

**Análisis de aspectos técnicos y tecnológicos de la telefonía móvil 5G, sus posibles beneficios
e inconvenientes de implementación en Colombia**

Herbert Sánchez Martínez

Asesor

Mauricio Ochoa Sana

Universidad Nacional Abierta y a Distancia - UNAD

Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería- ECBTI

Especialización En Redes De Nueva Generación

Abril 2023

Contenido

Introducción	6
Planteamiento del Problema	7
Justificación	8
Objetivos	9
Evolución de las Redes de Telefonía Móvil	10
Primera Generación	10
Segunda Generación	11
Generación 2.5	13
Tercera Generación	13
Cuarta Generación	14
Quinta Generación	14
Principales Características	15
SIGFOX y Redes IoT.....	17
Estado del Arte.....	18
Elementos Destacados de la Arquitectura 5G.....	21
Espectro y Frecuencias en Redes 5G	21
MEC.....	22
NFV aplicada en tecnología 5G	24
Arquitectura del Core en redes 5G.....	25

Arquitectura RAN en 5G	28
Fronthaul y la interfaz eCPRI	30
Segmentación de redes.....	32
Beamforming	33
Seguridad de la arquitectura 5G.....	34
Bandas de Frecuencia y Espectro 5G en Colombia	36
Bandas bajas (Por debajo de 1 GHz)	37
Banda 600 MHz (614 – 698 MHz)	37
Banda 900 MHz (880 – 915 / 925 – 960 MHz)	38
Bandas medias (Entre 1 a 6 GHz).....	39
Banda L (1427 – 1518 MHz)	39
Banda AWS-3 (1755 – 1780 / 2155 - 2180 MHz).....	40
Banda 2300 MHz (2300 – 2400 MHz)	40
Banda 3500 MHz (3300 – 3800 MHz)	41
Bandas altas (Por encima de 6 GHz)	42
Banda 26 GHz (24.25 – 27.5 GHz).....	43
Estado de Asignación de Espectro para Servicios IMT en Colombia	44
Resumen Histórico de Asignación del Espectro en Colombia	44
La ANE y la Asignación del Espectro para 5G	48
Consideraciones técnicas del despliegue de 5G en Colombia	54

Liberación y Asignación de Espectro Radioeléctrico	55
Redes de Backhaul de Alta Capacidad	56
Protección Ambiental y Preservación Urbana	57
Emisiones de RNI	58
Políticas Arancelarias y de Importación	59
Políticas de Administración de Datos	59
Beneficios e Inconvenientes de la Implementación de 5G en Colombia.....	60
Conclusiones	67
Referencias.....	69

Lista de Figuras

Figura 1- Vista simplificada de las arquitecturas 2G, 2.5 G, y 3G.	12
Figura 2 - Principales Características y ventajas de redes 5G.	16
Figura 3 - Arquitectura Multi-Access Edge Computing	23
Figura 4 - Nuevas funciones dentro de la arquitectura de Core 5G.	26
Figura 5 - Opciones de implementación de arquitectura para redes 5G.	27
Figura 6 - Arquitectura general NG-RAN.	29
Figura 7 - Esquema de funcionamiento de FrontHaul.	30
Figura 8 - Arquitectura de alto nivel 4G C-RAN vs. 5G C-RAN.	31
Figura 9 - Funcionamiento de Network Slicing.	33
Figura 10 - Relación cobertura- Capacidad – Bandas de frecuencias 5G.	36
Figura 11 - Resumen lineamientos de política y mejores prácticas internacionales en gestión de Espectro	50

Introducción

La constante evolución de las telecomunicaciones, así como los cambios en el tipo de consumo y necesidades por parte de los usuarios de redes móviles, conlleva a que las redes actuales no cumplan con todas las expectativas de estos usuarios. La cada vez mayor presencia de dispositivos IoT, así como el avance de la industria 4.0 demanda de las redes de datos mayor ancho de banda y baja latencia en las conexiones, lo que es uno de los principales motivos por los cuales se siguen desarrollando avances en el modo como funcionan y operan las redes móviles.

Estas redes han pasado de proporcionar telefonía móvil a ser poderosas redes de datos, que brindan a los usuarios una infinidad de servicios y contenidos multimedia. Para satisfacer las necesidades actuales y futuras de los consumidores, organizaciones como la UIT-T y compañías privadas como el 3GPP se plantean una serie de innovaciones técnicas y tecnológicas que han sido llamadas la Quinta Generación de redes móviles o 5G.

El presente escrito aborda los aspectos más relevantes en el diseño, implementación y despliegue de esta tecnología, y es un complemento desde el punto de vista académico a las pruebas piloto de 5G que ya iniciaron los operadores de telecomunicaciones en Colombia.

Planteamiento del Problema

El creciente aumento de contenido digital que cursa por las redes móviles (multimedia, IPTV, Streaming de audio y video, videoconferencias, entre otros) por su propia naturaleza demanda de la red móvil características como alto ancho de banda, menor latencia, mayor estabilidad de la señal y la posibilidad de estar siempre conectado. Aspectos que, a pesar del progreso de las redes de telefonía móvil, las redes actuales no son capaces de satisfacer completamente.

De esto nace la necesidad de una nueva generación de redes (la 5 Generación o 5G) que plantea inquietudes respecto a cómo se ha de implementar las innovaciones en las distintas áreas de una red móvil, el tipo y capacidad del transporte necesario para un buen funcionamiento, el tipo de acceso que se brindará a los distintos y variados dispositivos (no solo Smartphones), todo esto centrándose en la experiencia que tendrá el usuario.

Justificación

La modificación de las necesidades de los usuarios de redes móviles, haciendo uso de aplicaciones y contenidos que demandan alta velocidad y conectividad permanente, así como las nuevas tecnologías emergentes, el avance de la industria 4.0, el aumento de los dispositivos IoT y las necesidades de comunicaciones Machine 2 Machine demandan redes más rápidas, con mayor estabilidad y menor latencia. La respuesta a esta nueva exigencia sobre las redes de telecomunicaciones ha sido el desarrollo y estandarización de la quinta generación de redes móviles o 5G, que en algunos países del mundo ya se encuentra implementada y en otros países en proceso de planificación, reglamentación o despliegue.

Mediante este documento se pretende brindar un análisis de los aspectos técnicos, así como de las innovaciones tecnológicas que se requieren para poder ofrecer a los usuarios una mejor experiencia. Actualmente las principales empresas de telecomunicaciones del país se encuentran en el diseño y ejecución de pruebas piloto en 5G, por lo cual es pertinente el desarrollo de un escrito que pueda complementar desde un punto de vista académico la llegada de esta nueva tecnología al país. Este despliegue e implementación merece un análisis de los requerimientos técnicos que se deben contemplar en los procesos de diseño y puesta en operación, así como un enfoque en los beneficios e inconvenientes que pueda ocasionar en Colombia.

Objetivos

Objetivo General

Analizar los aspectos técnicos y tecnológicos de la telefonía móvil 5G, mediante una revisión de literatura identificar potenciales beneficios e inconvenientes en el contexto colombiano.

Objetivos Específicos

Presentar una síntesis de los principios de la telefonía móvil, así como las novedades tecnológicas que conlleva la implementación y el despliegue de las redes de quinta generación (5G).

Examinar en detalle los aspectos técnicos más relevantes que implica el despliegue de la nueva tecnología, como las frecuencias de operación, la cantidad de antenas necesarias, el efecto en las redes actuales de transmisión, cobertura y su operatividad con las tecnologías móviles existentes en Colombia.

Exponer los pros y contras del despliegue de las redes de 5G en el país, teniendo en cuenta los aspectos sociales, económicos, ambientales y de salud que esto implica.

Evolución de las Redes de Telefonía Móvil

En sus inicios, el principal objetivo de la telefonía móvil fue brindar exactamente los mismos servicios que ofrecía la telefonía fija, pero con la ventaja de que el usuario pudiera cambiar de ubicación sin que esto significara una interrupción en la comunicación. Con el pasar de los años se han venido adicionado servicios y posibilidades al contenido que pueden brindar las redes móviles, al llegar a un punto en el que ahora son usadas para poder tener contacto permanente con Internet, realizar videollamadas o videoconferencias, todo esto gracias a la evolución constante de las distintas tecnologías. En Colombia, coexisten los despliegues de tecnologías 2G, 3G y 4G, sin embargo, la tendencia de los operadores de telecomunicaciones es implementar nuevas tecnologías en las cuales puedan brindar convergencia en sus servicios.

“Los inicios de la telefonía móvil pueden ser establecidos con el nacimiento de los sistemas celulares: un conjunto de estaciones base coordinadas, donde se reutilizan las frecuencias disponibles, lo que permite que un sistema tenga una extensión y capacidad prácticamente ilimitadas, haciendo las células cada vez más pequeñas”. (Huidobro Moya, 2014)

Primera Generación

Son considerados “sistemas analógicos como NMT, TACS y AMPS, creados inicialmente para transmisión de voz”. “El nombre común que recibió esta tecnología fue “celular” ya que la señal transmitida se dividía en celdas hexagonales que se podían reutilizar de manera dinámica, según la necesidad de la red”. (López Catalá, Guerra Martínez, & Izaquirre Leach, 2017).

Estos sistemas permiten transferencia de comunicación entre células o “handover con tiempos de conmutación menores de 500 milisegundos”, lo que significa interrupciones mínimas que no afectan la conversación. “El proceso de transferencia de célula lo lidera el centro de conmutación móvil MSC (Mobile Switching Center)”. La medida de señal es realizada por la estación base (BTS) y son transmitidas al MSC para su análisis, lo que ocasiona alta carga de tráfico. (Huidobro, 2014)

La tecnología predominante de esta generación fue AMPS, “donde la información con la voz era transmitida en forma de frecuencia modulada al proveedor de servicio, un canal de control era usado en forma simultánea para habilitar el traspaso a otro canal de comunicación de serlo necesario”. (López et al.,2017) “En estos sistemas no era posible la interconexión entre sistemas de diferentes proveedores de servicio y como consecuencia no existía posibilidad de realizar roaming”. (Huidobro, 2014)

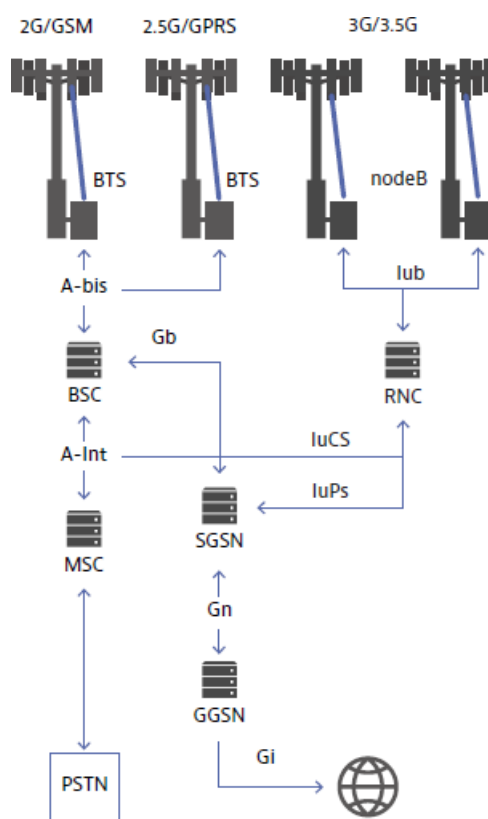
Segunda Generación

Son representantes de esta generación “sistemas digitales como D-AMPS, GSM y PDC”, los cuales son tecnologías orientadas a soportar además de voz, mensajería corta (SMS) y transmisión de datos, motivo por el cual es esperado que los retardos durante la transferencia de células fueran muy cortos y no ocasionaran interrupciones en la comunicación. (Huidobro, 2014) Esta generación permitió por primera vez la transferencia de datos y que pudieran ofrecerse servicios adicionales o de valor agregado como el correo de voz, los mensajes de texto, así como las notificaciones vía Internet y la posibilidad de navegar en portales web. (López et al.,2017).

La implementación de servicios de valor agregado es posible gracias a la digitalización de la comunicación establecida para esta generación. “La digitalización establece diferencias importantes en cuanto a la movilidad sobre los sistemas analógicos”, pues la “movilidad entre celdas con transferencia es liderada por la estación móvil bajo el esquema de handover asistido por el móvil (MAHO o Mobile Assisted HandOver), que toma como base las medidas realizadas por la estación base” y las medidas realizadas por el equipo terminal. (Huidobro, 2014)

Figura 1

Vista simplificada de las arquitecturas 2G, 2.5 G, y 3G



Nota: Esquema básico de arquitectura 2G, 2.5G y 3G. Figura tomada de (Viavi Solutions, 2021)

Generación 2.5

“Comúnmente se habla de una generación intermedia entre 2G y 3G que incluye, básicamente a GPRS (General Packet Radio Service) utilizando GSM y EDGE (Enhanced Data Rates for GSM Evolution)”. Estas tecnologías ofrecen mejor desempeño en la transferencia de datos y paquetes. Para esta implementación se requiere “una red de transporte IP (IP Backbone) que trabaja en paralelo al núcleo de GSM” y la función de este Backbone IP “es realizar la conmutación de paquetes, así como conexiones a Internet y hacia otras redes de datos”.

(Huidobro, 2014)

Tercera Generación

Como resultado del esfuerzo por “universalizar los servicios junto a las redes que los soportan”, llega UMTS, HSPA, HSPA+, las cuales traen consigo una renovación en el terminal del usuario, que ahora es más pequeño, de menor peso y con baterías de mayor autonomía. Bajo estas tecnologías se optimiza “la cobertura de grandes áreas geográficas y atender demandas específicas”, pudiendo adoptar una estructura con células de distinto tamaño. (Huidobro, 2014). Esto permitió a los operadores realizar segmentación de las celdas según la necesidad de tráfico o de usuarios que existan en la zona.

