



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Propuesta Técnico-Regulatoria de un protocolo para el despliegue de los sistemas de 5G en México

TESIS

Que para obtener el título de

INGENIERO EN TELECOMUNICACIONES

P R E S E N T A N

Leyva Tlapa Carlos Alfredo

Vera Sandoval Lucero Irais

DIRECTOR DE TESIS

M.I. Mario Alberto Hernández Flores



FI-DIE



Lic. Angélica Gutiérrez Vázquez
Coordinación de Titulación y
Servicio Social
angelica_6@comunidad.unam.mx
09/09/2020

Sello digital por
emergencia sanitaria

Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Para la familia Leyva y la familia Tlapa

Para mi padres y Gaby

Agradezco todo su apoyo y cariño

Agradecimientos.

Quiero agradecerle a mi familia, mis padres y a mi hermana Gaby, por haberme brindado todo ese apoyo y cariño durante todo este tiempo, por esos sacrificios que hicieron para que yo pudiera completar mi formación y cumplir mis sueños y metas, gracias por todas sus enseñanzas y valores que llevaré conmigo durante toda mi vida, que me han forjado como una persona responsable y capaz.

A mis amigos (Ulises, Lesvia, Alan, Sergio, Kioko, Kiomi y demás personas que he conocido desde la prepa 2 y la facultad) por brindarme su cariño y apoyo en diferentes ocasiones. Tengo un agradecimiento muy especial para la generación 2015-2019 “teletubies” que me dieron su apoyo y amistad durante nuestro tiempo en la facultad, haciéndome querer cada vez más esta carrera.

Un agradecimiento para nuestro asesor M.I. Mario Alberto Hernández Flores, quien nos dio oportunidad de trabajar en esta investigación, por su asesoría y paciencia en el desarrollo del mismo.

Finalmente le agradezco a la UNAM y a toda su comunidad, profesores, trabajadores, alumnos y todos los que la conforman por brindarme esta oportunidad de estudiar y formarme no sólo como Ingeniero en Telecomunicaciones, si no como una persona integra en diferentes ámbitos...

Carlos Alfredo Leyva Tlapa

Agradecimientos.

A mis padres: Roberto y Mireya, por ser el mejor de los ejemplos, apoyarme en todo y siempre darme todo su amor. Sin ustedes no sería la persona que soy, son lo mejor de mi vida.

A mis hermanas: Monserrat y Lisset, por ser un ejemplo y estar siempre que lo he necesitado. Las amo con todo mi corazón.

A Nayeli Torres, por ser la mejor amiga del mundo y haber estado toda la carrera a mi lado. Tu amistad ha sido un gran apoyo en mi vida, tanto académica como personal. Te amo.

A todos los profesores que a lo largo de mi vida he tenido la oportunidad de conocer, han sido una gran inspiración, gracias por transmitirme sus conocimientos.

A nuestro asesor, M.I Mario Alberto Hernández Flores, por brindarnos la oportunidad de trabajar con usted, por todo su apoyo y paciencia.

A la UNAM, por darme a gente maravillosa y por brindarme la oportunidad de crecer tanto en el ámbito académico como en el personal.

Lucero Irais Vera Sandoval.

ÍNDICE

1. Introducción	10
1.1 Definición del Problema	11
1.2 Objetivos de la Tesis	11
1.3 Metodología de la Tesis.....	12
1.4 Contribuciones	13
1.5 Estructura de trabajo de Tesis.....	13
2. Fundamentos de los Sistemas de Telefonía Celular	15
2.1 Concepto de celda	15
2.2. Técnicas de acceso al medio	16
2.2.1 Frequency Division Multiple Access (FDMA).....	16
2.2.2 Time Division Multiple Access (TDMA).....	17
2.2.3 Code Division Multiple Access (CDMA)	18
2.2.4 Spread Spectrum (SS)	19
2.2.5 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM).....	20
2.2.6 Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)	22
3. Evolución de la Telefonía Celular	23
3.1 Redes Celulares de Primera Generación (1G)	23
3.1.1 Advanced Mobile Phone System (AMPS).....	23
3.2 Redes Celulares de Segunda Generación (2G)	24
3.2.1 Global System for Mobile Communications (GSM).....	24
3.2.2 Arquitectura de las Redes GSM	25
3.2.3 Tramas GSM	26
3.2.4 Digital Advanced Mobile Phone System (D-AMPS).....	27
3.2.5 Tramas D-AMPS.....	27
3.3 Redes Celulares de Generación 2.5.....	28
3.3.1 High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD)	28
3.3.2 General Packet Radio Service (GPRS).....	29
3.3.3 Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE).....	29
3.4 Redes Celulares de Tercera Generación (3G).....	29
3.4.1 3rd Generation Partnership Project (3GPP)	30

3.4.2 Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS).....	32
3.4.3 CDMA2000.....	33
3.5 Redes Celulares de Cuarta Generación (4G)	34
3.5.1 Long Term Evolution (LTE).....	34
3.5.2 Arquitectura LTE	35
3.5.3 World Interoperability for Microwave Access (WiMAX).....	36
4. Redes Celulares de Quinta Generación (5G)	38
4.1 Características de las nuevas redes.....	38
4.2 Descripción de la Capa Física.....	39
4.2.1 Arquitecturas SA y NSA	39
4.2.2 Bandas de Frecuencia Asignadas.....	41
4.2.3 Tecnologías Habilitadoras	43
4.2.4 Formas de onda y técnicas de Modulación.....	47
4.2.5 Nuevas Técnicas de Acceso al Medio	50
4.3 Aplicaciones de la tecnología 5G.....	55
5. Prospectiva de Uso de los Sistemas 5G en México y en el mundo	57
5.1 Usos y Necesidades de la Tecnología 5G.....	57
5.2 Despliegue Actual de las Redes de Telefonía Celular	57
5.3 Acciones regulatorias para la implementación de 5G.....	61
5.3.1 Implementación a nivel Mundial.....	61
5.3.2 Desarrollo en la zona de Norteamérica.....	62
5.3.3 Desarrollo en la zona Asiática.....	64
5.3.4 Desarrollo en Europa.....	67
5.3.5 Planes de desarrollo en México	68
6. Propuesta para el Despliegue de los Sistemas 5G en México	74
6.1 Análisis del Espectro Radioeléctrico en México	74
6.1.1 Bandas de Frecuencias propuestas para la tecnología 5G	74
6.1.2 Licitaciones de Bandas de Frecuencias.....	80
6.1.3 Optimización del Modelo de Licitación del Espectro Radioeléctrico	83
6.2 Adopción de la Telefonía Móvil 5G	84
6.2.1 Implementación de Infraestructura: NSA o SA	85

6.2.2 Requerimientos Tecnológicos de Backhaul.....	87
6.2.3 Optimización de Cobertura y Funcionamiento de la Tecnología 4G.....	91
7. Conclusiones.....	92
7.1 Recomendaciones	94
Bibliografía y Referencias	96
Apéndice de Acrónimos y Abreviaciones	100

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Reúso de Frecuencias Asignadas en las Celdas.....	15
Figura 2.2. Funcionamiento de OFDM.....	16
Figura 2.3. Diagrama de Funcionamiento TDMA.....	17
Figura 2.4. Representación CDMA.....	19
Figura 2.5. Espectro Extendido	20
Figura 2.6. Representación Espectral de una Señal OFDM	21
Figura 2.7. Comparación OFDMA con SC-FDMA.....	22
Figura 3.1. Arquitectura de una red GSM.....	26
Figura 3.2. Estructura de las tramas GSM/TDMA.....	26
Figura 3.3. Estructura de una trama D-AMPS.....	28
Figura 3.4. División del espectro de la red UMTS.....	32
Figura 3.5. CDMA2000 ancho de banda de operación.....	34
Figura 3.6. Arquitectura de la red LTE.....	36
Figura 4.1. Arquitectura NSA, compatible con 4G.....	40
Figura 4.2. Arquitectura SA, exclusivo para 5G.....	40
Figura 4.3. Multiplexación Espacial - MIMO.....	45
Figura 4.4. Estaciones Base MU - MIMO.....	46
Figura 4.5. Comparación RAN y CRAN.....	46
Figura 4.6. Diagrama de bloques GFDM.....	48
Figura 4.7. Diagrama de bloques de FBMC.....	49
Figura 4.8. Subportadoras OFDMA.....	50
Figura 4.9. Subcanales de OFDMA (a) ASM (b) DSM.....	51
Figura 4.10. Uso del espectro de OFDMA y NOMA.....	52
Figura 4.11. Funcionamiento de NOMA.....	53
Figura 5.1. Porcentajes de Utilización de Tecnologías Móviles en el Mundo.....	58
Figura 5.2. Adopción Tecnológica de 2G, 3G, 4G y 5G a Nivel Mundial.....	59
Figura 5.3. Despliegue de Tecnologías Celulares en el Mundo.....	60
Figura 5.4. Porcentaje de Adopción 5G en los Mercados Clave.....	61

Figura 5.5. Población usuaria de Internet en 2015-2018 en México.....	68
Figura 5.6. Pruebas de 5G en los Principales Mercados Latinoamericanos.....	70
Figura 5.7. Comparativo de Espectro Asignado para Servicios IMT.....	71
Figura 5.8. Asignación de espectro IMT en Latinoamérica.....	72
Figura 5.9. Propuesta de Segmentación para la Banda de 600 MHz.....	73
Figura 6.1. Bandas Propuestas en el Release 15 del 3GPP para la Tecnología 5G más Ocupadas en su Implementación a Nivel Mundial.....	75
Figura 6.2. Segmentos de Frecuencias Asignados para Servicios de Comunicaciones Móviles en el CNAF.....	76
Figura 6.3. Servicios Asignados en el CNAF para los Rangos de Frecuencias de las Bandas n257, n258 y n260 del Release 15.....	79
Figura 6.4. Diagrama de Flujo para la Concesión y Explotación de Bandas para Sistemas 5G.....	82
Figura 6.5. Diagrama de Implementación de Arquitecturas 5G.	86
Figura 6.6. Línea de Tiempo de Implementación de Arquitecturas 5G.....	87
Figura 6.7. Porcentaje de Hogares con Acceso a Servicios de Banda Ancha.....	88
Figura 6.8. Zonas de Cobertura por Parte de la Red Compartida.....	89

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Radio de Cobertura de Celdas Celulares.....	16
Tabla 2. Cuadro Comparativo Generaciones Celulares.....	37
Tabla 3. Frecuencias Propuestas para 5G.....	42
Tabla 4. Cuadro Comparativo de Tecnologías de Acceso.....	55
Tabla 5. Frecuencias de Operación de los Operadores Telefónicos Mexicanos.....	75
Tabla 6. Ventajas y Desventajas de los Rangos de Frecuencias para 5G.....	80
Tabla 7. Estatus de las Bandas de 5G en México.....	81
Tabla 8. Relación de Tiempos de Licitación e Implementación de Bandas 5G.....	83
Tabla 9. Cuadro comparativo NSA y SA.....	85

1. Introducción

Dentro de este trabajo de tesis nos enfocamos a mostrar el desarrollo que han tenido las redes de tecnología móvil 5G, en México y en el mundo para poder observar cuales son las necesidades que se requieren cumplir dentro del país para poder implementar una red de la nueva tecnología que sea capaz de dar soporte a la población. Es importante tomar en cuenta que la implementación de una nueva tecnología afecta directamente en todos los aspectos que conciernen a la población que la utiliza, no sólo en aspectos tecnológicos, sino que, en aspectos económicos, políticos, sociales e incluso culturales debido a las aplicaciones que traen consigo las nuevas tecnologías [1].

Dado que se trata de un protocolo de telefonía móvil, durante el desarrollo de este trabajo nos enfocamos principalmente en la parte de la telefonía celular, así como sus características y aplicaciones, es por esto que, nos centramos en desarrollar algunos aspectos pertenecientes a la telefonía celular que la conforman así como, a describir algunas de las tecnologías que se han utilizado para su funcionamiento. Por otra parte se desarrollan las características de cada generación de telefonía celular con el paso de los años, sus tecnologías y principales características en el aspecto técnico, pasando así a las principales características y tecnologías que fueron propuestas para el funcionamiento y soporte de las redes de telefonía de quinta generación, mostrando la diferencia que se presenta a nivel físico con las antiguas generaciones desarrolladas [22], así como sus ventajas y algunas aplicaciones que impulsara la nueva tecnología.

Además, se realiza un análisis del desarrollo e implementación actual que presentan diferentes países respecto a este tema, para con esto poder comparar el desarrollo que ha tenido México y así, poder presentar propuestas que resulten favorables para una buena implementación de esta tecnología a partir del 2020. Si bien, actualmente se cuenta con una tecnología 4G-LTE dentro del país [2], esta red aún no se encuentra funcionando en un sistema óptimo, debido a que aún no cubre el cien por ciento del territorio nacional, siendo necesario plantear medidas para optimizar y mejorar esta red, planteando un buen sustento para la implementación de una red de la nueva tecnología.

Cabe recalcar que actualmente México presenta un rezago dentro de este tema pues no se le ha dado la suficiente importancia por parte de las empresas y por la parte del gobierno el cual es el encargado de promover y marcar estándares a cumplir dentro de la implementación de dichas tecnologías en nuestra nación. Por nuestra parte decidimos enfocarnos a las acciones regulatorias que genera el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) debido a que es el encargado de administrar el uso y explotación de las bandas del espectro radioeléctrico nacional, además, de que la explotación de las bandas de frecuencias han sido un tema importante para la implementación del nuevo protocolo debido a que sus características comienzan a variar ampliamente con las bandas utilizadas por los sistemas 4G [3].

1.1 Definición del Problema

Las redes 5G aún representan un reto, dado que están aún en desarrollo y se prevé su implementación para este año 2020 a nivel mundial y, unos años después, su implementación nacional [1]. Para reducir este previsto retraso es importante analizar los diferentes protocolos de despliegue que se han desarrollado para esta tecnología en otros países, además, de conocer a fondo el diseño de los Sistemas 5G, con el objeto de desplegar estas redes de telefonía celular que sean óptimas y eficientes.

Si bien, recientemente, se ha instaurado el sistema 4G-LTE dentro del país [2], aunque aún no trabajan de la mejor manera ni dan cobertura a todas las poblaciones de México, no se tiene por qué detener el avance hacia la tecnología 5G y, aún más, sería conveniente utilizar el tiempo de rezago para observar el funcionamiento de los protocolos técnicos y regulatorios que se han adoptado en otros países, para escoger el más óptimo para su uso en territorio nacional.

Actualmente, en México no se han llevado a cabo las suficientes acciones para la implementación técnica y regulatoria de las redes 5G. Sin embargo, se ha realizado la liberación de bandas de frecuencia para objeto de licitación y operadores como Movistar y AT&T [42] han realizado pruebas de esta tecnología en bandas de frecuencias que el Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT) ha concedido para este fin [3].

1.2 Objetivos de la Tesis

Esta Tesis tiene como objetivo general proponer y justificar un protocolo técnico-regulatorio de adopción de los Sistemas 5G para México de cara a los años 2019-2024. Se busca que el protocolo propuesto esté, fuertemente, justificado en el Marco Regulatorio vigente en el país y en los aspectos técnicos del Estado del Arte de los Sistemas 5G, procurando una pronta y eficiente implementación de estos sistemas en México.

Adicionalmente, la Tesis tiene como objetivos particulares los siguientes:

- Investigar sobre los principios básicos de funcionamiento, tecnologías y características de cada generación de los sistemas de telefonía móvil.
- Presentar y explicar las tecnologías que se han propuesto para el nuevo protocolo 5G de telefonía móvil.
- Presentar el desarrollo de la implementación de los sistemas de telefonía móvil 5G que, hasta ahora, se han llevado a cabo en el mundo.
- Presentar propuestas técnicas y regulatorias, que resulten convenientes para la eficiente implementación de los sistemas de telefonía móvil 5G dentro del país.

1.3 Metodología de la Tesis

El desarrollo de esta Tesis comprende 6 capítulos, además de éste. La metodología se basa en la investigación, tanto a nivel técnico, como regulatorio, de las tecnologías de telefonía celular que se han desarrollado al día de hoy. Una vez recopilada la suficiente información, ésta fue analizada y comparada para poder generar propuestas que fueran factibles y propicias para llevar a cabo por el IFT y los operadores telefónicos.

En el Capítulo 2 se presentan los conceptos básicos que integran una red de telefonía celular, así como las principales tecnologías de acceso con las que funcionan las generaciones de telefonía móvil.

Para el siguiente capítulo, se desarrolló una síntesis de las características y del funcionamiento de cada una de las generaciones de telefonía celular que han sido implementadas. Se mencionan las principales ventajas y desventajas de cada generación, y aspectos técnicos, tales como velocidades de transferencia y otras características.

Una vez abordadas las generaciones de telefonía móvil, en el Capítulo 4, se presenta un resumen técnico de las características de los sistemas de 5G. Dado que en el periodo de desarrollo de este trabajo aún no estaban definidas la totalidad de las tecnologías de los sistemas de 5G, se definieron todas las tecnologías candidatas a ser utilizadas, incluyendo modulaciones, tecnologías de acceso y arquitecturas de red. También, se describe, brevemente, el Release 15 de la 3GPP.

El Capítulo 5 presenta una descripción de los casos de desarrollo e implementación de los sistemas 5G que se han dado en diferentes partes del mundo, sobre todo en las bandas de frecuencia liberadas hacia los operadores móviles para el desarrollo de pruebas y el futuro despliegue de las redes. Además, se describe el caso de México y el estado, que se tiene hasta estos días, sobre las bandas de frecuencia destinadas para ser explotadas para el despliegue de sistemas telefónicos 5G.

En el Capítulo 6, se presentan las propuestas que se consideran más convenientes para una correcta implementación de un sistema 5G dentro del país, centrándonos en la liberación y licitación de bandas dentro del espectro radioeléctrico para lograr una explotación eficiente de éstas en los siguientes años. En el aspecto técnico de las propuestas se habla de las arquitecturas de red que resultan más convenientes para implementar, en estos momentos y en un futuro, en el país, de acuerdo a las características de velocidad y latencia que prometen los nuevos sistemas de 5G. El protocolo está propuesto para su aplicación en periodos asequibles para los operadores telefónicos, brindando servicios de calidad equiparables con los de otras naciones.

Finalmente, en nuestro Capítulo 7, se presentan las conclusiones a las cuales llegamos luego de haber desarrollado este trabajo de Tesis, además de algunas recomendaciones que creemos necesarias para un mejor desarrollo de los sistemas 5G.

1.4 Contribuciones

Se espera que, a partir de la investigación realizada en éste trabajo de tesis, se llegue a definir las mejores decisiones para el despliegue de las redes 5G y de esta forma aportar un documento que contenga un análisis de los sistemas que existen en la actualidad en México, además de tomar en cuenta las acciones que se han realizado en otros países respecto al despliegue de los sistemas 5G, esto dirigido a las instituciones encargadas de la toma de decisiones y regulación de las tecnologías móviles, como lo es la Secretaria de Comunicaciones y Transportes y el Instituto Federal de Telecomunicaciones.

Con el desarrollo de este documento esperamos contribuir para tomar las mejores decisiones para este país, en cuestión de tecnologías móviles, para que en un futuro no muy lejano finalmente se pueda aprovechar al máximo todos los beneficios que trae consigo el despliegue de los sistemas 5G.

1.5 Estructura de trabajo de Tesis

Inicialmente definiremos los conceptos básicos de telefonía, para después de eso investigar sobre las tecnologías de acceso al medio existentes, para con ello comprender mucho mejor el funcionamiento de los sistemas que existen actualmente, con esto conoceremos mucho mejor como se encuentra nuestro país respecto a los sistemas implementados, como en su arquitectura y su asignación de bandas de frecuencia.

Partiendo de la investigación que se realizará acerca del funcionamiento de las redes de la primera a la cuarta generación, se tomarán en cuenta todo lo que hay actualmente en el país, además se realizará una comparación de México con países de primer mundo y sus acciones respecto al despliegue de la nueva tecnología móvil 5G, para de esta forma se logre elegir la más conveniente y adecuada para nuestro país, según sus necesidades y posibilidades.

Así que este trabajo consistirá en recabar la información que existe actualmente para buscar tomar las mejores decisiones, buscando beneficiar a los usuarios, cubriendo sus necesidades respecto al despliegue de la nueva tecnología 5G, buscando traer consigo nuevos avances tecnológicos.

2. Fundamentos de los Sistemas de Telefonía Celular

En este capítulo se habla brevemente sobre los principios de funcionamiento en los que se basa la telefonía celular. Centrándose, principalmente, en las tecnologías de acceso al medio y la descripción de la capa física.

2.1 Concepto de celda

Las celdas son un concepto fundamental de las redes de telefonía celular, éstas consisten en radio bases con un transceptor que cubren una determinada área, la cual suele ser representada de forma hexagonal. La ventaja de las celdas es que hacen posible el reúso de frecuencias de RF, y así, se aumenta el número de canales de información simultáneos disponibles para la zona de servicio. [4]

En la figura 2.1 puede apreciarse un arreglo típico de celdas dentro de la telefonía celular, en el cual, a cada celda le corresponde una frecuencia (canal) de operación, mientras que el otro arreglo reutiliza las mismas frecuencias de operación haciendo posible aumentar la capacidad de la red sin generar interferencia entre las celdas adyacentes. Es importante tener en cuenta que se necesita una distribución homogénea entre los arreglos y tener una distancia “considerable” entre las frecuencias que se reutilizan para aprovechar de manera eficiente los arreglos de celdas.

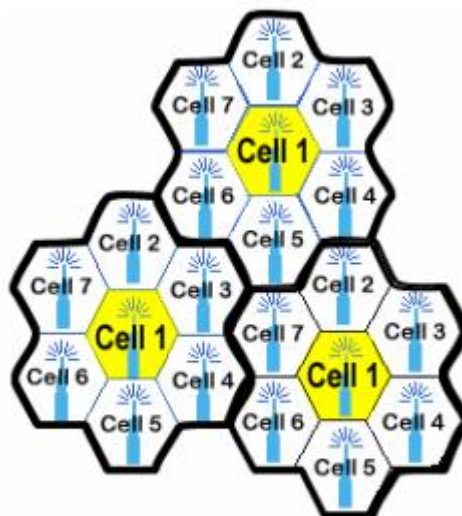


Figura 2.1. Reúso de frecuencias asignadas en las celdas [9].

Las celdas celulares se dividen en el rango de cobertura que pueden ofrecer, por ejemplo, se tienen clasificadas las macro-celdas que ofrecen kilómetros de cobertura utilizadas para áreas rurales o zonas de área extensa [9].

Otra clasificación son las pequeñas celdas, donde se ubican las femto-celdas, pico-celdas y micro-celdas especializadas para áreas pequeñas de cobertura dentro de lugares públicos, edificios o en zonas interiores cuyos rangos de cobertura se van desde unos metros hasta algunos kilómetros, como se describen mejor en la tabla 1 [9].

Tipo de Celda	Radio de Cobertura
Macro-celda	1 - 20 km
Micro-celda	500 m - 2 km
Pico-celda	100 m - 300 m
Femto-celda	< 50 m

Tabla 1. Radio de Cobertura de Celdas Celulares. [9]

2.2. Técnicas de acceso al medio

Las técnicas de acceso múltiple son herramientas que permiten a un grupo de usuarios determinado conectarse a un medio con cierta capacidad para poder realizar la transmisión y recepción de información. En el caso de las redes inalámbricas han evolucionado las diferentes técnicas, aunque el principio básico de su funcionamiento es la multiplexación ya sea de frecuencia, tiempo o de código todos ellos ubicados en la capa física (Modelo OSI) de la red como se explicará en los siguientes párrafos.

2.2.1 Frequency Division Multiple Access (FDMA)

Se trata de una técnica de acceso múltiple para telefonía en la cual se generan varias divisiones de frecuencia en el espectro que se tiene asignado dándole un ancho de banda diferente para cada usuario [7], es decir, se le asignaba un canal para su uso exclusivo, en la *figura 2.2* se muestra el funcionamiento de esta técnica, en la cual se le asigna un ancho de banda de canal para cada usuario con su respectiva banda de guarda hasta "M" usuarios que sean posibles tener dentro de la banda en la que se está trabajando. Este fue de los primeros sistemas de multiplexación de carácter analógico implementado en el sistema AMPS (Advanced Mobile Phone Service) de los laboratorios Bell en 1983 formando la primera generación de redes celulares (1G). [7]

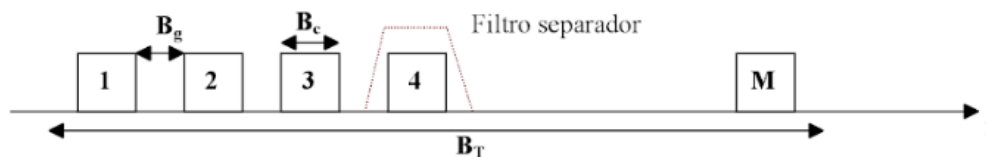


Figura 2.2. Funcionamiento de OFDM [7]

2.2.2 Time Division Multiple Access (TDMA)

TDMA es otra técnica muy utilizada de acceso múltiple la cual consiste en asignar un canal de comunicación común y dentro del implementar la división del tiempo asignado un slot para cada usuario. En pocas palabras se podría decir que reutiliza el sistema FDMA optimizado ya que este implementa la digitalización de la información dividiéndola en paquetes de datos que son enviados en un determinado time slot de un frame, además de que tiene la particularidad de que cambia de banda (canal) para evitar caer en bandas que posean mucha interferencia. La *figura 2.3* muestra el funcionamiento básico del sistema, donde por cada frecuencia que se utiliza se realiza una división en el tiempo generando un slot para el uso de un usuario diferente. [7]

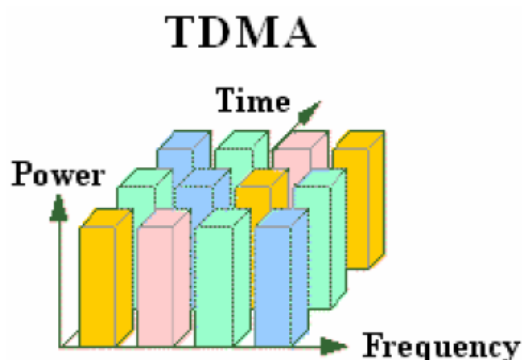


Figura 2.3. Diagrama de Funcionamiento TDMA [10]

Una de las ventajas que introdujo el uso de TDMA en los sistemas es que se dio en la digitalización de la información, permitiendo manejar datos además de voz, introduciendo los Short Message Service (SMS), además de aumentar la cantidad de transmisión de datos llegando a alcanzar desde 64 kbps hasta 120 Mbps [10]. TDMA implementa un nuevo concepto en la forma de trabajo, ya que introduce la compresión de datos al tratarse de un sistema digital permitiendo la transmisión de mayor cantidad de datos utilizando diferentes tipos de códigos.

El hecho de asignar un time slot para cada usuario reduce la interferencia que recibe también haciéndolo más resistente al ruido y es posible implementar códigos de detección y corrección de errores mejorando el servicio de llamadas para los usuarios. [7] Este sistema necesita de una buena sincronización entre los dispositivos y la estación base ya que al utilizar time slots específicos para cada usuario no es posible tener adelantos o retrasos de tiempo pues comprometería la información que se está transmitiendo, por lo que el protocolo debe de especificar los tiempos en los que se transmite y recibe cada time slot.

Por otro lado, el sistema TDMA permite utilizar eficientemente la distribución jerárquica de las células, generando una división entre las células en pico, micro y macro células, con esto es posible identificar el tipo de tráfico y colocar una célula específica dependiendo del tipo de tráfico con el que se trabajará. [10]

Las desventajas que tiene el sistema nuevamente es la saturación del sistema, pues a cada usuario se le asigna un time slot específico, pero al saltar de celda pudiera ser que el circuito se encuentre ocupado por otro usuario negándole el servicio. Al utilizar el sistema FDMA continua con el problema de la optimización del ancho de banda, si bien aumenta la cantidad de usuarios con el uso de las frames y los time slot también desperdicia tiempo, pues cada time slot maneja un tiempo de guarda para evitar tener pérdida de información debido a la desincronización.

Otra desventaja consiste en que implementa la distorsión por multirrayectos, ya que el dispositivo puede recibir varias señales provenientes de rebotes del entorno afectando la recepción y la sincronización del dispositivo comprometiendo la información que está recibiendo.

2.2.3 Code Division Multiple Access (CDMA)

Esta técnica de comunicación digital lleva su acceso múltiple a través de la asignación de un código pseudoaleatorio para cada usuario, dichos códigos deben ser ortogonales entre sí, permitiendo que todos los usuarios puedan utilizar el mismo canal de forma simultánea [8]. Al trabajar con códigos ortogonales es posible evitar traslapes entre los usuarios y evitar información no deseada o interferencias (ruido) entre los usuarios. Este código es utilizado para transformar la señal de un usuario en una señal de banda ancha a través de la técnica denominada espectro extendido [5]. Cuando el receptor recibe múltiples señales de banda ancha, este utiliza el código de cada usuario para recuperar la información original. Durante el periodo de recuperación de la señal deseada, la potencia es comprimida dentro del ancho de banda original, las demás señales son interpretadas como ruido ante la señal deseada.

Cuando CDMA se utiliza y los usuarios transmiten de forma simultánea utilizando la misma portadora se pueden observar señales traslapadas, pero gracias al código asignado se podrá distinguir cada usuario y será posible recuperar la señal transmitida, aprovechando al máximo el canal [5]. CDMA separa y recupera la información de cada uno de los usuarios únicamente conociendo el código de cada usuario, tanto en receptor como en el transmisor.

CDMA permite que más usuarios utilicen un mismo canal, esta técnica es la forma de acceso para las redes de tercera generación de telefonía (3G). Al utilizar CDMA tenemos múltiples ventajas, por ejemplo, se optimiza el ancho de banda del canal, por la codificación se tiene una mayor seguridad y privacidad de la información que es transmitida, hay un control del nivel de potencia gracias al procesamiento de las señales y la corrección de errores, gracias al control de nivel de potencia hay una mayor cobertura y hay una disminución en el ruido y en la interferencia.

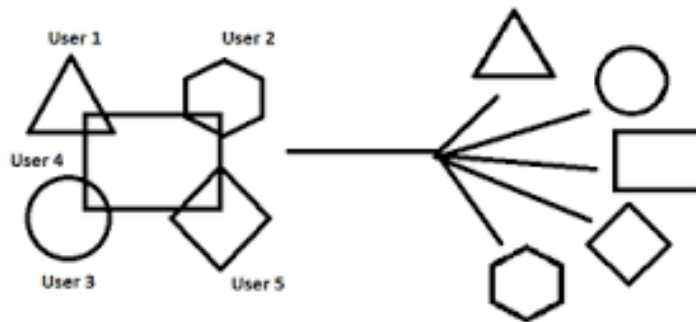


Figura 2.4. Representación CDMA [5]

En la figura 2.7 del lado izquierdo podemos observar una representación de lo que sería la información transmitida por cada usuario en un mismo ancho de banda que incluso están traslapadas, pero también podemos ver que es posible transmitir la información diferente de cada usuario al mismo tiempo y la cual puede ser recuperada por el receptor sin tener tanto ruido y sin tanta interferencia, como lo podemos observar en la misma ilustración pero del lado derecho, así que obtenemos la información inicialmente transmitida y la información recibida se puede regresar a su forma transmitida únicamente con el código que le fue asignado inicialmente a cada usuario.

2.2.4 Spread Spectrum (SS)

La técnica del Spread Spectrum (Espectro Extendido), en CDMA, es utilizado para separar señales, mediante la distribución de la potencia a lo largo de un ancho de banda mayor al de la información, el esparcimiento se lleva a cabo cuando le es agregada a la señal de transmisión un código pseudoaleatorio con una velocidad de transmisión mayor, así se obtiene una señal con una densidad de potencia que es comparable al ruido, lo explicado anteriormente lo podemos observar en la figura 2.8. [4] La mayor ventaja de la modulación de Spread Spectrum es la gran inmunidad ante las interferencias.

