

Universidad del País Vasco (UPV/EHU)

eman ta zabal zazu



Universidad del País Vasco Euskal Herriko  
Unibertsitatea

Departamento Ingeniería de Comunicaciones

Escuela de Ingeniería de Bilbao

NQaS | Networking. Quality and Security Research Group

Tesis Doctoral

# **Análisis del despliegue de Comunicaciones de Misión Crítica sobre redes 4G y 5G**

Aitor Sanchoyerto Martínez

Director: Dr. Fidel Liberal

Abril, 2021

**Aitor Sanchoyerto Martínez**

Análisis del despliegue de Comunicaciones de Misión Crítica  
sobre redes 4G y 5G.

Tesis Doctoral

Director: Dr. Fidel Liberal.

**University of the Basque Country (UPV/EHU)**

NQaS | Networking, Quality and Security Research Group

Escuela de Ingeniería de Bilbao

Departamento Ingeniería de Comunicaciones

Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1

48013 - Bilbao

Para mi equipo: Ainhoa y Alain

ULTRA RUNNER DREAMS - DATE YOUR DREAMS

"Si lo puedo soñar, lo puedo programar"

"Si lo puedo imaginar, lo puedo construir"

"Pon fecha a tus sueños y estarás un paso más cerca de cumplirlos"

"Construye tus sueños"

Aitor Sanchoyerto Martínez [URD]



# Agradecimientos

---

Tradicionalmente se reserva este espacio para los agradecimientos por el apoyo y la ayuda recibidos en la elaboración de la tesis. En mi caso, tengo muchísimo que agradecer a mi familia, amigos, compañeros de trabajo y a todos mis compañeros del grupo de investigación NQaS, en especial a mi director, Fidel Liberal, que me ha guiado en todo este largo y complejo proceso. Todos me han animado, me han acompañado y me han dado su apoyo incondicional y no habría sido capaz de llegar aquí sin sus ánimos y sin su cariño.

Gracias, compañeros por la gran acogida y el cariño que siempre me habéis manifestado. Soy un auténtico privilegiado por tener la oportunidad de poder compartir mi día a día con las mentes más prodigiosas e inteligentes con las que he tenido la oportunidad de trabajar. Antes de llegar al departamento no me podía hacer una idea de lo que realmente era la inteligencia y con vosotros la he descubierto. Mucho trabajo, estudio, perseverancia en una idea y equivocarse mucho, son vuestro gran secreto.

Profesionalmente he tenido la oportunidad de trabajar con grandes personas. Que me han enseñado mucho a lo largo de estos 25 años de experiencia laboral, pero sin duda mi mayor aprendizaje comenzó cuando lo dejé todo en busca de un sueño. Fue un cambio tan radical que todo lo que ha ocurrido a partir de ese momento siempre ha sido motivador y positivo. Estas ganas renovadas por querer seguir aprendiendo me han permitido llegar a escribir esta tesis doctoral. La investigación se ha convertido en mi trabajo, pero también en mi pasión y ha devuelto la ilusión a cada día que comienza.



# Abstract

---

The great interest in the coexistence and future convergence of public security networks in mission critical networks of broadband is reflected in the significant effort in publications and standardization in recent years. However, the requirements of the new mission critical services when deployed on 4G / 5G architectures has not been analyzed.

The main motivation of this researcher is to COMMUNICATE and to do it in the most rigorous way possible and that his MESSAGE contributes to the increase of confidence in the mission critical services (MC) deployed on 4G, 5G broadband networks, etc. The 3GPP is making an effort in hours, resources and money in the standardization of emergency services in accordance with the requirements of the security, defense and emergency services.

In order to carry out this research, I have managed to bring together the team of the FP7 GERVON project, with whom, in July 2014, we were able to define and implement an ALL-IP architecture that allowed interoperating resources connected to private radio networks. (TETRA) with registered users in an LTE broadband network. In 2014, 3GPP was building the foundations of the MCPTT (Mission Critical Push to Talk) standard, but when we started this project in December 2011, it was the OMA that had developed a standard called POC (Push to Talk Over Cellular), the forerunner of the MCPTT and that we implemented at GERVON.

After GERVON our professional lives followed parallel paths. The UPV/EHU research department team continued to work on standardizing 3GPP's mission critical services. Like this project, it started from the PoC they knew so well, placing the department in an international benchmark in the study, development and implementation of the MCPTT standard of 3GPP. In January 2018, I joined NQaS at UPV / EHU.