Con la llegada al mercado de los Smartphones o teléfonos inteligentes en los cuales es posible ver videos, reproducir música en streaming o simplemente tener acceso a Internet desde cualquier sitio, empieza a ser importante el consumo de contenido multimedia y el ancho de banda necesario para el mismo. Estos teléfonos también trajeron las primeras vulnerabilidades por código malicioso, de localización por GPS entre otras. (Agencia Española Protección Datos, 2020)

En UMTS (WCDMA) no existe traspaso MAHO entre frecuencias, ya que todos los móviles utilizan la misma, lo que implica que se realice un control de potencia. “El traspaso es blando, ya que cuando un terminal móvil sobrepasa el nivel de potencia del borde de una célula debe ajustar su potencia en la nueva célula para no interferir.” (Huidobro, 2014)

Cuarta Generación

Wimax y en mayor medida LTE (Long Term Evolution) son los máximos exponentes de esta generación, permitiendo gran velocidad de datos. Actualmente la 4 generación permite a los usuarios disfrutar altas velocidades de descarga que hacen posible realizar videoconferencias, streaming de contenido multimedia en alta calidad, entre otras. (Delgado Dotor, 2020) También se implementan técnicas de cifrado más robustas, sin embargo, al ser redes basadas en IP, se trasladan a estas redes las amenazas que se encuentran en redes LAN e Internet tales como DDoS (Ataque de Denegación de servicio Distribuida), APTs (Amenaza Avanzada Persistente) entre otros. (Agencia Española Protección Datos, 2020)

Las redes de cuarta generación tienen un espectro limitado en áreas donde existe una alta densidad de usuarios, lo que implica un menor ancho de banda para los terminales y se traduce en un servicio lento y con conexiones perdidas. (Delgado, 2020). El aumento de usuarios y su consumo enfocado a contenido multimedia obliga a que las redes necesiten anchos de banda cada vez mayores, garantizando bajas latencias y respuesta casi en tiempo real.

Quinta Generación

La 5 Generación o 5G es la propuesta de “3GPP (3 Generation Partnership Project), donde participan operadores y fabricantes” en un trabajo mancomunado, para definir los

estándares de la tecnología a desplegarse en los próximos años. “Tiene el potencial de soportar velocidades de banda ancha muy superiores a las que se tienen actualmente”; también tiene como fin impulsar y potencializar “tecnologías emergentes como vehículos autónomos, inteligencia artificial, robótica, realidad virtual (RV), realidad aumentada (RA), internet de las cosas (IoT), smart city, entre muchas otras”. (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

Principales Características

Se espera que las redes de 5G tengan muy baja latencia, así como una alta disponibilidad y fiabilidad, aún mayor a las que se tienen actualmente en las redes móviles. También permitirán que millones de dispositivos puedan estar conectados al mismo tiempo en áreas densamente pobladas manteniendo altas tasas de transferencia de datos.

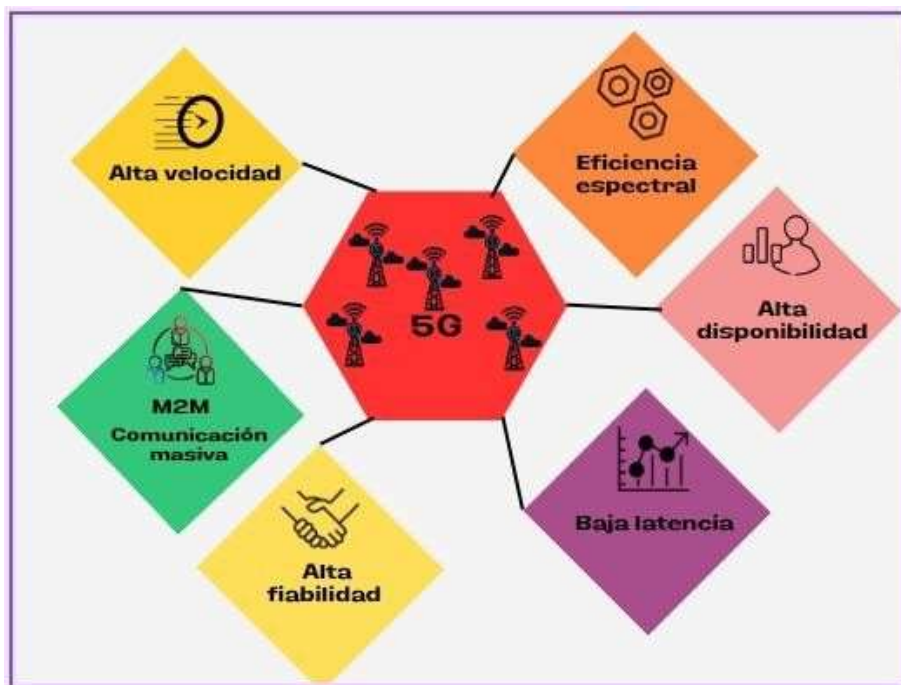
Estas redes tendrán la capacidad de que todos los dispositivos de quinta generación se puedan conectar entre sí. (Observatorio Nacional 5G, 2020) Se tiene contemplado que puedan brindar velocidades de entre 1Gbps y 20 Gbps, latencias alrededor de 1 ms, eficiencia energética y espectral hasta 3 veces mayor que 4G, con gran densidad de conexiones, y alta velocidad de movilidad. (Chica Pedraza & Ariza Beltrán, 2021). No se trata simplemente de multiplicar la velocidad de conexión, sino también de lograr que las conexiones ganen en calidad.

Numerosos estudios evidencian que la implementación de 5G traerá beneficios a variados sectores que se involucran en las actividades de los seres humanos, permitiendo el desarrollo y la democratización de nuevos productos, así como nuevos servicios y aplicaciones tecnológicas en sectores relacionados con transporte, energía, seguridad y defensa, entre muchos otros. También permitirá el despliegue y la masificación de numerosos dispositivos IoT tales como sensores que puedan ser utilizados en variadas actividades esenciales como la agricultura, la salud, turismo,

entretenimiento, servicios financieros, etc. (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019).

Figura 2

Principales Características y ventajas de redes 5G



Nota: Figura adaptada de (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019)

Una de las novedades de las redes de 5G es la utilización de un espectro que no se ha aprovechado para servicios móviles: las ondas milimétricas (mmWave). Este rango de frecuencias “es necesario para sustentar la velocidad ultra rápida de banda ancha móvil contemplado para la tecnología 5G”. “El término "ondas milimétricas" se refiere a una longitud de onda entre alrededor de 10 mm (30 GHz) y alrededor de 1 mm (300 GHz). Actualmente se usa este término para todas las bandas de frecuencia por encima de 24 GHz, usado para soportar

5G” (Agencia Nacional del Espectro, 2020). Dentro de sus ventajas aumenta la capacidad de las redes, pero implica una propagación limitada debido a que las capacidades de cobertura son bastante bajas y no puede viajar a través de edificios u obstáculos. Para superar esto, los operadores deben instalar estaciones base tipo small cells. (Delgado, 2020).

Dos tecnologías resultan muy importantes para el funcionamiento de 5G. Son estas Massive MIMO (Múltiple-Input Multiple-Output) y Beamforming. Massive MIMO ofrece la posibilidad de realizar arreglos con cientos de antenas, brindando tasas más altas de datos, mayor fiabilidad de enlace, y un mejor equilibrio entre la eficiencia espectral y la eficiencia energética. (Agredo-Méndez, Jojoa-Gómez, & Almenar-Terré, 2015).

Beamforming permite que un gran número de usuarios y un arreglo de antenas Massive MIMO puedan intercambiar información mejorando la relación señal a ruido; además permite un flujo de datos enfocado que mejora el alcance y la distancia, para en conjunto, poder aumentar el número de suscriptores atendidos por las Estaciones Base. (Delgado, 2020)

SIGFOX y Redes IoT

Una alternativa a las redes móviles tradicionales es SIGFOX una red de IoT dedicada pensada para tener un bajo consumo y ser independiente de los despliegues de telefonía móvil comercial. Tiene varios aspectos a destacar, como su alta eficiencia energética, debido a que los dispositivos IoT casi siempre están en espera, solo activándose para realizar la transmisión. Esto conlleva a que los dispositivos IoT puedan obtener una vida útil de sus baterías hasta por 10 años, en algunos casos.

Sigfox usa bandas de frecuencia libres como es el caso de las ISM, esto ocasiona ciertas restricciones en cuanto al porcentaje del tiempo de ocupación o duty cycle, restringiendo el

límite máximo de mensajes de un dispositivo a 140 por día y un límite de 7 mensajes por hora. Para su funcionamiento se requiere adquirir un módulo de radio y realizar un pago de una suscripción.

Dentro de sus mayores ventajas permite una comunicación eficiente entre innumerables dispositivos IoT, garantizando una alta eficiencia energética, así como posibilita el desarrollo de APPs propias que se integran fácilmente a la API principal de Sigfox, esto para llevar una recolección organizada de los datos transmitidos por sensores y dispositivos IoT. Su independencia de las redes de telefonía tradicionales lo hace una buena opción para potenciar sectores como la Agroindustria, Seguridad, Logística o Industrias 4.0 en territorios en los que la cobertura tradicional es deficiente o en casos dónde se requiere garantizar una larga vida útil de la batería de los dispositivos o sensores.

Estado del Arte

Dentro de los estudios que se han realizado sobre el despliegue de redes 5G, en el documento “Redes Móviles 5G: Evolución New Radio” (Gómez, 2021) se aborda “las necesidades, requerimientos y características del diseño de la red 5G, así como su arquitectura, técnicas y algoritmos más representativos” centrandose su investigación en las novedades que plantea la red de Acceso de 5G conocida como New Radio. Esta investigación enfatiza su análisis en dos tecnologías que resultan muy importantes para el funcionamiento de 5G. Son estas Massive MIMO (Múltiple-Input Multiple-Output) y Beamforming.

Beamforming permite que un gran número de usuarios y un arreglo de antenas Massive MIMO puedan intercambiar información mejorando la relación señal a ruido. Además, permite

un flujo de datos enfocado que mejora el alcance y la distancia, para en conjunto, poder aumentar el número de suscriptores atendidos por las Estaciones Base. (Delgado, 2020)

Por su parte Massive MIMO ofrece la posibilidad de realizar arreglos con cientos de antenas, brindando tasas más altas de datos, mayor fiabilidad de enlace, y un mejor equilibrio entre la eficiencia espectral y la eficiencia energética.

En el trabajo “Evaluación de redes móviles 5G en entornos con aplicaciones IoT” (Delgado Dotor, 2020) se analizan las principales características, requisitos, y tecnologías en la implementación de 5G, y se investiga la aplicación y el desempeño de servicios IoT (Internet de las cosas) en entornos de redes de comunicaciones 5G. Una de las novedades de las redes de 5G es la utilización de un espectro que no se ha aprovechado para servicios móviles: las ondas milimétricas (mmWave). Este rango de frecuencias es necesario para sustentar la velocidad ultra rápida de banda ancha móvil contemplada para la tecnología 5G. Actualmente se usa el término "ondas milimétricas" para todas las bandas de frecuencia por encima de 24 GHz, usado para soportar 5G (Agencia Nacional del Espectro, 2020) Dentro de sus ventajas aumenta la capacidad de las redes, pero implica una propagación limitada debido a que las capacidades de cobertura son bastante bajas y no puede viajar a través de edificios u obstáculos. Para superar este inconveniente, los operadores deben contemplar la instalación de estaciones base tipo small cells. (Delgado, 2020)

En 2020 la Agencia Nacional del Espectro (ANE) presenta el “Documento de consulta pública sobre las bandas de frecuencias disponibles para el futuro desarrollo de las telecomunicaciones móviles internacionales en Colombia.” (Agencia Nacional del Espectro, 2020) Este documento es un completo estudio de frecuencias disponibles en Colombia, teniendo consideraciones específicas para la operación actual de 4G (LTE) y que bandas o frecuencias

están disponibles para la implementación de 5G (NR) en el país. Este documento es fundamental para la armonización del espectro radioeléctrico, y permite a distintos actores como operadores, empresas de tecnología, investigadores, entre otros, realizar pruebas en las nuevas bandas disponibles y prepararse para las nuevas bandas que estarán disponibles como consecuencias de la evolución tecnológica.

El Ministerio de Telecomunicaciones de Colombia en 2019 presentó el “Plan 5G Colombia” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019) un documento que analiza los beneficios de la implementación de 5G para el país, realiza consideraciones respecto al uso del espectro en nuestro país e identifica los principales retos en el despliegue de esta tecnología en Colombia. Es un archivo muy completo que muestra la visión del Ministerio de Telecomunicaciones respecto a la llegada de la quinta generación de Telefonía móvil a Colombia y cómo esta implementación podrá llevarse a cabo y que impacto pueda tener en el desarrollo de la sociedad colombiana.

Elementos Destacados de la Arquitectura 5G

La propuesta de 3GPP (3rd Generation Partnership Project) plantea para 5G un marco dinámico y flexible, que pueda adaptarse a redes de acceso (RAN) que no se encuentren atadas a la infraestructura física o proximidad de las Radio Base. Se ha planteado una nueva arquitectura de red la cual se encuentra aún más orientada a los servicios

Nuevos principios como la “modularidad, la reusabilidad y la autosuficiencia de las funciones de red”, son aspectos fundamentales dentro del marco propuesto para 5G. (Viavi Solutions, 2021)

Espectro y Frecuencias en Redes 5G

Nuevos rangos de frecuencias serán dedicados para la tecnología New Radio (NR) para 5G, “dentro de tres rangos de frecuencias principales”:

Bandas Bajas (Por debajo de 1 GHz).

Bandas Medias (Entre 1 a 6 GHz).

Bandas Altas (Por encima de 6 GHz).

De los distintos rangos de frecuencias se abordará en profundidad en un capítulo siguiente, sin embargo, se presenta un breve resumen de los tres rangos de frecuencias principales.