La técnica de espectro extendido, en CDMA, es utilizado para separar señales y son empleadas diferentes técnicas, como lo son:

- Secuencia Directa (DS)

Para esta técnica se genera un patrón de bits redundantes para cada bit que componen a la señal, entre más grande sea el patrón de bits que le es generado a cada señal, mayor será la resistencia a interferencias. El estándar 802.11 de la IEEE recomienda un tamaño de 11 bits, el óptimo es de 100 [4]. Una vez que se tenga en el receptor se tiene que realizar el proceso inverso para poder obtener la información original.

Esta es una técnica que utiliza un código de pseudoruido y este es utilizado para modular de forma digital una portadora, de esta forma el ancho de banda de transmisión se aumenta y la densidad de potencia espectral disminuye. La señal que es resultante de todo este proceso tiene un espectro parecido al del ruido, así todos los radiorreceptores a los que no va dirigida la señal recibirá esta señal como ruido. [4]

- Salto de Frecuencia (FH)

Para esta técnica las señales son emitidas en una serie de radiofrecuencias de forma aparentemente aleatoria, saltando de frecuencia en frecuencia de forma sincronizada con el transmisor [7]. Como ya se mencionó antes, CDMA requiere de códigos ortogonales, aunque normalmente, existe una pequeña correlación entre una señal con otra, lo que genera una porción de ruido debido a las demás señales mezcladas.

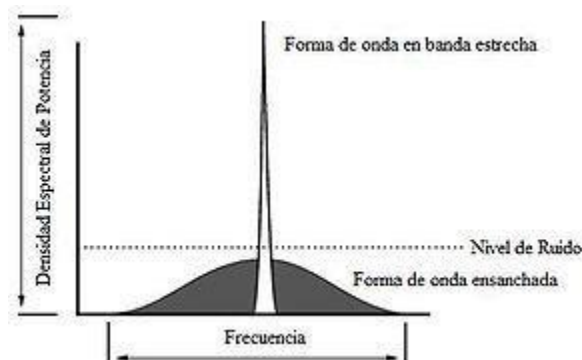


Figura 2.5. Espectro Extendido [5]

Para que la señal sea recuperada, el receptor requiere el código que le fue agregado a la señal de transmisión, para que cuando le sea retirado se pueda obtener la información en banda base. De esta manera cuando se cuente con una señal local que sea una réplica de la señal que contiene el código de transmisión y la sincronía correcta se lograra la recuperación de la información. [5]

En pocas palabras el espectro extendido toma una señal de información pequeña y la distribuye en una banda que puede ser mayor.

2.2.5 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing (OFDM)

La multiplexación por división de frecuencias ortogonales trabaja con el principio de funcionalidad de FDMA, esto es, maneja diferentes portadoras para diferentes usuarios. Con OFDM se asigna un grupo de cientos, o incluso miles de portadoras, de diferentes frecuencias separadas cierto intervalo de frecuencias para el uso de cada usuario,

generando así un canal de transmisión bastante robusto logrando así disminuir los efectos interferentes generados por multitrayectos de la señal o por otras señales que puedan afectar al canal. [8] La ortogonalidad le da el efecto de espaciar portadoras a una frecuencia precisa con una cierta cantidad de información, es decir, genera una separación espectral entre las señales.

Lo importante de la ortogonalidad es que se observa que los picos de las señales portadoras corresponden a puntos nulos para otras señales, evitando tener interferencia de señales sub-portadoras, como se muestra en la figura 2.6. Este fenómeno hace que OFDM tenga una alta eficiencia espectral, pues, a pesar de tener un espaciamiento entre cada portadora puede transmitir mucha más información que una señal que ocupe su versión análoga FDMA.

En primera instancia, podría parecer que al modular bastantes señales portadoras sería un problema, sin embargo, para el proceso de modulación y demodulación es posible aplicar algoritmos correspondientes a la transformada rápida de Fourier optimizando el sistema [4].

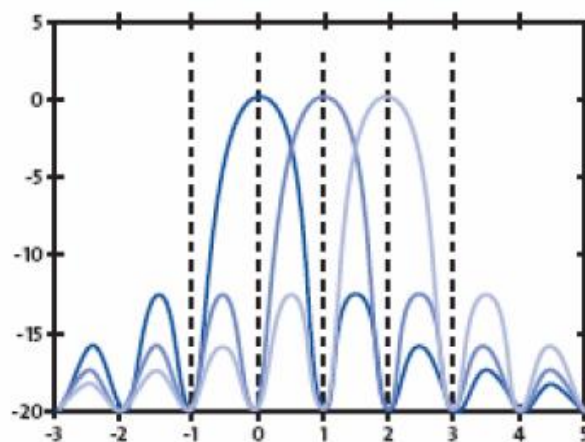


Figura 2.6. Representación Espectral de una Señal OFDM [8]

Las principales ventajas de OFDM es que posee una alta eficiencia espectral, dependiendo de las portadoras que se le asigne al usuario, puede aumentar o disminuir la robustez del canal con el cual se va a transmitir información, la ecualización del canal resulta ser más sencilla que para sistemas de canal único de banda ancha, los umbrales de potencia necesarios para transmitir se ven reducidos al igual que el número de retardos, además si se pierde información es posible recuperarla con códigos FEC [8].

Mientras que las desventajas del sistema son que sigue siendo muy sensitivo a desfases de frecuencia y de tiempo, además de que la ortogonalidad elimina las interferencias entre sub-portadoras al existir varias de ellas, en caso de no haber más portadoras ortogonales la interferencia vuelve a ser un gran problema para el canal [8].

2.2.6 Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

El SC-FDMA (Acceso múltiple por división de frecuencia ortogonal de portadora única) corresponde a otra técnica de acceso al medio en la cual se transmiten diferentes símbolos de forma secuencial. De esta forma se transmiten en un mismo período de tiempo, luego de cuatro símbolos se deja un tiempo para evitar traslapes y volver a enviar símbolos.

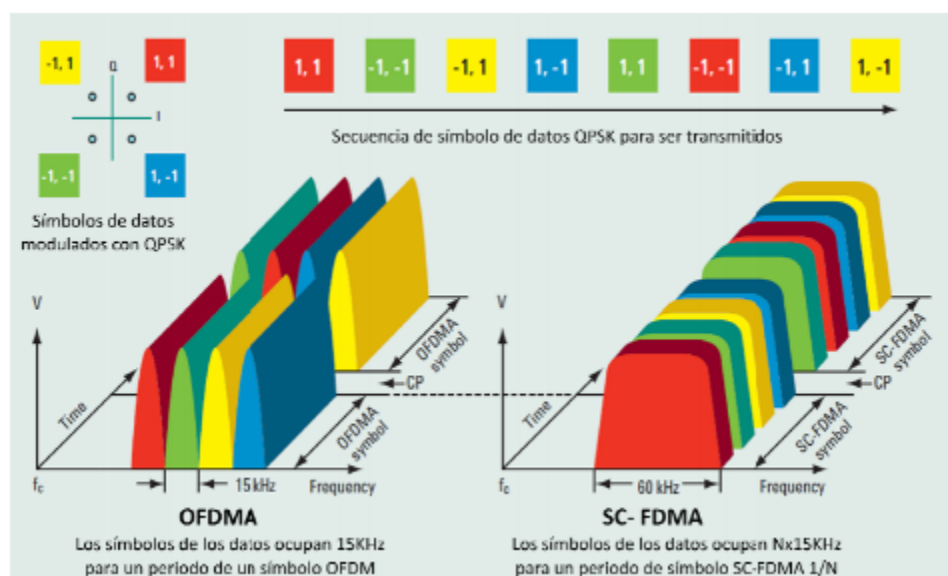


Figura 2.7. Comparación OFDMA con SC-FDMA. [6]

SC-FDMA se utiliza porque la señal OFDMA requiere de un alto consumo energético. En OFDMA, como ya se explicó anteriormente, los símbolos son transmitidos de forma paralela mientras que en SC-FDMA los símbolos son transmitidos en series de cuatro veces la velocidad. Como se presenta en la figura 2.7, observamos una comparación entre OFDMA y SC-FDMA y aquí podemos ver que OFDMA luce como una señal multiportadora y en SC-FDMA se ve como una portadora simple, esta característica hace que la señal SC-FDMA tenga un par menor que en la señal OFDMA y por lo tanto, es la adecuada para el canal ascendente.

3. Evolución de la Telefonía Celular

3.1 Redes Celulares de Primera Generación (1G)

La tecnología de telefonía celular que se implementó inicialmente en el año de 1979 [12] consistía en un sistema muy básico, el cual consistía en un sistema muy parecido a la tecnología telefónica fija de ese entonces, únicamente manejaba servicios de voz de forma analógica, la velocidad que llegaba a alcanzar rondaba entre 1kbps y 2.4 kbps y utilizaba un sistema de FDMA para acceso al medio.

Su funcionamiento se basaba en el sistema AMPS, que fue instaurado en los laboratorios Bell por el año de 1983, implementando la el concepto de Frequency Division Duplexing (FDD) permitiendo transmitir y recibir al mismo tiempo sin afectar el canal [12], este sistema era muy rudimentario y además de la mala calidad de las llamadas tenías un gran desaprovechamiento del ancho de banda que poseía y por tanto manejaba un número reducido de usuarios que podía atender por cada radio base establecida.

3.1.1 Advanced Mobile Phone System (AMPS)

El sistema Advanced Mobile Phone System (AMPS) es un protocolo utilizado en la primera generación celular, el cual funciona con FDMA aplicado a un ancho de banda total de 25 MHz asignado a 1664 canales en total, 832 canales de subida de 30 kHz cada uno (de 824 a 829 MHz) y otros 832 canales de bajada (de los 869 a los 894 MHz) asignando un canal de subida y otro de bajada para cada usuario para que realizara su debida conmutación durante el proceso , es decir se le asignaban dos canales para cada usuario para que realizara su comunicación [4]. El sistema se conocía con el nombre de FDD, todo el sistema se conoció por el nombre de FDMA/FDD.

Este sistema resulta ser muy sencillo de implementar dado que trabajaba de la misma forma en que funcionaban los sistemas de telefonía alámbrica reduciendo los costos de trabajo en ese entonces. Las desventajas que este tenía era la baja cantidad de usuarios que podía manejar debido al ancho de banda finito con el que cuenta además de que no lo administra eficientemente, porque a cada canal que se tenía se le añadía una banda de guarda para facilitar el trabajo de los filtros y evitar la interferencia entre canales.

Otra desventaja del sistema es el efecto conocido como Handoff que es un efecto de la transición entre células de un dispositivo móvil, pues este cambia el circuito que está utilizando en una determinada área de cobertura y toma uno nuevo dentro de la nueva área que cubre la célula [7]. Este factor resulta fundamental para el diseño de las redes celulares, ya que de este depende que el servicio que se está brindando sea continuo para el usuario.

3.2 Redes Celulares de Segunda Generación (2G)

Como se describió, la Primera Generación de redes que se utilizó para telefonía celular consistía en un sistema con un funcionamiento idéntico a los sistemas de telefonía fija, no implementa ninguna tecnología nueva y resultaba poco eficiente, por lo que se buscaron nuevas tecnologías para optimizar el funcionamiento del sistema, para el año de 1990 [10] se da paso al sistema TDMA que es la base para los protocolos de la segunda generación de redes celulares (2G).

Los principales protocolos generados durante esta etapa se tratan del protocolo GSM y el D-AMPS, la ventaja que trajeron consigo estos protocolos es que realizaron la transición de la telefonía analógica a la digital, la inclusión de un mayor número de usuarios dentro del mismo ancho de banda utilizado y nuevos servicios como mensajes de texto mediante el sistema SMS (Short Message Service) alcanzando velocidades que iban de los 9.6 hasta los 14.4 kbps [10].

3.2.1 Global System for Mobile Communications (GSM)

El protocolo GSM es un estándar generado y utilizado principalmente en la zona europea y se convirtió en el estándar predominante en gran parte del mundo abarcando cerca del 80% de los usuarios mundiales logrando alcanzar velocidades cercanas a los 9.6kbps [9]. La base de los estándares es la tecnología TDMA, manejando diferentes variantes del estándar que únicamente varían los rangos de frecuencias y la zona donde se ocupan.

- GSM-900. Este estándar utiliza como base la TDMA y funciona principalmente en dos bandas de 25 MHz cada una, una de bajada de 935 a 960 MHz y la otra de subida abarca de 890 a los 915 MHz, Las bandas se dividen en canales de 200 kHz, uno de los canales funge la función de ser una banda de protección por lo que las 124 bandas restantes se utilizan para brindar servicios.
- GSM-1800. Este estándar utiliza la banda de 1710 a 1875 MHz de subida y la banda de 1805 MHz a 1880 MHz de bajada, generando 374 canales numerados desde el 512 hasta el 885.
- GSM-850. Corresponde a otra variante del estándar GSM, utilizado principalmente en países de Latinoamérica, en el caso de México se manejan la banda de 1900 MHz. [9]

3.2.2 Arquitectura de las Redes GSM

A continuación, se presentan los elementos que conforman una red GSM y la forma en que están organizados: [9].

- Subsistema de Radio (RSS, Radio Subsystem): Se encarga de cubrir la comunicación entre las estaciones móviles (MS, Mobile Station) y las estaciones base (BTS Base Station).
- Subsistema de Estaciones Base (BSS): Funge como interfaz entre la parte de Radio y la parte de Red. Está integrado en la parte de Radio se conforma de los siguientes elementos.
 - BTS (Base Transceiver Station): Consiste en un emisor, receptor y la antena, este se encarga de procesar los canales de radio.
 - BSC (Base Station Controller): Es un Handover, control de las BTS, mapea los canales de radio sobre los canales terrestres. Se comunica con las BTS mediante un interfaz de canales de 16 kbps y además se comunica con los MSC a través de la interfaz A con canales de 64kbps.
- Subsistema de Red y Conmutación (NSS, Network and Switching Subsystem): Básicamente es la parte de conmutación, gestión de movilidad, interconexión con otras redes y control del sistema. Es una parte muy compleja conformada por los siguientes elementos.
 - MSC (Mobile Services Switching Center): El centro de conmutación
 - GMSC (Gateway Mobile Services Switching Center): Se encarga de la conexión con otras redes.
 - Bases de Datos.
 - HLR (Home Location Register)
 - VLR (Visitor Location Register)
 - EIR (Equipment Identity Register)

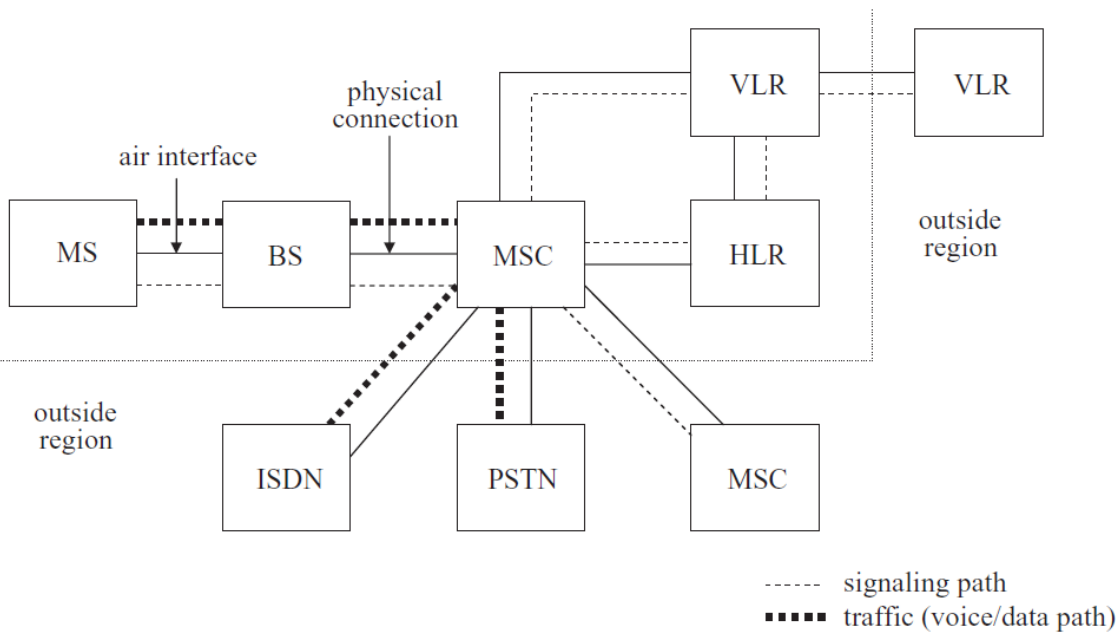


Figura 3.1. Arquitectura de una red GSM [4]

3.2.3 Tramas GSM

La unidad fundamental de transmisión de GSM son las tramas, las cuales están conformadas por 8 *time slot* cada una, con una duración total de 4.615 ms asignando un *time slot* específico para cada usuario. El protocolo maneja 124 bandas divididas en 8 *time slots* generaban un total de 992 canales [4] la figura 2.4 nos muestra la estructura general de la trama GSM.

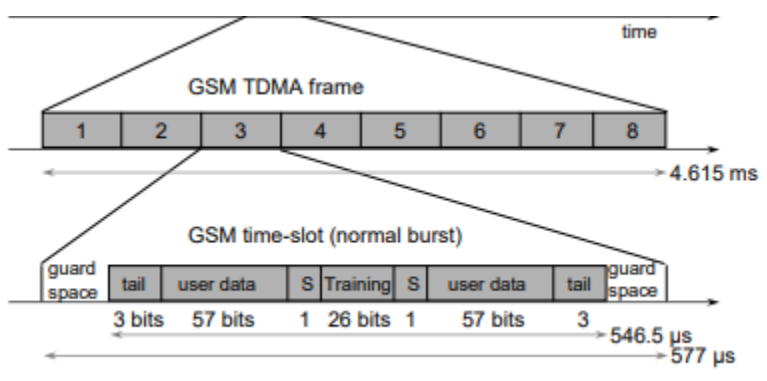


Figura 3.2. Estructura de las tramas GSM/TDMA [4]

Internamente dentro de cada *time slot* 114 bits de información divididos en dos partes, más 26 bits de control. Para generar una correcta sincronización entre cada trama se tiene un tiempo de guarda de 32.5 μs para evitar la pérdida de información.

3.2.4 Digital Advanced Mobile Phone System (D-AMPS)

Los protocolos IS-54 e IS-136 son dos protocolos conocidos como D-AMPS que fueron predominantes en América sobre todo en Estados Unidos y Canadá [12]. El sistema D-AMPS utiliza canales AMPS los cual permitía una fácil transición entre canales analógicos a los digitales con la variante de que de las 832 bandas de 30 kHz se le pudiera dividir en tres ranuras de tiempo logrando triplicar la efectividad del protocolo AMPS. La modulación que ocupa para las señales es la QPSK para luego utilizar la técnica de TDMA con tramas de 6 slots cada una. [7]

3.2.5 Tramas D-AMPS

El funcionamiento de las tramas D-AMPS es muy similar al funcionamiento de las tramas GSM con ciertas variantes que se explicaran a continuación, como se había mencionado anteriormente las tramas se dividen en seis slots como se muestra en la *figura 2.6*. En total se transmiten 25 tramas durante un segundo cada una transporta 1944 bits de información alcanzando una velocidad de transmisión neta de 48.6 Kbps. Es importante destacar que también maneja el sistema FDD ya que existen dos tipos de trama una de subida (uplink) y otra de bajada (downlink). Se observa que la trama de subida maneja 6 bits de G al inicio, estos bits se refieren a un tiempo de guarda debido a que los dispositivos pueden estar en movimiento con respecto a la estación base y existe ese espacio para evitar generar interferencias entre dispositivos. Los 6 bits correspondientes a R son para asignar terminales a los dispositivos dependiendo de la potencia que está manejando el dispositivo dependiendo de la distancia a la que este de la estación base. Los 12 bits de CDVCC (Coded Digital Verification Color Code) corresponden a una palabra que envía la estación base para establecer la conexión, el dispositivo recrea el código y de no ser el mismo se desecha el mensaje. El SACCH (Slow Associated Control Channel) corresponde a 12 bits de información de control de la trama. [4]

En el caso de las tramas de D-AMPS se pueden distinguir dos tipos de usuarios a los cuales se les brindaba el servicio, los usuarios de servicio normal (full rate) asignándoles dos slots por trama mientras que a los usuarios de servicio medio (half rate) se les asignan un slot de tiempo por cada trama. Alcanzando tasas de transmisión de alrededor de los 6.5 kbps para los half rate y de 13 kbps para los full rate.

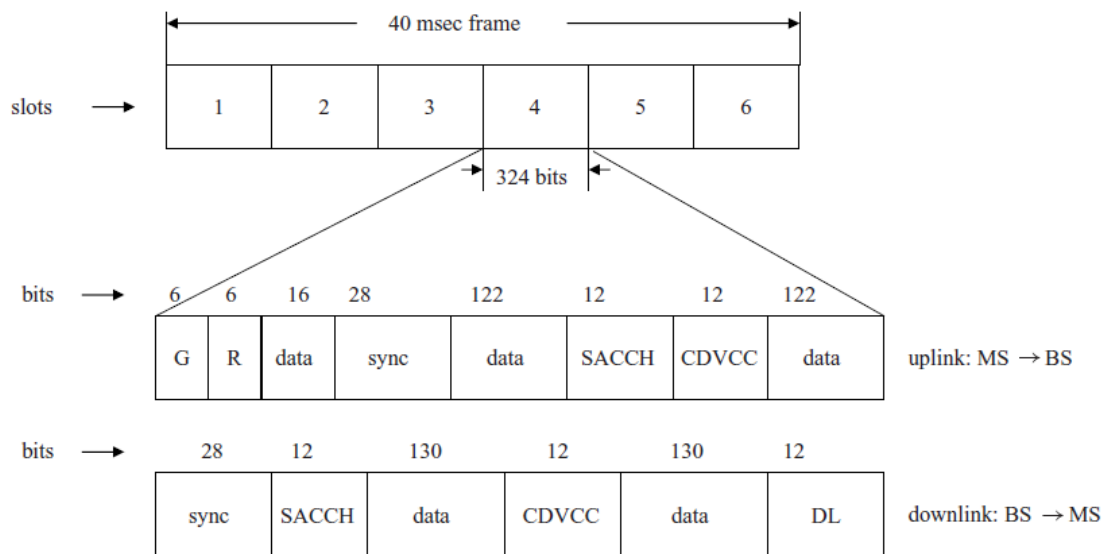


Figura 3.3. Estructura de una trama D-AMPS [4]

3.3 Redes Celulares de Generación 2.5

Una vez consolidadas las tecnologías de TDMA y los protocolos de segunda generación se buscó mejorar la calidad de los servicios y aumentar las tasas de transmisión para soportar servicios de transmisión de datos, incluyendo archivos multimedia.

Con esto se desarrollaron diferentes protocolos como HSCD, GPRS y EDGE, podría decirse que estos protocolos no tuvieron suficiente impacto ya que no proporcionaron grandes mejoras a las técnicas empleadas en la segunda generación si bien realizaron algunos avances a la tecnología no rebasaron las capacidades que se lograron con la llegada de la siguiente generación 3G. [12]

3.3.1 High-Speed Circuit-Switched Data (HSCSD)

Lanzado en 1997, es una mejora al sistema de transmisión de datos GSM. Éste trabaja como el protocolo GSM con la diferencia de que al usuario se le asignan 4 *time slots*. La otra característica de HSCSD es que disminuye la corrección de errores para asignar más bits a la transmisión de datos, logrando alcanzar velocidades de hasta 57.6 kbps contra los 9.6 kbps que se tenían anteriormente [11]. Sin embargo, continuaba siendo una implementación muy ineficiente con el uso de los recursos, además de que no fue utilizado tanto como los protocolos GPRS y EDGE.

3.3.2 General Packet Radio Service (GPRS)

Este es un protocolo generado a finales de la década de 1980 que está enfocado a la conmutación de paquetes en servicios de radio enlaces, logrando alcanzar una capacidad de transmisión aproximada de 200 kbps [11]. GPRS se basa en divisiones de frecuencia dúplex y TDMA, asignándole un canal físico a cada usuario en un bloque temporal utilizando un sistema de multiplexación estadística en el dominio del tiempo para mejorar la asignación de bloques para cada usuario y evitar que estos se desperdicien logra alcanzar velocidades de hasta 115 kbps. En general el sistema que utiliza GPRS es muy similar al sistema ALOHA.

El sistema GPRS logró implementar y optimizar diferentes servicios como aplicaciones que utilizaban el protocolo WAB, mensajería SMS y MMS, además de P2P (Peer to Peer) mediante protocolos IP. La otra mejora de GPRS es que implementó el cobro de servicios dependiendo de la cantidad de Mbytes que el usuario utilizara, en vez de cobrar por el tiempo en el que está utilizando un circuito. GPRS al igual que EDGE sentaron las bases para los futuros protocolos de tercera generación [57].

3.3.3 Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE)

Es un protocolo de mejora para GSM, es una evolución del GPRS (General Packet Radio Service) que funciona en la mayoría de las terminales GSM o en terminales que funcionen con la tecnología TDMA. La tasa de transmisión que logra alcanzar el protocolo EDGE es de 384 kbps, considerablemente más grande que la tasa de GPRS. Entre las características que implementa EDGE es que utiliza la modulación de 8PSK, con esta modulación es posible transmitir 3 bits por símbolos, aunque fue necesario modificar las estaciones base para que fueran capaces de soportar los cambios generados. Además, puede ser combinado con la tecnología HSCSD. [11]

En general, la tecnología EDGE no alcanza a tener las características suficientes para ser considerada de tercera generación, pero fue necesario para poder implementar la tecnología UMTS y sentar las bases y características para la tercera generación de telefonía móvil.

3.4 Redes Celulares de Tercera Generación (3G)

Las redes de tercera generación incrementaron de una forma significativa la capacidad de sistemas de radio. Se realiza a través de UMTS y CDMA-2000 principalmente, los sistemas de tercera generación nos ofrecen la posibilidad de transferir voz y diferentes tipos de datos de otra naturaleza (mensajes, correos electrónicos, etc.). Esta tecnología inicialmente fue orientada a la telefonía móvil, la tecnología de tercera generación está dada principalmente por la especificación IMT-2000 que fue realizada por

la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) el 19 de marzo de 1999 durante una reunión cuya sede fue en Fortaleza (Brasil) [16], siendo un primer paso para describir más a detalle los protocolos que se utilizaron para la tercera generación de telefonía celular (3G).

Las decisiones a que se llegó en Fortaleza ofrecen fundamentalmente una norma flexible única con una variedad de métodos de acceso múltiple que comprenden CDMA, TDMA y una combinación CDMA/TDMA, todos los cuales se pueden combinar con SDMA para adaptarse a los numerosos entornos de funcionamiento de los sistemas móviles en todo el mundo. Por otra parte, se revisaron las necesidades del espectro radioeléctrico que requerían los nuevos sistemas.

También se acordó que las interfaces radioeléctricas del IMT-2000 deben comprender la posibilidad de funcionar con las dos principales redes centrales de tercera generación que se estaban desarrollando [16].

Los sistemas CDMA-2000, UMTS pertenecientes a la nueva generación (3G), comparados con los sistemas de generaciones anteriores ofrecen mayor seguridad dado que permiten autenticar la red a la que se va a conectar, asegurando que la red es genuina y no se trata de alguna imitación [14].

Las redes celulares de tercera generación permiten una transferencia de voz con calidad comparable a la calidad de las redes de sistemas fijos, también tienen mayor velocidad de transmisión como consecuencia de la evolución de esta tecnología se pueden alcanzar velocidades de transmisión mayores de 3 Mbps por usuario móvil [14], velocidad de acceso y de conexión ante caídas de señal, por lo que hace que la tecnología de la red de tercera generación sea la ideal para diferentes servicios de multimedia móviles. Pero, así como las redes celulares de tercera generación tienen múltiples ventajas, poseen también ciertas desventajas, esta tecnología tiene cobertura limitada, dependiendo de la ubicación del usuario, la velocidad de transmisión puede llegar a disminuir de forma drástica, en comparación con servicios de ADSL tiene una elevada latencia, disminución de velocidad si el dispositivo desde el que nos conectamos se encuentra en movimiento.

3.4.1 3rd Generation Partnership Project (3GPP)

El 3GPP consiste en un acuerdo de colaboración el cual fue creado en diciembre de 1998 [16], también es conocido como miembros organizativos, uno de sus objetivos es generar especificaciones y reportes técnicos que fueran aplicables en todo el mundo para un sistema móvil de tercera generación, 3GPP une siete organizaciones que se encargan de desarrollar estándares de telecomunicaciones, las cuales son [59]:

- La Asociación de Industrias de Radio y Negocios (ARIB), procedente de Japón.
- La Alianza para las Soluciones de la Industria de las Telecomunicaciones (ATIS), procedente de Estados Unidos.

-
- La Asociación China de Normas de Comunicaciones (CCSA), procedente de China.
 - El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI), procedente de Europa.
 - La Sociedad de Desarrollo de Estándares de Telecomunicaciones de la India (TSDSI), procedente de la India.
 - La Asociación de Tecnología de Telecomunicaciones (TTA) procedente de Corea del Sur.
 - El Comité de Tecnología de Telecomunicaciones (TTC), procedente de Japón.

Esta organización, se encarga de proporcionar a las organizaciones un entorno estable para que puedan producir informes y especificaciones que definen las especificaciones 3GPP, este proyecto se encarga de contemplar tecnologías de redes celulares de telecomunicaciones, incluyendo acceso por radio, la red de transporte principal y las capacidades de servicio (incluyendo calidad del servicio, trabajo en codecs y seguridad), este proyecto proporciona especificaciones completas del sistema. Pero estas especificaciones también se encargan de proporcionar enlaces para el acceso por no radio a la red central y para que pueda seguir funcionando, cuando sean conectadas con las redes Wi-Fi.

Los tres Grupos de Especificaciones Técnicas (TSG) en 3GPP son [59]:

- Red de Acceso por Radio (RAN)

Ayuda a los operadores de redes móviles a ofertar el ancho de banda requerido para hacer uso de redes de tercera generación.

- Servicios y Aspectos del Sistema (SA)

Es el responsable de la arquitectura general y de las capacidades del servicio basados en las especificaciones 3GPP.

- Red Principal y Terminales (CT)

Es el responsable de especificar las Interfaces de la terminal, tanto lógicas como físicas, las capacidades de la terminal y la red principal de los sistemas 3GPP.

Las tecnologías 3GPP de estos grupos evolucionan constantemente a través de generaciones de celulares comerciales/sistemas móviles. Desde que finalizaron las primeras especificaciones de LTE y Evolved Packet Core, 3GPP se ha convertido en un punto muy importante para los sistemas móviles, más allá de 3G [59]. El objetivo principal que tiene todos los lanzamientos de 3GPP es hacer que los sistemas sean compatibles con versiones anteriores y futuras, siempre que sea posible, para que de esta forma se pueda asegurar el funcionamiento sin interrupciones del equipo a cada usuario.

Más tarde el alcance se amplió para incluir el desarrollo y mantenimiento de:

- GSM y estándares relacionados "2G" y "2.5G", incluidos GPRS y EDGE.

- UMTS y estándares relacionados "3G", incluyendo HSPA.
- LTE y los estándares relacionados "4G", incluidos LTE Advanced y LTE Advanced Pro.
- La próxima generación y los estándares relacionados "5G".
- Un subsistema multimedia IP (IMS) evolucionado desarrollado de una manera independiente de acceso.

3.4.2 Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS)

Es la tecnología utilizada para los móviles de tercera generación, promovida por El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI), su especificación actual corre a cargo del acuerdo de colaboración 3GPP. Ofrece principalmente cobertura a nivel mundial, tanto por enlace terrestre, como por vía satélite, es la tecnología sucesora de GSM, logrando alcanzar velocidades de desde los 144 kbps hasta 10 Mbps [16]. Esta tecnología tiene mayor resistencia a interferencias y también permite que sea utilizada de manera simultánea conexiones de datos y voz con una mayor velocidad de descarga sin importar la ubicación del usuario. UMTS es considerado como el comienzo del fin de las telecomunicaciones fijas, aquí es cuando la telefonía comienza a convertirse en algo más personal, asignándole a cada persona un número y teniendo la posibilidad de utilizar las telecomunicaciones con o sin voz, así como utilizar el internet sin encontrarse en un lugar fijo.