I have had the great opportunity to use for my research one of the few operational mission critical broadband networks available worldwide. As a researcher I have been privileged to be able to analyze and measure the performance of the MCPTT service. It is not easy for a researcher to have such an infrastructure unless you work in the team that has developed and implemented one of them.

My motivation for doing this research has been twofold. On the one hand, I am privileged to be able to test all the functionalities of the MCPTT service, which, despite the new data requirements demanded by security, defense and emergency organizations, will undoubtedly continue to be the cornerstone of any organization's communications. On the other hand, as a designer and developer of solutions in the forerunner technology, it has allowed me to acquire more quickly the necessary knowledge of the MCPTT service to be able to make proposals for deployments of this service with the aim of reducing service latencies. A resource

must be able to establish a new call in less than 1000 ms, be included in a group call in less than 300ms and the time between a resource speaking and its message reaching all registered members of that group must not exceed 300 ms.

The work reflected in this thesis is the result of studying the operation of the service not only at a functional level, but above all at the level of network protocol (TCP / UDP), signaling (SIP) and data (RTP, RTCP or sRTP). These services are deployed over broadband networks that include service latency, which is why an important part of the research time has been focused on the detailed knowledge of the communications mechanisms and how this can affect compliance with demanded KPI of the service defined by the 3GPP for MCPTT.

So, in this thesis we have to talk about 4G networks and 5G NSA (Non-Standalone), 5G SA (Standalone). We will talk about virtualization of services (NFV), we will talk about deployment of these virtualized services at the end (MEC) and how the separation of the control channel from that of the data proposed in CUPS can already be implemented in 4G networks thanks to SDN.

# Laburpena

---

Banda zabaleko misio kritikoko herri-segurtasunerako sareen elkarkidetzeta eta etorkizuneko bateratzearekiko dagoen interesa azken urteetako argitalpen eta normalizazio ahalegin handian islatzen da. Hala ere, oraindik ez da aztertu misio kritikoko zerbitzu berrien QoS (Zerbitzu kalitatea), hauek 4G / 5G arkitekturetan zabaltzen direnean.

Ikerlari honen motibazio nagusia KOMUNIKAZIOA da, ahalik eta modu zehatzenean, eta baita bidaltzen den MEZUA banda zabaleko 4G, 5G sareetan hedatutako misio kritikoko zerbitzuengan konfiantza areagotzen laguntzea. 3GPPak orduak, baliabideak eta dirua eman ditu larrialdietarako zerbitzuak estandarizatzeko PPDR (Public Protection Disaster Recovery) agentzien eskakizunen arabera.

Argitalpen honetan aurkezten den ikerketa hau aurrera eramateko, FP7 GERVON proiektuaren taldea biltzea lortu dut. Haiekin, 2014ko uztailean, irrati sare pribatuekin (TETRA) konektatutako baliabideak LTE banda zabaleko sare batean erregistratutako erabiltzaileekin elkarri eragiteko aukera ematen zuen ALL-IP arkitektura definitu eta gauzatu ahal izan genuen. 2014an, 3GPPak MCPTT (Mission Critical Push to Talk) estandarren oinarriak eraikitzen ari zen, baina 2011ko abenduan proiektu hau hasi genuenean, OMA zen POC (Push to Talk Over Cellular) izeneko estandar bat garatu zuena, MCPTTren aitzindaria eta guk GERVON proiektuan inplementatu genuena.

GERVONen ondoren gure bizitza profesionalek bide paraleloak jarraitu zituzten. EHUKo ikerketa saileko taldeak 3GPPren misio zerbitzu kritikoak normalizatzen jarraitu du. Proiektu hau bezala, iadanik ezaguna zen PoC-tik abiatu ziren, beraien saila nazioarteko erreferente bezala kokatuz 3GPPren MCPTT araua ikertu, garatu eta ezartzeko. 2018ko urtarrilean, UPV / EHUren parte den NQoS taldean sartu nintzen.

Aukera bikaina izan dut mundu osoan eskuragarri dagoen banda zabaleko misio kritikoko sare operatibo bakanetako bat nire ikerketan erabiltzeko. Ikerlari gisa, MCPTT zerbitzuaren errendimendua aztertzeko eta neurtzeko pribilegioa izan dut. Ez da erraza ikertzaile batek horrelako azpiegiturarik edukitzea horietako bat garatu eta martxan jarri duen taldean lan egin ezean.