El espectro comprendido entre las frecuencias 30 GHz y 300 GHz es conocido como ondas milimétricas, “dado que las longitudes de onda están comprendidas entre 1 y 10 mm. Las frecuencias entre 24 GHz y 100 GHz se están asignando para el aprovechamiento y la implementación de las nuevas redes 5G”. (Viavi Solutions, 2021)

En las bandas medias se ha venido priorizando el rango de 3300 a 3700 Mhz (Banda de 3500 Mhz). De hecho, ya en varios países de Europa y Asia se tiene noticia del despliegue de redes 5G con operación en este rango de frecuencias. (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

En cuanto a la disponibilidad de frecuencias en bandas bajas se puede trabajar en la banda de 700 MHz en la cual actualmente viene operando 4G y puede ser usada como puente entre estas dos generaciones. Las frecuencias UHF que no se aprovechan en la actualidad, las cuales se encuentran entre 300 MHz y 3 GHz se podrían readaptar también para la utilización en redes 5G.

“Esta diversidad de frecuencias puede ser empleada según las aplicaciones, debido a que las frecuencias más altas son caracterizadas por un ancho de banda mayor pero un rango de alcance corto, lo que las hace propicias para ser implementadas en zonas con alta densidad de población, en las cuales el alcance no implique la cobertura de grandes distancias”. (Viavi Solutions, 2021)

MEC

Multi-Access Edge computing (Informática perimetral Multiacceso) o MEC “es un elemento importante de la Arquitectura 5G. MEC no es exclusiva de la tecnología 5G, pero es vital para garantizar un buen desempeño. Consiste en una evolución de la informática basada en la nube, donde son trasladadas aplicaciones de los centros de datos hacia el perímetro de la red”. Esto implica mayor cercanía de estos centros con los usuarios finales, lo que se traduce en menores saltos y mejores tiempos de respuesta.

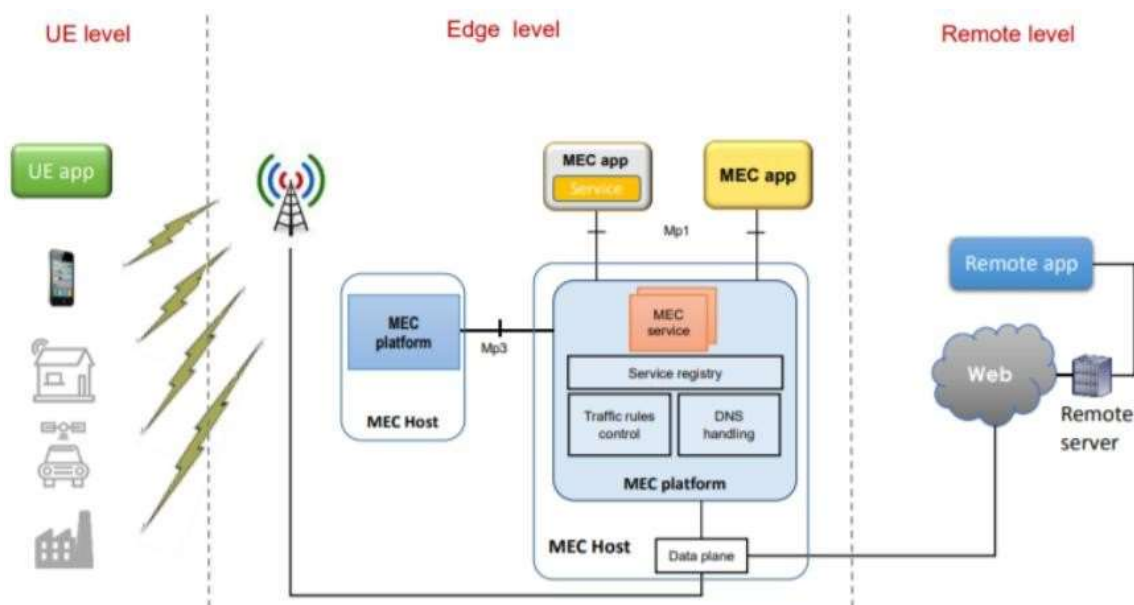
MEC pretende aproximar al borde de la red las capacidades de cómputo y otros servicios tecnológicos de la nube, permitiendo de esta manera una baja latencia; está orientada a servicios

o aplicaciones que requieran interacciones en tiempo real y en los cuales la baja latencia sea un factor determinante. Dentro de este paradigma todo desarrollo de software debe adaptarse a las especificaciones, por lo cual ofrece una API estandarizada que en gran medida facilitaría la programación de las diversas aplicaciones. (Pacheco Herranz, 2019)

MEC permite una plataforma abierta en el borde de red, que facilita múltiples servicios y puede permitir a terceros autorizados hacer uso de capacidades de almacenamiento y procesamiento, fomentando la creación y adaptación de nuevos servicios flexibles y bajo demanda. MEC también saca provecho de la amplia red celular y puede convertirse en pieza clave para respaldar y dar un empuje definitivo a servicios M2M (Machine to Machine) y IoT. (Taleb, y otros, 2016)

Figura 3

Arquitectura Multi-Access Edge Computing



Nota: Esquema de Arquitectura MEC. Figura tomada de (Pacheco Herranz, 2019)

“Dentro de las características de MEC se incluye baja latencia, un alto ancho de banda y acceso en tiempo real a la información de la red RAN” (Radio Access Network), lo que se traduce en una convergencia total de las redes RAN y las redes centrales de los operadores. “Las especificaciones de la tecnología 5G definen varios elementos facilitadores de la MEC que permiten al Core de 5G enrutar tráfico de forma colaborativa”. La redistribución de la capacidad informática hace posible aumentar significativamente el número de dispositivos conectados que promete el despliegue de esta nueva red. (Viavi Solutions, 2021)

NFV aplicada en tecnología 5G

El concepto de virtualización es comúnmente definido como “el proceso de crear versiones virtuales (software) de recursos físicos específicos que emulen las mismas características físicas del hardware”. (Cárdenas, 2016) En el caso de la virtualización de funciones de red, “Network Function Virtualization (Virtualización de funciones de red) o NFV separa el software del hardware sustituyendo diversas funciones de red”, como enrutadores, equilibradores de carga o cortafuegos, los cuales son ejecutados en instancias virtualizadas por software. De esta manera se pueden ahorrar “elementos de hardware dedicado de alto costo, y se pueden hacer más cortos los plazos de instalación” y puesta en operación de nuevas funcionalidades dentro de la red.

La implementación de funciones virtualizadas de red permite agilizar la gestión, asignación y escalamiento de los recursos disponibles. Evita la alta ocupación en centros de datos, así como contribuye de manera eficiente a controlar los costos energéticos, de mantenimiento y operación de los mismos equipos. “NFV hace posible mediante la virtualización de dispositivos la segmentación de redes que permite a varias redes virtuales

funcionar al mismo tiempo. NFV también puede sustituir otros recursos de red, almacenamiento e informática virtualizada que puede ser configurada y personalizada según las necesidades del operador, los clientes o las aplicaciones”. (Viavi Solutions, 2021)

Como se consigna en este documento, NFV hace parte vital dentro de la nueva propuesta 5G, haciendo posible la segmentación de redes, la articulación y estructuración de la nueva RAN, la implementación del modelo propuesto para el Core 5GC, y el aprovisionamiento y desarrollo de innumerables servicios que aprovechen la tecnología 5G.

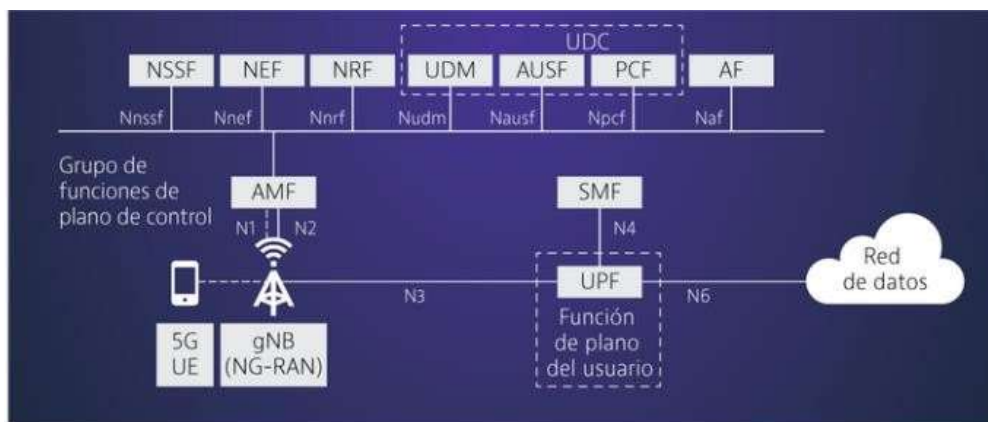
Arquitectura del Core en redes 5G

Uno de los grandes cambios que propone 5G es la estructura de su Core. Se fundamenta en una Arquitectura Basada en Servicios (SBA) que se articula completamente con la Nube, y en la cual se contemplan funciones como autenticación, gestión de sesiones, control de tráfico de dispositivos finales, seguridad, entre otros. Se tiene contemplado una mayor participación de NFV como funciones de software virtualizadas con la capacidad de ser integradas mediante la infraestructura MEC. (Viavi Solutions, 2021)

El Core de Paquetes Evolucionado o EPC usado en 4G es distinto a la propuesta de implementación para las redes 5G, debido en gran parte a la gran utilización de software nativo en la nube y la amplia utilización de NFV. Dentro de las novedades contempladas para 5G incluye la función de plano de usuario (UPF) que separa las funciones de plano de usuario y plano de control de paquetes, y la función de gestión de acceso y movilidad (AMF) que separa las funciones de gestión de sesiones de las tareas de gestión de conexiones y movilidad” (Viavi Solutions, 2021)

Figura 4

Nuevas funciones dentro de la arquitectura de Core 5G



Nota: Esquema de Arquitectura Core 5G. Figura tomada de (Viavi Solutions, 2021)

El proceso de implementación puede darse de manera gradual, realizando un acople con la red actual de 4G, donde pueden ser compartidas el Core y redes RAN existentes para LTE, con la añadidura de una portadora 5G en lo que se ha denominado modelo No Independiente o NSA.

En este escenario la E-UTRAN (RAN LTE) y la NR (RAN 5G) funcionan de manera complementaria. Los gNode B (5G) gestionan su tráfico de usuario directamente con el EPC (Core LTE) y el plano de control es gestionando mediante el eNode B (LTE) mediante la interfaz X2. (Mrozowski, 2020)

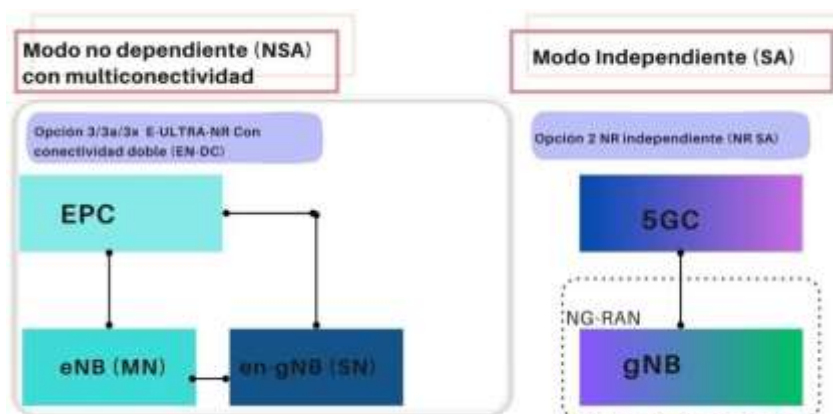
A pesar de compartir estructura con la red 4G existente, esta forma de implementación brinda los beneficios de 5G al ser desplegada en frecuencias de ondas milimétricas, lo que aumenta la velocidad y el ancho de banda entregado al usuario final. (Viavi Solutions, 2021)

En el modelo Independiente o SA se contempla una implementación total del Core de la red según las especificaciones requeridas por el nuevo estándar, incluyendo los componentes de

hardware y las nuevas funcionalidades de red. También abarca un despliegue independiente de RAN 5G o NG-RAN. Para el escenario SA la NR compuesta por los gNode B se conectan a un Core dedicado 5G denominado 5GC. Todo el tráfico de usuario y de señalización (o control) es gestionando directamente por los gNB. La interacción entre las redes 4G y 5G se presenta entre los núcleos de red (EPC y 5GC). (Mrozowski, 2020)

Figura 5

Opciones de implementación de arquitectura para redes 5G



Nota: Esquemas simplificados de Arquitecturas NSA y SA para redes 5G. Figura adaptada de (Viavi Solutions, 2021)

Dentro de la visión de las redes 5G se han planteado tres casos típicos de uso: “Banda Ancha mejorada (eMBB), las comunicaciones ultra confiables de baja latencia (uRLLC), y comunicaciones masivas de máquinas (mMTC)” (Mrozowski, 2020)

De estos casos, la configuración NSA solo soporta eMBB, lo cual refleja la importancia de ir integrando un Core dedicado 5G para poder habilitar todo el potencial de la nueva tecnología.

Arquitectura RAN en 5G

En su Release 15, 3GPP define los principios de la nueva red de Acceso o NG-RAN. Se plantea el NG-RAN como el conjunto de gNode B (nuevos nodos de acceso 5G) conectados al 5GC (o EPC) mediante la interfaz NG, la cual es muy similar a la interfaz S1 usada en LTE. Los gNB se pueden conectar con otros gNB mediante una interfaz Xn (similar a la interfaz X2 LTE). Los gNB se dividen entre una unidad central (gNB-CU) y una o más unidades distribuidas (gNB-DU). Estas unidades se conectan mediante la interfaz F1. (3rd Generation Partnership Project, 2019)

En su implementación más sencilla NG-RAN es muy similar a EUTRAN (RAN LTE), lo que facilita la implementación de NG-RAN en el modelo NSA (en conjunto con el EPC actual de LTE). NR fue diseñado para poder coexistir con RAN heredadas, en especial con LTE. Dentro de las funciones más relevantes de los gNB cabe resaltar:

La gestión de recursos de radio (control de portador, control de admisión, control de movilidad de conexión, asignación dinámica de recursos a los UE)

Selección de un AMF para el UE cuando no se pueda determinar el AMF predeterminado.

Encaminamiento de datos de usuario hacia UPF

Encaminamiento de datos de control hacia AMF

Configuración y liberación de las conexiones.