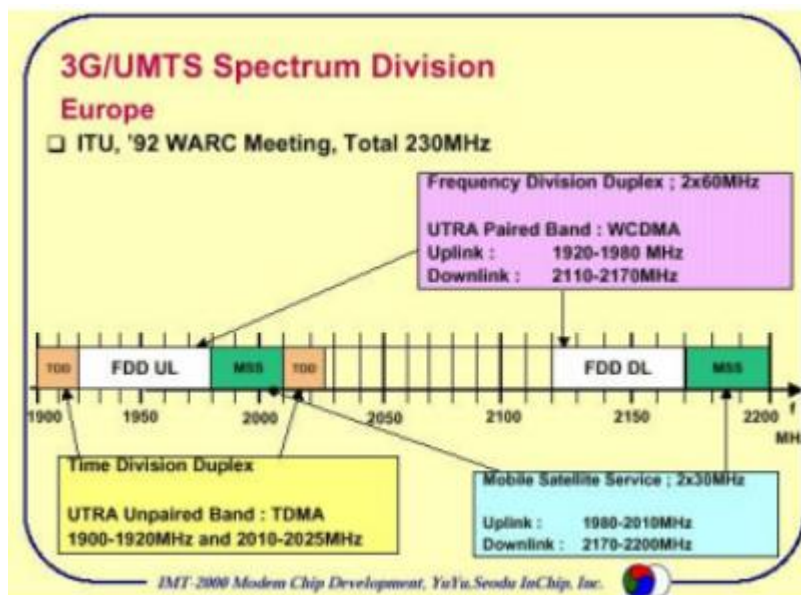


Figura 3.4. División del espectro de la red UMTS [16]

El estándar UMTS forma parte de los sistemas de la familia IMT-2000 el cual tiene como objetivo dar un carácter universal a las comunicaciones móviles de tercera

generación. UMTS utiliza la banda de frecuencias de 2 GHz lo cual hace que las células utilizadas sean de menor tamaño [14].

Las especificaciones de la UMTS están dadas principalmente por la 3GPP, UMTS se introdujo en fases: la primera fase fue llamada UMTS-Rel'99, el cual fue introducido en diciembre de 1999, este definió mejoras para redes GSM existentes. La segunda fase que se introdujo, la nombraron UMTS-Rel'00, se propusieron mejoras de IS-95 [14].

UMTS de forma física se encarga de introducir una nueva interfaz de aire y un nuevo componente de aire. En la figura 3.14 podemos observar el espectro que utiliza el sistema ocupando rangos de los 1920 a los 1980 MHz para Uplink y rangos de 2110 a los 2170 MHz para downlink [14]. UMTS le entrega al usuario terminales de multibanda y terminales con una interfaz de aire flexible, lo que permitía un roaming mundial entre diferentes localidades, también aumentaba la tasa de transmisión por usuario.

3.4.3 CDMA2000

CDMA2000 es un estándar de tercera generación de IMT-2000 aprobado por la UIT. CDMA2000 es un sistema de banda ancha el cual proporciona al usuario una mayor velocidad de transmisión y un uso eficaz del espectro radioeléctrico. CDMA2000 fue desarrollado a partir de lo que es conocido como CDMAx1, el nombre de x1 es atribuido al número de portadoras de 1.25 MHz [19].

Una ventaja que posee CDMA2000 es que es compatible con los sistemas y terminales de CDMAx1. La capa física de CDMA2000 tiene varios modos de funcionamiento, lo cual le permite a los operadores desplegar o configurar la red de acuerdo a sus necesidades, entorno y regulaciones locales.

En CDMA2000 existen varias opciones para la banda de operación, sistema, ancho de banda y modo de transmisión, en la figura 3.5 se muestra la implementación de ancho de banda full duplex de 1.25 MHz, que es conocido como "Spreading Rate 1" (SR1), o "1x" y al ancho de banda full duplex de 3.75 MHz se le conoce como "Spreading Rate 3" (SR3), o "3x" [19].

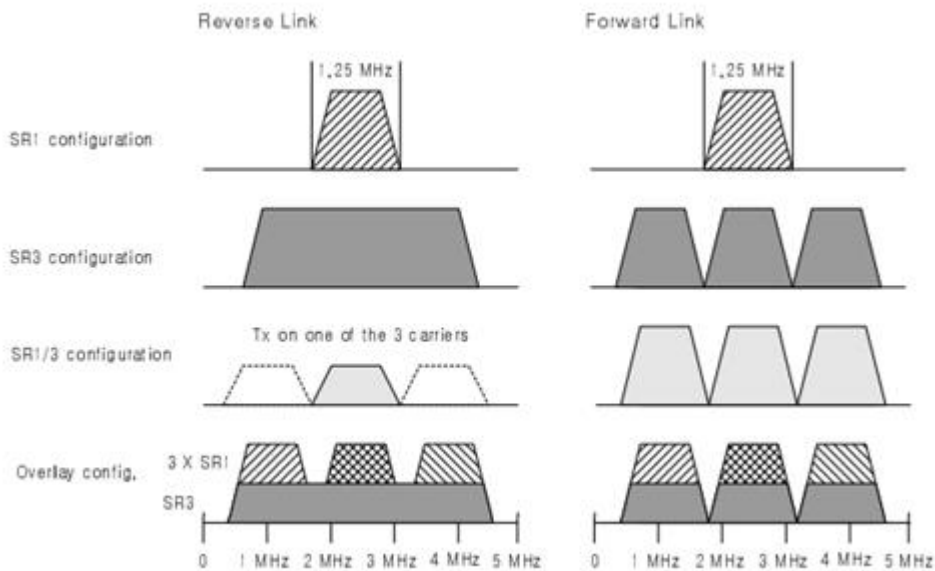


Figura 3.5. CDMA2000 ancho de banda de operación [19]

3.5 Redes Celulares de Cuarta Generación (4G)

Los sistemas de cuarta generación tienen dos sistemas fundamentales: WiMAX y LTE, los cuales logran alcanzar velocidades mayores a las redes celulares de tercera generación.

Los sistemas WiMAX y LTE no consisten en una tecnología o un estándar definido, sino que son la mezcla de diferentes protocolos, haciendo posible una convergencia entre redes de diferente naturaleza ya que estos se basan en el protocolo IP. Con esto es posible que puedan coexistir diferentes tipos de redes de diferentes generaciones (tanto alámbricas como inalámbricas) alcanzando mayores velocidades de acceso para el usuario ya sea que este se encuentre en reposo o en movimiento oscilando entre los 100 Mbps y 1 Gbps [15]. En esta generación continúan mejorando los servicios de mensajería, videollamadas, TV móvil y servicios de voz y datos.

3.5.1 Long Term Evolution (LTE)

Para el creciente uso de aplicaciones móviles y multimedia, 3GPP desarrolló la red LTE, con el fin de incrementar su efectividad en transmisión de imágenes y de videos en vivo en áreas problemáticas que requieren capacidad de transmisión de datos inalámbricos. Esto condujo al desarrollo de tecnologías como LTE, la cual mejora la tasa de datos, la eficiencia del espectro radioeléctrico disminuye la latencia y que es capaz de soportar múltiples tecnologías de acceso de radio, basándose en OFDMA en el enlace descendente y SC-FDMA en el enlace ascendente. Ambas permiten altas tasas en canales

móviles se ven afectados por efectos Doppler y de multitrayectos derivados del movimiento. [15]

La interfaz de radio LTE está basado en OFDM, con lo que se logra robustez frente a interferencias, multitrayectos y atenuación selectiva. En LTE el ancho de banda está dividido en numerosas subportadoras (de 15 KHz) ortogonales entre sí, evitando así las interferencias cruzadas sin necesidad de bandas de guarda [13].

LTE emplea la banda de los 700 MHz, esta tecnología sustituye a la utilizada para las redes de tercera generación, UMTS. LTE tiene como objetivo obtener una mayor tasa de transmisión, tener una latencia menor de 10 ms [13] y tener una flexibilidad del espectro para disponer de anchos de banda variables según el servicio y los usos de las diferentes bandas de frecuencia.

3.5.2 Arquitectura LTE

La arquitectura de la red LTE está compuesta por un equipo de usuario (UE), el cual accede a una red LTE, a través de un acceso de radio evolucionado “Evolved Radio Access Network (EUTRAN)”, el cual consiste en un único elemento: la estación base (eNodeB). Todo el sistema de radio LTE está controlado por el Núcleo de la Red “Evolved Packet Core (EPC)”, que lo forman generalmente cinco elementos, clasificados en el panel de control “Control Plane” y el panel de usuario “User Plane” dependiendo de la función que cada uno desarrolla [15].

En la arquitectura LTE, como lo podemos observar en la Figura 3.6, el núcleo de conmutación de paquetes para las redes de cuarta generación (4G) del 3GPP fue rediseñado y nombrado Evolución de la arquitectura del sistema (SAE), o también, Sistema de Empaquetado Evolucionado (EPS). Éste se encarga de interconectar diversas redes de acceso, esta arquitectura conserva los mismos parámetros que en las redes 3GPP, pero divide las funciones del Gateway de Control (SGSN en UMTS) en un plano de control de comando por la Entidad en Gestión de la Movilidad (MME) y un plano de usuario liderado por el Serving Gateway (SWG). Las funciones originales del GGSN son implementadas por el PDN Gateway (PGW) [15].

Las funciones de los elementos que componen la arquitectura de una red LTE son las siguientes:

- **eNodeB (Evolved Node-B)**

Es el único elemento funcional de EULTRAN

- **EI MME**

Obtiene los datos del suscriptor a través de la información almacenada en HSS. El MME se encarga de autenticar, autorizar y seleccionar el PDN apropiado para establecer el enlace entre el EUTRAN a las redes o servicios externos, también realiza funciones de

administración de movilidad y recolecta información del cobro. MME proporciona conectividad entre eNodeB y la red existente.

- **SGW**

Es el equipo de plano del usuario, el cual es controlado por MME, es un punto de monitoreo de las políticas de conexión y servicio establecidas en el PCRF (Policy and Charging Rules Function).

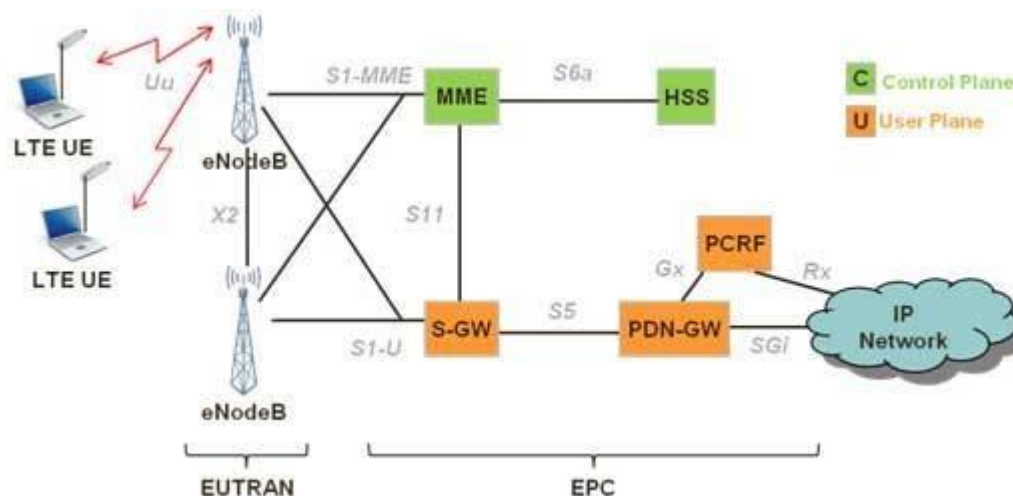


Figura 3.6. Arquitectura de la red LTE [13]

3.5.3 World Interoperability for Microwave Access (WiMAX)

WiMax es estándar para transmisión inalámbrica englobado en la norma 802.16 del año 2001 de la IEEE, norma que se encarga del desarrollo global de las redes locales metropolitanas. El concepto de WiMAX es generar enlaces punto a punto o punto multipunto además de brindar movilidad a estas redes fue un concepto que se implementó en la norma 802.16e-2005, su funcionamiento es parecido al funcionamiento del estándar WiFi pero con una mayor cobertura y de banda ancha. En general tiene cobertura de hasta 50 km a una tasa de transmisión cercana a los 70 Mbps. WiMAX funciona en las bandas de frecuencias de 2.5GHz, 3.5GHz y 5.8GHz (exenta de licencia) [17].

El estándar WiMAX fue uno de los candidatos a sustituir las tecnologías CDMA y GSM, siendo considerado dentro de la cuarta generación de telefonía móvil al igual que LTE. También funcionaba como backhaul para las redes 2G, 3G y 4G [16].

El funcionamiento de WiMAX se centra en las técnicas de acceso OFDM, el sistema también es compatible con el uso de antenas inteligentes mejorando su eficiencia espectral, presenta un ajuste dinámico a los paquetes que transmite y modulaciones adaptativas dependiendo de la relación señal a ruido (SNR) que presente el sistema. Las modulaciones que utiliza son B-PSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM [17].

Generación	Periodo	Tecnologías	Tasas de Transmisión	Acceso al Medio	Servicios
1G	1970 – 1986	AMPS, NMT, TACS	9 Kbps	FDMA	Voz
2G	1986 – 2000	D-AMPS, GSM/GPRS, CDMA, EDGE	56 - 384 Kbps	TDMA-CDMA	Voz, datos
3G	2001 – 2009	CDMA2000, UMTS, WCDMA/HSPA, TD-SCDMA	0.384 – 14.4 Mbps	TD-SCDMA, WCDMA, TDD, FDD, CDMA2000	Voz, datos multimedia
4G	2010 – 2019	LTE, LTE-A	50 – 1000 Mbps	OFDMA, OFDM	IP
5G	2020 - 2030	NR	10 Gbps	OFDMA	IoT

Tabla 2. Cuadro comparativo Generaciones Celulares. [22]

Dentro del cuadro comparativo observamos el periodo de tiempo en el que se ubica la implementación de cada generación telefónica, así como las tecnologías que ocupan, pasando de tecnologías análogas a las digitales que continúan utilizándose para la futura generación (5G). En cuanto a las tasas de transmisión se observa un aumento considerable entre cada una, ya que se multiplican en gran medida los valores alcanzados o que se deseaban alcanzar en cada una así, respondiendo a las necesidades y usos de cada una, pasando desde la voz a servicios multimedia, o servicios IP y finalmente, el IoT que se busca implementar dentro de los siguientes años.

4. Redes Celulares de Quinta Generación (5G)

La red celular de quinta generación se trata de la integración total y masiva de dispositivos, tratará de dar soporte para implementar el internet de las cosas (IoT) y muchas otras aplicaciones. Los organismos 3GPP y la ITU-R trabajaron en conjunto para emitir recomendaciones y estándares correspondientes para la red 5G lo cuales son 5G Evolution y IMT-2020 respectivamente. [22] El resultado de estos trabajos fue el Release 15 [55] en donde se declaran todas las recomendaciones propuestas para la implementación de la nueva generación de telefonía móvil.

3GPP ha generado un plan de implementación para el protocolo 5G, el cual consiste en 2 fases, la primera fase es conocida como el Release 15 y la segunda fase tiene el nombre de Release 16, el cual se espera para junio del 2020. [55]

Ambas fases engloban las características y procesos que deben seguirse para poder tener sistemas estándar dentro de las redes de telefonía móvil en diferentes naciones, básicamente, los Release 15 y 16 manejan dos tipos de sistemas, uno se trata de un sistema 5G que sea compatible con la infraestructura de las redes 4G y el otro plantea la implementación 5G “desde cero”, creando, nuevamente, la infraestructura de la capa física. Los sistemas: el Non-Stand Alone (NSA) y el Stand Alone (SA), respectivamente.

4.1 Características de las nuevas redes

Lo que se espera con la llegada de la red 5G es la eficiencia espectral, es decir que se pueda aprovechar mucho mejor el espectro utilizando diferentes formas de onda o multiplexado, también que la tecnología pueda proporcionar una mayor capacidad de tráfico, otra expectativa es que se pueda tener soporte en situaciones críticas, una baja latencia, mayor confiabilidad y disponibilidad para soportar mayores niveles de tráfico para aplicaciones como el IoT, entre otras.

La tecnología de quinta generación tendrá las siguientes características: [23]

- Una tasa de datos de hasta 10 Gbps, lo cual es de 10 a 100 veces más de la tasa de datos que nos brinda actualmente 4G y 4.5G.
- Latencia de 1 milisegundo o menos.
- Una disponibilidad de 99.999%.
- Cobertura total.
- Gran reducción de energía de la red.
- Hasta 100 dispositivos conectados por unidad de área (en comparación con las redes de 4G LTE).

-
- Una banda ancha mil veces más rápida por unidad de área.
 - Hasta 10 años de duración de baterías de los dispositivos IoT de baja potencia.

4.2 Descripción de la Capa Física

Uno de los grandes retos que presentan las nuevas redes 5G y su implementación es referente a la implementación de la capa física, ya que esta cambia drásticamente respecto a las antiguas versiones que funcionaban de una forma similar y era posible reutilizar la infraestructura ya presente en las radio bases. En cambio, para la implementación de las redes 5G puede que ya no sea posible reutilizar dicha infraestructura ya que el diseño maneja varios cambios de las radio bases, a lo largo de este capítulo se describirán las características y protocolos con los que se planea que trabaje esta nueva generación de telefonía celular.

4.2.1 Arquitecturas SA y NSA

Para la arquitectura 5G es necesario primeramente centrarse en las funciones que tendrá la red en lugar de entidades de red/nodo, separación de los datos de usuario y el sistema funcional de control, la adaptación a casos de uso e interfaces funcionales. Existen dos formas de implementar la nueva red 5G, con redes independientes y con redes no independientes, es decir si estas redes serán o no compatibles con la tecnología (4G) [27].

Redes no independientes (NSA)

Esta implementación de red busca instalar redes 5G utilizando la infraestructura de 4G ya existente. El operador 5G que se base en esta arquitectura, únicamente transportará los datos del usuario y la señal de control se transmite a través de la red 4G, con las ventajas que brinda el nuevo protocolo (baja latencia, etc.). [27]

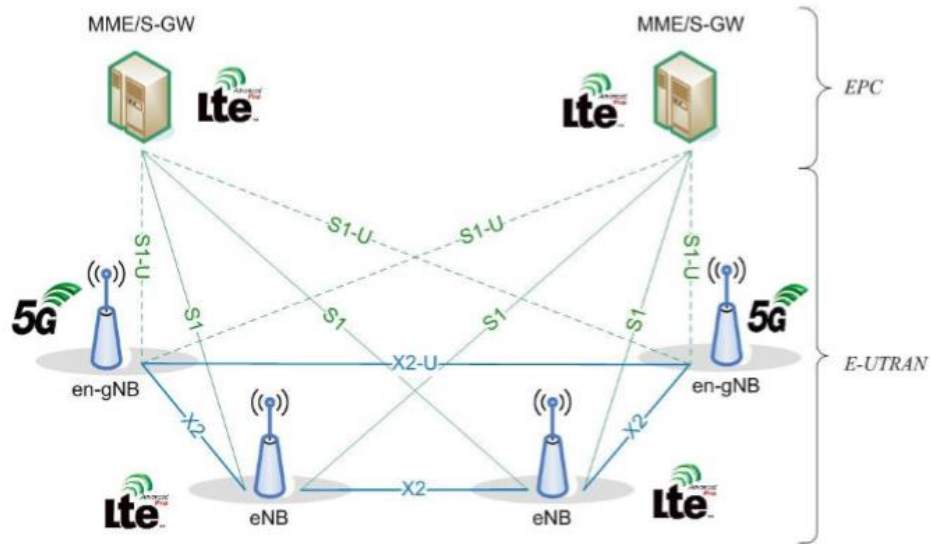


Figura 4.1. Arquitectura NSA, compatible con 4G [55]

El Release 15 también conocido como el NSA se trata de la primera fase de implementación del protocolo 5G, facilita la implementación del nuevo protocolo, mientras aún se están manejando tecnologías anteriores (4G). [55]

Redes independientes (SA)

Este tipo de redes se enfocan en la creación de una nueva red, esto incluye nuevas estaciones base, enlaces de backhaul y redes centrales. Además de que la arquitectura SA introduce nuevos elementos e interfaces de red adopta nuevas tecnologías como lo es la virtualización de redes a gran escala. [27]

La segunda fase se trata del SA consiste en la implementación de una nueva arquitectura que soporte únicamente los sistemas de 5G, esto implica renovar completamente la infraestructura para las nuevas redes en todos los aspectos. [55]

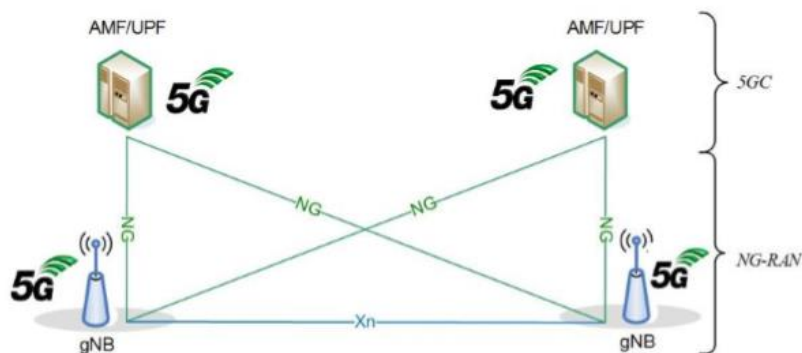


Figura 4.2. Arquitectura SA, exclusivo para 5G [55]

4.2.2 Bandas de Frecuencia Asignadas

5G requiere grandes anchos de banda, usualmente entre 400 y 800 MHz, esto para llegar a las grandes velocidades que se quiere alcanzar con la tecnología de quinta generación, la cual recordemos se espera que sea de 10 Gbps. [54]

5G requerirá espectro en 3 grandes anchos de banda, los cuales son [3]:

- *Frecuencias Bajas*: Las cuales son menores a 1GHz. Bandas de gran cobertura, pero de capacidad limitada.
- *Frecuencias Medias*: las cuales están entre 1 y 6 GHz. Bandas de alcance medio con alta capacidad.
- *Frecuencias Altas*: las cuales son mayores a 6 GHz. Bandas de corto alcance con muy alta capacidad.

Recordemos que, para las frecuencias bajas, las ondas electromagnéticas debido a su frecuencia se propagan de mejor forma por lo tanto llegan a mayor distancia, pero tienen muy baja capacidad. Y con el caso de frecuencias altas, las bandas tienen un efecto contrario, debido a que las ondas electromagnéticas se atenúan mucho con la distancia por lo cual tienen corto alcance, pero tienen alta capacidad. Dependiendo del operador y el país que licite las bandas se elige la que mejor se adapte a las necesidades.

La operación de los sistemas 5G propuestos dentro del Release 15 manejan dos rangos de frecuencias (FR), los cuales se dividen en el FR-1, que va de los 450 MHz a los 6000 MHz y el FR-2 que se ubica entre los 24.250 GHz a los 52.600 GHz. [55]

En grupo de bandas de FR-1 son completamente nuevas, mientras que para FR-2 sólo algunas de las bandas propuestas lo son, mientras que el resto se encuentran dentro de las bandas de LTE, lo que mejora. [55]

Banda de Operación NR	Banda de Operación Uplink (MHz)	Banda de Operación Downlink (MHz)	Modo Duplex
n1	1920 – 1980	2110 – 2170	FDD
n2	1850 – 1910	1930 – 1990	FDD
n3	1710 – 1785	1805 – 1880	FDD
n5	824 – 849	869 – 894	FDD
n7	2500 – 2570	2620 – 2690	FDD
n8	880 – 915	925 – 260	FDD
n12	699 – 716	729 – 746	FDD
n20	832 – 862	791 – 821	FDD
n25	1850 – 1915	1930 – 1995	FDD
n28	703 – 748	758 – 803	FDD
n34	2010 – 2025	2010 – 2025	TDD
n38	2570 – 2620	2570 – 2620	TDD
n39	1880 – 1920	1880 - 1920	TDD
n40	2300 – 2400	2300 – 2400	TDD
n41	2496 – 2690	2496 – 2690	TDD
n50	1432 – 1517	1432 – 1517	TDD
n51	1427 – 1432	1427 – 1432	TDD
n66	1710 – 1780	2110 – 2200	FDD
n70	1695 – 1780	1995 – 2020	FDD
n71	663 – 698	617 – 652	FDD
n74	1427 – 1470	1475 – 1518	FDD
n75	N/A	1432 – 1517	SDL
n76	N/A	1427 – 1432	SDL
n77	3300 – 4200	3300 – 4200	TDD
n78	3300 – 3800	3300 – 3800	TDD
n79	4400 – 5000	4400 – 5000	TDD
n80	1710 – 1785	N/A	SUL
n81	880 – 915	N/A	SUL
n82	832 – 862	N/A	SUL
n83	703 – 748	N/A	SUL
n84	1920 – 1980	N/A	SUL
n86	1710 – 1780	N/A	SUL
n257	26500 – 29500	26500 – 29500	TDD
n258	24250 – 27500	24250 – 27500	TDD
n260	37000 – 40000	37000 - 40000	TDD
n261	27500 – 28350	27500 – 28350	TDD

Tabla 3. Frecuencias propuestas para 5G. [55]

4.2.3 Tecnologías Habilitadoras

4.2.3.1 Beamforming

El beamforming corresponde a una tecnología de un sistema de movilización de tráfico para estaciones base, mediante la implementación de arreglos de antenas con las que transmite una señal y analiza el feedback (la señal que va de vuelta), con dicha información permite ubicar la posición en la que se encuentra el dispositivo receptor y así poder estimar una ruta específica por la cual viaja la señal transmitida [18].

La técnica del beamforming permite transmitir hacia el equipo receptor por una trayectoria establecida haciendo más robusta la señal, alcanzar una mayor tasa de transmisión y también reducir los niveles de interferencia para dicho dispositivo [11]. El funcionamiento del beamforming se basa en el censado de las señales que se reciben por el arreglo de antenas, para estos arreglos suelen utilizarse antenas inteligentes y algoritmos especializados para encontrar la fuente de radiación y los multitrayectos que afectan la transmisión para poder identificar la posición del dispositivo del usuario y poder dirigir la transmisión hacia él.

Existen dos tipos de técnicas conocidas el beamforming adaptativo y no adaptativo [18]. Básicamente, el beamforming adaptativo consiste en que con la ayuda de los arreglos de antenas se genere un patrón de radiación haciendo que las señales transmitidas generen una interferencia constructiva en la dirección deseada y en interferencias destructivas en el resto de las direcciones, este patrón puede cambiar con la ayuda de algoritmos que calculen la respuesta que tienen los arreglos de antenas a la señal transmitida. En cuanto al beamforming no adaptativo tiene el mismo funcionamiento que el adaptativo con la diferencia de que los patrones generados para la transmisión son precalculados y no responden ante algún cambio de la posición del dispositivo, es decir si, éste llegara a cambiar su posición perdería la cobertura.

La técnica del beamforming es una de las candidatas a ser utilizadas para darle soporte a la capa de acceso de las redes 5G, por el hecho de brindar una mejor cobertura a los usuarios y mejorando altamente las tasas de transmisión y recepción de los equipos receptores.

4.2.3.2 Multiple Input Multiple Output (MIMO)

La tecnología MIMO es también una de las principales propuestas a utilizar en la capa de acceso de las nuevas tecnologías, su desarrollo es un tema tan actual, ya que sus inicios surgen alrededor de la década de 1990, mientras que su introducción en WiFi se realizó en el 2006 [20], dentro del estándar 802.11 Pre-N base del futuro estándar 802.11n de WiFi.

MIMO basa su funcionamiento en un concepto muy importante el cual es la diversidad espacial, esto se refiere al uso de diferentes canales de transmisión para una señal, generalmente esto se alcanza con el uso de múltiples antenas para la transmisión y recepción. Dependiendo del número de antenas utilizadas se generan diferentes sistemas de comunicación como los que se muestran a continuación. [11]

- **Single Input Single Output (SISO).** Este sistema utiliza una sola antena transmisora y una receptora.
- **Multiple Input Single Output (MISO).** Este sistema implementa dos o más antenas para la transmisión y una sola antena para la recepción (Diversidad en Transmisión).
- **Single Input Multiple Output (SIMO).** En este sistema se utiliza una antena para transmisión y dos o más antenas para recepción (Diversidad en Recepción).
- **Multiple Input Multiple Output (MIMO).** Sistema que implementa dos o más antenas para la transmisión y dos o más antenas para la recepción.

Una vez aclarados los diversos sistemas de comunicación podemos profundizar un poco más en el funcionamiento de MIMO. Este consiste en utilizar múltiples señales que viajan a una misma frecuencia de manera simultánea en un mismo canal de RF, aprovechando los multitrayectos presentados por la señal en el medio, mediante la diversidad de antenas (transmisión y recepción) y diversos algoritmos de procesamiento digital de las señales en ambos extremos, logrando así obtener una mayor eficiencia espectral en el sistema [11].

La tecnología MIMO se basa en un proceso conocido como la multiplexación espacial la cual consiste en combinar varias señales con un ancho de banda “pequeño” en una señal resultante más robusta y de forma similar al demultiplexar se realiza el proceso contrario, esto es, de una señal con ancho de banda bastante “grande” se separa en diferentes señales con un ancho de banda más “pequeño”. Esta técnica se utiliza en los transmisores y receptores de MIMO aprovechando los multitrayectos presentados por la señal durante su propagación alcanzando una tasa de transmisión mayor para el sistema [21]. En la figura 4.3 se puede observar gráficamente el trabajo de MIMO, ya que se envía una señal demultiplexada y cada parte de la trama de datos es transmitida por medio de diferentes antenas, cada señal sufre diferentes afectaciones (atenuación, interferencia, multitrayectos, etc.) y son recibidas por las diferentes antenas receptoras. Después de su procesamiento, se toma cada señal o lo que se pudo recuperar de ella, y se multiplexan en una sola señal la cual posee toda la información de las tramas que se enviaron. Es esencial poseer un sistema con un gran número de antenas, ya que la tasa de transmisión depende linealmente de los elementos con los que se cuentan, se tendrá

una mayor o menor eficiencia espectral y entre mayor número de antenas se puede tener una mayor cobertura de la señal. [21]

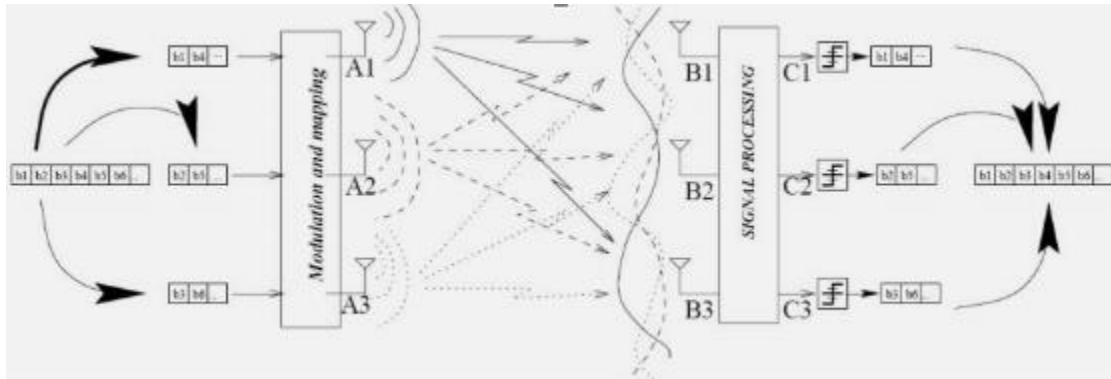


Figura 4.3. Multiplexación Espacial - MIMO [21]

En general MIMO trae varios beneficios al sistema de comunicaciones inalámbrico entre los cuales destacan la tasa de bits permitiendo la transmisión de múltiples tramas de datos de forma simultánea sin consumir más espectro electromagnético. [21]. En otros aspectos al tener mayor número de antenas mejora la distancia de cobertura permitiendo incrementar la capacidad de los usuarios conectados simultáneamente a la red; Debido a las múltiples señales recibidas por el multitrayectos mejora la señal que se recibe y disminuye la probabilidad de error de la transmisión.