Ikerketa hau egiteko nuen motibazioa bikoitza izan da. Alde batetik, MCPTT zerbitzuaren funtzionaltasun guztiak probatzeko aukera izan dut. Segurtasun, defentsa eta larrialdi erakundeek eskatzen dituzten datu eskakizun berriak izan arren, zalantzarik gabe, edozein erakundetako komunikazioen ardatz izaten jarraituko dute. Bestetik, aitzindaria den teknologiako soluzioen diseinatzaile eta garatzaile gisa, MCPTT zerbitzuaren beharrezko ezagutza azkarrago eskuratzeko aukera eman dit zerbitzu hau zabaltzeko proposamenak egin ahal izateko. Baliabide batek deia berri bat 1000 ms-tan baino arinago finkatzeko gai izan behar

du, taldeko deian sartu 300ms-tan baino arinago, eta baliabide batek hitz egin eta talde horretako kide guztiei mezua iristen zaien tartea ezin du 300 ms baino handiagoa izan.

Argitalpen honetan islatzen den lana zerbitzuaren funtzionamendua maila funtzionalean aztertzea ezezik, sareko protokoloaren (TCP / UDP), seinaleztapenaren (SIP) eta datuen (RTP, RTCP edo SRTP) mailan aztertzearen emaitza da. Zerbitzu horiek zerbitzuen atzerapena gehitzen duten banda zabaleko sareetan hedatzen dira. Hori dela eta, ikerketaren denboraren zati garrantzitsu bat garraio kanalaren ezagutza zehatza eskuratzera eta 3GPPak MCPTT zerbitzurako definitutako kalitatearen adierazleen betetzearengan izan dezakeen eragina aztertzea.

Tesi lan honek 4G eta 5G banda zabaleko sareetan hedatzen diren misio kritikoko komunikazioen zabaltzea aztertzen da. Oinarrizko LTE kalkulu-agertoki batetik abiatuta, hedaketa estrategia ezberdinak aurkezten dira operadorearen ertzean (MEC) zerbitzu hauek zabaltzea posible egingo duten NFV eta SDN bezalako teknologia gaitzaileak erabiliz. Azken erabiltzailerengandik hurbil zerbitzuak hedatzeak komunikazioen atzerapen denborak murriztuko ditu eta CUPSak proposatutako datu eta kontrol kanalak banatzeak, kontrol kanalak 5Gen eskuragai dagoen banda-zabaleraren gehikuntza kudeatzea egingo du posible. 5Grako adierazitako hedapen estrategia guztiak, 5G NSA (Non Standalone) arkitekturan zabaltze proposamenarekin osatuko da. Honek arkitekturaren irri ataleko komunikazioen atzerapena murriztea egingo du posible, 5G arkitekturaren jatorrizko parte diren aipatutako teknologia gaitzaileetaz aprobetxatzeaz gain. 5G SA (Stand Alone) arkitektura ez bezala, tesi honetan 4G arkitekturaren EPC sare-nukleoa hausnartu dugu, 5G nukleo berriaren orde.

Aurreko lerroetan aipatutakoaren arabera, tesi hau MCPTT misio-kritikoko zerbitzuak zabaltzeko erabili daitezkeen banda zabaleko sareen funtzionamenduari ekinez hasi behar da: 4G, 5G NSA (Non Standalone) eta 5G SA (Standalone) sareak. Baina baita, zerbitzuen birtualizazioa (NFV), hauen hedapena operadorearen sarearen ertzean (MEC) eta SDN-ri esker iadanik 4G sareetan inplementatuta dagoen CUPS-en proposatutako kontrol-kanalaren bereiztea posible egiten duten teknologia gaitzaileak aurkeztuko dira.

# Resumen

---

El gran interés por la convivencia y la futura convergencia de las redes de seguridad pública en redes de misión crítica de banda ancha se refleja en el importante esfuerzo en publicaciones y normalización de los últimos años. Sin embargo, no se ha analizado la QoS (Calidad de servicio) de los nuevos servicios de misión crítica cuando se implementan en arquitecturas 4G / 5G.

La principal motivación de este investigador es COMUNICARSE y hacerlo de la manera más rigurosa posible y que su MENSAJE contribuya al aumento de la confianza en los servicios de misión crítica (MC) desplegados en redes 4G, 5G de banda ancha, etc. El 3GPP se ha esforzado en horas, recursos y dinero en la estandarización de los servicios de emergencia de acuerdo con los requerimientos de las agencias PPDR (Public Protection Disaster Recovery).

Para llevar a cabo esta investigación, que se presenta en esta publicación, he logrado reunir al equipo del proyecto FP7 GERVON, con quien, en julio de 2014, se pudo definir e implementar una arquitectura ALL-IP que permitió interoperar recursos conectados a redes de radio privadas. (TETRA) con usuarios registrados en redes de banda ancha LTE. En 2014, el 3GPP estaba construyendo los cimientos del estándar MCPTT (Push to Talk de misión crítica), pero cuando comenzó este proyecto en diciembre de 2011, era la OMA la que había desarrollado un estándar llamado POC (Push to Talk Over Cellular), precursor del MCPTT y que se implementó en GERVON.