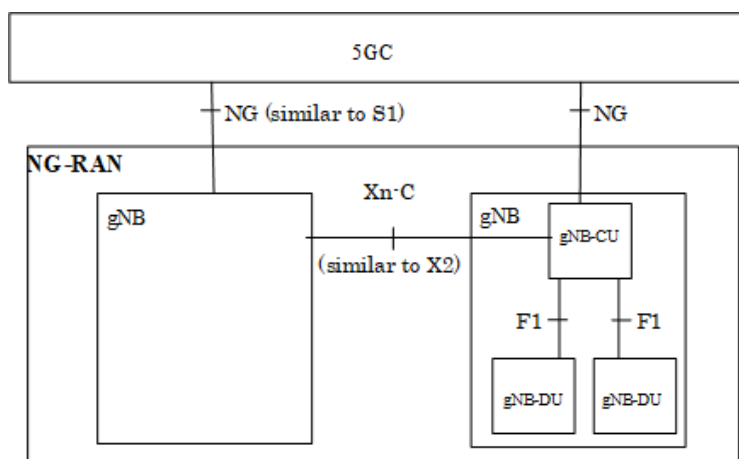
Gestión de sesiones

Uso compartido de la red de acceso por radio y conectividad dual

Funcionamiento entre NR y EUTRAN (3rd Generation Partnership Project, 2019)

Figura 6

Arquitectura general NG-RAN



Nota: Esquema simplificado de arquitectura propuesta de NG-RAN. Figura tomada de (3rd Generation Partnership Project, 2019)

El concepto de NFV es extendido hacia las redes RAN, por ejemplo, a través de la nueva organización de redes impulsadas por alianzas como O-RAN. “Esto conlleva mayor flexibilidad, nuevas interfaces abiertas y el desarrollo mancomunado bajo código abierto, para facilitar en último momento la implementación de nuevas características y tecnologías en desarrollo”.

“Uno de los objetivos es permitir la implementación de varios distribuidores con hardware completamente comercial para implementar una interoperabilidad mucho más sencilla y rápida. La nueva organización de la red permite que muchos de los componentes de esta se

puedan virtualizar” de tal manera que pueda ser posible mejorar y ampliar la experiencia del usuario en función de la capacidad.

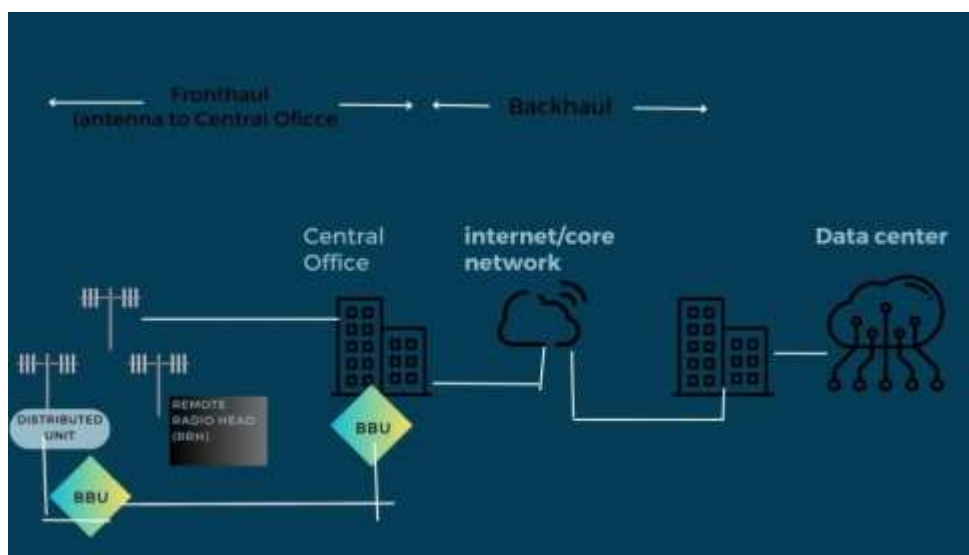
Dentro de “las ventajas de virtualizar los componentes de una red RAN” está la facilidad de un mejor aprovechamiento del hardware, en el caso de aplicaciones relacionadas con IoT, que tienden a tener millones de dispositivos, lo que se traduce en mayor carga de procesamiento requerido en la red. (Viavi Solutions, 2021)

Fronthaul y la interfaz eCPRI

El fronthaul es una conexión generalmente de fibra óptica implementada en las redes RAN, que conecta la BBU (Band Base Unit) con los RRH (Remote Radio Head) que son los que le brindan acceso a la red a los usuarios finales, como se puede ver en el siguiente gráfico:

Figura 7

Esquema de funcionamiento de FrontHaul

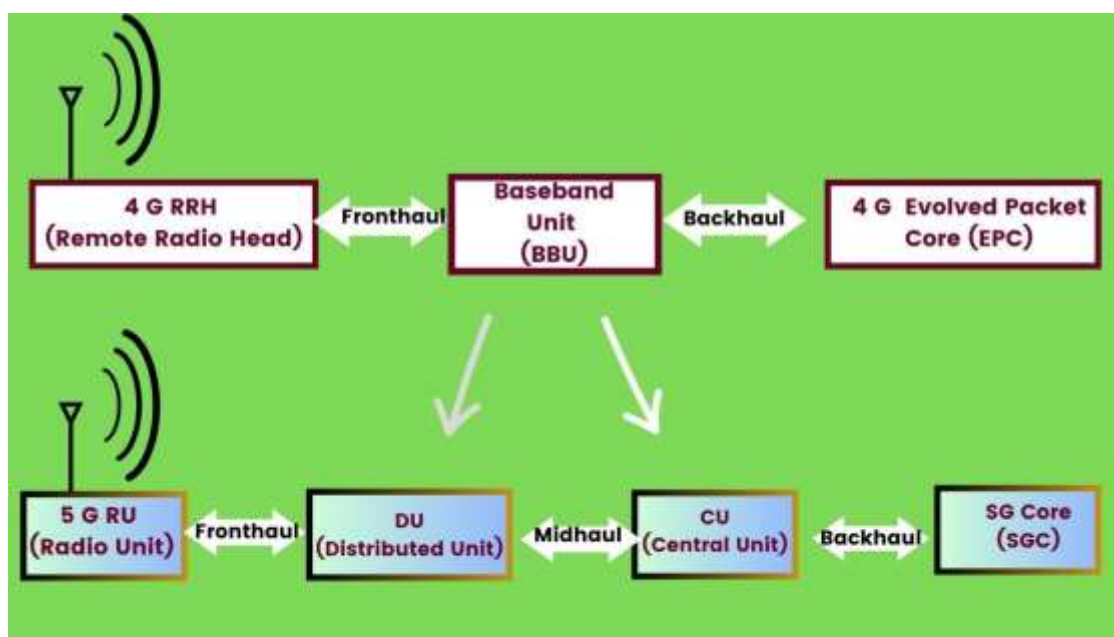


Nota: Esquema de funcionamiento de Fronthaul. Figura adaptada de (Viavi Solutions, 2021)

La evolución del Fronthaul mediante fibra óptica ha permitido separar físicamente las BBU de sus RRH, sin que esto signifique incrementos mayores en latencia o degradaciones de los datos, manteniendo un buen ancho de banda en la conexión.

Figura 8

Arquitectura de alto nivel 4G C-RAN vs. 5G C-RAN



Nota: Comparativa de Arquitecturas alto nivel 4G C-RAN vs. 5G C-RAN. Figura adaptada de (Viavi Solutions, 2021)

En 5G, las RU se conectan a las BBU (gNB) que a su vez pueden estar desagregadas y virtualizadas en sus componentes gNB-CU (Unidad Central) y gNB-DU (Unidad distribuida). Esta interfaz que conecta las DU con su CU se encuentra estandarizada por 3GPP como F1 y puede ser conocida como MidHaul. (Lavallée, 2020). Para el Fronthaul 5G se propone la

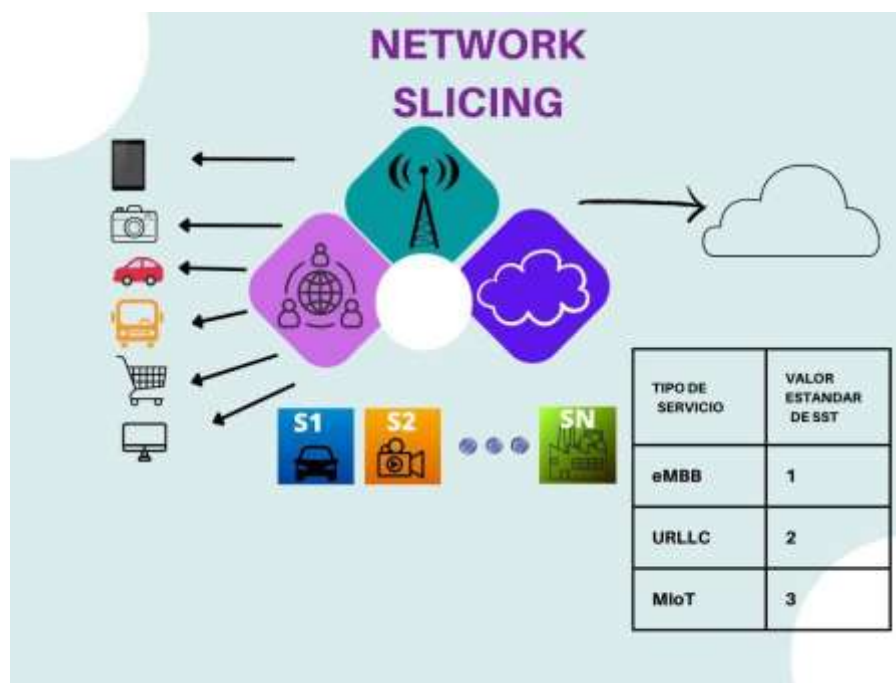
utilización de eCPRI, que es una interfaz que proporciona una conexión de alta velocidad entre las RRH (o RRU) y sus respectivas BBU, y además es capaz de utilizar algoritmos que pueden priorizar el tráfico y optimizar el rendimiento de la información que será transportada por la interfaz. (Viavi Solutions, 2021)

Segmentación de redes

La segmentación de redes 5G o Network Slicing es un cambio dentro del concepto tradicional de tener redes físicas y recursos dedicados para distintas aplicaciones o servicios. Network Slicing permite el funcionamiento de varias redes lógicas especializadas en diferentes tipos de servicios, dentro de un mismo hardware, mediante el aprovechamiento de NFV. (Gómez, 2021)

Dentro de la arquitectura propuesta, permite la creación de redes virtuales que pueden incluir funciones de red y almacenamiento. Esto habilita la posibilidad de dividir y enfocar los recursos disponibles en la red, creando perfiles específicos para cumplir con demandas puntuales (capacidad, latencia) según el tipo de usuarios. (Viavi Solutions, 2021)

Los recursos de capa física de acceso pueden ser divididas según el tipo de servicios y los paquetes clasificados según el tipo de servicio pueden seguir distintos caminos en la red, según se requiera. La clasificación se segmenta según los valores consignados dentro del NSSAI (Network Slicing Selection Assistance) que se compone de un SST (Slice Service Type) que precisa el tipo de servicio, y un SD (Slice Differentiator) que contiene información para realizar la selección precisa de Slices. Cada Slice suele tener un concepto lógico y especializarse en ciertos tipos de servicios. (Gómez, 2021)

Figura 9*Funcionamiento de Network Slicing*

Nota: Esquema básico de funcionamiento de Network Slicing. Figura adaptada de (Gómez, 2021)

Esta segmentación hace posible un óptimo aprovechamiento de los recursos disponibles en la red, garantizando satisfacer las necesidades puntuales de los distintos tipos de tráfico.

Beamforming

El Beamforming o conformación de haces consiste en “combinar la señal de varias antenas, con el objetivo de apuntar la señal en una dirección específica”. (Gómez, 2021) Esto se logra ajustando los desfases de cada antena de tal forma que se sumen a la señal de forma positiva. Esta suma se realiza en el aire de tal manera que el terminal del usuario no es capaz de

reconocer que se tratan de varias señales combinadas, y el terminal demodula la señal como si se tratase de una única señal.

La propuesta de conformación de haces presenta un gran avance respecto a tecnologías tradicionales, donde las Radio Bases transmiten señales sin poder tener un control preciso de las señales hacia los usuarios. Los inconvenientes propios de transmitir en altas frecuencias, tales como pérdidas por difracción, la poca penetración de muros y paredes, y las pérdidas de propagación del espacio libre son compensados con arreglos de antenas cada vez mayores y con la utilización eficiente de los haces de señales y un seguimiento más efectivo con los dispositivos finales.

Mediante el aprovechamiento de los arreglos masivos de antenas basados en Massive MIMO y Beamforming es posible determinar mediante algoritmos de procesamiento, la forma más eficaz de organizar las señales y poder establecer conexiones estables y de alta capacidad con los usuarios. La forma de trabajo conjunta de Massive MIMO y Beamforming es una de las grandes innovaciones de 5G.

Seguridad de la arquitectura 5G

Los cambios estructurales dentro de la arquitectura 5G, la flexibilidad en servicios o aplicaciones soportadas por la red, y la relevancia de funciones virtualizadas, Network Slicing entre otras conllevan a que 5G pueda ser vulnerable a ataques y otros tipos de amenazas.

Algunos de los puntos a ser considerados son:

Exposición a ataques por aumento de puntos potenciales de entrada.

Equipos y funciones sensibles a ataques.

Aumento de funciones de seguridad en entornos como Network Slicing.