4.2.3.3 Massive MIMO

Existen dos tipos de MIMO de los que se puede hablar, uno de ellos es el Single-User MIMO (SU-MIMO), cuyo funcionamiento se describió en la sección anterior el cual no está diseñado para atender a un gran número de usuarios al mismo tiempo a diferencia de su contraparte Multi-User MIMO (MU-MIMO) también conocido como Massive MIMO el cual se describe a continuación.

Massive MIMO emplea los mismos principios ya explicados con la diferencia de que éste aprovecha el uso de las múltiples antenas y va enfocado para atender a un gran número de usuarios, simultáneamente, permitiendo generar transmisiones punto a multipunto o multipunto a multipunto. Para lograr esto fue necesario la implementación de nuevas técnicas de acceso al medio, por ejemplo, el Space-Division Multiple Access (SDMA) [21]. La cual permite transmitir una señal desde o hacia múltiples usuarios de manera simultánea en una misma banda de frecuencias.

Uno de los retos que presenta MIMO es respecto a la arquitectura, ya que requiere de cambios radicales referentes a las radio bases, ya que la tecnología no es compatible con las radio bases utilizadas para las generaciones anteriores. Este cambio presenta a su vez una oportunidad de innovación de las topologías a emplear procurando que estas puedan ser escalables. En este caso se recomienda el empleo de arreglos de antenas en

2D como los mostrados en la figura 4.4 ya que de la forma en que se manejan las estaciones hoy en día solo es posible implementar un número limitado de antenas, además de que los arreglos de antenas presentados permiten incrementar el poder de transmisión y reducir la interferencia [20].

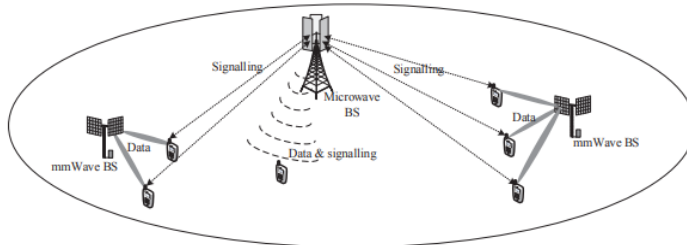


Figura 4.4. Estaciones Base MU - MIMO [20]

4.2.3.4 Cloud RAN

Las radio bases (RAN por sus siglas en inglés) que fueron desarrolladas e implementadas dentro de 3G corresponden la siguiente arquitectura. Tienen implementados dos secciones principales, las cuales son el Remote Radio Head (RRH) y un Baseband Unit (BBU). En general el RRH se ocupa del tratamiento de la señal para su correcto procesamiento, como la conversión analógica a digital y viceversa, filtrar el procesamiento de radiofrecuencias, y amplificar las señales, mientras que el módulo de BBU se encarga del procesamiento de las señales que recibe o envía dentro de la estación base [24].

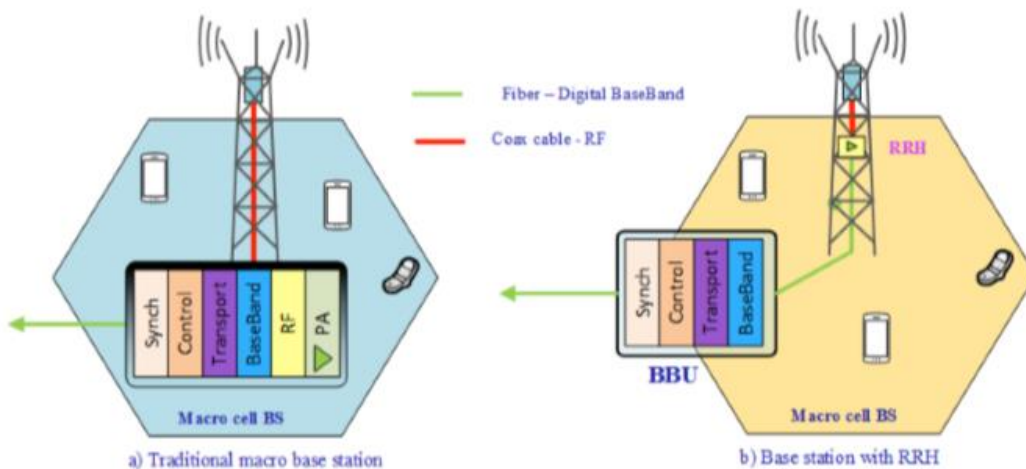


Figura 4.5. Comparación RAN y CRAN [24]

Las Cloud RAN (CRAN) corresponden a la versión actualizada para 5G de las radio bases que se han mencionado. El punto más destacable de esta nueva arquitectura es que el procesamiento del BBU se encuentra centralizado, todo el procesamiento realizado

es llevado a un pool central dicho elemento es llamado BBU pool. De forma física las antenas y el módulo RRH se conecta a una plataforma óptica. Con este modelo es posible reducir el número de BBUs dentro de una misma cobertura y, además, poder brindar mejores servicios que las radio bases convencionales [24].

Dentro de la figura 4.5, se puede observar una comparación entre las estaciones base RAN y las CRAN. En las primeras se observa el estilo de estaciones que se había ido manejando, se observa que el punto en donde se encuentran las antenas está conectado al equipo que procesa todo el tráfico mediante un cable coaxial generando grandes atenuaciones de las señales procesadas. Mientras que en la otra imagen se muestra el modelo de una CRAN, se observa que en este caso las antenas se conectan por cable coaxial hasta el RRH colocado a corta distancia de éstas disminuyendo la atenuación presentada por los cables, luego de esta se conecta al BBU mediante fibra óptica para que se encargue de su procesamiento.

4.2.4 Formas de onda y técnicas de Modulación

Dentro de este apartado se describen las características de las formas de onda y técnicas de modulación candidatas para ser utilizadas en 5G.

4.2.4.1 Multiplexación por División de Frecuencia Generalizado (GFDM)

Con el incremento de los sistemas de comunicaciones móviles se ha ido requiriendo una mayor eficiencia espectral y una menor latencia, por lo tanto, en la búsqueda de desarrollar la red de quinta generación se encontraron las atractivas características de la GFDM (Multiplexación por División de Frecuencia Generalizado). GFDM es un sistema en el que transmite múltiples símbolos a través de multiportadoras en un bloque de estructura bidimensional es decir en tiempo y frecuencia [25].

A diferencia del sistema OFDM, GFDM tiene mayor espaciamiento espectral, esto debido a la reducción del intervalo de tiempo de las sub-portadoras, gracias a esto es posible admitir más sub-portadoras y, por lo tanto se tiene mayor eficiencia espectral y flexibilidad en la implementación.

En la figura 4.6 podemos observar el diagrama de bloques del sistema de GFDM. Primeramente, se codifica la información binaria que piensa enviarse, luego de modula a banda base, finalmente, los símbolos de modulación se dividen en bloques de $M \times N$ M son los intervalos en el tiempo y N son el número de subportadoras, elementos. Para el caso de recepción sigue este proceso de forma inversa [26]. GFDM utiliza un único prefijo cíclico (CP) para el bloque completo de GFDM, a diferencia de OFDM en donde hay un CP por símbolo transmitido, por lo tanto, podemos observar que GFDM tiene mayor eficiencia espectral [26].

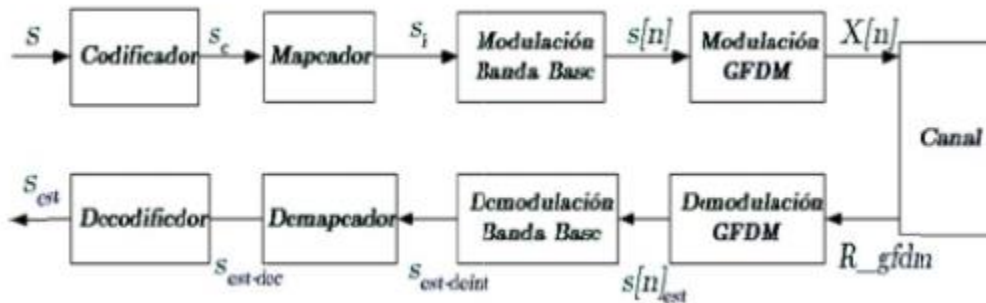


Figura 4.6. Diagrama de bloques GFDM [26]

En GFDM se pierde la ortogonalidad entre las sub-portadoras debido a los filtros que son utilizados para esta técnica de modulación. Esto ocurre debido a que los espectros de cada sub-portadora se ven afectados por la función de transferencia del filtro utilizado. Esta interferencia que se produce entre sub-portadoras debido a la pérdida de ortogonalidad, esto provoca que la tasa de errores BER (Bit Error Rate) sea peor que en OFDM.

Para objetivos de cumplir la baja latencia esperada de 5G es necesario que la duración de la trama sea muy corta, en GFDM es posible que la duración de la trama se adapte a las necesidades del servicio que se va a proporcionar.

4.2.4.2 Filter Bank Multicarrier (FBMC)

La modulación Filter Bank Multicarrier (FBMC) consiste otra de las técnicas de modulación propuestas para el nuevo protocolo, al igual que en GFDM esta técnica de modulación aplica un filtrado a cada sub-portadora, pero lo que los hace diferentes son el tipo de filtro, la modulación y la temporización de los símbolos.

Gracias al filtrado utilizado en FBMC se reduce notoriamente la necesidad de banda de guarda, esto debido a que el filtrado anula, prácticamente, las componentes fuera de banda de cada sub-portadora. El espectro queda confinado dentro de los límites, gracias a esto es posible soportar diversas aplicaciones con diferentes anchos de banda que requieren fragmentación del espectro. Esta modulación separa de forma casi perfecta las sub-portadoras, esto a través de un buen diseño de banco de filtros. [31]

La implementación de FBMC es mucho más compleja debido a que se le agregan bloques PPN (Polyphase Network), los cuales significan un mayor procesamiento para los filtros digitales que le son agregados al sistema, los bloques PPN es el conjunto de filtros prototipo, los cuales utilizan la transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) esto para dividir el ancho de banda en M subcanales para la transmisión, como se muestra en el diagrama de bloques de la figura 4.7 [33]. Gracias a estos filtros es posible separar de forma casi perfecta las sub-portadoras.

Existen dos variantes de FBMC, las cuales son Multi-Tono Filtrado (FMT) y Multi-Tono Escalonado (SMT). SMT exhibe mayor eficiencia espectral y es más promovido que FMT. Para lograr una máxima eficiencia de tiempo-frecuencia, sin la necesidad del CP, y del tiempo de guarda que utiliza OFDM, SMT necesita escalar los símbolos de múltiples portadoras en el tiempo y debe aplicar offset-QAM (OQAM).

Debido al filtrado por sub-portadora la respuesta en frecuencia del filtro debe ser bastante corta, esto requiere longitudes de filtro muy grandes, comparándola con la longitud de un solo símbolo, además FBMC no utiliza ningún CP y gracias a esto logra máxima eficiencia espectral. Como resultado de la teoría del banco de filtros, la modulación y demodulación se puede realizar de manera más eficiente gracias a la transformada rápida de Fourier (FFT).

Los bancos de filtros pueden estar definidos como una formación de M filtros que producen M entradas que producen M salidas, como lo podemos observar en la figura 3.7.

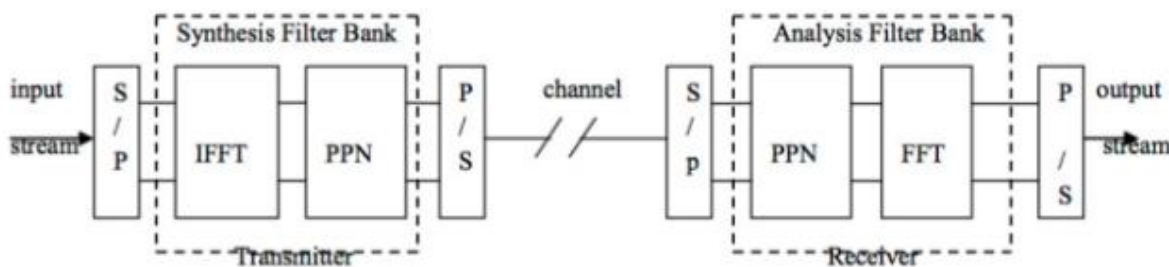


Figura 4.7. Diagrama de bloques de FBMC [33]

4.2.4.3 Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC)

Además de FBMC existe otra técnica de modulación la cual corresponde a Universal Filtered Multi-Carrier (UFMC), ésta se diferencia de las demás modulaciones por su tipo de filtrado. En FBMC se filtran las sub-portadoras individuales, pero en esta técnica de modulación se filtra un grupo de sub-portadoras. Con la agrupación de sub-portadoras se logra la reducción de la longitud del filtro utilizado en UFMC comparándolo con FBMC, además de que es posible que la modulación se realice en menos tiempo. Otra de las ventajas que tiene UFMC sobre FBMC es que con esta técnica de modulación se tiene una menor latencia en la transmisión de datos. [32]

La técnica de modulación utilizada para UFMC es la Modulación de Amplitud en Cuadratura (QAM), además UFMC no tiene necesidad del prefijo cíclico, pero puede ser utilizado para la protección de interferencia entre símbolos.

4.2.5 Nuevas Técnicas de Acceso al Medio

Dentro de este apartado se describen algunas de las técnicas de acceso al medio propuestas para usarse dentro de 5G, ya que como se ha visto, cambiarán las características de la red para acceder al canal, así que las tecnologías utilizadas para el resto de las generaciones celulares no pueden responder ante las nuevas exigencias que se tienen para la nueva generación celular.

4.2.5.1 Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access (OFDMA)

OFDMA consiste en una técnica de acceso al medio la cual maneja la multiplexación de sus señales tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, ésta se basa en la técnica OFDM. En este caso las señales que se manejan se manejan en diferentes slots de tiempo alojados en varias frecuencias, también se tienen diferentes grupos de subportadoras o símbolos OFDM para ser transmitidos a los diferentes usuarios que se tienen en el sistema. [29]

El uso de las subportadoras de los usuarios en OFDMA se asigna dinámicamente, cambiándose en periodos cortos de tiempo, esta técnica se conoce con el nombre de scheduling [30], con esto es posible determinar la cantidad de subportadoras que se le asignan a cada usuario, dependiendo del tipo de servicio que requiere el usuario, con esto es posible tener una mejor eficiencia espectral. También es posible brindar diferentes velocidades de transmisión a los usuarios que así lo requieran con mayor o menor número de subportadoras.

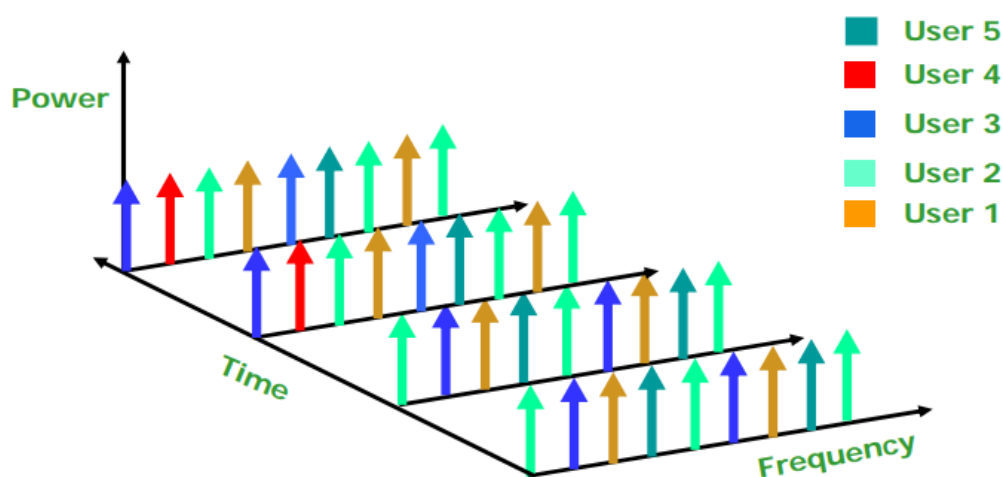


Figura 4.8. Subportadoras OFDMA [29]

En la figura 4.8 se observa el funcionamiento básico de las subportadoras asignadas para cada usuario dentro de OFDMA, como se menciona, no es necesario que

esta viajen siempre juntas si no que se pueden manejar en diferentes slots de tiempo y frecuencias, dependiendo del servicio del usuario se le asigna el número de subportadoras. La señal manejada con OFDMA posee una mayor robustez ante los multitrayectos y evita la distorsión mediante técnicas de ecualización en dominio de la frecuencia.

Algunas desventajas de la técnica es que se basa en la ortogonalidad y si algunas de las subportadoras llegan a desfazarse de su frecuencia de referencia, estas empiezan a comportarse como interferencia para las demás subportadoras.

Dentro de OFDMA se crean subcanales formados por grupos de subportadoras, la forma de crear los subcanales se divide en dos formas. Una es la Adjacent Subcarrier Method (ASM) y la otra es la Diversity/Permutation (DSM) [30]. El método ASM consiste en que las subportadoras se encuentran de forma continua formando un grupo entre ellas, este hecho hace que el subcanal donde se encuentre esté correlacionado de una forma más fuerte. En DSM las subportadoras están separadas ya que toman una posición aleatoria dentro del dominio de la frecuencia a pesar de estar agrupadas dentro de un subcanal, dicho canal posee una diversidad de frecuencia además de estar codificado y entrelazado, para demodular es posible utilizar diferentes tecnologías como WiFi o WIMAX.

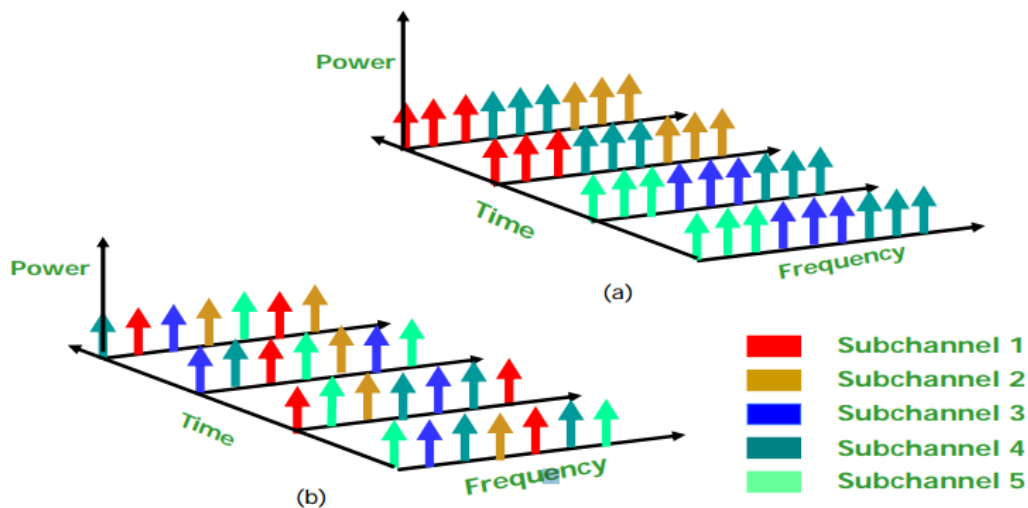


Figura 4.9. Subcanales de OFDMA (a) ASM (b) DSM [29]

Cada método de subcanalización corresponde a diferentes características y requerimientos del usuario. Dentro de la figura 4.9, se puede observar la forma en la que trabajaría cada sub-canal ASM o DSM. Como se observa en ASM este genera grupos de subportadoras, tanto por slots de tiempo, como en frecuencias, para así generar grupos más robustos, mientras que, DSM maneja posiciones aleatorias, tanto en el dominio del tiempo, como de la frecuencia.

4.2.5.2 Non Orthogonal Multiple Access (NOMA)

NOMA corresponde a una de las nuevas técnicas de acceso propuestas para las señales de radio de 5G, a diferencia de las técnicas utilizadas anteriormente, por ejemplo, TDMA, DCMA o FDMA que manejan time slots, portadoras en frecuencia o códigos, para asignar un canal para el servicio del usuario, en el caso de NOMA maneja un acceso ortogonal, ya sea en tiempo, frecuencia, código o espaciamiento. Básicamente, cada usuario se encuentra operando en la misma banda al mismo tiempo, lo que se utiliza para diferenciar los canales que corresponden a cada usuario es el nivel de potencia de cada uno. NOMA maneja códigos de superposición, los cuales permiten transmitir varias señales al mismo tiempo. Ya recibidas las señales se ocupan los denominados SIC (Successive Interference Cancellation), separando una señal de las demás, que toma como interferencia, y así obtener los canales de subida y de bajada del usuario que se está manejando [28]. En la figura 4.10 se muestra un esquema comparativo entre el uso del ancho de banda entre OFDMA y NOMA, donde observamos la funcionalidad de NOMA, porque es posible que utilice el mismo ancho de banda para enviar el canal de subida y el de bajada juntos, optimizando el uso del espectro para cada usuario.

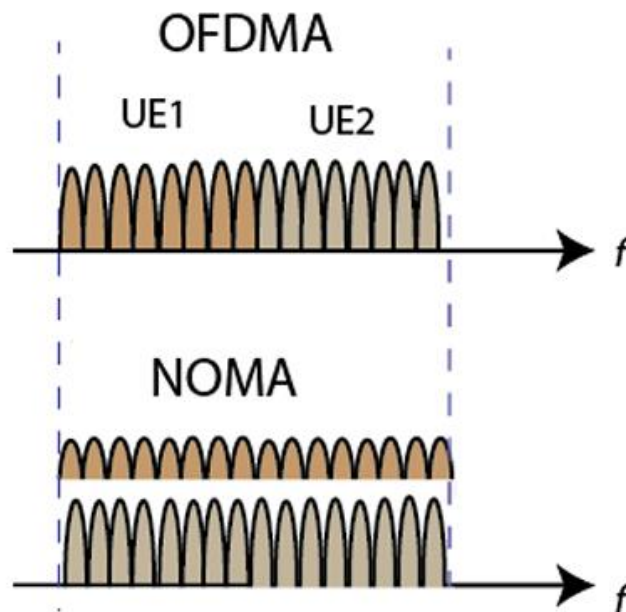


Figura 4.10. Uso del espectro de OFDMA y NOMA [28]

Ahora bien, se explica más a fondo la forma en que trabajan los SIC que son la base de funcionamiento del sistema de NOMA generando una cancelación perfecta de las señales espurias que se tienen, cabe destacar que se comportan de forma diferente para cada canal dependiendo si es el de uplink o downlink.

NOMA para Downlink y Uplink

Para los canales de downlink la estación base sobrepone las señales de información de todos los usuarios que está manejando. Para poder distinguir la señal que corresponde a cada usuario es necesario que su dispositivo cuente con algoritmos SIC. [28] En estos casos el reto para las estaciones base es el decidir con qué potencia se transmite para cada usuario, en este caso el criterio de NOMA es que se debe dedicar una mayor potencia para los elementos que se encuentran a mayor distancia de la radio base, mientras que la menor potencia es dedicada a los elementos más cercanos a ésta.

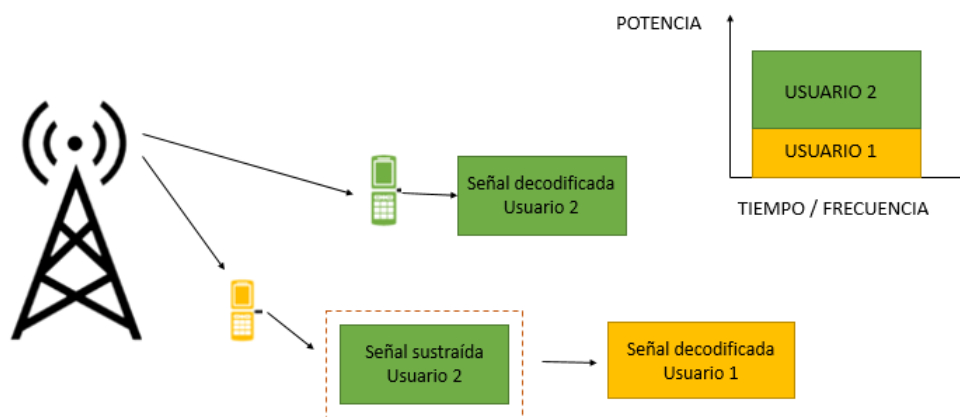


Figura 4.11. Funcionamiento de NOMA [28]

Cada elemento receptor recibe la señal que contiene todas las señales en conjunto, así que empieza a decodificar la señal más fuerte y comienza a decodificar las demás señales en un proceso iterativo, hasta que encuentra la señal que le corresponde al usuario, cancelando las que no le corresponden.

En el caso del Uplink, se toma en cuenta que el nivel de potencia de cada dispositivo será diferente dado que estos se encuentran distribuidos en el área de cobertura de la estación base, dependiendo de la distancia a la que se encuentran de ésta, por la atenuación que presentan durante el trayecto, así que la estación base procede a utilizar los algoritmos SIC, pero esta vez para codificar todas las señales que recibe. Primero codifica la señal de más baja potencia, que correspondería al usuario más alejado, y así con cada señal que va recibiendo, hasta llegar al usuario que se encuentra más cerca de la estación base, como se observa en la figura 4.11.

Las desventajas de NOMA serán que, teóricamente, es posible eliminar todas las señales que se comportan como interferencia para el usuario con el uso de los SIC, pero aún en casos reales se prevé que podrían mantenerse ciertas interferencias entre las todas las señales que se envían. Una buena opción para manejar NOMA es que esté acompañada por el uso de MIMO lo que podría mejorar la eficiencia de los algoritmos SIC y en general de NOMA. [28]

4.2.5.3 Multiuser Shared Access (MUSA)

Se han propuesto diferentes técnicas que trabajan con el principio de la tecnología NOMA, se pueden dividir en dos grupos los code-domain y los power-domain. El grupo de los code-domain fue desarrollado en el funcionamiento de CDMA permitiendo que varios usuarios compartan la misma frecuencia y recursos mediante códigos ortogonales entre sí.

MUSA consiste en una técnica que pertenece al grupo de los code-domain, esta técnica ocupa códigos complejos no binarios para asignarlos a cada usuario, la longitud de los códigos que maneja MUSA son cortos debido a la parte compleja que poseen dicha parte se puede escoger de las constelaciones de la modulación que se utiliza, en este caso es la modulación QAM permitiendo manejar múltiples usuarios. [34]

4.2.5.4 Sparse Code Multiple Access (SCMA)

SCMA corresponde a una técnica de acceso al medio que se basa en el uso de LDS (Low-Density Signature). Los LDS corresponden a secuencias que generan una separación entre los usuarios mediante la transmisión y detección de símbolos síncronos en un canal Gaussiano [37].

El uso de LDS-CDMA mapea los bits transmitidos dentro de códigos multidimensionales con valores complejos para cada usuario que esté dentro de la red, dicho código es único para cada usuario. Estos códigos comparten un mismo patrón de radiación dentro de un codebook. Los códigos asignados para cada capa no son ortogonales, por lo que el número de usuarios puede ser más grande que la cantidad de recursos ortogonales que posee el sistema, con esto puede generar un mayor número de conexiones en la red. [34]

Tecnología	Ventajas	Desventajas
NOMA	<ul style="list-style-type: none"> -Tiene el CP necesario. -Tiene facilidad de integración con MIMO. - Tiene una eficiencia espectral media. 	<ul style="list-style-type: none"> -Requiere de un receptor muy complejo. -La multiplexación por dominio de potencia se encuentra aún en desarrollo. -Tiene larga latencia. -No es ortogonal. -Tiene alta complejidad de procesamiento.
SCMA	<ul style="list-style-type: none"> -Mejora la eficiencia espectral 3 veces o más. -Capacidad de mejorar el sistema de subida cerca de 2.8 veces el de OFDM. -Alcanza un throughput y ganancia de cobertura mayor que OFDMA por 5% y 8% respectivamente. 	<ul style="list-style-type: none"> -Presenta problemas en el diseño y optimización de los códigos que necesita. -La interferencia entre usuarios aumenta.
MUSA	<ul style="list-style-type: none"> -Baja tasa de errores por bloque. -Soporta el acceso un gran número de usuarios. -Mejora la eficiencia espectral. 	<ul style="list-style-type: none"> -La interferencia entre usuarios aumenta. -Problemas en el diseño de los símbolos.

Tabla 4. Cuadro Comparativo de Tecnologías de Acceso. [38]

4.3 Aplicaciones de la tecnología 5G

La tecnología del nuevo protocolo 5G trae varias aplicaciones para el uso de la población, no solamente en la telefonía celular, donde se alcanzan velocidades de hasta 10 Gbps y latencias de 1 ms, además, se ve implicada dentro del desarrollo de nuevas tecnologías en diferentes ámbitos dentro de la vida de las personas y la sociedad de la información, la cual se verá beneficiada en gran medida.

Entre algunas de las aplicaciones se encuentra la telemedicina, debido a los bajos tiempos de latencia es posible que los médicos puedan dirigir operaciones a distancia por medio de robots en tiempo real, con una mejor precisión y seguridad para los pacientes, sin necesidad de trasladarse a lugares remotos a su residencia [35].

Otra aplicación consiste en el Internet de las Cosas (IoT por sus siglas en inglés) representa la próxima evolución de internet, el cual, está integrado por una enorme cantidad de elementos como lo son sensores y actuadores, gracias a estos elementos es

posible recibir y proporcionar información en forma digital, esta información se coloca en redes bidireccionales que son capaces de transmitir los datos para ser utilizados por diferentes servicios y usuarios. [35]

Las aplicaciones del IoT requieren de una mejor conexión entre los host, ya que se trata de aplicaciones en tiempo real y debido a esto es que debe existir una alta transmisión de datos así como calidad en la conexión, la cual se ve soportada con las características del protocolo 5G. Las redes de sensores inalámbricos (WSN) están constituidas por sensores autónomos situados en diferentes puntos con el objetivo de comunicarse entre ellos con un mínimo de consumo de energía y entregando su colección de datos.

Gracias a los sensores es posible medir diferentes variables físicas o fenómenos, para después transmitir estos datos obtenidos a la nube. Estos sensores están clasificados principalmente para tres usos: proveedores de datos del sensor, organizaciones y Personal y hogares [39].

El primero en la clasificación es utilizado por corporaciones empresariales quienes por sí mismos implementan y administran los sensores, la clasificación de organizaciones considera a infraestructuras públicas, organizaciones comerciales y corporaciones privadas quienes se encargan de proporcionar servicios y tecnología y por último la clasificación de Personal y hogares contiene los teléfonos móviles, relojes inteligentes, cámaras, GPS, micrófonos, alimentos y artículos para el hogar, como lo son congeladores, televisores, hornos de microondas, lavadoras, electrodomésticos inteligentes, etc. [36]

Otra aplicación que trae consigo el nuevo protocolo consiste en la comunicación M2M (Machine to machine) logrando transmitir y recibir información y desencadenar una acción establecida, alcanzando una mayor productividad debido a la automatización de procesos [39], eliminando la interacción humana, sin lugar a duda estos procesos serán potenciados con la nueva tecnología y potenciar y optimizar nuevos procesos de este tipo de comunicación.

El desarrollo de los autos autónomos es otro aspecto en el cual se observa directamente las ventajas que traen consigo las tecnologías 5G, debido a que, aunque hoy en día se encuentran en procesos de desarrollo [36], los autos autónomos necesitan tomar decisiones en tiempo real en cuestión de milisegundos para garantizar la seguridad de los usuarios y evitar en lo posible cualquier daño o accidente en los que estos pudieran verse implicados.

5. Prospectiva de Uso de los Sistemas 5G en México y en el mundo

5.1 Usos y Necesidades de la Tecnología 5G

Como se revisó, cada generación de telefonía celular respondía a las necesidades que tenía la población durante esa época, la tecnología 2G se encargaba principalmente de la transmisión de servicios de voz. Con la inclusión de la tecnología 3G y 4G se introdujeron también la transmisión de diferentes datos (imágenes, mensajes de texto, videos) o el acceso a internet, a partir de este punto la comunicación mediante archivos de voz se dejó en segundo plano; En estas tecnologías el desarrollo se centró en el aumento de las tasas de transmisión y recepción a los dispositivos móviles.