Después de GERVON, nuestra vida profesional siguió caminos paralelos. El equipo del departamento de investigación de la UPV / EHU continuó trabajando en la estandarización de los servicios de misión crítica de 3GPP. Al igual que esta tesis, se partió del PoC que tan bien conocían, colocando al departamento en un referente internacional en el estudio, desarrollo e implementación del estándar MCPTT de 3GPP. En enero de 2018 me incorporé a NQaS en la UPV / EHU

He tenido la gran oportunidad de utilizar para mi investigación una de las pocas redes operativas de banda ancha de misión crítica disponibles en todo el mundo. Como investigador he tenido el privilegio de poder analizar y medir el desempeño del servicio MCPTT. No es fácil para un investigador tener dicha infraestructura a menos que trabaje en el equipo que ha desarrollado e implementado una de ellas.

Mi motivación para hacer esta investigación ha sido doble. Por un lado, tengo el privilegio de poder testear todas las funcionalidades del servicio MCPTT que, a pesar de los nuevos requerimientos de datos exigidos por las organizaciones de seguridad, defensa y emergencia, sin duda seguirá siendo la piedra angular de las comunicaciones de cualquier organización. Por otro lado, como diseñador y desarrollador de soluciones en la tecnología precursora, me ha permitido adquirir más rápidamente los conocimientos necesarios del servicio MCPTT para poder hacer propuestas de despliegues de este servicio con el objetivo de reducir las

latencias del servicio. Un recurso debe poder establecer una nueva llamada en menos de 1000 ms, estar incluido en una llamada de grupo en menos de 300 ms y el tiempo entre un recurso que habla y su mensaje que llega a todos los miembros registrados de ese grupo no debe exceder los 300 ms.

El trabajo reflejado en esta publicación es el resultado de estudiar el funcionamiento del servicio no solo a nivel funcional, sino sobre todo a nivel de protocolo de red (TCP / UDP), señalización (SIP) y datos (RTP, RTCP o sRTP). Estos servicios se despliegan sobre redes de banda ancha que incluyen latencia de servicio, por lo que una parte importante del tiempo de investigación se ha centrado en el conocimiento detallado del canal de transporte y cómo éste puede afectar el cumplimiento de los indicadores de calidad del servicio definido por el 3GPP para el servicio MCPTT.

Esta tesis analiza el despliegue de las comunicaciones de misión crítica sobre redes de banda ancha. 4G y 5G. Partiendo de un escenario base de cálculo LTE se plantean diferentes estrategias de despliegue empleando tecnologías habilitadoras como NFV y SDN que harán posible que se puedan desplegar estos servicios en los extremos de la red del operador (MEC). El despliegue de los servicios cerca del usuario final reducirá los tiempos de latencia de comunicaciones y la separación del canal de control del de datos propuestos por CUPS permitirá al canal de control poder gestionar el incremento de ancho de banda disponible en 5G. Todas las estrategias de despliegue indicadas para 4G, se completará con la propuesta de despliegue sobre la arquitectura 5G NSA (Non Standalone) que permitirá reducir los tiempos de latencia de las comunicaciones en la parte radio de la arquitectura, además de beneficiarse de las tecnologías habilitadoras mencionadas que ahora forman parte de forma nativa de la arquitectura 5G. A diferencia de una arquitectura 5G SA (Standalone), en esta tesis hemos considerado como núcleo de red el EPC de la arquitectura 4G y no el nuevo núcleo 5G. (5GC).

Por lo indicado en las líneas anteriores, en esta tesis se debe comenzar abordando el funcionamiento de las redes de banda ancha sobre las que se pueden desplegar los servicios de misión crítica MCPTT: redes 4G y 5G NSA (Non Standalone), 5G SA (Standalone). Pero también se presentarán tecnologías habilitadoras que permitan la virtualización de servicios (NFV), el despliegue de estos en el extremo de la red del operador (MEC), así cómo, la separación del canal de control del de los datos propuestos en CUPS que es posible ser implementada en redes 4G gracias a SDN

# Prólogo

---

Un primer acercamiento a la definición de comunicación puede realizarse desde su etimología. La palabra deriva del latín **COMMUNICARE**, que significa “compartir algo, poner en común”. Por lo tanto, la comunicación es un fenómeno inherente a la relación que los seres vivos mantienen cuando se encuentran en grupo. A través de la comunicación, las personas obtienen información respecto a su entorno y pueden compartirla con el resto.

