. (2017). *Estudo das características de ondas milimétricas para os sistemas 5G*. Niterói - RJ.

Buckley, B. D. (1998). *Beamforming: A versatile approach to spatial filtering*. IEEE.

Irfan Ahmed, H. K. (2018). *A survey on Hybrid Beamforming Techniques in 5G: Architecture and System Model Perspectives*. IEEE.

Guefry Leider Agredo, P. e. (2015). *Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: para la 5G inalámbrica*. Cali.

Jia Liu, E. S. (2019). *Hybrid - Beamforming - Based Millimeter - Wave Cellular Network Optimization*. IEEE.

Achaleswar Sahai, G. P. (2011). *Pushing the limits of full - duplex: Design and Real-time Implementation*. Texas, USA: Technical Report TREE1104.

Zhongshan Zhang, X. C. (2015). *Full Duplex techniques for 5G Networks: Self - Interference cancellation, Protocol Design and Relay Selection*. China: IEEE.

Sahrish Khan Tayyaba, M. A. (2017). *5G Cellular network integration with SDN: Challenges, issues and beyond*. Pakistan: IEEE.

3GPP. (Ocupre de 2021). *3GPP*. Obtenido de <https://www.3gpp.org/about-3gpp>

Ibrahim Afolabi, T. T. (2018). *Network Slicing and Softwarization: A survey on Principles, Enabling Technologies, and solutions*. Finlandia : IEEE.

Muhammad Nauman Irshad, L. D. (2019). *A Hybris Solution of SDN Architecture for 5G Mobile Communication to Improve Data Rate Transmission*. China: IEEE.

Lusani Mamushiane, S. D. (2017). *Leveraging SDN/VNF as key stepping stones to the 5G era in emerging markets*. Sur Africa: IEEE.

Van-Giang Nguyen, A. B.-J. (2017). *SDN/NFV-Based Mobile Packet Core Network Architectures: A Survey*. Iran: IEEE.

Alcardo Alex Barakabitze, A. A. (2020). *5G network slicing using SDN and NFV: A survey of taxonomy, architectures and future challenges*. Irlanda: Computer Networks .

Aleksandra Checko, H. L. (2015). *Cloud RN for Mobile Networks - A Technology Overview*. Dinamarca: IEEE.

Raza, H. (2013). *A brief survey of radio access network backhaul evolution: Part II*. IEEE.

Ijaz Ahmad, S. S. (2019). *Security for 5G and Beyond*. Finlandia : IEEE.

A. Mukherjee, S. A. (2014). *Principles of physical layer security in multiuser wireless networks: A survey*. IEEE.

P.L.S.C Leslie Fernanda Monter, P. D. (2021). *Comunicaciones en redes*. Obtenido de http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/24_multiplexacin.html

P.L.S.C. Leslie Fernanda Monter Martínez, P. D. (2021). *Comunicaciones en redes*. Obtenido de http://cidecame.uaeh.edu.mx/lcc/mapa/PROYECTO/libro27/241_tcnicas_de_multiplexacin.html.

Beltran, Ó. L. (2020). *Términos de referencia para la migración de LTE a 5G en Colombia*. Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Córdoba, F. A. (2018). *Comparativo entre la tecnología de redes 4G y 5G y los beneficios de su implementación en Colombia* . Santiago de Cali: Universidad Santiago de Cali.

Suárez, L. L. (2017). *Estudio de Prospectia en el uso de la tecnología 5G en Colombia al 2025*. Bogotá : Universidad Santo Tomás.

Murillo, O. P. (2021). *Estudio de cobertura de la tecnología 5G para las zonas metropolitanas de la ciudad de Bogota D.C*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Mathew, A. (2020). *Network Slicing in 5G and the Security Concerns* . India : IEEE.

J. Cao, P. Y. (2019). *Fast authentication and data transfer scheme for massive NB-IoT devices in 3GPP 5G network*. IEEE.

Wu, Y., Khisti, A., Xiao, C., Caire, G., Wong, K.-K., & Gao, X. (2018). *A survey of Physical Layer Security Techniques for 5G Wireless Networks and Challenges Ahead* . China: IEEE.

Albreem, M. A., Juntti, M., & Shahabuddin, S. (2019). *Massive MIMO Detection Techniques: A Survey* . Finlandia: IEEE.