La tecnología 5G responde a nuevas necesidades dentro de la telefonía celular está enfocado principalmente al uso de datos e internet, aunque su enfoque cambia y su prioridad no es que el usuario tenga cobertura y acceso a internet, si no que el objetivo es poder brindar datos a diferentes dispositivos que se han desarrollado dentro de IoT, como por ejemplo los vehículos autónomos y ciudades inteligentes. Estas aplicaciones requieren de una mayor fiabilidad y una muy baja latencia, para que sean utilizados con confianza y puedan operar óptimamente. Además de que existen otras aplicaciones como lo son las comunicaciones masivas tipo máquina (mMTC), la cual requiere un mayor ancho de banda para evitar la saturación de las redes y del mismo modo requiere de menores tasas de transmisión.

Si bien, varios países han estado trabajando en la telefonía 5G, son muy pocos los que en realidad comienzan a implementar los nuevos sistemas dentro de sus ciudades. En este capítulo, se describe, brevemente, el avance del despliegue de estas redes en los países que están más próximos a tener un sistema 5G comercial funcional, así como algunas medidas regulatorias que siguieron para el desarrollo de éste.

5.2 Despliegue Actual de las Redes de Telefonía Celular

La telefonía móvil representa una parte vital en la vida de las personas, tanto para la comunicación, como para el acceso al internet. El porcentaje de penetración en la población mundial apenas alcanzó el 66% para el año 2017, según los estudios revelados en el 2017 por GSMA [1]. Dentro de estos estudios se muestra también, que más de la mitad de la población que puede acceder al uso de la telefonía celular sigue ocupando tecnologías pertenecientes a la segunda y tercera generación de telefonía, mientras que una minoría maneja la tecnología de la cuarta generación de telefonía celular. En el 2017 un 45% de la población mundial tenía conexiones de 3G, el 39% contaba con conexiones de 2G y tan solo el 16% contaba con conexión 4G [1].

Las predicciones en el tema indican que para el año 2025 podría alcanzarse un porcentaje de penetración cercano al 61%, con acceso a telefonía móvil, dentro del cual el acceso principal estaría en la telefonía 4G, dando un avance a la siguiente generación celular 5G, que bien estaría en su etapa inicial de implementación y optimización.

Dentro del mismo estudio [1] se muestra que los países que poseen una mayor penetración de la última tecnología de telefonía móvil, es decir 4G, pertenecen a las zonas de Norte América y una parte de Europa, además, pertenecen a las zonas que tienen un porcentaje cercano del 85% de acceso a la telefonía móvil dentro de la población. Estas zonas, además, representan las naciones pilares que han invertido en el desarrollo de 5G de telefonía celular y que poseen una buena proyección para su implementación dentro de unos años.

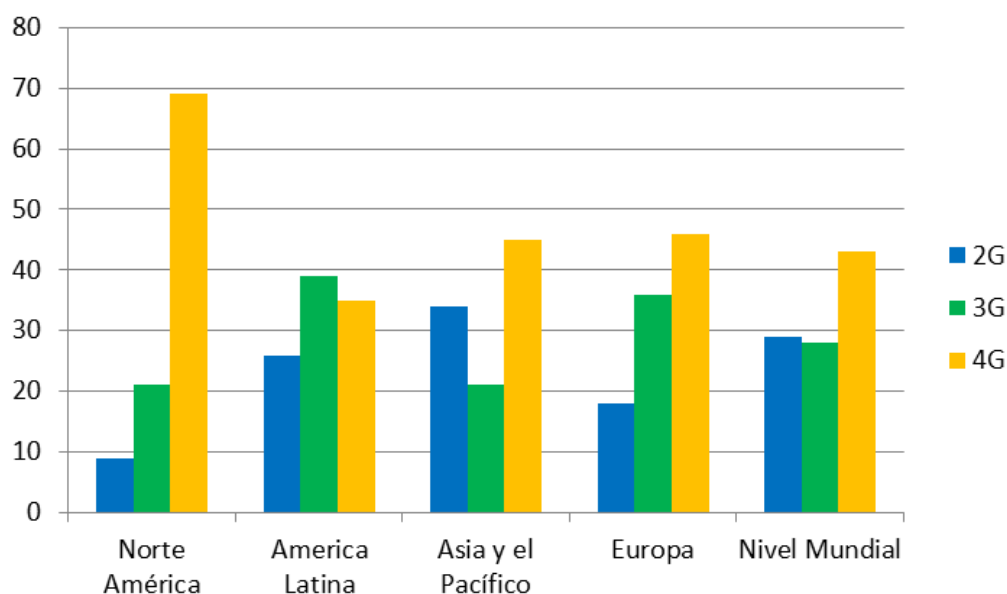


Figura 5.1. Porcentajes de Utilización de Tecnologías Móviles en el Mundo [41]

La zona asiática y el pacífico poseen una penetración de telefonía celular cercana al 70% de la población de la cual un porcentaje sigue utilizando dispositivos pertenecientes al 2G y 3G. Este porcentaje pudiera parecer engañoso ya que países como China, Corea del Sur y Japón han destacado en el desarrollo de la tecnología 5G, así, no quiere decir que no estén actualizados, solamente es que el estudio abarca otros países pertenecientes a la zona los cuales no presentan el mismo desarrollo tecnológico que estas potencias, por lo tanto, los porcentajes de la zona se reducen. Dentro de la figura 5.1 se observa a más detalle los porcentajes de utilización de las tecnologías móviles dentro de algunas áreas del mundo en las cuales no centraremos en desarrollar más adelante.

Respecto a las zonas de América Latina, el norte de África y Asia Occidental, manejan un porcentaje cercano al de la zona de Asia Oriental en cuanto a la penetración

de la telefonía dentro de la población, la diferencia con la zona asiática y del pacífico radica en que las tecnologías que manejan se centran en 2G y 3G, teniendo estadísticas muy parecidas, así como las predicciones que se tienen para el desarrollo celular para el año 2025.

Finalmente, los países pertenecientes a la zona sur de África presentan menores estándares de penetración telefónica móvil dentro de la población, ya que alcanzan un porcentaje cercano al 44% de la población, de la que el 60% utiliza tecnología telefónica de 2G, la otra mayor parte maneja la tecnología de 3G y una ínfima parte de su población utiliza tecnología de 4G, correspondiente al 4% de la población.

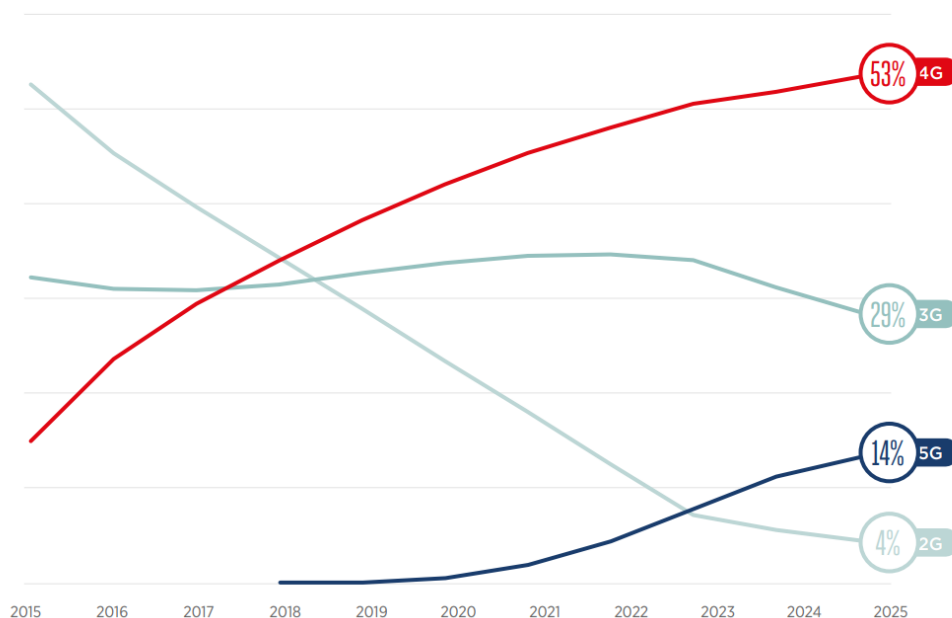


Figura 5.2. Adopción Tecnológica de 2G, 3G, 4G y 5G a Nivel Mundial [41]

Los dispositivos celulares utilizados a nivel mundial hasta el año 2018 presentan los siguientes porcentajes representados en la figura 5.2, en cuanto a las generaciones utilizadas. Los dispositivos de 4G predominan en la población, ya que alcanzan un porcentaje de utilización cercano al 45%, en cuanto a los dispositivos de segunda y tercera generación poseen un porcentaje muy cercano al 27% cada uno. Las predicciones que se tienen para el año 2025, concernientes a los dispositivos móviles, indican que el uso de las tecnologías 2G y 3G tenderían a disminuir con porcentajes entre el 5% y el 20%, haciendo que la tecnología 4G sea la predominante dentro de la población, con un porcentaje de utilización cercano al 60%. Finalmente, la nueva tecnología 5G estaría en su etapa inicial de implementación con porcentajes cercanos al 15%. [41]

Estas estadísticas muestran un estatus general de la situación mundial respecto a la integración telefónica móvil en la población y en diferentes países, se observa que la media de la población aún maneja 2G y 3G, como su principal medio tecnología de uso cotidiano, mientras que la tecnología 4G todavía se encuentra en proceso de

implementación. Otro punto que puede destacarse es el hecho de que el desarrollo tecnológico hacia la nueva generación (5G) se encuentra distribuido, principalmente, en la zona asiática, así como en América del Norte y Europa.

En cuanto a las predicciones de penetración de telefonía móvil que se tiene para el año 2025 [1], no muestran un ambiente muy distinto a lo observado para el año 2018, ya que las zonas con mayor predominancia de la tecnología 4G serán los países con una mayor implementación de la tecnología 5G, ubicada principalmente, en los países de Europa, América del norte y ciertos países de Asia. Los países que encabezan la lista en la implementación del 5G son principalmente Estados Unidos, Japón, Corea del Sur, China y, en menor medida, la zona europea, alcanzando porcentajes cercanos al 50% de su población.

En la figura 5.3 se observa el despliegue de la tecnología 5G a nivel mundial, las zonas o ciudades donde ya se cuenta con un uso comercial parcial del nuevo protocolo, en donde se están desarrollando pruebas o investigaciones y en donde se cuentan únicamente con tecnologías anteriores (3G y 4G).

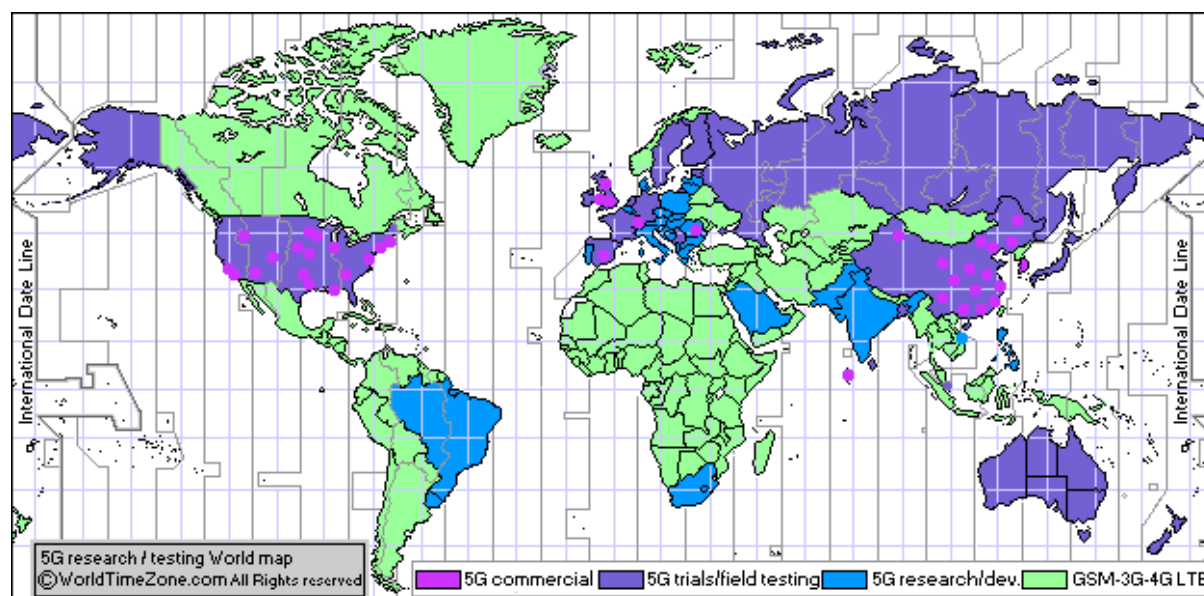


Figura 5.3. Despliegue de Tecnologías Celulares en el Mundo [68]

Las metas planteadas para el 2025 no radican únicamente en la implementación de 5G dentro de la población, los principales objetivos esperados para este año son el reducir el uso del 2G y 3G, así como alcanzar el auge de la tecnología 4G en la mayor parte del mundo. Los países más desarrollados se encuentran concentrados en la implementación de la nueva tecnología, mientras que el resto del mundo podría decirse que estará enfocado a ponerse al día respecto a las tecnologías implementadas dentro de su país, es decir concentrarse en el uso del 4G e ir erradicando poco a poco las tecnologías anteriores, dado que esas tecnologías son completamente incompatibles con la tecnología de 5G y con esto poder favorecer la futura transición a la nueva generación.

5.3 Acciones regulatorias para la implementación de 5G

5.3.1 Implementación a nivel Mundial

Según los estudios de mercado que se han realizado por GSMA [1] el principal desarrollo sobre el tema de 5G se encuentra en las áreas de Asia y el Pacífico, Europa y Norteamérica por lo que nos centraremos en hablar un poco más de países. Todas las predicciones de estos estudios llegan hasta el año 2025, en este caso para la adopción de 5G en los mercados clave a nivel mundial se estima que los países que encabezarían la lista serían Estados Unidos y Canadá, alcanzando que casi la mitad de su población se encuentre utilizando la nueva generación de telefonía, mientras que, la zona que los secundarían sería el grupo de los países asiáticos (China, Japón y Corea del Norte) y con casi el mismo porcentaje de adopción estaría la zona europea. Esto se puede observar en la Figura 5.4, obtenida del estudio de GSMA para Norteamérica [43].

5G adoption in key markets

Percentage of connections

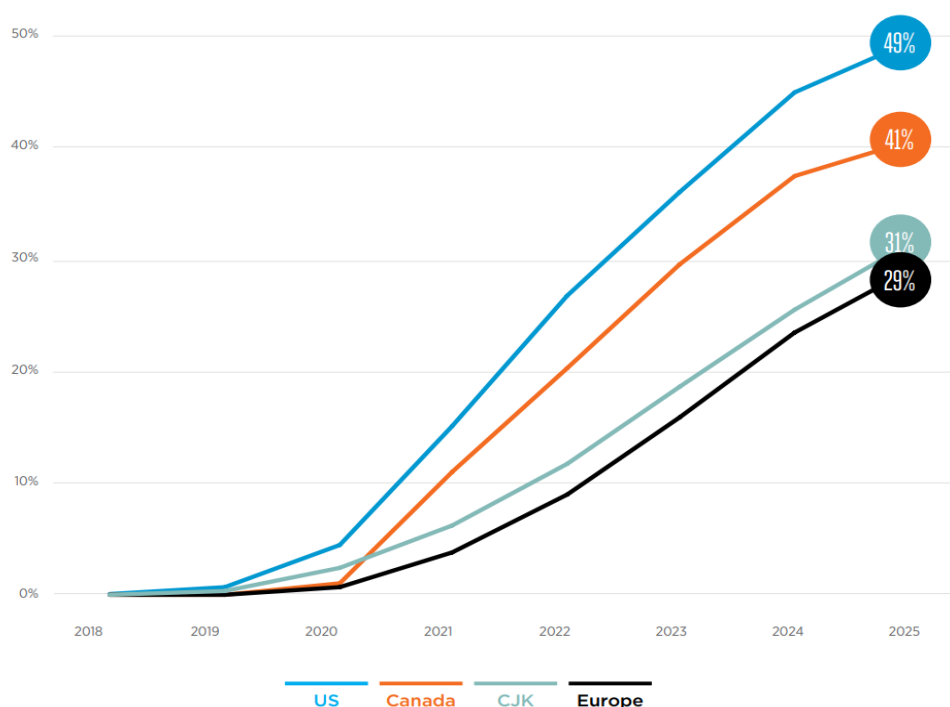


Figura 5.4. Porcentaje de Adopción 5G en los Mercados Clave [43].

5.3.2 Desarrollo en la zona de Norteamérica

Actualmente, la zona de Norte América (Estados Unidos y Canadá) se halla un panorama más propicio para la implementación del 5G, ya que, actualmente cuenta con altos niveles de penetración de la telefonía celular dentro de su población, alcanzando a cubrir un 84% de la población y se prevé que para el 2025 cubrirán a un 86%, lo cual destaca a esta zona por tener el porcentaje más grande en todo el mundo en cuanto a la población que tiene acceso a la telefonía móvil, además de ser la zona con la mayor adopción de internet móvil y smartphones [41]. Dicha zona destaca, además, por ser la zona donde se está más actualizado tecnológicamente ya que de la población que cuenta con uso de algún dispositivo móvil cerca del 68% ocupa dispositivos con tecnología 4G, mientras que el resto de los usuarios manejan equipos 3G y una mínima parte aún ocupan dispositivos 2G. Se estima que la adopción de la nueva tecnología será más rápida que la adopción que se tuvo para la implementación de la tecnología 4G alcanzando cerca de 100 millones de suscriptores para el 2020 y unos 200 millones para el 2025 [43].

5.3.2.1 Acciones Regulatorias

En cuanto al tema regulatorio de las nuevas tecnologías, la FCC (Federal Communications Commission) de Estados Unidos ha establecido un programa de acción respecto a la implementación 5G, este plan es llamado 5G Fast Plan [47], y concentra tres puntos primordiales: el brindar más espectro radioeléctrico para la telefonía 5G, actualizar las políticas de infraestructura de telecomunicaciones y actualizar las antiguas normas regulatorias.

Para el espectro, la FCC se encuentra trabajando en la licitación de diferentes bandas dentro de este año. En bandas de alta frecuencia recientemente se licitó la banda de los 28 GHz. Actualmente, se está buscando licitar la banda de los 24 GHz, para luego proceder con bandas de 37 GHz, 39 GHz y 47 GHz, ofreciendo cerca de 5GHz de espectro para los nuevos sistemas 5G. Para bandas medias están buscando implementar los sistemas 5G en las bandas de 2.5 GHz, 3.5 GHz y de 3.7 a 4.2 GHz ofreciendo cerca de 844 MHz para el desarrollo de los nuevos sistemas móviles. Finalmente, en las bandas bajas se busca trabajar sobre segmentos de las bandas de 600 MHz, 800 MHz y 900 MHz. [47]

En cuanto a la parte de infraestructura se modificaron las leyes concernientes a la ubicación y características de radio bases implementadas facilitando la expansión y cobertura que tendrá el sistema 5G una vez que entre en uso. Finalmente, el plan incluye el actualizar las antiguas normas que regulan diferentes servicios, como el uso de internet, y facilitar el acceso a las nuevas tecnologías por parte de las empresas, entre otros aspectos.

5.3.2.2 Implementación en Estados Unidos

El operador Verizon ya ha implementado 5G para servicios fijos en ciertas ciudades como Atlanta, Dallas, Denver, Seattle, Miami, Washington DC, entre otras ofreciendo tasas que van desde los 300 Mbps hasta 1 Gbps, probando los resultados de la nueva tecnología tanto en las tasas de subida y bajada, como en los bajos niveles de latencia. En cuanto a los servicios móviles se está buscando su implementación para el transcurso del 2019 para áreas limitadas de ciertos estados como en Chicago y Minneapolis, buscando ampliarse en el transcurso de este año [44].

AT&T es un operador que cuenta con mayor desarrollo en la nueva tecnología, uno de sus objetivos es tener cobertura nacional de 5G para el 2020, a finales del 2018 ya brindaba servicios en ciudades como Houston, Dallas, New Orleans, Indianápolis, Austin, Los Ángeles, San Diego, San Francisco, entre otras, a pesar de que en un principio era un servicio para clientes exclusivos, en el transcurso de este año (2019) se busca abrir el mercado a más tipos de consumidores [44].

Otro importante operador que está dentro de la carrera con el 5G en Estados Unidos es T-Mobile, quien a finales del 2018 ya estaba implementando la nueva tecnología en 30 ciudades, como Los Ángeles, New York, Las Vegas, Dallas, entre otras. Este sistema es que únicamente brinda servicio a equipos desarrollados por T-Mobile, que estarán en el mercado en el transcurso de este año. Su meta es que para el año 2021 tengan cubierta dos tercios de la población nacional con tasas mayores a las 100 Mbps, tasa que planean expandir a los 450 Mbps para alcanzar su máximo potencial de 4 Gbps para el año 2024 [44].

Sprint planea ofrecer servicios de 5G desde mayo de 2019 en ciudades como Dallas, Atlanta, Houston y Kansas, ciudades donde brindaría cobertura a grandes áreas abarcando poblaciones que van desde las 500 mil hasta 1.6 millones de usuarios. Además, en el transcurso del año se expandirán a ciudades como Chicago, Los Ángeles, New York, Phoenix y Washington D.C. [44].

Cabe mencionar que existen otros operadores que también se encuentran en la implementación del sistema 5G por ejemplo U.S. Cellular que trabajó en conjunto con Nokia para tener acceso inalámbrico de 5G en 2016 y con Ericsson realizó pruebas urbanas y rurales en el 2017. En el 2019 realizó diferentes pruebas de Massive MIMO y comenzaron un sistema de modernización junto con Nokia. Por su parte, C Spire lanzó el servicio de 5G en diciembre de 2018 con tasas cercanas a los 120 Mbps, buscando llegar a tasas de subida de hasta 750 Mbps, tasas de bajada de 600 Mbps y latencias de 8ms. Starry comenzó a brindar servicio en ciudades como Boston, Denver, Los Ángeles, New York y Washington D.C., con tasas cercanas a los 200 Mbps, buscando ampliarse a más ciudades. Finalmente, Charter se encuentra en estado de desarrollo realizando pruebas en ciudades como Orlando, Reno, Columbus entre otras. [44]

Los proveedores de servicios en Estados Unidos utilizaron diferentes bandas de frecuencia para realizar sus pruebas con esta nueva red.

- T-Mobile: planea utilizar el espectro de banda baja, es decir, 600 MHz., así como el espectro de banda media.
- Verizon: su red 5G Ultra Wideband, opera en ondas milimétricas, específicamente 28 y 39 GHz.
- AT&T: su estrategia de desarrollo es usar ondas milimétricas para áreas más densas y utilizar espectro de banda baja y media para localidades rurales y suburbanas.
- Sprint: afirma tener más espectro que cualquier operador en Estados Unidos, Sprint cuenta con 3 bandas de espectro, 800 MHz, 1.9 GHz y 2.5 GHz.

5.3.2.3 Implementación en Canadá

Canadá es otro de los países que tiene muy altas posibilidades de brindar el nuevo servicio de telefonía móvil a su población, la implementación de los sistemas 5G se prevén para el año 2020.

Telus Mobility es un importante operador canadiense que planea llevar sistemas 5G al país para el año 2020. Vancouver será una de las primeras ciudades que contará con esta nueva tecnología. La implementación de 5G en Vancouver se basa en el 5G Living Lab el cual fue inicialmente lanzado por Huawei y en donde Telus Mobility era colaborador, el proyecto alcanzó velocidades de hasta 30 Gbps en el año 2016.

Otro operador que está trabajando en el desarrollo del 5G para Canadá es Rogers Communications quien busca lanzar el sistema 5G que se desarrolló en la UBC (University of British Columbia) dentro de la ciudad de Vancouver para el 2019, y que esté disponible comercialmente para 2020.

5.3.3 Desarrollo en la zona Asiática

Como se ha mencionado la zona asiática es otras de las zonas principales donde se implementará el estándar 5G dentro de los siguientes años, esta zona tuvo una rápida adopción de la tecnología 4G destacando en los mercados de los principales países de la zona, como son Corea del Sur, China y Japón, mientras que otros países como la India, Bangladesh e Indonesia, se actualizarán con la tecnología 4G dentro de los siguientes años. Se prevé que para el año 2025 se tendría una cobertura cercana al 37% de la población de la zona [46].

El porcentaje de cobertura poblacional que se tiene en la zona de Asia y el Pacífico es cercano al 66%, aunque cabe destacar la presencia de tres países que serán fundamentales para el desarrollo 5G en el continente y cuyos casos desarrollan más en esta sección. Por estas razones, esta es una de las zonas líderes con el desarrollo del 5G,

compitiendo directamente con los mercados de Norteamérica y Europa y siendo de las primeras en lanzar servicios comerciales.

5.3.3.1 Acciones Regulatorias

En China, a finales del año pasado le fueron asignadas algunas bandas de frecuencia a los principales operadores de telefonía del país. A China Mobile, el principal operador, se le asignaron los rangos de 2.515 a 2.675 GHz y de 4.8 a 4.9 GHz. A China Telecom, otro de los principales operadores, le fueron concesionadas las bandas de los 3.4 a los 3.5 GHz. [52]

Existen, además, otras bandas que el gobierno chino clasifica como posibles candidatas para el uso del 5G dentro de unos años, las cuales están en los rangos de los 24.75 a los 27.5 GHz y de los 37 a los 42.5 GHz [52].

En el caso de Japón, el 10 de abril de 2019, el MIC (Internal Affairs Communications) asignó las bandas de 3.7, 4.5 y 28 GHz para trabajar con el 5G, dichas bandas fueron distribuidas en los cuatro principales operadores de Japón con la condición de desarrollar infraestructura y sistemas para poder operar dentro de los siguientes años [53].

Entre los operadores que ganaron la licitación de las bandas para 5G están, NTT DOCOMO, con los rangos de 3.6 a 3.7 GHz, de 4.5 a 4.6 GHz y de 27.4 a 27.8 GHz. El operador KDDI maneja las bandas de 3.7 a 3.8 GHz, de 4 a 4.1 GHz y de 27.8 a 28.2 GHz. A Softbank se le asignaron las bandas de 3.9 a 4 GHz y de 29.1 a 29.5 GHz. Por último, al operador Rakuten Mobile se le asignaron las bandas de 3.8 a 3.9 GHz y de 27 a 27.4 GHz. [53]

5.3.3.2 Implementación en China

China se destaca por tener un porcentaje de cobertura del 82% el cual crecería al 85% para el año 2025, otro punto muy importante es que cerca del 70% de su población utiliza la tecnología 4G y el resto maneja las tecnologías anteriores, el contraste para el 2025 es que el porcentaje que se tiene para tecnologías anteriores estaría en el uso de 5G y aproximadamente un 1% continuaría usando 3G con la mayor parte de la población utilizando el 4G todavía. [46]

Los operadores chinos se encuentran tratando de desarrollar la infraestructura que soportará la nueva red, 5G, tratando de que ésta pueda soportar los estándares 4G y 5G en conjunto y remover la compleja integración de LTE. Además, de que se busca optimizar el uso del espectro radioeléctrico para las nuevas tecnologías, así como reducir el costo que se tuvo para las nuevas unidades que el que se tuvo para las unidades 4G. La implementación de la nueva tecnología no plantea un problema para el país chino ya que

estiman que para el 2025 sean cerca de 460 millones de usuarios conectados a la red 5G, según estudios de GSMA, siendo el país con el mayor número de usuarios en la nueva red [44].

China Unicom es uno de los principales operadores de telefonía móvil dentro del país y del mundo, contando con cerca de 96.06 millones de usuarios. En el 2019 esta compañía cuenta con pocos proyectos para implementar tecnología 5G en las principales ciudades chinas. En la única localidad donde se cuenta con radio bases 5G desde el 2019 es en Tiananmen Square, además de la ciudad de Shenzhen que cuenta con el nuevo sistema en una zona de la ciudad con 100 nuevas radio bases. Se planea implementar más estaciones base en Beijing, Tianjin, Qingdao y otras nueve ciudades más. [44]

China Mobile es otra compañía que se encuentra en el mercado de 5G, este es el operador móvil más grande de todo el mundo contando con cerca de mil millones de usuarios y ya ha estado trabajando en proyectos sobre 5G desde el 2015, en conjunto con Ericsson, instalando radio bases en las ciudades de Guandong y Beijing. Para el año 2020 busca construir cerca de 10,000 estaciones base dentro de las principales ciudades de la nación. [44]

Otro operador que está en la implementación del 5G en China se trata de 3 Hong Kong, quienes a finales del 2018 implementaron sistemas que trabajan en las bandas de los 3.5 y los 28 GHz, alcanzando velocidades por debajo de los 2 Gbps. [44]

5.3.3.3 Implementación en Japón

Japón es otro país muy adelantado con el desarrollo de 5G, principalmente, por que en el año 2020 será el anfitrión de los juegos olímpicos, por lo que prometió sorprender al mundo con sus avances tecnológicos. Actualmente cerca del 75% de su población maneja la tecnología 4G, previendo que para el 2025 se tendrá una cobertura de 5G cercana al 50% de la población y la otra mitad manejando la tecnología 4G, solo con una pequeña parte de la población utilizando el 3G todavía. [46]

Uno de los principales operadores que se encuentra trabajando en la implementación del 5G dentro de Japón es NTT DOCOMO, quien ha trabajado la nueva tecnología desde el 2010, planeando lanzar oficialmente sus nuevos servicios para el año 2020. El operador ha generado velocidades de descarga de hasta de 25 a 27 Gbps, trabajando con Mitsubishi en estudios para redes vehiculares de 5G.

5.3.3.4 Implementación en Corea del Sur

Corea del Sur es otro de los países con más desarrollo para la tecnología 5G dentro de la zona asiática y con una de las mejores proyecciones de implementación para el año 2025, según los estudios realizados. [1]

Corea del Sur destaca con sus niveles de implementación telefónica y con una cobertura móvil cercana al 87% de la población y, desde el año 2018, manejan tecnologías superiores al 3G y con un alto porcentaje de usuarios que utilizan la tecnología 4G. Dados estos porcentajes es forma parte de los países líderes en el desarrollo e implementación de la futura tecnología celular dentro de estos años, el estudio de GSMA [46] indica que para el año 2025 cerca del 60% de la población del país tendrá dispositivos 5G, un mínimo porcentaje seguirá manejando dispositivos 3G mientras que el resto seguirán con la tecnología 4G.

Actualmente, el país cuenta con tres principales operadores que están desarrollando e implementando la tecnología 5G, los cuales son SK Telecom, KT y LG Uplus, que comenzaron a brindar servicios el 5 de abril de 2019 [44]. KT ha destacado por sus estudios en servicios de conducción autónoma de vehículos en zonas urbanas conocidos como K-City. LG Uplus ha brinda planes ilimitados de servicios 5G dentro de ciudades como Seúl y otras ciudades con la cobertura de sus casi 7000 radio bases 5G, dicha cobertura se busca ampliar para el año 2020 en diferentes locaciones.

5.3.4 Desarrollo en Europa

La zona europea consiste en otra de las principales zonas en las cual se implementarán los sistemas 5G dentro de los próximos años y servirán como prueba

En términos generales, Europa representa uno de los mercados principales a nivel mundial, aunque en términos de implementación no se encuentra tan desarrollado, ya que los usuarios del continente siguen siendo principalmente 3G y 2G con un porcentaje cercano al 46% de usuarios que cuentan con tecnología 4G. Según las predicciones para el 2025, se estima que el 63% de la población europea contará con tecnologías 4G y alrededor de un 29% utilizará los nuevos sistemas 5G y el resto de la población manejaría tecnologías 3G o anteriores.