La comunicación es propia de la condición humana, los seres humanos necesitan comunicarse. La comunicación convierte a los seres humanos de individuos a colectivos. El intercambio de información entre seres humanos enriquece el conocimiento individual de los participantes. La información recibida sirve para añadir, complementar o modificar conocimientos obtenidos de forma individualizada. La comunicación puede ser uno a uno, de grupo (uno a muchos o muchos a muchos).

Pero para que una comunicación sea efectiva, el mensaje debe ser expresado en un lenguaje que sea comprensible por todos los que participan en ella. El medio o canal debe ser limpio, sin ruido que perturbe la transmisión del mensaje. Cualquier modificación convierte el mensaje original en un nuevo mensaje diferente al que se ha querido compartir, es otro mensaje y por tanto la comunicación se considera no válida. De este tipo de comunicación se obtiene desinformación y no información válida.

Si en la comunicación participan muchos, se debe establecer un orden o jerarquía para poder hablar y un criterio para indicar que alguno de los miembros de la comunicación quiere participar. Si más de un miembro habla de forma simultánea, los dos mensajes que se quieren comunicar se mezclarán dando lugar a un nuevo mensaje que no tiene nada que ver con el inicial, se dice que el mensaje se ha corrompido.

Las comunicaciones de misión crítica las emplean personas que trabajan en condiciones excepcionales bajo un protocolo de intervención que garantiza que todo el equipo funcione como un solo hombre. Cada miembro del grupo tiene asignada su tarea que complementa a las del resto de sus compañeros. El resultado es una intervención conjunta y simultánea donde todos suman. El objetivo es resolver el incidente por el cual han sido movilizados en el menor tiempo posible, garantizando la seguridad del equipo y de los ciudadanos a los que prestan el servicio.

El estudio de esta tesis versa sobre las comunicaciones de agencias PPDR (Public Protection Disaster Recovery) que agrupan a grupos de personas que se tienen que coordinar con personas de otras organizaciones con recursos, procedimientos y capacidades diferentes pero que juntas suman para alcanzar el objetivo para el que han sido activados, que no es otro que la resolución de incidentes de defensa,

seguridad o emergencias en el menor tiempo posible primando la salud y la vida de las personas que integran el grupo de rescate y del grupo de víctimas.

El éxito de su misión es el fruto de la unión de las capacidades de todos los profesionales que participan en cada intervención y para ello es necesario:

- Un mando conjunto, que será coordinado a través de un puesto de mando avanzado (PMA) apoyado por un mando central único.
- Una jerarquía de mando entre organizaciones y por organización.
- Información que se recoge de cada uno de los miembros de los diferentes equipos pertenecientes a las diferentes organizaciones y que supone la base sobre la que el mando conjunto toma las decisiones.
- Comunicaciones prioritarias, seguras, claras y sin interrupciones que garanticen el intercambio de información entre los recursos desplegados en campo y sus mandos operativos.

Tradicionalmente todas las agencias empleaban redes privadas de radio digital. En sus inicios analógicas. Poco a poco y prácticamente alineadas en el tiempo con la evolución de la telefonía analógica a digital se produjo la migración de las organizaciones de seguridad, defensa y emergencias a redes de radio digitales: TETRA, P25, TETRAPOL o DMR.

En la era analógica cada organización tenía asignadas un rango de frecuencias reservadas, generalmente en VHF, que era repartido entre los diferentes grupos existentes en la organización. Cuando un recurso pulsaba la pastilla (PTT) de su walkie-talkie para hablar, el resto de los recursos permanecían a la escucha. Podía ocurrir que un recurso que no tuviera una cobertura de radio buena no escuchara al recurso y por tanto pensara que el canal estaba libre. Entonces, éste hablaría y lo que ocurría era que podía interferir a un recurso cercano que, al disponer de buena propagación, estaba escuchando correctamente al primer recurso. Cuando se ha puesto a hablar el segundo por estar más cercano ha pasado a oír también al segundo, provocando una degradación de las comunicaciones.

Si el recurso que ha pulsado el PTT no lo suelta, ningún otro recurso puede hablar por ese canal. Por eso se emplean, palabras claves para indicar que se ha terminado de hablar "corto y cambio" o cuando se suelta la pastilla se escucha un sonido característico denominado "Roger Beep". El tiempo que puede hablar cada recurso no está inicialmente limitado. Esto implicaba que el primero que coge el canal se lo queda sin ningún tipo de prioridad. Esta tecnología provocaba problemas en las comunicaciones cuando se manejaban grupos grandes de usuarios y se complicaba en la medida que aumentaba el número de grupos y especialmente si la infraestructura de red era empleada por varias organizaciones.