Necesidad de actualizaciones constantes de software. (Franco, 2020)

Dentro de las características avanzadas de seguridad que propone 3GPP como estándar a ser implementado en 5G se encuentran “la autenticación unificada para separar la autenticación de los puntos de acceso, los protocolos de autenticación extensible para permitir transacciones seguras, las políticas de seguridad flexible para abordar más casos prácticos y los identificadores permanentes de suscriptores (SUPI) para garantizar la privacidad en la red” (Viavi Solutions, 2021)

Bandas de Frecuencia y Espectro 5G en Colombia

Para la correcta implementación y despliegue de 5G se requiere la regulación de una gran cantidad de espectro nuevo, que permite asegurar que los servicios cumplan con las expectativas y materializar el potencial completo del uso de esta tecnología. (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019)

Figura 10

Relación cobertura- Capacidad – Bandas de frecuencias 5G



Nota: Figura tomada de (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019)

La ANE ha identificado 7 bandas en las cuales se podría realizar el despliegue de 5G en Colombia. Estas bandas por considerar son las de 600 MHz (n71), 900 MHz (n8), 1400 MHz (n75, n76), AWS-3 (n66), 2300 MHz (n40), 3500 MHz (n77, n78), y las bandas mayores a 24 GHz (n257, n258, n260). En este aspecto la ANE ha venido trabajando de acuerdo con las recomendaciones de la UIT y ha tenido en cuenta diversos aspectos de armonización

internacional, para aplicar las mejores decisiones en cuanto a la posible asignación del espectro para 5G. (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

Bandas bajas (Por debajo de 1 GHz)

Se estima que el espectro inferior a 1 GHz sea utilizado para ampliar la cobertura de 5G a zonas urbanas, suburbanas y rurales y poder ser sustento del IoT, se tiene contemplado que sea una de las utilidades del despliegue de la nueva tecnología. Esta banda permitirá garantizar el acceso a 5G más allá de los centros urbanos (densamente poblados) y también dentro de los edificios. (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019)

Banda 600 MHz (614 – 698 MHz)

En Colombia la banda de 600 MHz según el CNABF puede ser usada en servicios de Radiodifusión (TV Abierta) y para telefonía móvil. Sin embargo, en la actualidad solamente está siendo usada por estaciones de televisión, tanto en versión analógica (próxima a finalizar) como en versión digital. Respecto al “apagón analógico” que sucederá a más tardar a finales de 2022, la ANE viene considerando departamentos o regiones (como la Orinoquía o Amazonía) en las cuales existirá disponibilidad completa de la banda de 600 MHz (debido a que en estas regiones no se tiene prevista la radiodifusión digital en esta banda), lo que significa que en muchos departamentos esta banda puede estar disponible para el uso de la telefonía móvil.

Esta banda conocida como n71 para 5G, es considerada por su potencial en cobertura para áreas urbanas y rurales. Se tiene previsto su operación en modo FDD (Frequency Division Duplex), trabajando el enlace ascendente en el rango de 663 – 698 MHz y el enlace descendente

en el rango de 617 – 652 MHz. Por el momento en la región América ya se tiene registro de despliegue de 5G por parte de los operadores móviles en USA y Canadá.

Banda 900 MHz (880 – 915 / 925 – 960 MHz)

La banda de 900 MHz a nivel mundial ha tenido una canalización FDD con enlace ascendente entre los 880 y los 915 MHz y el enlace descendente entre los 925 y los 960 MHz. Esta banda ha sido una de las más usadas a nivel mundial para IMT, teniendo en cuenta los despliegues iniciales de 2G y 3G. Sin embargo, en la región 2 (América) no ha tenido un uso generalizado, esto debido a que los despliegues iniciales de telefonía móvil en América fueron llevados a cabo en su mayoría en la banda de 850 MHz.

Para el caso de Colombia el rango de frecuencias identificado para IMT es de 894 – 905 MHz para el enlace ascendente, y 939 – 950 MHz para el enlace descendente, lo que daría un total de 22 MHz disponibles en esta banda. La diferencia puntual en el rango de frecuencias para Colombia obedece a que el enlace descendente de la banda de 850 MHz (860 – 894 MHz) se solapan con los primeros 14 MHz de la banda de 900 MHz. También hay que considerar, que de los 11 MHz disponibles en el enlace ascendente (894 – 905 MHz) debe ser descontando una banda de guarda que permita la operación adecuada de las bandas 850 MHz y 900 MHz. Todo esto genera que la ANE tenga pendientes distintos estudios respecto a la posible asignación de espectro para 5G en esta banda, y que, por ende, no tenga planeado una asignación o subasta inmediata en esta banda en Colombia.

Bandas medias (Entre 1 a 6 GHz)

El espectro comprendido entre 1 GHz a 6 GHz permite una combinación equilibrada entre cobertura y capacidad para el aprovisionamiento de servicios 5G; dentro de este espectro existe a nivel mundial una buena cantidad de bandas disponibles para ser implementada en una primera ola de implementación de 5G. Cabe resaltar el rango entre 3,3 GHz – 3,8 GHz como base para el aprovisionamiento de servicio; en el rango puntual de 3,4- 3,6 GHz es dónde mayor coincidencia se tiene a nivel mundial para ser de las primeras bandas en producción comercial de la tecnología 5G.

También existen rangos de frecuencia dentro de este espectro en donde funcionan servicios 3G y 4G que pueden ser redistribuidos según lo demande la necesidad en la implementación de la nueva tecnología.

Banda L (1427 – 1518 MHz)

La utilización y asignación de la banda L para IMT tiene un interesante desafío a nivel mundial, debido a que en su adyacencia inferior (1400 – 1427 MHz) opera el servicio de Exploración de la tierra por satélite (pasivo) y en su adyacencia superior (1518 – 1525 MHz) opera el servicio Móvil por satélite (espacio - Tierra), lo que conlleva una serie de consideraciones para evitar las interferencias y garantizar la coexistencia de estos servicios con las redes IMT. Debido a que en muchos países aún no se llevan a cabo los estudios o disposiciones para la armonización correcta de la banda L, en LTE sólo se tienen algunos despliegues en la sub-banda 1452 – 1496 MHz, y por el momento no se tienen anuncios de fabricación de dispositivos 5G para esta banda de frecuencias. (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

En el caso específico de Colombia según el Sistema de gestión del espectro “la banda L está siendo utilizada por enlace microondas, aunque con una ocupación muy baja ya que la mayoría de los enlaces microondas están en plan de transición o han migrado a bandas superiores con mayor ancho de banda” (Agencia Nacional del Espectro, 2020). Debido a que existen equipos LTE con capacidad de operar en banda L de modo PMR (Private Mobile Radio) la ANE considera esta banda L como opción para operar como red privada de banda ancha.

Banda AWS-3 (1755 – 1780 / 2155 - 2180 MHz)

También conocida como banda AWS extendida, esta banda es adyacente a la AWS-1 (1710 – 1755 / 2110 - 2155 MHz). La banda AWS-3 sólo presenta uso en la región 2 (América) debido a que se sobrepone con la banda de 2GHz usada en las otras regiones.

En el caso concreto de Colombia esta banda venía siendo ocupada por algunos enlaces Fijos, los cuales operaron hasta su fecha de vencimiento el 31 de diciembre de 2020, y hay completa disponibilidad para las IMT a partir del 1 de enero de 2021. Un aspecto a tener en cuenta en esta banda es su posible sobreposición con la telefonía móvil satelital, que según el más reciente CNABF podría presentarse interferencias con el enlace descendente en el rango de 2170 – 21780 MHz. Sin embargo, a la fecha no se tiene documentado el interés de la industria por desplegar telefonía móvil satelital en estas frecuencias.

Banda 2300 MHz (2300 – 2400 MHz)

Según la recomendación de la UIT, esta banda se encuentra canalizada para poder operar en el modo TDD (Time Division Duplex). Cuenta con amplia utilización en la región 3 (Asia y Oceanía). Para la región 2 (América) en la mayoría de los países ha sido reservada para IMT y se

encuentra en proceso de estudio o adjudicación de espectro para servicios móviles. En materia del ecosistema de dispositivos para esta banda se encuentra un alto desarrollo de terminales LTE, y por el contrario por el momento un bajo desarrollo para dispositivos 5G.

En Colombia la banda ya se encuentra atribuida al servicio IMT, pero no han sido llevado a cabo los estudios de convivencia, en especial con la banda adyacente de 2400 MHz la cual es ampliamente usada por dispositivos de uso libre como los dispositivos Bluetooth o Wi-Fi.

Banda 3500 MHz (3300 – 3800 MHz)

Esta banda tiene una diversidad de servicios permitidos a nivel mundial, y a su vez es una de las mejores opciones que se han planteado para realizar el despliegue de 5G, esto debido a su conveniente armonización internacional y la posibilidad de tener bloques de frecuencias contiguos y amplios para que sean aprovechados por los operadores de telefonía móvil.

Se estima que sea necesario un ancho de banda entre 80 y 100 MHz para que los operadores puedan realizar el despliegue adecuado en esta banda. Adicional a esto, la cercanía de esta banda con las ya previamente asignadas a los operadores permite que estos puedan hacer uso de técnicas como Beamforming y massive MIMO, y también puedan hacer reuso de la tecnología ya previamente instalada.

A nivel internacional se tiene noticia de los primeros despliegues comerciales de 5G en el rango de 3400 – 3800 MHz, como en el caso de Corea del sur y algunos países en Europa. Para el caso de la región 2 (América) se tiene previsto un uso mayoritario entre los 3300 – 3700 MHz. Debido a la disparidad en el uso de esta banda, la industria de las telecomunicaciones se prepara para ofrecer soluciones de tipo “tuning range” que permitan sintonizar los equipos de telecomunicaciones según las necesidades puntuales en cada país o región. En cuanto al

ecosistema 5G, es en esta banda que más dispositivos han sido lanzados y ya se encuentran operando en distintas partes del mundo, algunos en el rango completo de 3300 – 4200 MHz (bandas n77, n78)

En Colombia, según el CNABF el rango de 3300 – 3400 MHz se encuentra atribuido al servicio móvil y radiolocalización. El rango de 3400 – 3600 MHz se encuentra atribuido a los servicios móviles y fijo. Por último, el rango comprendido entre los 3700 y 4200 MHz se encuentra atribuido “a los servicios móvil, fijo y fijo por satélite. Bajo esta última atribución funciona el enlace descendente banda C satelital, en el cual operan proveedores de capacidad satelital asociados a sistemas de televisión únicamente de recepción (TVRO).” (Agencia Nacional del Espectro, 2020). Teniendo en cuenta estas consideraciones, y las previamente analizadas para el correcto desempeño en la banda 3500 MHz, como los amplios bloques continuos de espectro y un modo TDD, para Colombia la ANE sugiere el uso de canalización F3 (TDD) en el rango completo de 3300 – 3700 MHz usando bloques de 80 MHz a 100 MHz.

Bandas altas (Por encima de 6 GHz)

El espectro superior a los 6 GHz es vital para poder aprovechar la alta velocidad proyectada en la tecnología 5G. A nivel mundial se ha llegado al consenso de que estas frecuencias altas son la clave para poder proveer a los usuarios finales una gran velocidad de transmisión. Sin esta implementación en altas frecuencias 5G no podrá prestar velocidades mayores a las actuales registradas en la tecnología 4G, y tampoco será capaz de permitir el aumento de conexiones y tráfico móvil proyectado en la evolución de las telecomunicaciones.

Aún deben ser acordadas las bandas de frecuencias para servicios móviles, ya que se encuentran a disposición numerosos bloques de frecuencia en las cuales pueda ser implementada y desplegada 5G.

Banda 26 GHz (24.25 – 27.5 GHz)

Este rango de frecuencias mayores a 24 GHz son conocidas como bandas milimétricas o “mmWave” para 5G. Dentro de las capacidades que pueden ofrecer en el NR cabe destacar la alta velocidad (latencias cercanas a 1 ms), así como banda ancha mejorada y comunicaciones ultra confiables. Para Europa se ha considerado la banda 26 GHz (24.25 – 27.5 GHz) como una de las bandas pioneras para el despliegue de 5G siendo asignados bloques amplios de espectro, por ejemplo, hasta 1 GHz por operador. (Agencia Nacional del Espectro, 2020).

Lastimosamente aún no se tienen muchos anuncios de dispositivos para esta banda también conocida como n258.

En el caso concreto de Colombia, la banda 26 GHz tiene diversas atribuciones, dentro de las más usadas son el servicio fijo teniendo asignaciones de enlaces microondas, principalmente en las zonas urbanas. La ANE teniendo en cuenta “el comportamiento de ecosistema de equipos 5G, no considera necesario un plan de migración en esta banda de frecuencias antes de la fecha máxima de la vigencia de estos permisos y propone la reserva de la banda para las IMT a partir del 12 de junio de 2027” (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

Estado de Asignación de Espectro para Servicios IMT en Colombia

Como lo reconoce el MinTIC: “En Colombia la asignación de permisos de uso del espectro radioeléctrico no ha sido uniforme ni a lo largo del tiempo, ni para las diferentes bandas de frecuencia”; (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020) Esto ha ocasionado retrasos e ineficiencia en el acceso al espectro y por consiguiente en la cobertura y provisión de servicios móviles a los habitantes del país. El MinTIC da como ejemplo dos situaciones respecto a la asignación de permisos para el uso del espectro: “(i) en las bandas usadas para el servicio móvil, hoy denominadas bandas IMT pasaron más de 25 años para que se diera una asignación de permisos de uso en las bandas bajas, es decir, las que se encuentran en el rango de 698 MHz – 960 MHz; (ii) en las bandas altas, es decir las que se encuentran en el rango de 1710 MHz – 2690 MHz, han pasado hasta 6 años entre una asignación y la siguiente”; (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020)

Resumen Histórico de Asignación del Espectro en Colombia

En la historia de las telecomunicaciones en Colombia se pueden diferenciar tres momentos destacables en la asignación de permisos de uso del espectro para servicios IMT: “el primero dado por la expedición de los permisos de uso del espectro antes de la Ley 1341 de 2009, el segundo, en vigor de la Ley 1341 de 2009 y, el último, a partir de la entrada en vigor de la Ley 1978 de 2019.” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020)

Inicialmente, bajo la ley 37 de 1993 fueron adjudicados mediante concesiones regionales 25 MHz de espectro en la banda 850. De esta manera iniciaron sus labores 6 operadores

regionales de telefonía celular. “Posteriormente, estos se consolidaron en dos operadores a los que, entre el último trimestre de 2004 y el primer trimestre de 2005, se les otorgaron permisos de uso de 30 MHz adicionales, 15 MHz a cada uno, en la banda de 1900 MHz.” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020). Luego en 2003 fue adjudicado el contrato de concesión al operador que actualmente se conoce como “TIGO” y fueron otorgados 30 MHz en la banda de 1900 MHz. En 2008 le fue asignado el uso de 10 MHz adicionales también en la banda de 1900 para completar 40 MHz en esta banda.