5.3.4.1 Implementación en el Reino Unido

Dentro del Reino Unido se implementó el 5G en este año (2019) por uno de sus principales operadores EE, los nuevos servicios se implementan en Londres, Manchester, Belfast y otras ciudades. Otro principal operador es Vodafone UK, que comenzaría a lanzar

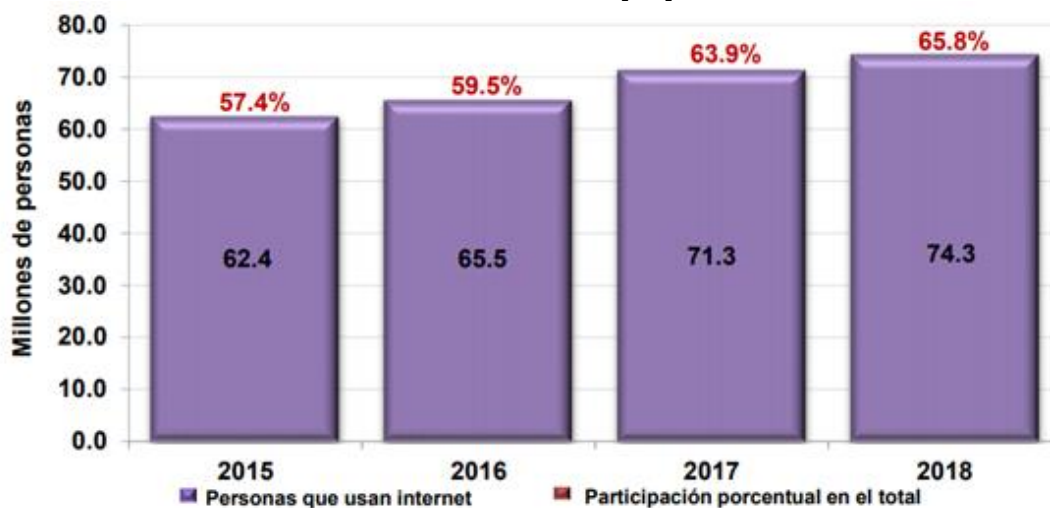
los sistemas 5G dentro de 7 ciudades en julio de este año y en otras 12 ciudades para el año 2020.

Otro operador importante en el Reino Unido es O2, que estará implementando los nuevos sistemas en diferentes ciudades durante 2019 y 2020. En el año 2018, la compañía realizó un estudio con Masive MIMO dentro de Londres para tener bases de despliegue para la nueva red 5G.

En gran medida, el desarrollo que se tiene para la implementación del 5G en esta zona se debe por el desarrollo de IoT, el objetivo es que se triplique el número de conexiones de este tipo de aplicaciones para el 2025 alcanzando cerca del 5.9 billones principalmente en el ámbito industrial.

5.3.5 Planes de desarrollo en México

De acuerdo con el último censo realizado en México por el INEGI, en 2019, el país tiene 119 millones 530 mil 753 de habitantes. [60].



Nota: Porcentajes calculados respecto de la población total de seis años y más.

Figura 5.5. Población usuaria de Internet en 2015-2018 en México [60]

Como observamos en la figura 5.5, según ENDUTIH (Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares) en México, durante el 2018, había 74.3 millones de usuarios a Internet, lo cual representa aproximadamente el 65.8% de la población de 6 años y más de edad. Además, 18.3 millones de hogares cuentan con conexión a Internet. México es un país clave a nivel comercial regional ya que representa el segundo mercado móvil más grande dentro de América Latina. [60]

Se observa un notable crecimiento a lo largo del periodo 2015-2018. Con estos datos es evidente que con el paso de los años el número de usuarios y de conexiones a

la red se irán incrementando y se requiere de una red con mucha mayor capacidad y velocidad, es decir, ante ello, una alternativa de solución es una red de quinta generación que cumpla las necesidades de los usuarios. Se debe recordar que en unos años también se implementará en mayor medida el uso de dispositivos IoT, causando un mayor consumo de datos, por lo tanto, se requiere de una red 5G.

México, actualmente, no ve el despliegue de esta red a un corto plazo, debido a los altos costos de implementación y de que los proveedores de estos servicios no ven aún tan indispensable el uso de esta red, y debido a que los requerimientos de esta red hacen que, por ahora, sea económicamente inviable.

Actualmente, México ha realizado diferentes labores para implementar la red de quinta generación (5G). Por ejemplo, fue de los países en la liberación de la banda de los 600 MHz, la cual será utilizada para brindar servicio de banda ancha móvil de 5G. Además, se subastó con éxito la banda de los 2.6 GHz [65].

Los principales mercados en América Latina, en cuanto al gobierno, los reguladores y los operadores de la industria móvil se preparan para la llegada de la era de 5G. Algunos de los principales operadores comenzaron a realizar pruebas de 5G en bandas de altas frecuencias, en las llamadas ondas milimétricas las cuales se encuentran por encima de los 20 GHz. En México, actualmente diferentes operadores se encuentran realizando pruebas de 5G. [2]

Según un estudio de GSMA, se espera que México sea el primer mercado en América Latina en lanzar servicios de 5G comerciales, con los operadores Telcel y AT&T.

Como se observa en la figura 5.6 México fue de los primeros países en realizar pruebas de la red 5G para su futura implementación. Por otro lado, en los principales mercados de América Latina, varios operadores se encuentran realizando pruebas y evaluaciones para la era 5G, algunos de estos operadores probaron bandas de alta frecuencia por encima de los 20 GHz.

Muchos operadores no solo tienen planeado aumentar la conectividad, sino que además buscan convertirse en proveedores de servicios de IoT. Un ejemplo de esto ha sido la propuesta de la alianza de Samsung y Telcel, quienes anunciaron soluciones de IoT para el hogar, las cuales son ofrecidas a través de SmartThings, los cuales son dispositivos inteligentes que se encuentran conectados entre sí y que se puede controlar de forma remota. En 2016, la Secretaría de Desarrollo Económico (SEDECO) implementó en la Ciudad de México, un Plan Maestro de Conectividad destinado a aumentar la conectividad en la ciudad.



Figura 5.6. Pruebas de 5G en los Principales Mercados Latinoamericanos [2]

En América Latina se espera que lleguen la mayoría de los lanzamientos de 5G a mediados del año 2020, esto después del “Release 16” del 3GPP y de implementar mejoras en los dispositivos y en la infraestructura de red. Otra de las causas principales de que la implementación de esta tecnología se espere a mediano o largo plazo, son los desafíos regulatorios, entre los cuales se encuentra la gestión del espectro radioeléctrico.

En México, será necesario desplegar aproximadamente 40,000 estaciones base adicionales, esto para que se pueda cubrir con la demanda de los usuarios de conectividad, lo cual se espera para el año 2020 [2].

Actualmente el operador de Telcel se encuentra trabajando en la implementación de su Gigared 4.5G, la cual tiene como objetivo utilizar antenas de Massive MIMO en rangos de frecuencia cercanos a los 5 GHz y con esto tener una fácil adaptación a los

sistemas de nueva generación 5G a mediados del año 2020 [58], dicha red se encuentra operando en 76 ciudades dentro del país, brindando mejores velocidades que la red 4G LTE, siendo compatible para ciertos equipos y cuyo plan consiste en expandirse poco a poco en estos años.

5.3.5.1 Acciones para la regulación de 5G en México

Hasta diciembre del 2014, la cantidad de espectro asignado para IMT (Telecomunicaciones Móviles Internacionales) en México era aproximadamente de 222 MHz. En la actualidad esta cantidad ha aumentado de forma considerable. Esto debido a las nuevas asignaciones, como el caso de la licitación de las bandas de frecuencias 1710-1780 MHz y de 2110-2180 MHz, las cuales son conocidas como AWS (Advanced Wireless System), la asignación de la banda 700 MHz (Red Compartida Mayorista); así como la licitación en la banda de 2.5 GHz, asignada a finales del 2018. [50]

En la figura 5.7 podemos observar el aumento de asignación del espectro radioeléctrico, comparando con lo asignado en diciembre del 2014 hasta febrero de 2019.



Figura 5.7. Comparativo de Espectro Asignado para Servicios IMT [50]

México, actualmente, se encuentra en segundo lugar en Latinoamérica, sólo por debajo de Brasil, en cuanto a cantidad de espectro asignado para IMT, tal y como lo podemos observar en la figura 5.8. [51]

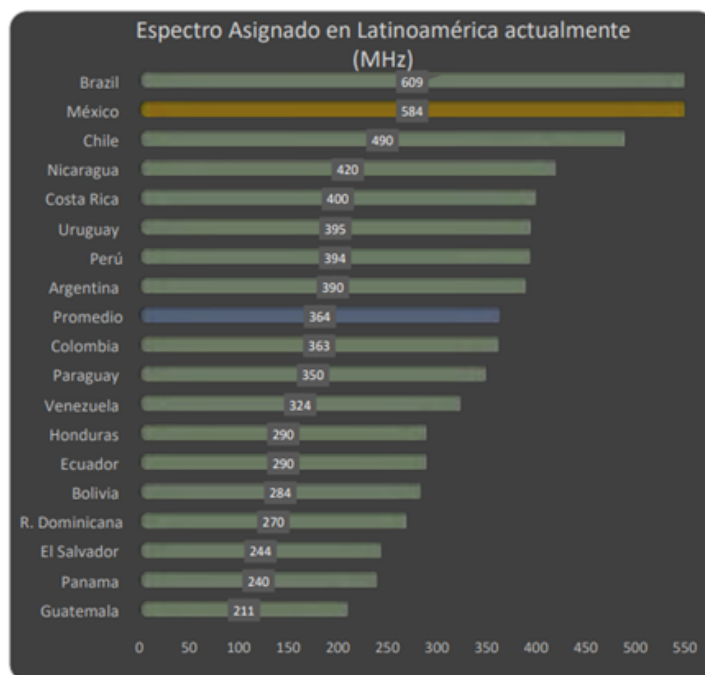


Figura 5.8. Asignación de espectro IMT en Latinoamérica [51]

A inicios del año 2019 el IFT otorgó al operador AT&T la primera concesión para construir la primera red inalámbrica basada en la tecnología de 5G, esta concesión dio la a posibilidad a AT&T de crear y de explotar la red 5G, la concesión se le fue otorgada para trabajar sobre el espectro radioeléctrico en 3.4 GHz de manera privada y experimental, esto en un periodo de 6 meses y en algunas alcaldías de la Ciudad de México [54].

AT&T tiene entre sus planes utilizar infraestructura basada en Massive MIMO, además, planeaba utilizar para sus pruebas, un bloque de 25 MHz de ancho de banda, de los 3500 a los 3525 MHz, para encontrar las viabilidades y complicaciones de lanzar nuevos productos inalámbricos, tanto fijos, como móviles en México. Además, con estas pruebas el operador espera conocer los parámetros de latencia y velocidad [42].

Mientras tanto, otro de los principales operadores que obtuvo concesión de bandas de frecuencias para aprovechamiento y desarrollo de la tecnología 5G es Movistar, se trata de 120 MHz en la banda de los 2.5 GHz a los 2.69 GHz [3].

Estas concesiones tienen una duración de 20 años en los cuales se encargan de desarrollar e implementar los sistemas de nueva generación (5G) procurando brindar servicios a 200 de las 557 poblaciones de entre 1000 y 1500 habitantes que aún no cuentan con servicios de telefonía móvil, además, de brindar servicio a 10 de las 13 poblaciones urbanas con más de 1 millón de habitantes que existen en el país [3].

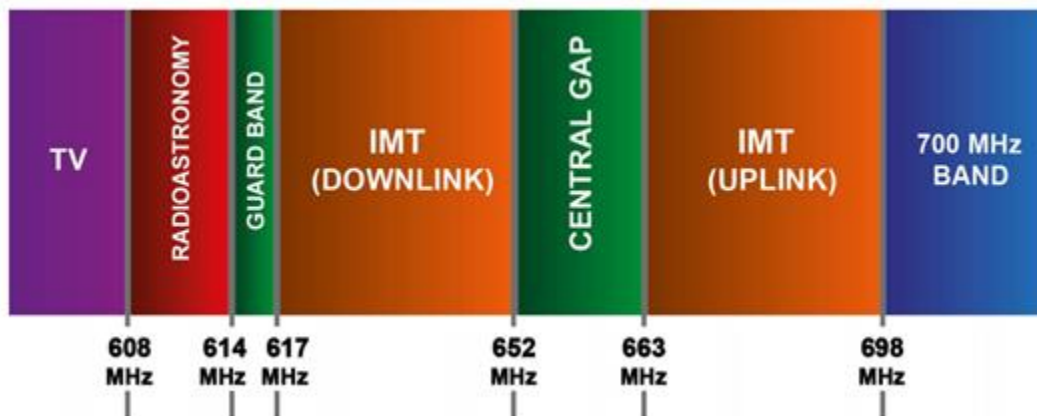


Figura 5.9. Propuesta de Segmentación para la Banda de 600 MHz [54]

En la figura 5.9 se puede observar la propuesta de segmentación de la banda de 600 MHz planteada por México y Nueva Zelanda a la UIT, para esto se reordenó la banda y se liberaron 84 MHz [54].

Otro punto muy importante que se debe de tener en cuenta dentro de las acciones regulatorias por parte del IFT fue la reasignación de servicios de las bandas de los 600 y 700 MHz con el conocido apagón analógico en el 2015, donde se reubicaron servicios de radiodifusión liberando estas bandas para ser ocupadas para servicios móviles dentro del CNAF (608 MHz a los 614 MHz). Cabe resaltar que actualmente la banda de los 700 MHz (698 MHz a los 806 MHz) está destinada a ser utilizada únicamente por la red compartida para brindar servicios de telefonía móvil, aunque en este caso sus clientes no se tratan de la población en general, sino que, se tratan de otros operadores que brinden servicios telefónicos móviles.

6. Propuesta para el Despliegue de los Sistemas 5G en México

6.1 Análisis del Espectro Radioeléctrico en México

Durante el desarrollo del tema se ha mencionado, en varias partes, que el espectro radioeléctrico resulta ser uno de los puntos fundamentales dentro de la implementación de la nueva tecnología (5G) y uno de los primeros aspectos a considerar por varios organismos reguladores de diferentes partes del mundo, dado que con la asignación de las bandas de frecuencias es que varios operadores telefónicos internacionales han comenzado a realizar las pruebas buscando consolidar un servicio comercial para los usuarios.

Es por eso que dentro de las propuestas hacemos en los siguientes puntos se encuentra la gestión del espectro radioeléctrico para conseguir un despliegue eficiente de los sistemas de la tecnología 5G en México durante los siguientes años, destacando puntos como, la atribución de las bandas de frecuencia a utilizar en estos servicios y, la asignación de las frecuencias para propiciar una sana competencia entre los operadores móviles.

Por otra parte, se aborda el tema de las licitaciones que está generando nuestro organismo regulador (IFT) respecto a estas bandas, pues el país está en un periodo inicial de pruebas de la tecnología, para el cual se ha liberado y asignado sólo una parte del espectro para a los operadores, con el propósito de llevar a cabo estas pruebas en ciertas ubicaciones de la nación.

Con todo esto se busca brindar opciones e ideas que puedan facilitar los procesos de implementación de la tecnología 5G en México.

6.1.1 Bandas de Frecuencias propuestas para la tecnología 5G

Uno de los principales aspectos a tomar en cuenta para una óptima implementación de la tecnología 5G corresponde a la eficiente utilización de las bandas de frecuencia que fueron propuestas dentro del Release 15 de 3GPP [59]. Es por eso que en este primer punto se analizan las bandas que, dentro de dicha propuesta, están disponibles dentro del espectro radioeléctrico mexicano.

En la figura 6.1 se muestra una gráfica en la cual se observan algunas de las bandas de frecuencias propuestas dentro del Release 15 de 3GPP [3] que más utilización han tenido por parte de operadores móviles extranjeros para realizar las pruebas y las primeras implementaciones, viendo así que las bandas más socorridas son la n78 n257 y la n95 (véase en la tabla 7).

En México, actualmente, se tienen planeadas las bandas inferiores a 1 GHz, las frecuencias entre 1 GHz y 6 GHz y las bandas superiores a los 6 GHz para el despliegue de 5G [3]. Estas bandas de frecuencia han sido propuestas para la operación de la

tecnología 5G debido a las diferentes características que tienen y con las cuales se busca cumplir con las metas de 5G [20], y lograr una transición eficaz de la tecnología 4G a la 5G.

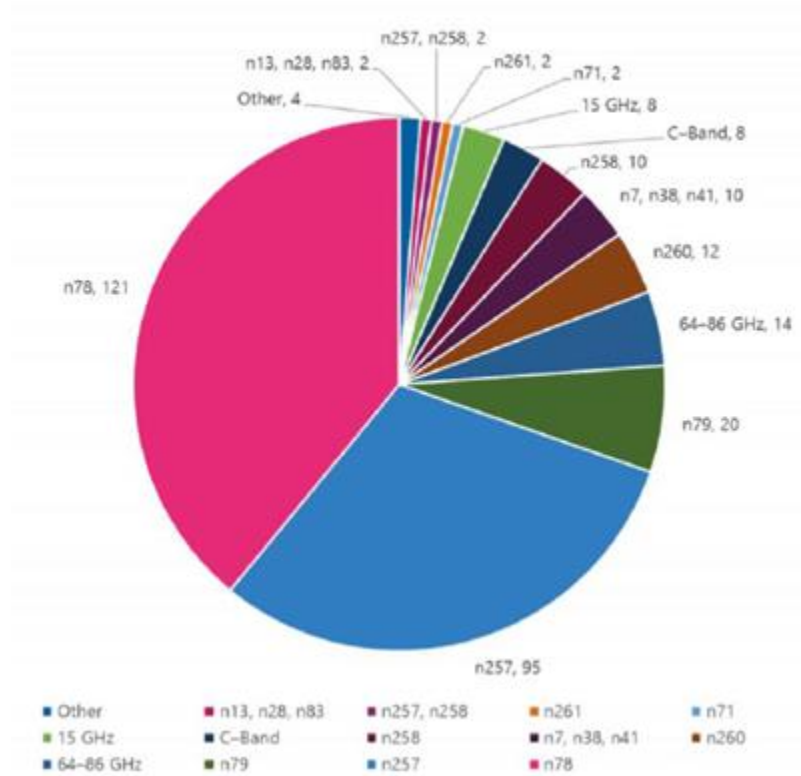


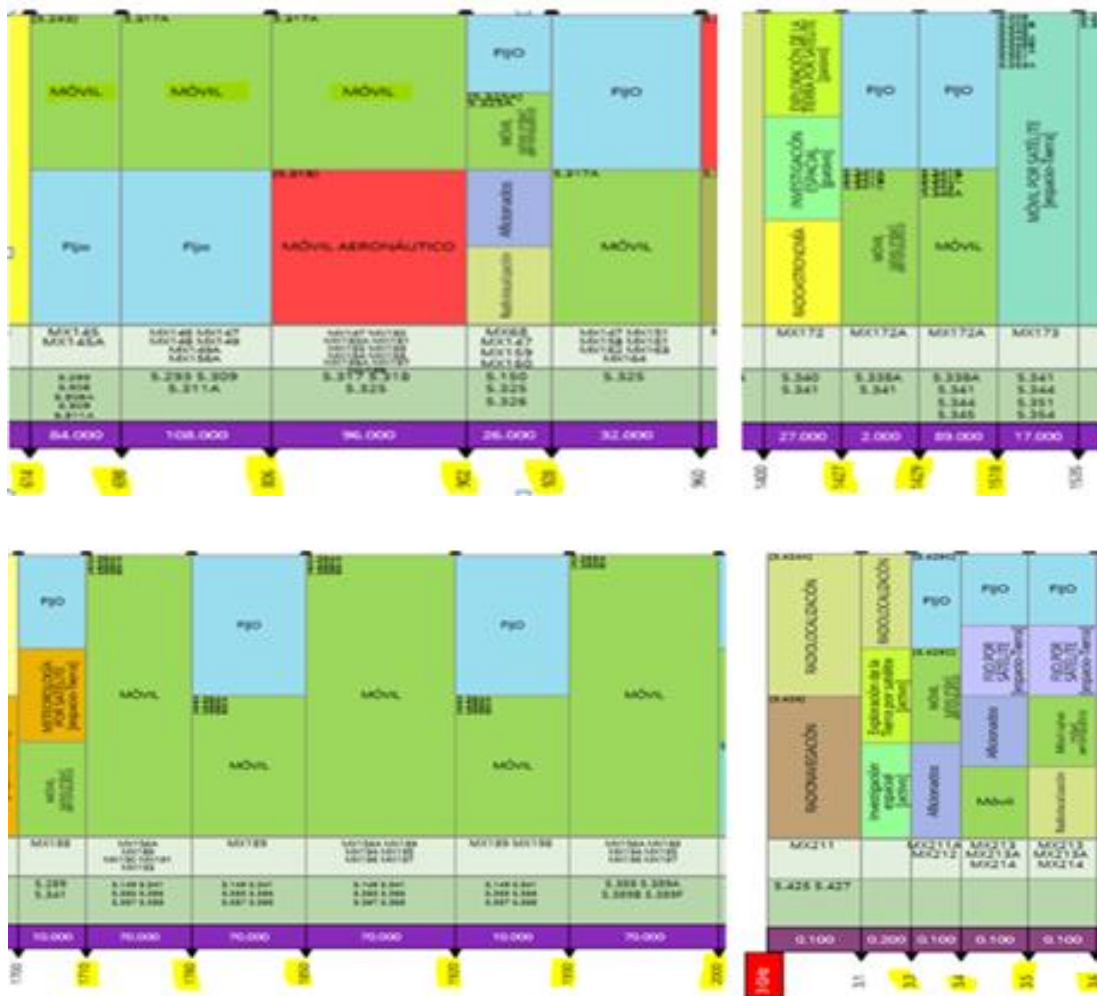
Figura 6.1. Bandas Propuestas en el Release 15 del 3GPP para la Tecnología 5G más Ocupadas en su Implementación a Nivel Mundial [3]

Como se ha mencionado, las frecuencias bajas (menores a 1 GHz) proporcionan una mayor cobertura, mientras que las frecuencias altas (mayores a 6 GHz) proveen una mayor capacidad de transmisión de datos, así, éstas últimas serán ideales para las zonas donde la demanda de tráfico es muy alta. De acuerdo con las características de cada una de estas bandas de frecuencia se buscará dar el mejor uso para cada una de ellas, aprovechando al máximo sus características de propagación en los diferentes escenarios de operación y de servicios de la tecnología 5G.

Operador	Bandas / Frecuencias 3G	Bandas / Frecuencias 4G
TELCEL	B2 - 1900 MHz B5 - 850 MHz	B4 - 1700 / 2100 MHz
AT&T	B2 - 1900 MHz B5 - 850 MHz B4 - 1700 / 2100 MHz	B4 - 1700 / 2100 MHz
MOVISTAR	B2 - 1900 MHz B5 - 850 MHz	B2 - 1900 MHz

Tabla 5. Frecuencias de Operación de los Operadores Telefónicos Mexicanos

Actualmente, los operadores telefónicos en México se encuentran trabajando en las bandas que se ubican entre los 850 MHz y los 2100 MHz para tecnologías 3G, mientras que utilizan rangos de los 1700 a los 2100 MHz para el funcionamiento de tecnologías 4G (Bandas B2 y B4 de LTE) [64] como se muestran en la tabla 5. Al observar un poco más a detalle el CNAF (Cuadro Nacional de Asignación de Frecuencias) para México, presentado por el IFT en el 2018 [61], que corresponde al documento más actualizado del tema, se observa que las bandas destinadas a brindar servicios de telefonía móvil se encuentran entre las bandas de 614 MHz, 894 MHz, y las bandas de 1.4 GHz a los 3.6 GHz.



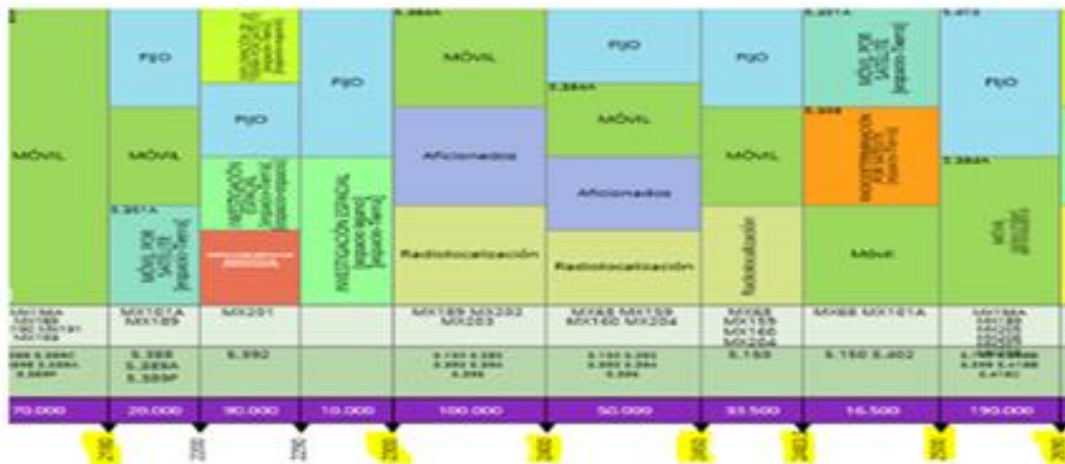


Figura 6.2. Segmentos de Frecuencias Asignados para Servicios de Comunicaciones Móviles en el CNAF [62]

Dentro de los planes de IFT para el desarrollo de la nueva tecnología de telefonía móvil dentro están las primeras implementaciones del 5G funcionen sobre las frecuencias de los 2500 MHz a los 2690 MHz, correspondientes a las bandas n7 y n38 (2500 - 2570 MHz y 2570 - 2620 MHz, respectivamente) presentadas este año en el Release 15 por el 3GPP [55]. Por otra parte, se tiene en estudio las bandas que van de los 3.2 GHz a los 3.8 GHz (Bandas n77 y n78 del Release 15), ya que estas bandas se encuentran entre las principales bandas a trabajar con 5G a nivel mundial [3]. Por lo tanto, es conveniente comenzar a visionar estas frecuencias para futuras implementaciones, dentro de la figura 6.2 se muestran segmentos del CNAF correspondientes a las bandas propuestas a utilizar para sistemas de nueva generación dentro del Release 15.

Dichas bandas se encuentran atribuidas para servicios móviles dentro del CNAF, pero, también lo están para servicios fijos, de radiolocalización y de aficionado, por lo que no podrían licitarse tan fácilmente a un operador móvil que quisiera ocuparlas para implementación de sistemas de quinta generación. Primero habría que realizar un reacondo de servicios para concesionar estas bandas para servicios móviles principalmente, este cambio puede realizarse de manera paulatina al migrar servicios que actualmente lo están utilizando, tal como se realizó con las bandas de los 700 MHz en el 2015 con el apagón analógico de televisión terrestre, al migrar los servicios de radiodifusión y dejar estas bandas para servicios móviles principalmente, además de analizar su compatibilidad con los servicios que se ubican en dichas bandas para revisar si es posible que trabajen conjuntamente y permitir una migración menos radical o si es posible evitar dicha migración [65].

En cuanto a los servicios para bandas que se ubican por encima de los 24 GHz y las correspondientes a las bandas milimétricas, se observa que la mayoría de éstas están asignadas a servicios de comunicación satelital fija, móvil y entre satélites, así como servicios de investigación espacial y radio navegación [62]. Entonces resultaría propicio

asignar estas bandas únicamente a proyectos de pruebas e investigación para la implementación de la tecnología 5G, dado que en varias partes del mundo se trabaja de la misma forma con estas frecuencias, pues, si bien fueron propuestas dentro del Release 15, aún no se ha tenido una implementación comercial, como si se ha realizado con otras bandas a nivel mundial [44].

Las principales bandas milimétricas con las que se tiene que trabajar son con las bandas n257 y n258 de Release 15, las cuales se ubican entre los rangos de 24,250 GHz a los 29,500 GHz [55] mostrados en la figura 6.3, a las cuales debe brindarse una principal atención y promover interés entre los operadores telefónicos con incentivos en la concesión de bandas, dado que, al implementar los primeros sistemas 5G en estas bandas posicionaría a México por encima de otros países en el desarrollo de los nuevos sistemas móviles, viéndose en vanguardia y sin necesidad de tener que esperar resultados o sistemas de implementación de otros países para poder comenzar a explotar estas bandas del espectro. Para estas bandas es importante el investigar su compatibilidad entre servicios satelitales y servicios móviles, ya que ambos son de vital importancia en nuestros días, por lo que sería conveniente realizar nuevas normas en donde puedan trabajar conjuntamente excluyendo ciertas zonas o áreas geográficas buscando una explotación eficiente de dichas bandas.

Si bien el IFT ha plantado un primer paso fundamental al analizar las bandas candidatas a ser utilizadas por los operadores móviles y asignar ya la banda de los 2.5 GHz [42] para que implementen la tecnología 5G, ahora el siguiente paso es acomodar el espectro asignado a otros servicios de telecomunicaciones y asignar que las bandas sean de uso exclusivo para los servicios móviles. Concentrarse, primeramente, en las bandas de los 3.2 a los 3.6 GHz, no sólo porque son las principales frecuencias que se están asignando para dicho propósito en otros países, sino que, además, son bandas que brindan una cobertura amplia y conservan las altas tasas de transmisión que se esperan alcanzar con la tecnología 5G (10 Gbps) [54] y baja latencia propiciando su implementación en varias zonas del país sin necesidad de implementar o modificar tantas radio bases dentro de las zonas urbanas o rurales donde se comience a trabajar.

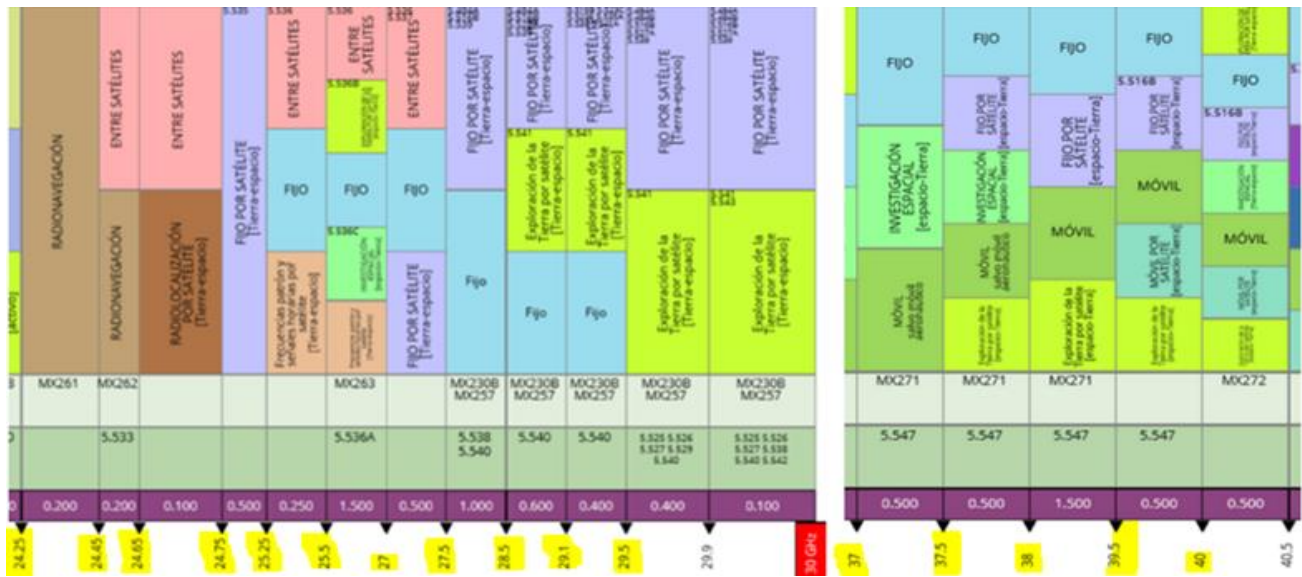


Figura 6.3. Servicios Asignados en el CNAF para los Rangos de Frecuencias de las Bandas n257, n258 y n260 del Release 15 [62]

Otra ventaja de trabajar en el rango de frecuencias mencionadas, es que facilita la migración de frecuencias de operación ocupando una tecnología NSA (Non-Stand Alone, redes no independientes) [55], ya que resulta ser propicio para los operadores móviles, pues, pueden concentrarse en implementar las primeras radio bases con la tecnología 5G y comenzar a migrar los servicios que se tienen con 3G a 4G, logrando así que con la arquitectura de NSA ambas generaciones puedan coexistir hasta que se termine la migración tecnológica y puedan enfocarse en ampliar la cobertura de los nuevos servicios 5G.