La llegada del Trunking Analógico (MPT 1327) resolvió el problema del tiempo de ocupación del canal y permitió un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico. Era un sistema diseñado para comunicaciones analógicas de voz, aunque disponía de hasta 1,2 Kbps para el manejo de datos. Los grupos no estaban asignados a canales de frecuencia fija. El recurso marcaba el identificativo del

recurso con el que quería hablar o del grupo a llamar. Permitía la encriptación. Este sistema de comunicaciones fue el precursor de las actuales redes profesionales móviles de radio empleadas por las organizaciones de seguridad, defensa y emergencia: TETRA, P25, TETRAPOL y DMR.

Se ha comenzado este prólogo, hablando de COMUNICACIÓN y se ha restringido a la VOZ. Estas tecnologías son sin duda las más eficaces cuando el MENSAJE o la INFORMACIÓN está soportada en la VOZ. Tienen dos pequeños inconvenientes: todos los recursos se deben desplegar dentro la cobertura de la infraestructura de radio que ha desplegado el operador de la red y la interoperabilidad con otras redes privadas de radio digital no es transparente.

Actualmente, las agencias PPDR requieren adicionalmente a la VOZ, DATOS que se puedan comunicar con la misma eficiencia y eficacia que se hace con la VOZ. Las redes tradicionales de misión crítica no tienen la capacidad técnica para satisfacer las necesidades de los servicios de seguridad, defensa y emergencia. Es necesario un proceso de convergencia de estas redes hacia redes de banda ancha con capacidades de misión crítica.

¿Como encaja el autor de esta tesis doctoral, en este proceso de convergencia de las redes de misión crítica? En **2005**, obtuvo su licencia de operador de telecomunicaciones para poder operar bajo el indicativo **EB2GCA**. Pero su pasión por la radio comenzó de muy joven cuando experimentaba con una radio de galena que había construido con la ayuda de su progenitor, técnico de televisión en sus ratos libres y maestro de taller de profesión. La inquietud por aprender, por querer saber de todo, por saber cómo funciona todo viene de él, fue sin duda su mentor. Con él aprendió a probar, a investigar, a mejorar, a reparar e incluso alguna que otra vez, a romper para conocer y entender su funcionamiento. La magia y la paciencia de ir sintonizando la bobina de su radio de galena, dio paso a una radio de banda ciudadana de 40 canales en FM y a tener que ajustar las estacionarias de su antena FM de pared con la esperanza de tener algún contacto de largo alcance. La licencia de radio aficionado abría la posibilidad de poder operar en un espectro radio eléctrico mucho más amplio y por tanto tener la posibilidad de establecer contactos de largo alcance por fin.

Pero fue años antes, concretamente en **agosto 1983** coincidiendo con un fenómeno meteorológico excepcional que sufrió en Bilbao, cuando se dio cuenta de lo importante que eran las comunicaciones de radio. Era el **26 de agosto de 1983**, el verano se estaba acabando y pronto tocaría abandonar Gorniz (municipio costero Bizkaino) y volver a Bilbao coincidiendo con el inicio de un nuevo curso escolar. Ese día comenzó a llover y le costó dejar de hacerlo hasta el punto de que el río Nervión a su paso por Bilbao se salió de su curso y arrasó Bilbao. El municipio de Gorniz se quedó incomunicado, la lluvia había dado cuenta del puente de Plentzia y en Munguía el río Butrón se apoderó de todo. Carreteras cortadas, caseríos incomunicados, vías de abastecimiento cortadas. La radio no podía dar información actualizada porque nadie podía comunicar que ocurría. El teléfono móvil no se había inventado y las líneas de telefonía fija estaban caídas. Como consecuencia de los desbordamientos los tendidos telefónicos habían sido

arrancados. Tan solo, unos walkie-talkies inicialmente de juguete era el único vínculo con el mundo. Su simple receptor y una adaptación que fabricaron para su escueta antena le permitió conocer de primera mano lo que estaba ocurriendo. La magia de la radio y la propagación le permitía escuchar avisos de emergencia y a pesar de su escueto equipo pudo captar avisos que por propagación recibía y que operadores de radio con equipos más potentes no oían. Ellos a él le oían y hacía de repetidores hacia estaciones más grandes. En pocas horas, se consiguió montar una red de asistencia para la zona de Gorliz, Plentzia y Munguía que sin duda marcó para siempre su futuro profesional.