A partir de 2009 el MinTIC inició el proceso de adjudicación de espectro radioeléctrico bajo la Ley 1341 de 2009, por la cual se establecen “procesos de selección objetiva con pluralidad de interesados y, excepcionalmente, se asigna de manera directa en los casos contemplados en la misma Ley” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020). En diciembre de 2009 le fueron otorgados 10 MHz de espectro a “CLARO”, y en abril de 2010 le fueron otorgados 10 MHz de espectro a TIGO, ambos en la banda de 1900 MHz. En junio de 2010 se realizó un proceso de selección mediante subasta en la que participaron los operadores “UNE” y “DIRECTV” siendo ganador el operador UNE con 50 MHz en la banda de 2500 MHz.

Para agosto de 2011 se realizó un nuevo proceso de selección mediante subasta para asignación de permisos en la banda de 1900 MHz, en este caso participaron los operadores TIGO, CLARO y MOVISTAR “obteniendo 5 MHz, 5 MHz y 15 MHz respectivamente” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020). Luego en junio de 2013 los operadores MOVISTAR, ETB-TIGO y AVANTEL resultaron adjudicatarios de 30 MHz cada uno en la banda AWS (1700 MHz – 2100 MHz). En esta misma subasta los operadores CLARO y DIRECTV obtuvieron 30 MHz y 70 MHz en la banda de 2500 MHz

respectivamente. Debido a la fusión de los operadores TIGO-UNE estas empresas superaban los topes permitidos, razón por la cual realizaron devolución de 50 MHz en la banda 2500 que se encontraban adjudicados al operador UNE.

El Gobierno colombiano en 2019 realizó la subasta del Espectro Radioeléctrico de la banda de 700 MHz, junto con el espectro que aún no se había asignado en las bandas de 2500 MHz y 1900 MHz. En este proceso participaron cuatro proveedores de telecomunicaciones, “tres de ellos ya existentes en el mercado (Claro, Movistar y Tigo), y un nuevo entrante al mercado (WOM), de los cuales tres resultaron adjudicatarios.” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019)

Dentro de los compromisos adquiridos en la subasta, los tres operadores adjudicatarios en la banda de 700 MHz se comprometen a tener cobertura 4G en 3658 nuevas localidades en el país. Según el MinTIC el resumen del espectro subastado fue:

Banda 700 MHz: 80 MHz. (Sobraron 10 MHz)

Banda 2.500 MHz: 60 MHz. (Totalidad de lo subastado)

Banda 1.900 MHz: No recibió ofertas.

El espectro adjudicado por operador en esta subasta fue:

“Comunicación Celular S.A., (Claro): 20 MHz en la banda de 700 MHz, y 30 MHz en la banda de 2.500 MHz.

Colombia Móvil (Tigo): 40 MHz en la banda de 700 MHz. (Este operador no podía pujar por la banda de 2.500 MHz por topes).

Colombia Telecomunicaciones (Telefónica): No fue adjudicatario de ninguna banda.

Partners(Wom): 20 MHz en la banda de 700 MHz, y 20 MHz en la banda de 2.500 MHz.” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2019)

La siguiente Tabla resume el estado de asignación del Espectro por parte de los operadores móviles por el método de Subasta (desde 2011).

Tabla 1

Asignación del Espectro a operadores móviles por el método de Subasta

	Frecuencias			Asignatarios	
	Upload (MHz)	Download (MHz)	Cantidad de espectro (MHz)	Operador	Año Asignación
Banda A – Baja	1850 – 1852,5*	1930 – 1932,5**	5	TIGO	2011
Banda A – Alta	1852,5 – 1855	1932,5 – 1935	5	CLARO	2011
Banda D – Baja	1865 – 1867,5	1945 – 1947,5	5	No Asignado	2011
Banda D - Alta	1867,5 – 1870	1947,5 – 1950	5	MOVISTAR	2011
Banda E -Baja	1885 – 1887,5****	1965 – 1967,5*****	5	MOVISTAR	2011
Banda E – Alta	1887,5 – 1890*****	1967,5 – 1970*****	5	MOVISTAR	2011
a – AWS	1710 – 1725	2110 – 2125	30	AVANTEL	2013
b – AWS	1725 – 1740	2125 – 2140	30	MOVISTAR	2013
c – AWS	1740 – 1755	2140 – 2155	30	TIGO - ETB	2013
2500 MHz	2525 – 2540	2645 – 2660	30	CLARO	2013
2500 MHz	2555 – 2570	2675 – 2690	30	DIRECTV	2013
2500 MHz	2575 -2615		40	DIRECTV	2013
700 Mhz	703 – 713	758 – 768	20	TIGO	2019
700 Mhz	713 – 723	768 – 778	20	TIGO	2019
700 Mhz	723 – 733	778 – 788	20	WOM	2019

700 Mhz	733 – 743	788 – 798	20	CLARO	2019
2500 MHz	2515 – 2520	2635 – 2640	10	WOM	2019
2500 MHz	2520 – 2525	2640 – 2645	10	WOM	2019
2500 MHz	2540 – 2545	2660 – 2665	10	CLARO	2019
2500 MHz	2545 – 2550	2665 – 2570	10	CLARO	2019
2500 MHz	2550 - 2555	2570 – 2575	10	CLARO	2019

Nota 1: Tabla resumen de la asignación del espectro a operadores móviles por el método de Subasta en Colombia. Tabla realizada con información de (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020)

Nota 2: Sobre los rangos de frecuencia entre 2017 y 2018 fueron realizadas modificaciones al espectro asignado, con los siguientes cambios:

- * 1887,5 – 1890 MHz
- ** 1967,5 – 1970 MHz
- *** 1877,5 – 1880 MHz
- **** 1957,5 – 1960 MHz
- ***** 1880 – 1882,5 MHz
- ***** 1960 – 1962,5 MHz

La ANE y la Asignación del Espectro para 5G

Luego de la revisión de las mejores prácticas sugeridas por organismos internacionales como la OCDE, la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) y el BID (Banco Interamericano de Desarrollo), la ANE toma los elementos más relevantes para la formulación de la Política Pública de Espectro 2020-2024. Dentro de estos elementos cabe destacar: La

“maximización del bienestar social generado con el uso del espectro”, la “implementación de mecanismos flexibles para el uso del espectro”, la “adopción de una aproximación de mercado en la toma de decisiones de gestión del espectro” y finalmente un “enfoque de transformación digital integral para la gestión del espectro” (Agencia Nacional del Espectro, 2020).

Para alcanzar estos lineamientos, la ANE consideró también las herramientas usadas en otros modelos de gestión de espectro a nivel Internacional. Cabe destacar:

1. Planeación a Largo Plazo.
2. Contar con un inventario de usos y usuarios del espectro
3. Simplificar el marco normativo y regulatorio asociado a la gestión del espectro.
4. Facilitar la participación de múltiples agentes a través de procesos abiertos de consulta pública.
5. Adoptar indicadores de uso del espectro

Como previamente se mencionó, las dificultades en la asignación de espectro han retrasado en Colombia el acceso a las tecnologías para las poblaciones más recónditas. El MinTIC registra que en 2020 para “8,2 millones de usuarios la máxima tecnología disponible es 3G” y “1,3 millones de usuarios usen una tecnología de conexión a Internet móvil 2G” Por este motivo, dentro del proceso de selección objetiva el MinTIC comprometió a los operadores “donde ya tuvieran algún tipo de conectividad a mejorar la tecnología de conexión a Internet y facilitar el acceso en las zonas rurales.” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2020)

Recientemente la ANE adelantó acciones enfocada a preparar bandas que ya han sido previamente identificadas para las IMT. Dentro de las principales acciones cabe resaltar que “se realizó la reserva de 100 MHz de espectro para IMT en la banda de 2300 a 2400 MHz, de 400

MHz para IMT en la banda de 3300 a 3700 MHz, de 91 MHz para IMT en la banda de 1427 a 1518 MHz y la atribución e identificación de 84 MHz de espectro en la banda de 614 a 698 MHz.” (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

Figura 11

Resumen lineamientos de política y mejores prácticas internacionales en gestión de Espectro

		OECD	ITU	BID	Reino Unido	Australia	Estados Unidos	Reino Unido	México
OBJETIVO	Maximización del bienestar social	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Modelos flexibles de gestión	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Aproximación de mercado: efecto en la competencia	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Enfoque de transformación digital	5G	5G	5G	✓	5G	5G	5G	5G
HERRAMIENTAS	Planeación a largo plazo	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Inventario de espectro y automatización	✓	✓		✓		✓		✓
	Simplificación regulatoria		✓	✓	✓	✓			
	Participación de múltiples agentes (otros sectores)	✓			✓	✓	✓		✓
	Indicadores de uso	✓	✓	✓	✓		✓		

Nota: Figura tomada de (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

Respecto a los ecosistemas de los equipos 5G, se tiene previsto que “cerca de dos tercios de los dispositivos anunciados en 5G operen en bandas inferiores a los 6 GHz, y cerca de un tercio soporte el espectro de las ondas milimétricas (por encima de 24 GHz)” (Agencia Nacional del Espectro, 2020). Dentro de las bandas más conocidas que soportarán los dispositivos 5G se encuentran las bandas n77 (3300 – 4200 MHz), n78 (3300 – 3800 MHz), n41 (2496 – 2690

MHz), y n79 (4400 – 5000 MHz), lo que refuerza la habilitación de la banda 3500 MHz como parte indispensable dentro del despliegue de esta tecnología en el país.

Por este motivo, la ANE enfoca sus esfuerzos en la identificación y gestión prioritaria de bandas en el rango bajo y medio del espectro, mientras las bandas altas o milimétricas las tiene contempladas en el largo plazo, luego de que se cumplan condiciones de evolución de la tecnología tales como “fortalecimiento de 4G en el país, masificación de casos de uso de 5G a nivel mundial, madurez en el ecosistema de equipos y terminales 5G, y una identificación de necesidad clara de aplicaciones y usuarios de estas bandas de frecuencias” (Agencia Nacional del Espectro, 2021)

En cuanto a las pruebas piloto de 5G en Colombia, el MinTIC “expidió las Resoluciones 467 y 468 de 2020 a través de las cuales fijaron las condiciones para la asignación de permisos temporales de uso de espectro para la realización de pruebas técnicas”, así como se han otorgado “siete permisos de uso del espectro para la realización de pruebas piloto en la banda 3,5 MHz.” (Agencia Nacional del Espectro, 2020)

En América Latina, Chile en 2021 realizó subasta del espectro para las bandas de 700 Mhz, 3.5 Ghz y 26 Ghz siendo otorgadas licencias a 3 operadores móviles en los cuales se ha iniciado el despliegue comercial de 5G. Para Brasil y República Dominicana se han anunciado los procesos de asignación de múltiples bandas, dentro de estas 700 MHz y 3.5 GHz. (Agencia Nacional del Espectro, 2021)

Con información de La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) (De León, 2023) el desarrollo de 5G en Latinoamérica avanza de manera dispareja. En algunos países ya se encuentra en despliegue y operación comercial la red 5G, en contraste con países

como Colombia en dónde aún no se ha realizado la subasta y asignación del espectro. Se presenta un cuadro comparativo de la situación del despliegue de 5G en América Latina.

Tabla 2

Estado de Despliegue de 5G en Latinoamérica

País	Asignación de Espectro 5G	Implementación de 5G
Argentina	Atribución de bandas Medias y Altas. 2021 Pendiente Subasta de Espectro	Pruebas demostrativas localizadas en principales ciudades
Brasil	Asignación de bandas Bajas, Medias y Altas. 2021 Subasta realizada en 2021	En despliegue según cronograma previsto en Subasta.
Colombia	Identificación de Bandas Bajas, Medias y Altas. 2020 Subasta prevista según ANE para 2024	Pruebas Piloto en principales ciudades en Banda 3500 MHz
Costa Rica	Planeación e Identificación Bandas Bajas, Medias y Altas.	En reorganización y planeación de proceso de Subasta.
Chile	Asignación de bandas Bajas, Medias y Altas. 2021 Subasta realizada en 2021	Operadores en despliegue de red comercial en todo el país.
Ecuador	Identificación de Bandas Bajas y Medias. 2019. Bandas Altas actualizadas en 2022. En medidas pro-inversión previo a proceso de Asignación.	Pruebas piloto en 2021. En despliegue de sitios en Guayaquil y Manta por un proveedor.
México	Asignación de Bandas Bajas y Medias. Licitación en 2022	Operadores en despliegue de red comercial en todo el país.

Perú	Autorización en Bandas Medias previamente asignadas 2021. Reserva de Bandas Altas 2021.	Operadores en despliegue de red comercial en todo el país.
------	---	---

Nota 1: Tabla resumen de Estado de despliegue de 5G en Latinoamérica. Tabla realizada con información de (De León, 2023)

Consideraciones técnicas del despliegue de 5G en Colombia

En términos generales, el despliegue de redes comerciales 5G demanda ciertos requisitos previos a considerarse antes de poder realizar una implementación masiva de las redes de cobertura.

Políticas y Estrategias Públicas

El primer ítem para considerar es la definición de políticas y estrategias de orden nacional, que permitan la articulación de esfuerzos de los distintos sectores. Este aspecto es básico, ya que permite identificar los sectores que tendrían beneficios directos e indirectos, facilitará el apropiado aprovechamiento de los nuevos recursos tecnológicos, así como evita que iniciativas de algunos sectores no se encuentren completamente coordinadas con las directivas y referencias adoptadas por el país.