Por otra parte, las frecuencias que se encuentran por encima de los 24 GHz y las frecuencias milimétricas (30 GHz - 300 GHz) aún no resultan tan factibles para su uso dentro de la nación, por lo tanto, debe analizarse exhaustivamente la posibilidad de la compatibilidad entre los servicios satelitales y los servicios móviles 5G permitiendo explotar en su totalidad estas bandas. Si bien, puede resultar más factible la migración de los servicios para el uso exclusivo de los servicios móviles, en otros países se encuentran aún como candidatas [44] y muchas de estas aún no se han concesionado para su uso, por dicho motivo resulta conveniente concesionar estas bandas para pequeños proyectos e instalación de radio bases. Lo más factible resultaría que dichas frecuencias sean licitadas para su explotación comercial por parte de los operadores móviles, para desarrollar una fase de pruebas de las frecuencias milimétricas y, su próxima implementación. Estos trabajos nos brindarían un adelanto vital en nivel de desarrollo comparándonos con otros países y compensando todo el tiempo de atraso en cuanto a las pruebas realizadas con la tecnología 5G.

Bandas de Frecuencias	Ventajas	Desventajas
Bandas Bajas (Menores a 1GHz)	-Frecuencias ya manejadas por los operadores. -Compatibles con la tecnología 4G. -Altos rangos de cobertura. -No requieren de mucha inversión en infraestructura.	-Tasas de transmisión menores a las proporcionadas por frecuencias mayores. -Brindan cobertura a zonas de baja densidad poblacional.
Bandas Medias (De 1 a 6 GHz)	-Frecuencias ya manejadas por los operadores. -Compatibles con la tecnología 4G. -Permiten cobertura en zonas urbanas. -No requieren de mucha inversión en infraestructura.	-Tasas de transmisión menores a las proporcionadas por frecuencias mayores.
Bandas Altas (Mayores a 6 GHz)	-Alcanzan una mayor tasa de transmisión. -Permiten cobertura en zonas urbanas de alta densidad de usuarios. -Ser de los primeros operadores a nivel mundial en explotar dichas frecuencias.	-Rangos de cobertura limitados. -Requieren de mayor inversión en infraestructura.

Tabla 6. Ventajas y Desventajas de los Rangos de Frecuencias para 5G.

Si bien los tres rangos de frecuencias son recomendados para el protocolo 5G dentro del Release 15, proponemos que las bandas que se deben explotar de forma prioritaria son los rangos medios y altos, ya que, los rangos medios presentan compatibilidad con la tecnología 4G y no resultaría una dificultad para los operadores telefónicos mexicanos el trabajar estas bandas de frecuencias. Por otra parte, el trabajar con las frecuencias milimétricas traería mayor trabajo al colocar nuevas radiobases, pero el implementar sistemas 5G con estas bandas nos colocaría en un nivel de desarrollo cercano al de otros países como Estados Unidos o Corea dentro del tema y facilita una futura implementación de sistemas dentro de estas bandas pues los estudios ya estarían generados.

6.1.2 Licitaciones de Bandas de Frecuencias

En cuanto a la licitación de frecuencias para la explotación del espectro radioeléctrico y la implementación de la tecnología 5G actualmente sólo se ha manejado la concesión de 120 MHz en la banda de los 2.5 GHz a los 2.69 GHz [3] (bandas n7 y n38 del Release 15) a los operadores AT&T y MOVISTAR quienes se encuentran realizando ya pruebas con la tecnología 5G, mientras tanto, el operador TELCEL se encuentra en la implementación de la Gigared 4.5G [58], la cual, se trata de una mejora de su red 4G en cuanto a las velocidades y servicios brindados, siendo un primer paso para alcanzar una red 5G por parte del operador facilitando la implementación de la nueva tecnología de manera paulatina dentro de los siguientes años, con un margen de tiempo más cómodo para las pruebas y actualización de las radio bases implementadas.

Por el momento, el despliegue de los sistemas 5G se encuentra en una fase inicial de pruebas e implementación, cuyos resultados podrían verse reflejados después de unos tres años y generar un sistema comercial más sólido para el año 2025 [2], lo conveniente es esperar un breve periodo de tiempo a que cada operador haga públicos los resultados

de las pruebas realizadas, así como el proceso de implementación de los sistemas 5G. Esto con el objetivo de observar el avance que se ha logrado cada operador, y, analizar si es factible concesionar más bandas para su explotación al operador que haya logrado tener una implementación óptima y con mejores resultados respecto al tiempo, eficiencia y operatividad.

Banda 5G	Frecuencia Uplink [MHz]	Frecuencia Downlink [MHz]	Estatus en México
n7	2,500 – 2,570	2,620 – 2,690	Licitada
n28	703 – 748	758 – 803	Uso exclusivo de la Red Compartida
n38	2,570 – 2,620	2,570 – 2,620	Licitada
n41	2,496 – 2,690	2,496 – 2,690	Licitada
n71	663 – 698	617 – 652	En licitación para el 2020
n78	3,300 – 3,800	3,300 – 3,800	En licitación para el 2020
n79	4,400 – 5,000	4,400 – 5,000	En estudio para su designación
n257	26,500 – 29,500	26,500 – 29,500	En estudio para su designación
n258	24,250 – 27,500	24,250 – 27,500	En estudio para su designación
n260	37,000 – 40,000	37,000 – 40,000	En estudio para su designación

Tabla 7. Estatus de las Bandas de 5G en México.

El siguiente paso a realizar es comenzar a liberar el espectro que se encuentra entre los 3.2 GHz y los 3.8 GHz (Bandas n77 y n78 del Release 15) [55], que es una de las bandas más utilizadas a nivel internacional y comenzar con su licitación, procurando darle prioridad a los operadores que tengan ya un buen avance de implementación del nuevo protocolo entre los siguientes 2 años, pues, serían quienes le darían un mejor uso a las bandas licitadas aprovechando la experiencia que obtuvieron luego de su primera implementación trabajando en las bandas ofrecidas por el IFT durante este año. Si bien parecería un tanto beneficiosa para los operadores que ganaron las bandas de los 2.5 GHz (AT&T y Telefónica) el objetivo es buscar sistemas 5G que resulten operacionales en un menor tiempo y cuyo desarrollo resulte más eficiente que los primeros sistemas implementados con las bandas licitadas en el año 2019. Por otra parte, deben analizarse minuciosamente los planes de trabajo de cada operador, entre los principales puntos a evaluar se encuentran el tiempo de pruebas, la cobertura poblacional (basándose en la convocatoria propuesta en la licitación [3]), tiempo de implementación operacional, cumplimiento de las metas propuestas inicialmente y la calidad de servicios ofrecidos. Pues, aunque tengan experiencia en pruebas y desarrollo con los nuevos sistemas 5G no quiere decir que su plan de acción resulte el mejor para los objetivos que se buscan obtener, además, de que el IFT busca promover un ambiente de libre y sana competencia entre los operadores de telecomunicaciones dentro de la nación.

Dentro del Programa Anual del Uso de Frecuencias para el año 2020 [62] se proponen dos bandas muy importantes dentro de los planes de implementación para los nuevos sistemas. Éstas se tratan de la banda de los 614 MHz a los 698 MHz y de la banda de los 3.3 GHz a los 3.4 GHz las cuales se encontrarán en una etapa de pruebas al igual que las licitadas durante el 2019. Por esto, resulta conveniente explotar dichas bandas para realización de pruebas y observar el desarrollo de los operadores como se mencionó

antes, siendo así, favorable no licitar más bandas hasta analizar las metas planteadas por el instituto y guardar el resto de bandas a operadores que cumplan los requisitos y evitar un mal uso de estas bandas obteniendo sistemas de baja calidad o cuyo tiempo de instauración resulte fuera de los límites esperados para comenzar a operar comercialmente o que no pueda dar cobertura a la poblaciones planificadas en un inicio, este proceso se muestra dentro del diagrama de la figura 6.4.

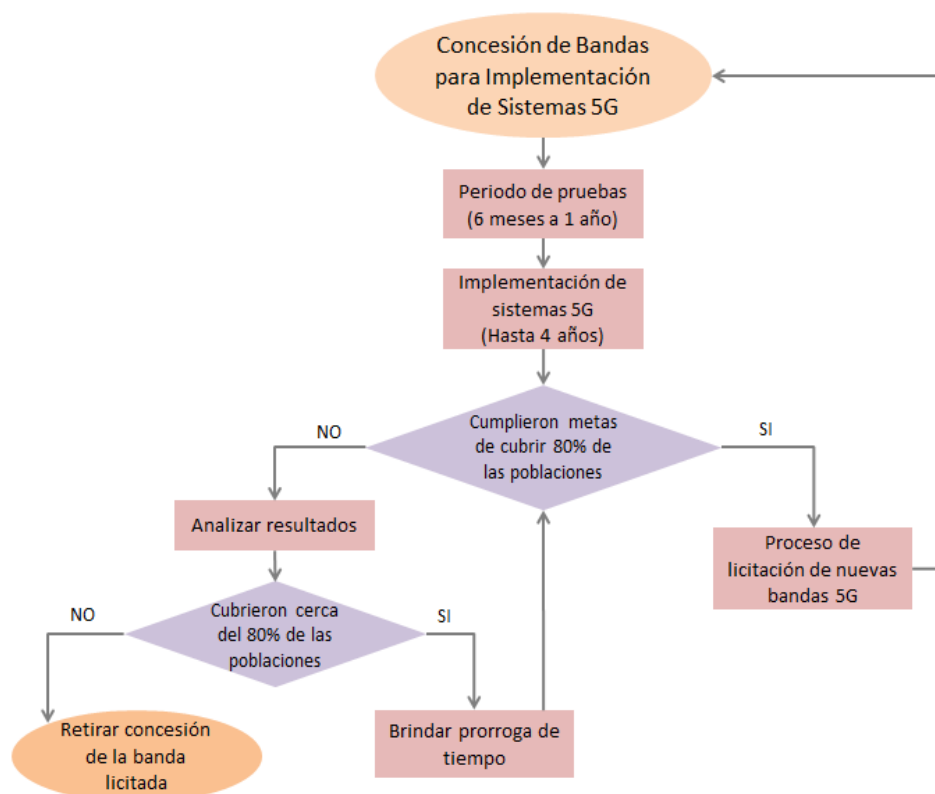


Figura 6.4. Diagrama de Flujo para la Concesión y Explotación de Bandas para Sistemas 5G

Un punto muy importante que tener en cuenta, es que dentro del Release 15 se han propuesto diferentes bandas de operación, para los sistemas de 5G algunas de las cuales son las que ocupan los sistemas LTE (4G), lo que resulta propicio para todos los operadores, porque, les permite desarrollar pruebas en las bandas que ya tienen concesionadas actualmente. Tomando en cuenta este punto sería factible que el IFT aproveche este punto y plantee nuevos requisitos para los operadores en los cuales incluyan la realización de pruebas de las nuevas tecnologías dentro de sus bandas de operación en periodos máximos de 1 año, para tener una implementación tecnológica y cobertura poblacional de un 50% de los poblados de entre mil y cinco mil habitantes, así como, tener una cobertura del 40% de las zonas urbanas que se piden dentro de las bases de las licitaciones de frecuencias del IFT [69] entre los primeros 2 o 3 años de concesión de la banda, negociando así la renovación de la concesión de las bandas de estos operadores u otros beneficios siempre y cuando se cumplan los requisitos marcados anteriormente. Concordando con las condiciones planteadas en las licitaciones de las

bandas 5G por el IFT [69], dentro de la tabla 8 se muestran los años de licitación y tiempos de implementación propuestos para los sistemas 5G dentro de los siguientes años.

Bandas 5G	Año de Licitación (Propuesta)	Periodo de Implementación
n38, n41 y n7	2019	2019 a 2022
n71 y n78	2020	2020 a 2023
n79	2021	2021 a 2024
n257, n258 y n260	2021	2021 a 2025

Tabla 8. Relación de Tiempos de Licitación e Implementación de Bandas 5G.

6.1.3 Optimización del Modelo de Licitación del Espectro Radioeléctrico

A finales del año pasado fue lanzada una licitación pública por parte del IFT para la explotación de la banda de los 2.5 GHz durante un periodo de 20 años, en los cuales se busca la instalación y desarrollo de la nueva tecnología de telefonía celular (5G). Si bien, se espera que México comience a operar con la nueva tecnología a nivel nacional hasta el 2025 [2], aproximadamente, el periodo con el que se manejan las concesiones de las bandas del espectro radioeléctrico mexicano es muy largo para poder analizar si dicha implementación se llevó a cabo correctamente y, sobre todo, de manera óptima, ya que a pesar de imponer metas en ciertos períodos de tiempo e impartir sanciones a los operadores en caso de no cumplir con los objetivos planteados durante la concesión de las bandas, las cuales pueden llegar a la revocación del uso del espectro, consideramos que el tiempo de concesión resulta inadecuado considerando los constantes avances tecnológicos que se están presentando durante los últimos años.

Por ejemplo, para la implementación de los sistemas 5G, México jugó un papel muy apresurado en cuanto a la utilización del espectro, pues en un periodo relativamente corto se dedicó a liberar y reasignar la banda de los 700 MHz [50] para que estas pudieran aprovecharse por los sistemas telefónicos de la nueva generación, en el periodo de Julio del 2013 a diciembre del 2015, debido en parte a que se finalizaron los periodos de concesión de dichas bandas y a una falta de previsión por parte de los organismos reguladores orientados a estos temas, pues a nivel tecnológico era bien conocido que se estaba desarrollando la fase de pruebas de la tecnología 5G y a pesar de que aún no fuera publicado el estándar del Release 15 varios países ya estaban manejando pruebas con bandas candidatas, ocasionando un retraso en nuestro país porque estas bandas no se encontraban disponibles unos años antes, para poder empezar su explotación en pruebas de los nuevos sistemas. Por dicha razón es importante modificar los sistemas de concesión de bandas buscando estar preparados y poder tener una fácil adaptación de nuevos sistemas tecnológicos, no solamente en el ámbito de las comunicaciones móviles, sino que para nuevos servicios que puedan desarrollarse con el tiempo.

Es por esto, que resulta conveniente modificar los periodos de concesión dentro de las licitaciones de bandas disminuyendo el periodo de concesión, marcando como nuevos

periodos de 5 a 8 años, estableciendo objetivos específicos y alcanzables para los operadores. Una vez finalizados dichos periodos se analizarían los objetivos planteados y las metas cumplidas o no cumplidas, con base en estos puntos se renovarían la concesión de las bandas de operación durante otro periodo de igual tiempo con nuevos requisitos a cumplir o a ser compensados por sus incumplimientos durante el periodo a evaluar. En caso de que resultara no ser un candidato a renovar la concesión de las bandas de operación, dichas bandas se volverían a licitar para ser explotadas por un nuevo operador que pueda cumplir con los requisitos marcados anteriormente.

Cabe mencionar que es prioritario el IFT debe estar actualizado con los temas de nuevas tecnologías que pueden implementarse en un futuro y la necesidad de bandas radioeléctricas que necesitan, esto para estar preparados e ir modificando o liberando el uso del espectro radioeléctrico y así poder licitar el uso de éste para pruebas obteniendo una implementación más viable y efectiva de las nuevas tecnologías.

6.2 Adopción de la Telefonía Móvil 5G

Otro punto muy importante a revisar dentro de la implementación de los nuevos sistemas telefónicos (5G) corresponden a los modelos de infraestructura y arquitecturas de red a adoptar por los operadores. Según lo propuesto en el Release 15 del 3GPP, se recomiendan tecnologías a ocupar basadas en los estudios e investigaciones realizadas hasta el año actual [55].

En este apartado se proponen puntos generales que se piensan convenientes para analizar y aplicar en los siguientes años, como parte de la implementación de estos nuevos sistemas, sobre todo, en nivel arquitectura de red y, las necesidades de backhaul y backbone que deben estar cubiertas para poder brindar un servicio eficiente de las nuevas redes y una transición de tecnologías práctica, tanto del lado de los usuarios, como de los operadores.

Por otra parte, se menciona acerca de la vitalidad de la actualización de los sistemas telefónicos de tecnologías anteriores a 4G dentro del país, ya que estos, aún dan servicio a un promedio del 25% de usuarios totales de cada operador telefónico en México [70]. Por esto, su migración a la tecnología actual, telefonía 4G, resulta de vital importancia para la futura implementación 5G, dentro de algunos años.

Si bien, la implementación de la nueva tecnología traerá consigo un gran impacto en diferentes aspectos de nuestra sociedad, tanto a nivel tecnológico, económico, social y cultural es importante que la población se encuentre preparada para recibir la nueva tecnología, es decir, que el gobierno y diferentes instituciones, tanto de ámbito público como privado sean capaces de habilitar a los usuarios para que utilicen los nuevos productos y tecnologías, y así, explotar al máximo todos los aspectos de la tecnología 5G dentro de poblaciones rurales y urbanas.

6.2.1 Implementación de Infraestructura: NSA o SA

Anteriormente, ya se han mencionado las características principales de ambas arquitecturas, la NSA (Non-Stand Alone) y la SA (Stand Alone), en este apartado se mencionan las acciones convenientes para alcanzar una implementación óptima de dichas arquitecturas dentro de los sistemas de telefonía móvil dentro de los siguientes años en México.

Recordemos que el estándar NSA no permite que los sistemas 5G operen de manera autónoma, por lo que necesita el apoyo de la infraestructura de 4G, esto será necesario para realizar tareas de acceso al medio, utilizando el backhaul. Esto quiere decir que la comunicación entre los las radio bases y los dispositivos móviles se realizará por la red 5G y con las bandas asignadas para estos sistemas 5G. Pero para lo restante de la comunicación se emplea la red troncal de 4G.

NSA	SA
<ul style="list-style-type: none">* NSA implica utilizar la red LTE como anclaje del plano de control.*NSA permite aprovechar las inversiones de red existentes en transporte y en el núcleo móvil, esto puede combinarse con diferentes esfuerzos para reducir los costos de operación de red mediante la adopción de la virtualización y Control y separación de planos de usuario (CUPS), utilizando redes definidas por software (SDN).	<ul style="list-style-type: none">*SA ofrece la capacidad total de comunicación del plano de control y de usuario por medio de una red 5G.*SA aprovecha las tecnologías SDN/NFV para crear segmentos de red optimizado y desarrollar todo el potencial de 5G.*Los operadores de red podrían construir una red 5G virtualizada al 100%, completamente nueva, la cual incluye una nueva red de transporte y nuevas redes centrales y periféricas móviles 5G, independientes y separadas completamente de las redes 4G existentes.

Tabla 9. Cuadro comparativo NSA y SA. [27]

Definitivamente, una de las desventajas que tiene este estándar es que no se pueden aprovechar todas las ventajas de 5G, debido a que se sigue utilizando la red troncal 4G para la comunicación. Consiste en un estándar de transición facilitando la implementación de sistemas nuevos conviviendo aún con la tecnología anterior, comenzando a ocupar en cierta medida las capacidades de las nuevas tecnologías.

Por su parte SA, que es el estándar con el que se puede operar de manera autónoma a los sistemas 5G, es el que permite alcanzar las velocidades y la latencia esperada para esta tecnología, siendo más conveniente para una transición tecnológica más rápida, teniendo como requisito una infraestructura implementada de tecnología 4G.

Lo más ideal para una implementación de infraestructura 5G, pensando a corto plazo, es utilizar la arquitectura NSA debido a que actualmente los sistemas 4G no han sido desarrollados y aprovechados al máximo dentro de nuestro país. El objetivo a corto plazo sería lograr explotar y actualizar lo mejor posible los sistemas de 4G que ya están implementados y migrar a la mayor parte de los usuarios a esta tecnología hasta alcanzar un porcentaje que supere el 90% de cobertura nacional [70], para después pensar en los sistemas 5G y realizar una pronta transición de tecnologías. En la figura 6.5 se describe brevemente los requerimientos de las arquitecturas SA y NSA para su implementación, se recomienda que se homologuen las redes en 4G mientras se trabaja con NSA hasta que se tenga un porcentaje casi total de la red 4G para comenzar con la implementación de SA.

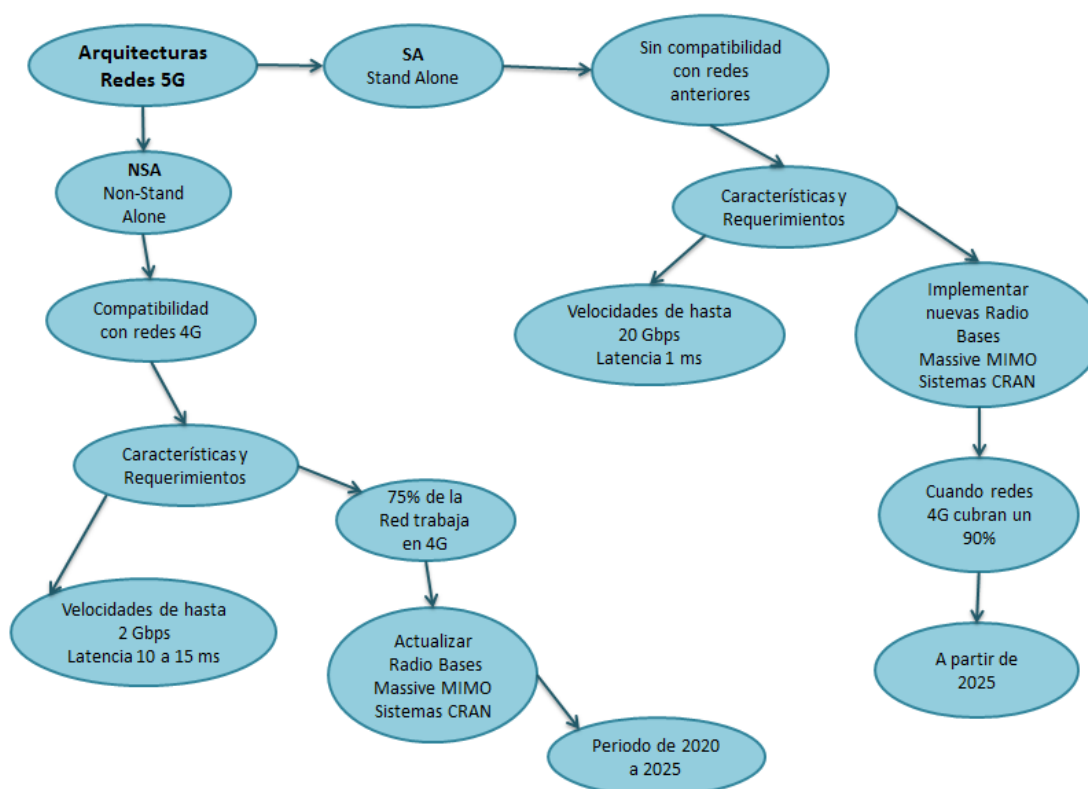


Figura 6.5. Diagrama de Implementación de Arquitecturas 5G

Uno de los motivos por los que la mejor opción es utilizar NSA para la implementación porque este estándar posee un despliegue que facilita, los procesos de implementación de la red 5G para los operadores telefónicos, así como un menor costo de nuevas radio bases debido a que se reutilizan los sistemas 4G, a pesar de que no se tendrían las velocidades y latencias que prometen los sistemas 5G, resulta más conveniente para los operadores el hecho de que puedan reutilizar las radio bases ya instauradas para protocolos 4G y no se requiere de un cambio tan abrupto en un corto periodo de tiempo siendo posible el irse preparando e ir planeando la implementación de la nueva infraestructura de una forma más cómoda.

Un claro ejemplo, al referirnos al máximo aprovechamiento de los sistemas 4G, es lo que está haciendo ahora mismo el operador Telcel con la evolución de su red 4G, con implementación de nuevos equipos y sistemas enfocado a mejorar la calidad de su servicio (velocidades, latencias, etc.), con la denominada GigaRed 4.5, por lo tanto, es una muestra que aún se pueden mejorar los sistemas que ya están implementados actualmente en México.

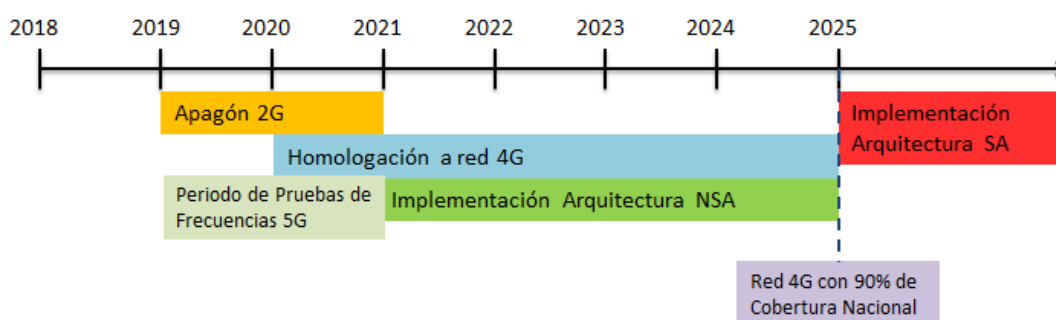


Figura 6.6. Línea de Tiempo de Implementación de Arquitecturas 5G

Es importante no dejar atrás la implementación de los 5G con una arquitectura SA ya que nos brinda el uso completo de los nuevos sistemas con todas las características técnicas que propone el 5G (velocidades, latencia, etc.), por lo que resulta conveniente planear su implementación en un periodo que inicie cerca del 2025 teniendo una red NSA consolidada, aprovechando que las arquitecturas que ya están implementadas puedan ser capaces de realizar una transición rápida a la nueva tecnología. En la figura 6.6 se muestra una línea de tiempo que muestra la propuesta de implementación de arquitecturas dentro de los siguientes años.

6.2.2 Requerimientos Tecnológicos de Backhaul

Para el despliegue de estos sistemas 5G, es conveniente utilizar fibra óptica como medio de backhaul dentro de la red, ya que es capaz de alcanzar altas tasas de transmisión, capaces de darle soporte a las radiobases del nuevo protocolo y tener una explotación óptima de las nuevas redes móviles. Esto representa una necesidad fundamental de contar con redes fijas de transporte óptimas, para que sean capaces de soportar el tráfico que generen las nuevas redes móviles y seguir brindando la calidad de los servicios planteados por estas redes. Para esto, es conveniente comenzar a migrar los últimos sistemas en los que se tengan medios de transmisión diferentes a la fibra óptica o que no puedan obtener las tasas de transmisión y velocidades deseadas.

Utilizando la fibra óptica se pueden mejorar los números que actualmente se tienen respecto a tasas de transmisión, latencia, velocidades, entre otras características. A pesar de que actualmente diferentes operadores de telecomunicaciones han ido realizando el reemplazo del cable coaxial por la fibra óptica, aún faltan muchos lugares a los que se espera llegar, mejorando así los sistemas actualmente implementados en México, como se muestra en la figura 6.7, se tienen los porcentajes de hogares con servicios de banda

ancha, teniendo un promedio del 55% de la población mexicana con acceso a estos servicios.

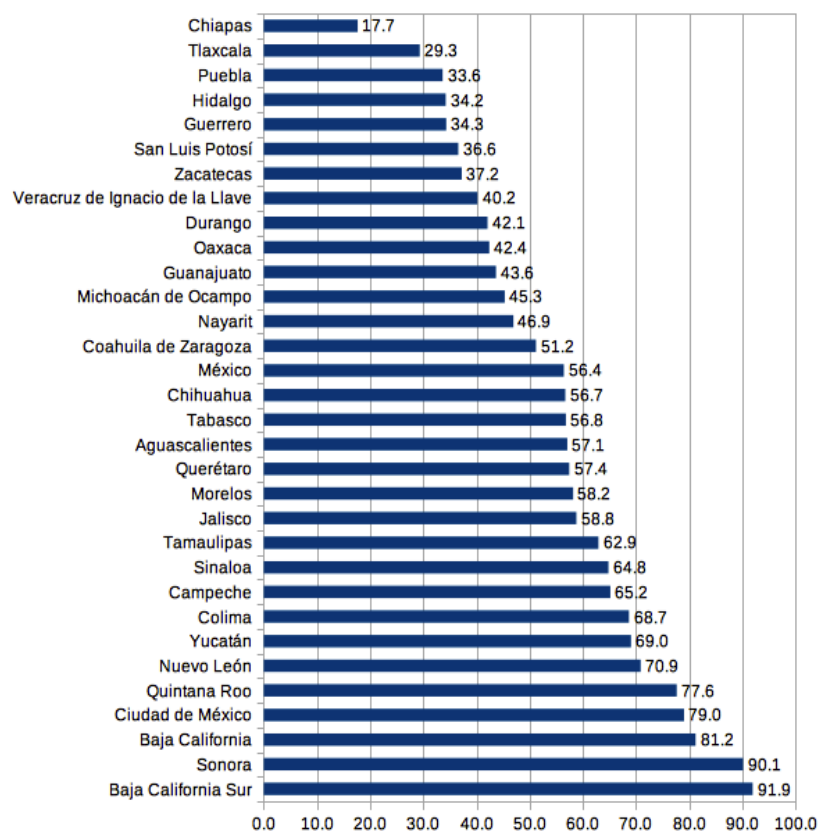


Figura 6.7. Porcentaje de Hogares con Acceso a Servicios de Banda Ancha [66]

Un factor importante a considerar en los planes de implementación 5G es la Red Compartida, un proyecto de implementación de una red 4.5G cuya infraestructura pretende brindar servicios de conectividad y cobertura a la mayor parte de México, incluyendo zonas de difícil acceso [63]. Este proyecto entró en operación en marzo del 2018, utilizando 90 MHz de la banda de los 700 MHz con una concesión de 20 años para su uso exclusivo además de hilos de fibra óptica de CFE. Las metas planteadas para la Red Compartida son el dar cobertura a un 92% de la población para el 2024, un 15% de poblaciones con menos de 1000 habitantes y 111 pueblos mágicos mediante una red de banda ancha de tecnología 4G LTE de baja latencia y altas tasas de transmisión proveyendo velocidades de downlink de 4 Mbps y de uplink de 1 Mbps [63].



Figura 6.8. Zonas de Cobertura por Parte de la Red Compartida [63]

La Red Compartida actualmente se encuentra brindando cobertura a un 50% de la población mexicana, en la figura 6.8 se muestran los principales puntos de infraestructura de la red compartida, conectando poblaciones con difícil acceso o que no era económicamente viable [63], su actual cobertura se presenta de forma gráfica dentro de la figura 6.8. La red compartida juega un punto fundamental para la implementación de los nuevos sistemas, ya que, su principal función no es dar servicios a la población como tal, sino, brindar soporte a los operadores telefónicos y con esto lograr que den cobertura a las poblaciones más alejadas del país, aumentando la capacidad de los servicios de telecomunicaciones que se ofrecen. Además, al ser una red 4.5G está preparada para recibir la implementación de la nueva tecnología, impulsando nuevos servicios digitales, como servicios de banda ancha y el IoT.

Actualmente, la red compartida ya ha sido implementada en México y gracias a su despliegue ha sido posible conectar a más de 40 millones de habitantes en el territorio mexicano [63]. La red compartida resulta fundamental para el backhaul, debido a los múltiples beneficios mencionados anteriormente, además de que ayuda a que el espectro sea mucho más eficiente, con esto se puede proporcionar mayor y mejor cobertura y con mucho mayor capacidad, por lo tanto, el despliegue de ésta red será ideal para el despliegue de los sistemas 5G.

Por lo tanto, con la ayuda de la red compartida es posible mejorar la velocidad de los servicios de telecomunicaciones y, además, proporciona una mejor conectividad, con esto es posible mejorar los sistemas actualmente implementados, pues es una red de última generación, al estar trabajando con tecnologías de una red 4.5G facilita la transición a una arquitectura NSA.