Años después, profesionalmente tuve la suerte de participar en **1996** en la implantación del 1<sup>er</sup> Sistema de Localización GPS en Tiempo Real en España. Fue en Barcelona sobre una infraestructura privada de radio en UHF para datos y en VHF para voz. Y fue de la mano de mi mentor profesional y amigo **Alejandro Martínez**. A esta implantación llegaron otras muchas, pero ya esta vez en solitario, aquel empujón me permitió coger altura y ya no dejar de volar e imaginar.

Pero no fue hasta **2005**, cuando comencé a trabajar profesionalmente con redes privada de misión crítica: TETRAPOL (AIRBUS DEFENSE) y TETRA (TELTRONIC). Con el paso de los años, la participación en múltiples proyectos del sector y el continuo aprendizaje del estándar TETRA especialmente de la infraestructura NEBULA de TELTRONIC y DIMETRA de MOTOROLA me permitieron acumular un profundo conocimiento de estas tecnologías.

Mi gran reto profesional llegó casi por sorpresa a través de un proyecto complejo, futurista y visionario. Desde el principio el reto me apasionó. Desde el inicio tuve claro que formaba parte de un grupo selecto de profesionales con una visión de futuro, una capacidad de trabajo y una capaz intelectual para desarrollar e imaginar fuera de los que estaba acostumbrado en mi día a día. Así en diciembre de **2011** comenzó mi participación en el proyecto europeo **GERYON** (NEXT GENERATION TECHNOLOGY INDEPENDENT INTEROPERABILITY EMERGENCY SERVICES). El objetivo principal era lograr la interoperabilidad entre recursos conectados a redes privadas de misión crítica (TETRA – NEBULA TELTRONIC) con clientes de telefonía móvil de redes LTE que tendrían instalado un cliente POC (Push to Talk over Cellular). La interoperabilidad debía ser transparente de tal forma que la provisión de los servicios a los recursos debía realizarse con independencia de la tecnología que estuvieran empleando. Un recurso registrado a la red TETRA podría realizar una llamada a un grupo formado por usuarios TETRA y LTE y poder comunicarse con ellos de forma transparente. De **diciembre 2011 y Julio 2014** se desarrolló una arquitectura que demostró de forma sobresaliente la interoperabilidad de recursos con independencia de la tecnología en la que se registraran. Pero se fue más allá, los servicios disponibles para los usuarios de la red incluían además de VOZ, DATOS y VIDEO. Era la primera vez que los recursos conectados a la red TETRA tenían acceso a servicios de DATOS y VIDEO.

Es precisamente en **2014** cuando el 3GPP (3rd Generation Partnership Project), en la Release 12 define el uso del mecanismo multicast eMBMS y los habilitadores del sistema de comunicación de grupo (GCSE) que sin duda fueron los facilitadores de

los actuales servicios de Misión Crítica (MC) cuyo servicio PTT (Push to Talk) gracias a la Release 13 (2015-2016) quedó estandarizado como MCPTT (Misión Critical Push To Talk). Es un servicio que conozco en detalle ya que tiene su origen en el PoC del OMA y que tuve que analizarlo e implementarlo funcionalmente a bajo nivel en la pasarela JANO (arquitectura de alta disponibilidad todo IP basada en SIP y RTP, diseñada específicamente para redes críticas de emergencia).

Pero no fue hasta Enero de **2018** cuando tomé la decisión de dejar mi trabajo en la ingeniería de telecomunicaciones (**2005 – 2018**) para centrarme en la investigación de los servicios de Misión Crítica estandarizados por el 3GPP (MCPTT, MCDATA, MCVIDEO) aunque mi deformación profesional y los años vinculados a la radio y las redes privada de TETRA me han llevado a centrar esta tesis doctoral que ahora presento MCPTT (la voz) y es por ello que me he centrado en el análisis del despliegue del servicio MCPTT en las redes LTE-4G y 5G.

Creo sinceramente, que es el momento para escribir este documento y para poder presentar las conclusiones obtenidas tras un profundo estudio del servicio y al que he sometido a múltiples pruebas con el objetivo de demostrar que este servicio MCPTT permitirá sin duda la convergencia de las actuales redes de misión crítica en redes de banda ancha de misión crítica mejorando incluso las magníficas características técnicas y operativas de las redes actuales.