Tener políticas públicas bien definidas permite a distintos sectores productivos aprovechar entre otras cosas el potencial del Internet de las cosas (IoT) en grandes ciudades donde existe una infraestructura de telecomunicaciones robusta, y también en zonas rurales apartadas de los centros urbanos, para los cuales estimular el desarrollo tecnológico cobra una mayor importancia. Realizar el despliegue a zonas menos pobladas representa un gran desafío para la industria de las telecomunicaciones y para llevarlo a cabo es importante una adecuada articulación entre distintos sectores productivos privados y públicos, debido a que en términos generales el despliegue de infraestructura en zonas muy apartadas representa un alto costo lo que ralentiza el tiempo de recuperación de la inversión.

Liberación y Asignación de Espectro Radioeléctrico

El segundo aspecto es la liberación de las bandas de frecuencia para 5G. Es fundamental el papel que viene desarrollando la ANE respecto a la planeación y gestión del espectro en pro de garantizar una adecuada y eficiente asignación de los recursos base (como lo es el espectro radioeléctrico) para el adecuado funcionamiento de las redes 5G en Colombia. “La atribución de nuevas bandas al servicio móvil, así como la identificación de nuevas bandas para IMT siguen procesos armonizados a nivel regional y global, lo que hace necesaria la participación de Colombia en las reuniones de trabajo de la CITELE y la UIT” (Agencia Nacional del Espectro, 2019) y de esta manera aprovechar las ventajas de una armonización y escalabilidad a nivel internacional.

Muy ligado al punto anterior se encuentra la asignación oportuna del espectro. Como lo recalca la ANE: “no basta con tener las bandas de frecuencia disponibles, el recurso debe ser entregado a los prestadores de servicios, para que estos puedan desarrollo del negocio” (Agencia Nacional del Espectro, 2019) En este aspecto Colombia ha tenido varios inconvenientes, siendo uno de los principales el aplazamiento de la Subasta del espectro que se tenía prevista para finales de 2021, y que por dificultades internas del MinTIC no se ha llevado a cabo. Respecto a este inconveniente, directivos de los operadores móviles, como es el caso de Juan Carlos Archila, presidente de América Móvil Colombia (casa matriz de Claro) reseña: “ya que en el país no se llevó a cabo la subasta de espectro de la banda de 3.500 MHz que se tenía planeada. lo que está pasando es que nos vamos a retrasar.” (Portafolio.co, 2022).

Otro aspecto vinculado a la asignación del espectro es su alto costo. Según Jorge Negrete, presidente de Digital Policy & Law comentó en entrevista con el portal económico Bloomberg Línea, “Colombia tiene los segundos precios de espectro radioeléctrico más caros de América

Latina, el Arpu (ingreso promedio por usuario) más bajo de la región y el mayor número de operadores compitiendo” (Salazar, 2021) lo que se traduce en un aspecto realmente poco atractivo al momento de realizar las inversiones necesarias para un despliegue de las redes de quinta generación en el país.

Redes de Backhaul de Alta Capacidad

El despliegue comercial de redes 5G aparte de los ya expuestos temas de asignación de frecuencias, también requiere la existencia de redes backhaul con alta capacidad que permita tener grandes velocidades con baja latencia y una conectividad robusta. En este sentido uno de los pilares es el despliegue y utilización de redes de fibra óptica y como lo señala la organización 5G Américas: “El tendido de esta tecnología tiene una correlación con la mayor densidad poblacional, la mayor cantidad de tendido de fibra óptica coincide con las ciudades más pobladas” (5G Américas, 2020) Para intentar reducir esta brecha el MinTic ha avanzado considerablemente luego de la implementación de distintas normativas de orden nacional, como el caso del Plan Nacional de Fibra Óptica de 2011. Según información del MinTic el PNFO “cuenta con 19.000 Km de fibra óptica que conecta a la cabecera de 786 municipios” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones, 2018) sin embargo, aún hay trabajo pendiente para lograr una conectividad completa de fibra óptica de las zonas rurales y más alejadas de los centros urbanos, en especial en aquellas zonas cuya topografía y grandes distancias representan mayores desafíos.

Las redes de backhaul también pueden ser constituidas por enlaces fijos (microondas) por lo cual es importante considerar la disponibilidad de frecuencias y los mecanismos de asignación que ha venido mejorando la ANE como ente regulador del espectro. En algunas zonas

geográficas la opción más viable para fortalecer las redes de backhaul es tener una red de enlaces microondas de alta capacidad, combinadas con las redes de fibra óptica.

Según la ANE, en el despliegue inicial de 5G esta red tendrá “más vocación de complemento que de sustituta de las tecnologías de cuarta generación (4G), motivo por el cual esta red seguirá ampliando su cobertura, especialmente en zonas rurales.” (Agencia Nacional del Espectro, 2019) Esto implica en términos generales una mayor carga sobre las redes backhaul ya existentes, debido a la expansión de las 4G, sumado a las altas exigencias que requiere la red 5G. Para los operadores móviles significa un gran desafío debido a que para que el usuario final pueda aprovechar al máximo las bondades de la nueva tecnología, es indispensable que la red completa (incluyendo el backhaul y el core) soporte las mejoras en velocidades y latencias.

Protección Ambiental y Preservación Urbana

Un tema para considerar en el desarrollo de las redes móviles en Colombia son las barreras que algunas autoridades territoriales han impuesto al despliegue de infraestructura. Este es un tema muy sensible, ya que el éxito de 5G depende en una gran medida de poder implementar una gran cantidad de antenas que permitan ofrecer a los usuarios la calidad y cobertura esperadas. Sin embargo, la implementación de esta infraestructura se hace aún más complicada en zonas urbanísticas especiales como los centros históricos u otros que requieren preservar una apariencia estética determinada, así como en zonas de reserva ambiental y ecológica.

Este dilema debe resolverse atendiendo las necesidades de ofrecer cobertura y conectividad a las comunidades manteniendo especial consideración con el entorno natural en el que se instala la infraestructura. En este ítem la ANE, la CRC y el MinTIC “han desarrollado

estrategias para identificar y remover barreras de despliegue” (Agencia Nacional del Espectro, 2019) como promover la implementación de dispositivos tales como microceldas y picoceldas que por sus características no implican grandes impactos en su entorno.

Emisiones de RNI

En cuanto a las emisiones de radiación no ionizante (RNI) Colombia ha adoptado los límites recomendados por el International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICINIRP) y la Organización Mundial de la Salud (OMS). Los operadores de telecomunicaciones realizan los cálculos y mediciones para que toda la infraestructura desplegada cumpla con los estándares previamente aprobados.

Uno de los puntos más sensibles en los que se debe trabajar por parte de los operadores y los gobiernos locales es en combatir la desinformación que se ha presentado recientemente en torno al desarrollo y despliegue de la tecnología móvil 5G. Presentar a las comunidades los resultados de las mediciones, así como los beneficios que conlleva permite una mayor aceptación de los despliegues de infraestructura en muchas localidades que erróneamente han presentado iniciativas que retardan o complican la instalación de antenas móviles. El MinTIC, en conjunto con la ANE y la CRC ha promovido “actividades de divulgación y capacitación a los entes territoriales y a la ciudadanía en general, en temas relacionados con el funcionamiento de las tecnologías móviles y los límites de exposición de personas a campos electromagnéticos, para dar claridad que las señales utilizadas por las tecnologías móviles funcionan de acuerdo con las reglamentaciones nacionales e internacionales” (Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones., 2020)

Políticas Arancelarias y de Importación

Las políticas de importación de equipos terminales en las primeras etapas juegan un papel fundamental en el éxito y masificación de la nueva tecnología. Por ejemplo, una política de bajos impuestos y aranceles de importación para terminales que operen en 5G (móviles, dispositivos IoT, sensores), puede incentivar la adquisición de estos equipos por parte de los usuarios y por consiguiente una rápida curva de penetración en el mercado y un mayor interés de los operadores por ampliar la cobertura de esta tecnología. La promulgación de regulaciones que favorezcan el despliegue de 5G es un aspecto que motiva tanto a operadores móviles como a otros sectores (importadores, comerciantes, industria, usuarios) a desarrollar el uso y masificación de la nueva tecnología en el país.

Políticas de Administración de Datos

Finalmente, con el despliegue de 5G y su masificación, se aumentará considerablemente la cantidad dispositivos, servicios y aplicaciones que pueden recolectar y hacer uso de diversos datos. En este sentido es importante revisar y ajustar las “políticas de tratamiento de datos, de seguridad y de privacidad de la información” (Agencia Nacional del Espectro, 2019) También es conveniente el desarrollo de centros especializados que cuenten con una infraestructura adecuada para el correcto almacenamiento y tratamiento de estos datos.

Beneficios e Inconvenientes de la Implementación de 5G en Colombia

El despliegue de redes móviles comerciales de quinta generación en varios países de la región ha traído consigo numerosos beneficios apalancando la producción de nuevos y distintos mercados, como es el caso de la revolución de la industria 4.0, la masificación del Internet de las cosas (IoT), los almacenamientos y desarrollos en la nube, así como el mayor aprovechamiento de Big Data. Todas estas tecnologías requieren para su correcto funcionamiento características como baja latencia, conexión estable y de banda ancha, así como una alta eficiencia energética. Es en este punto en el que las redes 5G se presentan como un importante impulsor que puede beneficiar el avance y modernización de la sociedad.

Aunque se ha avanzado considerablemente en el despliegue de redes 4G en gran parte del territorio nacional, aún existen poblaciones rurales en las que la cobertura y la velocidad es insuficiente para motivar la inversión de las comunidades en tecnologías como el IoT, dispositivos de automatización y control que se comuniquen entre sí, entre otras, que pueden ser apalancadas por un adecuado despliegue de infraestructura de 5G en combinación con las redes existentes. En países de la región como México, Chile o Uruguay ya se tienen en operación redes de 5G en las principales ciudades (tal y como sucedió inicialmente con el despliegue de LTE). En estos casos los operadores han invertido en el despliegue de Radio Bases que den cobertura a los dispositivos 5G y también en la modernización y robustez de sus redes de Core y Backhaul, de tal forma que la modernización de las redes hacia 5G también beneficia las redes existentes de UMTS y LTE.

Lamentablemente, el proceso del despliegue de nuevas redes en una geografía como la colombiana significa una gran inversión para los operadores, por lo que el despliegue inicial de

5G se hará en las ciudades principales (Bogotá, Cali, Medellín, Barranquilla entre otras) y posteriormente llegará a las ciudades intermedias para finalizar con las poblaciones más alejadas. Esto puede llevar varios años (como ha tardado con LTE) y muchos de los beneficios tardarán demasiado en llegar a las comunidades más apartadas. Esto sumado a que por la Pandemia del Covid-19 que se vivió a nivel mundial, y el cambio de gobierno en 2022, el MinTIC no ha realizado aún la subasta del espectro necesario para el despliegue comercial de 5G, retrasando aún más la implementación de toda la infraestructura necesaria para la modernización de las comunicaciones.

En 2021 la ANE publicó el documento “Plan Maestro de Gestión de Espectro” (Agencia Nacional del Espectro, 2021) en el cual contempla los lineamientos base para la asignación y manejo del Espectro entre 2022-2026. Es diseñado como un “Documento Vivo” en el cual se contemplan revisiones anuales a lo planteado, así como se reciben aportes y opiniones de los distintos interesados en el mismo (operadores móviles, agencias y organismos internacionales, gremios y empresas tecnológicas). En 2022 la ANE presenta la Primera actualización del Plan Maestro de Gestión del espectro, en el cual la atención de “la demanda futura de espectro para el despliegue de banda ancha inalámbrica IMT” (Agencia Nacional del Espectro, 2022) fue modificada hasta 2024, esto con el fin de considerar las definiciones que puedan darse al respecto en la “Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones” CMR-2023. Al respecto, 5G Américas ha realizado observaciones respecto al retraso en la asignación de bandas planteada y anotan de manera contundente “La asignación de suficiente espectro radioeléctrico para los servicios de telecomunicaciones móviles es clave para el desarrollo de la industria, la conectividad de los habitantes y el cierre de la brecha digital.” (5G Américas, 2022).

A primer vistazo, el retraso hasta 2024 en la asignación de espectro puede ocasionar que la implementación y despliegue de 5G comercial pueda estar ocurriendo a comienzos o mediados de 2025. Al respecto, distintos operadores móviles como ETB y Claro han realizado observaciones adicionales frente a la necesidad de “Determinar y fijar la valoración económica del espectro de banda ancha”. La postura común de los operadores sugiere que en la determinación y fijación de la contraprestación económica por asignación del espectro se tengan en cuenta los “criterios de fomento a la inversión, maximización del bienestar social y el cierre de la brecha digital” (ETB, 2022), esto con el fin de hacer más igualitario el valor pagado por el uso del Espectro en Colombia comparado con valores del mercado regional (América Latina), ya que estos valores en pasadas subastas “han estado hasta 3 veces más altos que los promedios internacionales” (Claro, 2022), lo que dificulta y desestimula la inversión de los operadores en infraestructura y va en clara contravía con los esfuerzos adelantados en el país por la digitalización, modernización y cierre de la brecha digital.

Para muchas comunidades las redes móviles son la mejor opción que tienen de permanecer en contacto con el mundo y tener acceso a la información, pero también es importante que el desarrollo no simplemente se quede en poder garantizarle a la población el derecho a las comunicaciones y la conectividad. De la mano del despliegue de las redes móviles es importante una política de estado que impulse a las comunidades al aprovechamiento de las nuevas tecnologías, ya sea para poder potenciar la agricultura, la ganadería o la industria en estas zonas apartadas del país. Son innumerables los beneficios de aplicaciones de la industria 4.0, el IoT, los servicios Cloud, la e-agricultura, entre otras tecnologías que pueden apalancarse con los nuevos desarrollos de las telecomunicaciones. Pero, en este aspecto, es necesaria una política de

estado que facilite o estimule el acceso y la compra de los nuevos dispositivos por parte de las comunidades más apartadas y en términos generales para toda la población colombiana.