La idea de utilizar la red compartida para los sistemas 5G consiste en que los operadores telefónicos que no puedan contar con una infraestructura propia ocupen la red compartida para ofrecer servicios de telefonía. La idea consiste en promocionar estos servicios con operadores que no cuenten con una infraestructura propia, centrándose en ofrecer servicios a zonas de la población que se encuentren más alejadas o que no cuenten con servicios telefónicos móviles.

En cuanto a la infraestructura que requieren las radiobases lo más recomendable es que los operadores comiencen la actualización de estas con las CRAN, ya que, estas mejoran el tratamiento de la señal al manejar conexiones de fibra óptica desde los módulos de RF hacia los módulos RRH que se encargan de procesar estas señales. Con esta característica es posible disminuir las unidades BBU en la zona procesándolos en un pool central mejorando el procesamiento de las señales.

La ventaja de utilizar CRAN recae en que al actualizar las radiobases o al implementar nuevos puntos de acceso estarán listos para soportar los requerimientos de 5G, CRAN permite en gran medida utilizar arquitectura NSA garantizando la compatibilidad entre ambas tecnologías (4G y 5G), para así, en un futuro poder implementar arquitecturas SA en su totalidad dentro del país sin la necesidad de volver a actualizar las radiobases ya establecidas y poder trabajar en su totalidad con la nueva tecnología.

Por otra parte, en cuanto al tema de implementación de antenas es muy importante tomar en cuenta que los rangos de frecuencias bajas y medias que han sido propuestos por el Release 15 son similares a las frecuencias utilizadas por la tecnología 4G, mientras que el rango de frecuencias altas (mayores a los 6 GHz) [3] no son utilizados para servicios móviles, sus características de propagación no permiten rangos de cobertura muy extensos, pero permiten velocidades de transmisión altas.

Para poder brindar soporte a la demanda de usuarios de la nueva tecnología es necesario instalar más radio bases y puntos de acceso, dado el bajo rango de alcance con el que cuentan dichas bandas es necesario utilizar las small cells (pequeñas celdas) que incluyen las micro, pico y femto celdas dentro de puntos estratégicos de la ciudad, y con esto poder implementar sistemas de Massive MIMO que puedan brindar cobertura a las zonas urbanas. Anteriormente se mencionó que el IFT debe de dar a concesión las bandas altas del Release 15 para su investigación y futura explotación a los operadores telefónicos, por lo que, es necesario tomar como requisito que los operadores cuenten con infraestructuras de MIMO y Massive MIMO que puedan soportar el tráfico requerido.

El requisito que se propone por nuestra parte es que la infraestructura de small cells instaladas por los operadores pueda cubrir un 75% de las zonas más concurridas de ciudades que cuenten con más de 10,000 habitantes, esto porque, dichas ciudades son las que contarían con mayor demanda de tráfico y los sistemas 5G deben ser capaces de brindar servicio a ese número de usuarios en áreas pequeñas mientras que en poblados que menor número de habitantes no contarán con la misma demanda de tráfico.

6.2.3 Optimización de Cobertura y Funcionamiento de la Tecnología 4G

Como se menciona en el apartado anterior, la red compartida ayuda a optimizar el uso del espectro y tecnologías telefónicas de 4G, mejorando la operación de las redes actuales. Resulta fundamental mejorar el funcionamiento de la tecnología con la que actualmente operan la mayoría de las redes de los operadores mexicanos (en promedio 75% operan en 4G [70]), para homologar a los usuarios en la tecnología 4G y luego tener una transición al nuevo protocolo 5G.

Si bien, lo esperado es que todos cuenten con acceso a la nueva tecnología, el primer paso es actualizar a toda la población con las últimas tecnologías móviles como fue sugerido en los estudios realizados por GSMA para los siguientes años [41]. Por ejemplo, el apagón de la red 2G fue solicitado por el IFT a los operadores para finales de este año [67], este movimiento implica la migración de miles de usuarios a sistemas más recientes (3G o 4G). Por el momento Telefónica comenzó con el apagón de su red 2G debido a actualizaciones tecnológicas, por su parte la red de AT&T se encuentra operando casi en su totalidad dentro de sistemas 3G y 4G, Telcel es el único operador cuya red 2G presenta una gran parte de su cobertura a nivel nacional por lo cual está buscando actualizar sus sistemas sin necesidad de apagar esta red [67]. Dicho apagón ha sido planeado en 2 fases por el IFT iniciando en Mérida en 2019 y finalizando en la Ciudad de México para septiembre del 2020 [67].

Si se realizara una migración completa de tecnologías 3G y 4G a los protocolos de 5G resultaría muy conflictivo tanto para los operadores como para los usuarios, pues gran parte de la población aún sigue utilizando este tipo de tecnologías por lo que es necesario migrar tecnológicamente a la tecnología 4G mientras se desarrolla y perfecciona la tecnología 5G, dándole tiempo a los operadores para actualizar radios bases y arquitecturas, además, de implementar nuevas tecnologías como CRAN, Massive MIMO, sistemas de Small Cells. El objetivo planteado por nuestra parte es migrar poco a poco a un sistema 4G durante los próximos 3 años tratando de alcanzar niveles de población superiores al 90% y así converger en una migración asequible para los usuarios finales.

Por otra parte, no se debe dejar de presionar a los operadores en instaurar una tecnología mixta entre ambas tecnologías, es decir, una arquitectura NSA donde puedan convivir los sistemas 4G y 5G para que los usuarios que recién estén actualizándose a la última tecnología móvil puedan comenzar a disfrutar algunos beneficios de los nuevos sistemas, tales como, mayores velocidades y tasas de transmisión. La forma de incentivar a los operadores a alcanzar estos objetivos sería mediante la concesión de más bandas disponibles para los sistemas 5G, especificando los puntos de implementación de arquitectura en tiempos no mayores a 4 años dentro de los lineamientos de la licitación de dichas bandas.

7. Conclusiones

En el desarrollo de esta tesis se presenta el funcionamiento de las generaciones de tecnología celular, desde la primera de ellas, hasta la actual, que continúa en proceso de estandarización e implementación, la tecnología 5G. Esta tecnología presenta un cambio significativo en la infraestructura de red requerida, en comparación con las tecnologías anteriores y que, hasta entonces, han sido compatibles entre sí. Por ello, se dedicó especial interés en la descripción de sus aspectos, tanto técnicos, como, regulatorios.

Durante el desarrollo de este trabajo pudimos conocer la situación actual de adopción de los sistemas 5G en México y, con base a esa información, generamos propuestas técnicas y regulatorias que lleven a un correcto y pronto desarrollo de estos sistemas celulares en nuestro país. Encontramos muy importante tomar en cuenta a todos los usuarios móviles y buscar adaptar, y complementar, las tecnologías con las que contamos en la actualidad para, posteriormente, desplegar completamente la nueva tecnología. Es decir, establecer un periodo de transición tecnológica en beneficio de los usuarios y los operadores de telefonía celular.

Primeramente, con la información recabada acerca del tema observamos, que es necesaria una homologación de las tecnologías celulares que brindan servicio dentro del país, tratando de que todos los usuarios se encuentren dentro de una red 4G, que sea capaz de brindarles soporte. Para esto, se necesita actualizar todos los segmentos de red con los que trabajan los operadores hoy en día, además, de continuar y apresurar el apagón de la tecnología 2G y plantear un posible apagón de la tecnología 3G dentro de unos años.

En cuanto a la parte técnica se mencionó que se necesita de una arquitectura que sea capaz de soportar de manera conjunta la tecnología 4G con la 5G para el caso de México. Es decir, una arquitectura NSA, debido a la necesidad de poder brindar servicios a toda la población, ya que gran parte cuenta aún con cobertura de sistemas 2G y 3G. Esta homologación facilita la transición de tecnologías, y en un futuro próximo, un despliegue total de un protocolo 5G únicamente.

La implementación de un sistema 5G requiere actualizar las estaciones bases que brindan servicio y cobertura a los usuarios finales dentro de la red desplegada en toda la nación. En un principio hay que actualizar los puntos de acceso ya establecidos, para que sean capaces de soportar las características del nuevo protocolo. Una vez llevado a cabo esto, es posible comenzar a instaurar las nuevas radio bases que soportan, exclusivamente, sistemas de la nueva generación 5G.

Por otra parte, también se desarrolló la parte regulatoria, centrándonos, principalmente, en las bandas de frecuencia que han sido, o se piensan, poner en licitación para un uso específico de sistemas de la nueva generación de telefonía celular. En esta parte nos enfocamos a proponer las acciones que debe llevar a cabo el IFT para mejorar

los sistemas de licitación y que su explotación se cumpla en tiempos eficientes para la implementación de los nuevos sistemas.

Para la parte regulatoria se observa conveniente que el IFT debe poner atención en que las bandas ya licitadas, que están entre los 2,500 MHz y los 2,690 MHz, sean explotadas de forma eficiente, logrando alcanzar las metas de despliegue y cobertura propuestas dentro de los siguientes años. Basándose en los resultados de implementación de los sistemas del protocolo 5G, para así, poder concesionar las futuras bandas a operadores que implementen sistemas óptimos y de calidad.

Por otra parte, el IFT debe poner principal atención en la licitación de las demás bandas propuestas para el protocolo 5G en el Release 15. Es por eso que, las bandas ubicadas dentro de los 3,300 MHz y los 3,800 MHz, y de los 4,400 MHz a los 5,000 MHz, debieran ser licitadas para su explotación dentro del siguiente periodo. La importancia de estas bandas es que continúan siendo compatibles con las bandas de la tecnología 4G y, esto, facilita la coexistencia de ambas tecnologías.

Referente a las ondas milimétricas, que se encuentran en el rango de frecuencias de los 24,250 MHz a los 29,500 MHz y de los 37,000 MHz a los 40,000 MHz, el IFT solo las ha considerado para objeto de estudio en sus planes de licitación, es por eso que deben comenzar a tomarse en cuenta para el siguiente periodo para operadores que demuestren un desarrollo de implementación óptimo con las bandas que ya han sido concesionadas.

Si bien el despliegue de sistemas de 5G está por comenzar dentro de nuestro país es muy importante continuar con la planeación en todos los aspectos para hacer que nuestra nación brinde servicios de calidad para los usuarios dentro de pocos años. Además, de que estos servicios sean capaces de ser aprovechados en todas las zonas del país, incluso llegar a las poblaciones más alejadas y de difícil acceso, aprovechando las nuevas tecnologías que se han desarrollado para instaurar este protocolo.

Actualmente, no existe algún otro protocolo que contenga el análisis y propuestas a utilizar para el despliegue y regulación de los sistemas 5G en México. Por esto, es necesario revisar y analizar las propuestas contenidas en el protocolo de adopción y despliegue de la telefonía móvil de 5G, que se desarrolló y presentó en este trabajo de Tesis. Considerando que, para su realización se reunió toda la información necesaria, y disponible, buscando generar las propuestas más viables, tanto para su despliegue técnico, como para la correcta regulación de esta nueva tecnología. Sin lugar a duda la instauración de las nuevas redes de 5G traerá consigo una nueva revolución en niveles tecnológicos, económicos e incluso sociales y culturales, por lo mismo es importante estar preparados para las nuevas necesidades y aplicaciones que se instauraran en los siguientes años. Por lo mismo, se debe de habilitar a la población para que se adapte y sea capaz de explotar los beneficios de la nueva tecnología adaptándose a su vida cotidiana de manera fácil tanto para poblaciones urbanas como rurales dentro del país.

7.1 Recomendaciones

Dentro de este trabajo de tesis se recopiló información referente al desarrollo de las redes de 5G, tanto en México como a nivel mundial con los países más desarrollados, se observa que existe un gran hueco de información y progreso en este tema, por lo cual, brindamos las siguientes recomendaciones para poder apoyar en futuros trabajos de investigación, desarrollo o implementación de sistemas que trabajen con el protocolo de la nueva generación.

- Para las instituciones públicas, se recomienda trabajar más a fondo en el desarrollo tecnológico a nivel telecomunicaciones, entre otros temas, presentando planes de trabajo con objetivos puntuales que se buscan alcanzar durante su tiempo en gestión.
- En un aspecto jurídico, es importante que las leyes que se generen dentro del país estén actualizadas y completas, en aspectos técnicos siendo capaces de responder a las necesidades actuales, estando al nivel que la sociedad mexicana presenta dentro del mundo.
- Teniendo un aspecto jurídico consolidado y firme, es importante comenzar a presionar a las instituciones y compañías privadas que brindan servicios a la población para que establezcan sistemas y redes que ofrezcan servicios de verdadera calidad, actualizados y eficientes, promoviendo sanciones económicas en caso de que no se cumplan los objetivos establecidos.
- Dentro del aspecto de la investigación y desarrollo tecnológico del país, es importante que los institutos especializados y universidades generen estudios e investigaciones de temas actualizados, promoviendo temas vanguardistas que sean capaces de sustentar futuras investigaciones y desarrollo de nuevas tecnologías dentro del país.
- Preparar a la población para el uso de las nuevas tecnologías y aplicaciones que estas traerán consigo, logrando que todas las partes de la población mexicana tanto a nivel rural como urbano puedan explotarlas al máximo, facilitando y mejorando aspectos de su vida cotidiana, ya que en la actualidad no se le da la importancia necesaria a las nuevas tecnologías, esto debido, a que no se conocen todos los beneficios que traerá 5G.
- Para los proveedores de servicios, buscar mejorar las tecnologías que ya se encuentran desplegadas en nuestro país, evitando de esta forma seguir en el rezago tecnológico en el que se encuentra nuestro país, buscar realmente una mejor calidad de servicio para que posteriormente se pueda desplegar de una forma óptima la tecnología 5G.

-
- A las instituciones educativas, comenzar a preparar a los estudiantes para poder formar profesionistas con visión hacia el futuro, buscando que ellos tengan las bases solidas para poder mejorar al país tecnológicamente y dejar el rezago en el que actualmente se encuentra nuestro país, así que mantener bien informados a los estudiantes acerca de la situación del país será un beneficio para comenzar a buscar mejorar los escenarios en los que juegan actualmente los proveedores de servicios de telecomunicaciones, mejorando de esta forma la calidad y precio del servicio.

Tomando en cuenta todo lo investigado hasta el momento, podemos ver que es necesario que se trabaje de manera conjunta para un correcto y óptimo desarrollo de las tecnologías en México, muchos de los rezagos que hay en el país es debido a la falta de organización entre las instituciones y las empresas que se encargan de brindar servicios. Es vital que el gobierno conozca la importancia de mejorar las tecnologías para que se pueda prestar la atención necesaria, debido a la falta de información es que no se le da la importancia que requiere la evolución de estos sistemas.

Bibliografía y Referencias

- [1] GSMA Association. (2018). The Mobile Economy 2018. GSMA.
- [2] GSMA Association. (2018). La Economía Móvil en América Latina y el Caribe 2018.
- [3] Unidad de Espectro Radioeléctrico. (2019) Panorama del espectro radioeléctrico en México para servicios móviles de quinta generación. Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT).
- [4] Schwartz M. (2005). Mobile Wireless Communications. Cambridge: Cambridge University Press.
- [5] Tecuanhuehue J. (2006). Sistemas CDMA: cdmaOne, cdma2000. Puebla: Universidad de las Américas Puebla.
- [6] Restrepo J. F. (2011). Análisis Técnico de la Transferencia de Tecnología para la Presentación de Servicios de Telefonía y Banda Ancha Móvil en Colombia a Través de Operadores Móviles Virtuales Soportados por Tecnología LTE. Bogotá: Universidad de Colombia.
- [7] Oriol R., J. L. (2003). Principios de Comunicaciones Móviles. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.
- [8] Gallardo J. (2006). Estudio de un Sistema OFDM-CDMA. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [9] Hernández A. (2003). Operación de una Radio Base Celular cuando Coexisten GSM & IS-54, IS-136. Puebla: Universidad de las Américas Puebla
- [10] Carrasco M. (2004) TDMA: Time Division Multiple Access. Venezuela: Universidad Simón Bolívar.
- [11] Goldsmith A. (2004). Wireless Communications. United States: Stanford University.
- [12] Cancela J. (2007). Redes de Telefonía Móvil. Recuperado a partir de: <https://www.javiercancela.com/> Consultado el 14/10/2018.
- [13] IPv6 Go (2014). Arquitectura de una Red LTE. Recuperado a partir de: http://www.ipv6go.net/lte/arquitectura_red_lte.php consultado el 27/10/2018
- [14] Martínez, E. (2001). La Evolución de la Telefonía Móvil. Revista Red, 1, pp. 1-6
- [15] Godfrey, A., Silva B., Hancke G, et. al. (2018) A Survey on 5G Networks for the Internet of Things: Communication Technologies and Challenges. IEEE Access Digital Object pp. 3619-3647.
- [16] Carlevaro P., Vázquez M. (2001) UMTS: Estándar de Tercera Generación de Telefonía Celular. Facultad de Ingeniería- Universidad de la República.
- [17] G.S.V. Radha Krishna Rao, G. Radhamani. (2008). WiMAX : a wireless technology revolution. Taylor & Francis Group, LLC,
- [18] V. Krishnaveni, T. Kesavamurthy, B. Aoarna. (2013) Beamforming for Direction-of-Arrival (DOA) Estimation-A Survey. International Journal of Computer Applications (0975 – 8887) Volume 61– No.11 pp. 5-9
- [19] S. Willenegger. (2000). CDMA2000 Physical Layer: An Overview. J. Commun. Networks, Volume 2 pp. 5–17.

-
- [20] Andrews J., Buzzi S., Choi W., Et.al. (2014). What Will 5G Be?. IEEE Journal on Selected Areas In Communications, Vol. 32, No. 6 pp. 1065-1082.
- [21] Anguís J. (2008). Redes de Área Local Inalámbricas: Diseño de WLAN de Wheelers Lane Technology College. Escuela Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla
- [22] D. Barreno, D. Carrión y I. Tenecora (2016). Evolución de la tecnología móvil. Camino a 5G. Revista Contribuciones a las Ciencias Sociales, Recuperado a partir de: <http://www.eumed.net/rev/cccss/2016/04/5G.html> Consultado el: 27/02/2019.
- [23] Lay I. (2018). 5G, brecha digital y políticas públicas. Research Gate, Recuperado a partir de: https://www.researchgate.net/publication/326816363_5G_Brecha_digital_y_politicas_publicas Consultado el 27/02/2019.
- [24] Huu Q., Ca V. Quoc-Tuan V. (2019) An Overview of 5G Technologies. Emerging Wireless Communication and Network Technologies 2018 pp. 59-80
- [25] Hamiti E., & Sallahu F. (2015). Spectrum Comparison between GFDM, OFDM and GFDM Behavior in a Noise and Fading Channel, pp. 39-43.
- [26] Verdecia R. (2018). Análisis del desempeño de los esquemas de modulación BPSK y QPSK para diferentes condiciones de canales en sistema GFDM.
- [27] Salamanca O. & González J. (2016). El camino hacia la tecnología 5G. TELEMATIQUE. pp. 15- 17.
- [28] Kizilirmak R. (2016) Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks. IntechOpen, DOI: 10.5772/66048. Recuperado a partir de: <https://www.intechopen.com/books/towards-5g-wireless-networks-a-physical-layer-perspective/non-orthogonal-multiple-access-noma-for-5g-networks> Consultado el 30/03/2019
- [29] Srikanth S., Kumaran V., Manikandan C., Et. al (2008) Orthogonal Frequency Division Multiple Access: Is it the Multiple Access System of the Future?. AU-KBC Research Center, Anna University, India.
- [30] Agusti R., Bernardo F., Casadevall F., Et. al (2010) LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles. España, Fundación Vodafone España. p.p.
- [31] Farhang-Boroujeny, B.(2011), OFDM Versus Filter Bank Multicarrier, Signal Processing Magazine, IEEE , vol.28, no.3, pp.92,112.
- [32] Sathipriya N.S. (2016), Implementation and study of Universal Filtered Multi Carrier Frequency Offset for 5G, International Journal of Electronics and Communication (IJEC), Vol 4, Issue 5, pp 1-5.
- [33] Arias L. (2016). La capa física de los futuros sistemas de 5ª Generación 5G. Dep. Teoría de la Señal y Comunicaciones Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla
- [34] Wang Q., Zhang R., Yang L., Et. al (2018). Non-Orthogonal Multiples Access: A Unified Perspective IEEE Wireless Communications Volume: 25 , Issue: 2 P.P. 10-16
- [35] Evans, D. (2011). Internet de las cosas, como la próxima evolución de internet lo cambia todo. Technical report, Cisco Internet Business Solutions Group (IBSG)
- [36] Salazar J., Silvestre S. (2016). Internet de las cosas. Recuperado a partir de: <https://upcommons.upc.edu/handle/2117/100921> consultado el 19/05/19.
- [37] Hoshyar R., Wathan F., Tafazolli R., (2008) Novel Low-Density Signature for Synchronous CDMA Systems Over AWGN Channel, IEEE TRANSACTIONS ON SIGNAL PROCESSING, VOL. 56, NO. 4 P.P. 1616-1617.
- [38] Bahri S., Izzaddin M., Shukor M. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) as a Potential Candidate for Future Radio Access Technologies. Recuperado a partir de [https://www.academia.edu/31128784/Non-](https://www.academia.edu/31128784/Non-Orthogonal-Multiple-Access-(NOMA)-as-a-Potential-Candidate-for-Future-Radio-Access-Technologies)

Orthogonal_Multiple_Access_NOMA_as_a_Potential_Candidate_for_Future_Radio_Access_Technologies
Consultado el 30/05/2019

[39] Cama Pinto, A., De la Hoz Franco, E., & Cama Pinto, D. (2012). Las redes de sensores inalámbricos y el internet de las cosas. INGE CUC, 8(1), 163-172. Recuperado a partir de <https://revistascientificas.cuc.edu.co/ingecuc/article/view/253> Consultado el 03/06/2019

[40] Wang M., Zhang J., Ren B. (2016). The Evolution of LTE Physical Layer Control Channels. IEEE Communications Survey & Tutorials. Vol. 18 No.2

[41] GSMA Association. (2019). The Mobile Economy 2019. GSMA.

[42] Lucas N. IFT entrega a AT&T una concesión para lanzar la primera red 5G de experimentación en México (2019). El economista. Recuperado a partir de: <https://www.economista.com.mx/empresas/IFT-entrega-a-ATT-una-concesion-para-lanzar-la-primera-red-5G-de-experimentacion-en-Mexico-20190124-0100.html> Consultado el 06/06/2019

[43] GSMA Association. (2018). The Mobile Economy North America 2018. GSMA.

[44] Fisher T. (2019) 5G: The Latest News & Update. Lifeware. Recuperado a partir de: <https://www.lifewire.com> consultado el 28/09/2019

[45] Evans A. (2018). La tecnología 5G de Intel tendrá un papel transformador en las Olimpiadas de Tokio 2020, desde los deportes al transporte

[46] GSMA Association. (2018). The Mobile Economy Asia Pacific 2018. GSMA.

[47] FCC (2019) The FCC's 5G FAST Plan. Recuperado a partir de: <https://www.fcc.gov/5G> Consultado el día 10/06/2019

[48] Pérez F. (2009). Redes Móviles Terrestres 4G. España: Universidad Pontificia Comillas.

[49] Fisher T. 5G Spectrum and Frequencies: Everything You Need to Know (2019). Lifewire. Recuperado a partir de: <https://www.lifewire.com/5g-spectrum-frequencies-4579825> Consultado el 20/07/19.

[50] IMT en México, Más espectro para aplicaciones de Banda Ancha Móvil. (2019). Instituto Federal de Telecomunicaciones (IFT). Recuperado a partir de: http://www.ift.org.mx/sites/default/files/imt_en_mexico_febrero_2019.pdf Consultado el 22/07/2019.

[51] 5G Americas (2018). ANALYSIS OF ITU SPECTRUM RECOMMENDATIONS IN LATIN AMERICA. . Recuperado a partir de: http://www.5gamericas.org/files/6115/3625/2903/EN_Analisis_de_las_Recomendaciones_de_Espectro_de_la UIT_en_America_Latina_Sept_2018.pdf Consultado el 22/07/2019

[52] Kinney S. (2019) Rounding up 5G spectrum allocations in China. China, RCR Wireless News

[53] Telegeography. (2019) MIC approves allocation of 5G spectrum to Japanese operators, with conditions Recuperado a partir de: <https://www.commsupdate.com/articles/2019/04/11/mic-approves-allocation-of-5g-spectrum-to-japanese-operators-with-conditions/> consultado el 03/08/2019

[54] Fromow M. 7º Webinar. (2018). Identificación de las bandas de frecuencias para 5G. IFT me informo. Recuperado a partir de: <http://www.meinformo.ift.org.mx/#webinars> consultado el 20/04/19.

[55] 3GPP, (2019) 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Release 15 Description; Summary of Rel-15 Work Items (Release 15).

[56] Grupo del Espectro del COIT (2018). Modulación y multiacceso en 5G. Colegio Oficial de Ingenieros de Telecomunicación. Recuperado a partir de: <https://www.coit.es/sites/default/files/informes/pdf/modulacion-y-multiacceso-en-5g.pdf>. Consultado el 29/09/19.

-
- [57] Sumit K., Nishit N., Priyanka P. (2009). 2.5G Mobile Networks GPRS and EDGE. India McGraw-Hill.
- [58] Castillo O. (2018) ¿Cómo funciona la red 4.5G?, Telcel Empresas. Recuperado a partir de: <https://www.telcel.com/empresas/tendencias/notas/como-funciona-red-45g> Consultado el 20/10/2019
- [59] About 3GPP Home. 3GPP The Mobile Broadband Standard. Recuperado a partir de: <https://www.3gpp.org/about-3gpp/about-3gpp> Consultado el 21/10/2019.
- [60] Comunicado de prensa núm. 179/19 ENDUTIH (2019). INEGI. Recuperado a partir de: https://www.inegi.org.mx/contenidos/saladeprensa/boletines/2019/OtrTemEcon/ENDUTIH_2018.pdf Consultado el 21/10/19.
- [61] Diario Oficial de la Federación. (2018) Programa Anual de Uso y Aprovechamiento de Bandas de Frecuencias 2019. Recuperado a partir de: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5543543&fecha=12/11/2018 Consultado el: 12/11/2019
- [62] Diario Oficial de la Federación. (2019) Programa Anual de Uso y Aprovechamiento de Bandas de Frecuencias 2020. Recuperado a partir de: http://www.ift.org.mx/sites/default/files/acuerdo_mediante_el_cual_el_pleno_emite_el_programa_2020.pdf Consultado el: 12/11/2019
- [63] Altan Redes (2019) Cobertura Red Compartida, Recuperado a partir de: <https://www.altanredes.com/red-compartida/> Consultado el: 17/12/2019
- [64] WhistleOut MX. (2019) Frecuencias en las que operan las compañías de celular en México. WhistleOut. Recuperado a partir de: <https://www.whistleout.com.mx/CellPhones/Guides/telefonía-celular-mexico> Consultado el: 20/11/2019
- [65] Instituto Federal de Telecomunicaciones (2018) AVANZA IFT EN LIBERACIÓN DE LA BANDA DE 600 MHZ, Comunicado de Prensa No. 65/2018
- [66] Instituto del Derecho de las Telecomunicaciones (2018) Fibra Óptica, camino para más competencia.
- [67] Castañares I. (2019) AT&T y Telefónica inician apagón de 2G en México; Telcel esperará. El Financiero
- [68] World time zone. (2019) World Coverage Map 5G. Recuperado a partir de: <https://www.worldtimezone.com/5g.html> Consultado el 26/12/2019
- [69] IFT (2018) Licitación No. IFT -7 (servicio de acceso inalámbrico). Recuperado a partir de: <http://www.ift.org.mx/industria/espectro-radioelectrico/telecomunicaciones/2018/licitacion-no-ift-7-servicio-de-acceso-inalambrico> Consultado el: 26/12/2019.
- [70] Corona L (2018) ¿Qué empresas tienen la mayor cobertura y velocidad en 4G?. Expansión, México.

Apéndice de Acrónimos y Abreviaciones

3GPP. 3rd Generation Partnership Project
ADSL. Asymmetric Digital Subscriber Line
AMPS. Advanced Mobile Phone Service
ARIB. Asociación de Industrias de Radio y Negocios
ASM. Adjacent Subcarrier Method
ATIS. Alianza para las Soluciones de la Industria de las Telecomunicaciones
BBU. Baseband Unit
BSC. Base Station Controller
BSS. Subsistema de Estaciones Base
BTS. Base Transceiver Station
CCSA. Asociación China de Normas de Comunicaciones
CDMA. Code Division Multiple Access
CDVCC. Coded Digital Verification Color Code
CNAF. Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias
CRAN. Cloud RAN
CT. Red principal y terminales
D-AMPS. Digital AMPS
DDF. Frequency Division Duplexing
DS. Secuencia Directa
DSM. Diversity/Permutation
EDGE. Enhanced Data rates for GSM Evolution
EIR. Equipment Identity Register
ETSI. El Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones
FBMC. Filter Bank Multicarrier
FCC. Federal Communications Commission
FDD. Frequency Division Duplexing
FDMA. Frequency Division Multiple Access
FEC. Forward Error Correction
FFT. Transformada Rápida de Fourier
FH. Salto de Frecuencia
FMT. Multi-Tono Filtrado
FR. Frequency Ranges
GMSC. Gateway Mobile Services Switching Center
GPRS. General Packet Radio Service
GSM. Global System for Mobile Communications
HLR. Home Location Register
HSCSD. High-Speed Circuit-Switched Data
IEEE. Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos
IFT. Instituto Federal de Telecomunicaciones
IMT. International Mobile Telecommunications-Advanced
IoT. Internet de las cosas
LDS. Low-Density Signature
LTE. Long Term Evolution
MIMO. Multiple Input Multiple Output

MME. Entidad en Gestión de la Movilidad
MSC. Mobile Services Switching Center
MUSA. Multiuser Shared Access
NOMA. Non Orthogonal Multiple Access
NR. New Radio
NSA. Non-Stand Alone
OFDM. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing
OFDMA. Orthogonal Frequency-Division Multiplexing Access
OSI. Open System Interconnection
P2P. Peer to Peer
PCRF. Policy and Charging Rules Function
PPN. Red Polifásica
QAM. Quadrature Amplitude Modulation
QPSK. Quadrature Phase-Shift Keying
RAN. Radio Access Network
RF. Radiofrecuencias
RRH. Remote Radio Head
RSS. Subsistema de Radio
SA. Stand Alone
SA. Servicios y aspectos del sistema
SACCH. Slow Associated Control Channel
SC-FDMA. Single Carrier Frequency Division Multiple Access
SCMA. Sparse Code Multiple Access
SDMA. Spatial Division Multiple Access
SDSI. Sociedad de Desarrollo de Estándares de Telecomunicaciones de la India.
SIC. Successive Interference Cancellation
SMS. Short Message Service
SMT. Multi-Tono Escalonado
SNR. Relación Señal a Ruido
SS. Espectro Extendido
TDMA. Time Division Multiple Access
TTA. Asociación de Tecnología de Telecomunicaciones
TTC. Comité de Tecnología de Telecomunicaciones
TSG. Technical Specifications Groups
UFMC. Universal Filtered Multi-Carrier
UIT. Unión Internacional de Telecomunicaciones
UMTS. Universal Mobile Telecommunications System
VLR. Visitor Location Register
WiMAX. World Interoperability for Microwave Access
WSAN. Redes de Sensores/Actuadores Inalámbricos
WSN. Redes de Sensores Inalámbricos

DECLARACIÓN

La información presentada en este trabajo se obtuvo de diversas fuentes que se consideran fidedignas y se consignan puntualmente en las referencias. El uso dado a la información es de naturaleza estrictamente de investigación académica y de divulgación, sin fines de lucro o de otra índole. Se ha hecho también el mayor esfuerzo por acreditar debidamente datos, opiniones y contenidos presentados, por lo que cualquier error u omisión en ello, es del todo involuntario.

México, CDMX., Septiembre de 2020



Carlos Alfredo Leyva Tlapa

NOMBRE Y FIRMA DEL ALUMNO



Lucero Iraís Vera Sandoval

NOMBRE Y FIRMA DEL ALUMNO