- Security-Enhanced Floodlight*. (2018). Obtenido de <http://www.sdncentral.com/education/toward-secure-sdn-control-layer/2013/10>
- Wu, Y., Khisti, A., Xiao, C., Caire, G., Wong, K.-K., & Gao, X. (2018). *A survey of Physical Layer Security Techniques for 5G Wireless Networks and Challenges Ahead*. China: IEEE.
- Porras, P., Shin, S., Yegneswaran, V., Fong, M., Tyson, M., & Gu, G. (2012). *A security enforcement kernel for OpenFlow networks*
- Al-Shaer, E., & Al-Haj, S. (2010). *FlowChecker: Configuration analysis and verification of federated OpenFlow infrastructures*.
- Yang, W., & Fung, C. (2016). *A survey on security in network functions virtualization*. IEEE.
- Basile, A. L., Pitscheider, C., Valenza, F., & Vallini, M. (2015). *A novel approach for integrating security policy enforcement with dynamic network virtualization*.
- Lindstrom, P. (2008). *The Laws of Virtualization Security: Baselinemag.com Driving Business Success With Technology*.
- Otros, R. S. (2005). *sHype: Secure hypervisor approach to trusted virtualized systems*
- Chonka, A., & Abawajy, J. (2012). *Detecting and mitigating HX-DoS attacks against cloud Web services*. IEEE.

- Pastor, J. (Noviembre de 2017). *Xataka* . Obtenido de <https://www.xataka.com/especiales/que-es-blockchain-la-explicacion-definitiva-para-la-tecnologia-mas-de-moda>
- Chaer, A., Salah, K., Lima, C., Ray, P. P., & Sheltami, T. (2020). *Blockchain for 5G: Opportunities and Challenges* . USA: IEEE.
- Dogra, A., Jha, R. K., & Jain., S. (2020). *A survey on beyond 5G Network with the advent of 6G*. India: IEEE.
- Chen, H., Wu, J., & Shimomura, T. (2018). *New Reference Signal Design for URLLC and eMBB Multiplexing in New Radio Wireless Communications* . Italia: IEEE.
- Zhang, X., Guo, X., & Zhang., H. (2021). *RB Allocation Scheme for eMBB and URLLC Coexistence in 5G and Beyond*. China: Telmo reis Cunha.
- Tanab, M. E., & Hamouda, W. (2019). *Machine to Machine communications with massive access: Congestion control* . IEEE.
- Lv, T., Ma, Y., Zeng, J., & Mathiopoulos, P. T. (2018). *Millimeter-wave NOMA transmission in cellular M2M communications for Internet of Things*. IEEE
- Khurpade, J. M., Rao, D., & Sanghavi, P. D. (2018). *A Survey on IoT and 5G Network* . India: IEEE.
- Muteba, K., Djouani, K., & Olwal, T. (2020). *Opportunistic Resource Allocation for Narrowband Internet of Things: A literature Review*. Turkia : IEEE.

Chettri, L., & Bera., R. (2019). *A Comprehensive Survey on Internet of Things (IoT) Toward 5G Wireless Systems* . India: IEEE.

Bejerano, P. G. (Junio de 2021). *ThinkBIG: Cellular V2X: Así conseguirá el 5G que los coches<<hablen>> entre sí* . Obtenido de <https://blogthinkbig.com/cellular-v2x-asi-conseguira-el-5g-que-los-coches-hablen-entre-si>

Gyawali, S., Xu, S., Qian, Y., & Hu, R. Q. (2020). *Challenges and Solutions for Cellular Based V2X Communications*. Estados Unidos: IEEE.

Dogra, A., Jha, R. K., & Jain., S. (2020). *A survey on beyond 5G Network with the advent of 6G*. India: IEEE.

Jiang, W., Han, B., Habibi, M. A., & Schotten, H. D. (2021). *The Road Towards 6G: A Comprehensive Survey* . Alemania: IEEE

5G, O. N. (2021). Observatorio Nacional de 5G. Obtenido de <https://on5g.es/el-nucleo-de-las-redes-5g-se-empieza-a-abrir-a-multiples-suministradores/>

5G, O. n. (25 de agosto de 2021). Observatorio nacional de 5G . Obtenido de <https://on5g.es/china-amplia-su-dominio-mundial-en-redes-5g-ahora-con-la-banda-de-700-mhz/>

GSMA. (2016). Espectro 5G: Posición de la GSMA sobre políticas públicas. GSM Association.

HUAWEI. (2021). HUAWEI. Obtenido de <https://www.huawei.com/en/news/2021/9/5g-core-leadership-award>

Iulio, A. A. (2021). OESIA. Obtenido de <https://ciberseguridad.oesia.com/seguridad-en-redes-5g/>

Mundo, T. (2020). Qué es la tecnología 5G: beneficios y rumores. Obtenido de <https://www.tvmundogt.com/tecnologia/que-es-la-tecnologia-5g-beneficios-y-rumores/>

Rui, L. (2020). ZTE. Obtenido de <https://www.zte.com.cn/global/about/magazine/zte-technologies/2020/5-en/Success-Stories/2.html>

Vara, D. J. (2020). Revolución hegemónica china: El 5g y la gobernanza digital. Universidad de león.

Digitales. (2021). Digitales. Obtenido de <https://www.digitales.es/blog-post/5-preguntas-para-entender-como-se-va-a-desplegar-el-5g-y-que-cambios-nos-traera/>

Remmert, H. (19 de marzo de 2021). DIGI. Obtenido de <https://es.digi.com/blog/post/5g-network-architecture>