Se ha observado en países de la región que el despliegue de 5G ha traído consigo el aumento en el número de radio bases y en el consumo de datos. Lo primero en gran parte debido a las frecuencias en las que se ha realizado el despliegue (3500 MHz) que requieren mayor número de estaciones para poder brindar una adecuada cobertura. También la alta densidad poblacional en distintos sitios (tales como centros comerciales, avenidas peatonales, estaciones de transporte masivo) hace viable la instalación de small cells que tengan la capacidad de brindar la conectividad necesaria a un gran número de usuarios simultáneamente. El aumento de dispositivos conectados, los contenidos que utilizan los usuarios (que cada vez demandan más velocidad de las redes), así como las comunicaciones propias entre dispositivos (IoT, Machine Learning, M2M) son la razón del aumento del consumo de datos luego de las primeras implementaciones comerciales de 5G.

Este aumento en el consumo de datos requiere inversiones de los operadores en aumentar su capacidad de red de soporte o “backhaul”. Como se ha expuesto en un capítulo anterior, una de las principales soluciones a esto es la fibra óptica, pero debido a lo complejo de la geografía colombiana, no siempre se encuentra disponible esta opción, por lo que también es importante contemplar redes de backhaul soportadas en enlaces Microondas. La ANE precisa que para Colombia se ha destinado la banda de 71-76 GHz, 81-86 GHz (banda E) para el despliegue de enlaces Mw destinados a robustecer las redes backhaul. También indica el inicio de “análisis del espectro para la viabilidad técnica del uso de otras bandas de frecuencias altas del espectro” (Agencia Nacional del Espectro, 2021). En este sentido, la ANE ha implementado desde 2019 un mecanismo de asignación ágil, con el cual “se busca brindar un sistema de gestión del

espectro más dinámico” y reducir tiempos de asignación de permisos para el despliegue de radioenlaces punto a punto en banda E. (Agencia Nacional del Espectro, 2021)

Una de las mayores preocupaciones que se han generado en torno al despliegue de la quinta generación de telefonía móvil (5G) ha sido el uso de nuevas frecuencias de operación, la necesidad de instalar mayor cantidad de antenas que brinden cobertura de servicio móvil y la relación de las radiaciones no ionizantes y su impacto en la salud humana. Al respecto, la normativa colombiana según el decreto 1370 de 2018 manifiesta que “los proveedores de servicios de telecomunicaciones deben asegurar que en las distintas zonas de exposición a campos electromagnéticos, los niveles de emisión de sus estaciones radioeléctricas no excedan los límites máximos que establezca la Agencia Nacional del Espectro (ANE)” (Decreto 1370, 2018). En cumplimiento de esta directriz, la ANE publica la resolución 774 de 2018 en el que establece “los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos, se reglamentan las condiciones que deben reunir las estaciones radioeléctricas para cumplirlos y se dictan disposiciones relacionadas con el despliegue de antenas de radiocomunicaciones” (Resolución 774, 2018)

En términos generales, la ANE toma las principales recomendaciones a nivel internacional de organismos como la Organización Mundial de la Salud (OMS), la Comisión Internacional para la Protección de la Radiación No Ionizante (ICNIRP), y la UIT-T para actualizar los lineamientos que han de ser cumplidos por los operadores de telecomunicaciones móviles en Colombia respecto a los límites de exposición a campos electromagnéticos. En la resolución se indica que las empresas o personas naturales que tengan a su cargo “estaciones de radiocomunicaciones que generen campos electromagnéticos deberán presentar un estudio de

cálculo simplificado con el cual se pueda demostrar que sus estaciones se pueden catalogar como Normalmente Conformes”. (Resolución 774, 2018)

Cabe resaltar que la OMS mediante numerosos estudios científicos ha indicado que la exposición a niveles inferiores a los límites recomendados por la ICNIRP, no produce algún efecto adverso para la salud en un corto plazo. Lo que ha manifestado la Agencia Internacional para la Investigación del Cáncer (IARC) es que se puede incrementar la exposición a campos electromagnéticos cuando las radio bases de telefonía móvil se encuentran más lejos de los terminales, lo que exige a que estos terminales incrementen su potencia de transmisión, para mantener la estabilidad de la conexión con la radio base. Esto implica que para mantener niveles saludables de potencia de los móviles se requiere mayor cercanía con las estaciones base de telefonía móvil, muy contrario a la animadversión popular erróneamente difundida.

Otra de las preocupaciones de la comunidad en general ha sido la posible interferencia de 5G con algunos radares de altímetro aeronáutico que funcionan en la banda de 4.2 – 4.4 GHz. Para estos casos, la ANE ha recibido comunicaciones formales de la Aeronáutica Civil, en las cuales la entidad que regula la aviación en Colombia expresa la necesidad de realizar revisión a posibles interferencias con los equipos aeronáuticos, en especial en lo que concierne a estaciones móviles que operen en un rango superior a los 3.7 GHz. La ANE por el momento indica que realizará seguimiento a los estudios que se están llevando a cabo en el ámbito Internacional, en especial atención a los que se encuentran en curso “por parte del Comité Técnico de Radio para Aeronáutica (RTCA)” (Agencia Nacional del Espectro, 2021). Muy relacionado con esta preocupación de la industria Aeronáutica está la investigación de la regulación de los Vehículos Aéreos No Tripulado (UAV) más conocidos como drones. En la Primera actualización del Plan Maestro de Gestión del espectro 2022-2026 la ANE muestra especial interés en “las

particularidades para la integración de los drones con 5G” (Agencia Nacional del Espectro, 2022), por lo cual el organismo se propone tomar atenta nota a las tendencias que se registren a nivel mundial, para poder garantizar una operación segura de estos dispositivos no tripulados y su óptima convivencia con otros dispositivos aeronáuticos y en especial con los usuarios de las redes móviles.

Conclusiones

El despliegue de la tecnología 5G no sólo permite aumentar la velocidad y el ancho de banda de los servicios móviles (eMBB), también permite la masificación de los dispositivos IoT, el desarrollo de ciudades inteligentes, comunicaciones ultra confiables de baja latencia (uRLLC), y comunicaciones masivas de máquinas (mMTC).

Conceptos como NFV (Virtualización de funciones de Red), MEC (Informática perimetral Multiacceso) o la segmentación de redes (Network Slicing) toman especial importancia dentro del modelo de Arquitectura 5G para poder brindar la calidad superior en los servicios implementados, así como garantizar alta velocidad y baja latencia en la red.

La implementación de la tecnología 5G se plantea inicialmente coexistiendo y utilizando el Core EPC (LTE), en un modelo conocido como NSA, sin embargo, para el aprovechamiento total de los beneficios de 5G se requiere implementar el Core Propio 5GC en un modelo de arquitectura SA.

Para lograr un despliegue efectivo de 5G se requiere armonizar a nivel mundial las nuevas bandas de frecuencias a utilizarse, lo que ha empezado en Colombia con la asignación de segmentos de frecuencias y la ejecución de pruebas piloto.

Una adecuada política pública que permita la existencia de un ecosistema digital en el que diversos sectores productivos y la comunidad puedan realizar el adecuado aprovechamiento de las nuevas tecnologías permitirán potenciar diversas industrias, así como disminuir la brecha digital existente en el país.

Mediante diversos estudios científicos se ha comprobado que la exposición a niveles inferiores a los límites recomendados por la ICNIRP no produce algún efecto adverso para la

salud en un corto plazo, lo cual hace seguro el despliegue y masificación de la tecnología 5G en Colombia.

En el país ya se han desarrollado diversos estudios piloto y los operadores se encuentran a la espera de la licitación formal que permita iniciar el despliegue comercial de 5G en Colombia, cosa que ya se ha empezado a implementar en otros países de la región.

Referencias bibliográficas

- 3rd Generation Partnership Project. (2019). *Technical Specification Group Services and System Aspects, Release 15 Description*. 3GPP.
- 5G Américas. (2020). *Identificación de habilitadores para la implementación de redes 4G y 5G en América Latina*. Bellevue: 5G Américas.
- 5G Américas. (2022). *Comentarios al documento "primera actualización anual del Plan Maestro de Gestión del Espectro (PMGE) 2022-2026"*. Bellevue.
- Agencia Española Protección Datos. (2020). *Introducción a las tecnologías 5G y sus riesgos para la privacidad*.
- Agencia Nacional del Espectro. (2019). *Documento de Consulta Pública sobre las Bandas de Frecuencia para 5G en Colombia*. Bogotá: ANE.
- Agencia Nacional del Espectro. (2020). *Documento de consulta pública sobre las bandas de frecuencias disponibles para el futuro desarrollo de las telecomunicaciones móviles internacionales (imt) en Colombia*. Bogotá.
- Agencia Nacional del Espectro. (2020). *Política Pública de Espectro 2020-2024*. Bogotá D.C: Agencia Nacional del Espectro.
- Agencia Nacional del Espectro. (2021). *Plan Maestro de Gestión del Espectro*. Bogotá.
- Agencia Nacional del Espectro. (2022). *Primera Actualización Plan Maestro de Gestión del espectro 2022-2026*. Bogotá.
- Agredo-Méndez, G. L., Jojoa-Gómez, P. E., & Almenar-Terré, V. (2015). Sistemas MIMO con un elevado número de antenas: clave para la 5G inalámbrica. *Entramado*, 250-261.

- Cárdenas, J. A. (2016). *Estudio de la tecnología NFV aplicada al núcleo EPC en redes LTE y análisis de entorno de orquestación OSM para su gestión*. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
- Chica Pedraza, G. A., & Ariza Beltrán, J. O. (2021). *Redes 5G como desarrollo de las redes NGN*. Bogotá.
- Claro. (2022). *Comentario al documento "Plan Maestro de Gestión de Espectro 2022-2026"*. Bogotá.
- De León, O. (2023). *Redes 5G en América Latina: desarrollo y potencialidades*. Santiago: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Decreto 1370, Por el cual se dictan disposiciones relacionadas con los límites de exposición de las personas a los campos electromagnéticos generados por estaciones de radiocomunicaciones (Diario Oficial No. 50.673 Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones 2 de Agosto de 2018).
- Delgado Dotor, D. (2020). *Evaluación de redes móviles 5G en entornos con Aplicaciones IoT*. Universitat Oberta de Catalunya.
- ETB. (2022). *Comentarios frente a la primera actualización del Plan Maestro de gestión del Espectro para el periodo 2023-2026*. Bogotá.
- Ferrer, V. (01 de 2020). *vicentferrer.com*. Obtenido de <https://vicentferrer.com/sigfox/>
- Franco, X. (2020). *www.redesmoviles.com*. Obtenido de ¿Por qué se habla tanto de la seguridad en 5G?: <https://redesmoviles.com/5g/por-que-se-habla-tanto-de-la-seguridad-en-5g/>
- Gómez, C. (2021). *Redes Móviles 5G: Evolución New Radio*. Universitat Oberta de Catalunya.
- Huidobro Moya, J. M. (2014). *Comunicaciones Móviles. Sistemas GSM, UMTS y LTE*. Madrid, España: Ra-Ma Editorial.

- Lavallée, B. (06 de 04 de 2020). *www.ciena.com.mx*. Obtenido de Las redes fronthaul 4G/5G en primer plano: https://www.ciena.com.mx/insights/articles/spotlight-on-4G5G-fronthaul-networks_es_LA.html
- López Catalá, M. O., Guerra Martínez, M. d., & Izaquirre Leach, S. R. (2017). Profundización en la Introducción de las redes móviles 5G. *Revista Técnica de la empresa de Telecomunicaciones de Cuba S.A.*, 34-45.
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2018). *Plan TIC 2018-2022. El futuro digital es de Todos*. Bogotá.
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (20 de 12 de 2019). *Comunicado/ Resultados de la subasta del Espectro Radioeléctrico*. Obtenido de <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-Prensa/Noticias/124713:Comunicado-Resultados-de-la-Subasta-del-Espectro-Radioelectrico>
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2019). *Plan 5G Colombia*. Bogotá: Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones.
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (2020). *Plan marco de asignación de permisos de uso del Espectro 2020 - 2022*. Bogotá.
- Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones. (30 de 07 de 2020). *Expertos nacionales e internacionales explicaron durante webinar de MinTIC la relación entre telecomunicaciones, salud y 5G*. Obtenido de www.mintic.gov.co: <https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/148919:Expertos-nacionales-e-internacionales-explicaron-durante-webinar-de-MinTIC-la-relacion-entre-telecomunicaciones-salud-y-5G>

- Mrozowski, A. (2020). *Implementación del Nucleo de Red LTE/5G Virtualizado*. Valencia: Universitat Politecnica de Valencia.
- Observatorio Nacional 5G. (2020). *Informe de estandarización y despliegue 5G*. Madrid, España.
- Pacheco Herranz, F. J. (2019). *Edge Computing on the IoT Gatasay*. Madrid: Universidad Complutense de Madrid.
- Portafolio.co. (27 de 02 de 2022). *Avanzan pilotos de conectividad 5G, pero el despliegue aún es lejano*. Obtenido de Portafolio.co: <https://www.portafolio.co/economia/gobierno/pilotos-de-5g-avanzan-pero-el-despliegue-aun-se-ve-lejano-562305>
- Resolución 774, Diario Oficial No. 50.821 (Agencia Nacional del Espectro 29 de 12 de 2018).
- Salazar, D. (22 de 11 de 2021). *Colombia aplaza subasta de 5G y el tiempo empieza a jugarle en contra*. Obtenido de Bloomberg Línea: <https://www.bloomberglinea.com/2021/11/22/colombia-aplaza-subasta-de-5g-y-el-tiempo-empieza-a-jugarle-en-contra/>
- Taleb, T., Samdanis, K., Mada, B., Flinck, H., Dutta, S., & Sabella, D. (2016). *On Multi-Access Edge Computing: A Survey of the Emerging 5G Network, Edge Cloud Architecture & Orchestration*. IEEE Communications Surveys & Tutorials.
- Viavi Solutions. (2021). Obtenido de www.viavisolutions.com: <https://www.viavisolutions.com/es-es/arquitectura-de-la-tecnologia-5g>
- Viavi Solutions. (2021). *Understanding 5G. A practical Guide to Deploying and Operating 5G Networks*. San Francisco, CA: Viavi Solutions.
- Viavi Solutions. (2021). www.viavisolutions.com. Obtenido de <https://www.viavisolutions.com/es-es/fronthaul>