## **AHORA ES EL MOMENTO**

- Disponibilidad de Servidores MCPTT 100% compatibles con el estándar 3GPP Release >=13.
- Disponibilidad de Clientes MCPTT 100% compatibles con el estándar 3GPP Release >=13.
- Las redes LTE están plenamente desplegadas con una cobertura del 100% en España y una cobertura de LTE del 84%. (Informe global de Opensignal de 2018)
- La evolución de las técnicas de virtualización nos capacita el empleo de NFV (Network Functions Virtualization) y SDN (Software Defined Networking).
- NFV nos permite desplegar servicios en los extremos de la red.
- SDN nos permite separar el canal de control del canal de reenvío de paquetes. Garantizando la gestión de un mayor throughput y la disminución de los tiempos de latencia gracias al despliegue de los servicios cerca de los usuarios finales.
- 5G ya está aquí, a finales de 2019 se pusieron en marcha redes 5G NSA empleando todavía el núcleo de red LTE existente, permitiendo un aumento del throughput y disminuyendo la latencia, aunque todavía no a los niveles que se espera alcanzar con la implementación de 5G SA Poco a poco las operadoras están virtualizando la red lo que permitirá el despliegue de servicios en el extremo
- El aumento de capacidades pico de las nuevas redes permitirá a los operadores de telefonía reservar una parte (SLICE) para garantizar los altos requerimientos a nivel de KPI (Key Performance Indicators) y SLA (Service Level Agreement) que requieren las organizaciones de seguridad, defensa y emergencias.



# Índice de Contenidos

---

<b>1</b>	<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>1</b>
1.1	MOTIVACIÓN .....	4
1.2	OBJETIVOS .....	9
1.3	ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO.....	12
<b>2</b>	<b><u>HOJA DE RUTA DE ESTANDARIZACIÓN REDES PPDR BB15</u></b>	
2.1	INTRODUCCIÓN .....	15
2.2	<b>OMA PoC (PUSH TO TALK OVER CELLULAR)</b> .....	<b>20</b>
2.2.1	INTRODUCCIÓN .....	20
2.2.2	COMPONENTES DE LA ARQUITECTURA.....	21
2.2.3	PROTOCOLOS PoC.....	22
2.2.4	PROCEDIMIENTO DE LLAMADA DE OMA PoC.....	23
2.3	<b>SERVICIOS DE MISIÓN CRÍTICA (MCS) – MCPTT</b> .....	<b>24</b>
2.3.1	INTRODUCCIÓN.....	24
2.3.2	COMPONENTES MCPTT .....	25
2.3.3	ROLES DEL MCPTT SERVER .....	27
2.3.4	PROCEDIMIENTO DE LLAMADA MCPTT.....	28
2.4	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>31</b>
<b>3</b>	<b><u>ANÁLISIS DE LA EVOLUCIÓN DE LAS REDES RADIO</u></b> .....	<b>33</b>
3.1	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>34</b>
3.1.1	EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARALELA .....	35
3.1.2	LA PROVISIÓN DE LOS SERVICIOS .....	38
3.2	<b>ANÁLISIS DE REDES DE RADIO PRIVADAS DIGITALES</b> .....	<b>39</b>
3.2.1	INTRODUCCIÓN.....	39
3.2.2	TETRA – REQUISITOS BÁSICOS.....	39
3.2.3	TETRA – ARQUITECTURA DE RED.....	39
3.2.4	TETRA – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS.....	41
3.2.5	TETRA – ¿CÓMO FUNCIONA?.....	43
3.3	<b>REDES DE BANDA ANCHA - LTE <math>\geq</math> 12</b> .....	<b>43</b>
3.3.1	INTRODUCCIÓN .....	43
3.3.2	ARQUITECTURA LTE .....	44
3.3.3	INTERFACES LTE.....	45
3.3.4	INTERFAZ RADIO LTE .....	46
3.3.5	CANALES DE RADIO LTE .....	47
3.3.6	LTE MIMO .....	50
3.3.7	CONCLUSIÓN .....	50

<b>3.4</b>	<b>REDES DE BANDA ANCHA - 5G .....</b>	<b>51</b>
3.4.1	INTRODUCCIÓN .....	51
3.4.2	ARQUITECTURA DE RED 5G .....	52
3.4.2.1	Componentes de la arquitectura 5G.....	52
3.4.2.2	Características generales de la arquitectura 5G .....	53
3.4.3	ALTERNATIVAS DE DESPLIEGUE 5G .....	53
3.4.3.1	Introducción.....	53
3.4.3.2	NSA (Non-Standalone) .....	55
3.4.3.3	5G Core Network Architecture – SA (Standalone) .....	56
<b>3.5</b>	<b>TECNOLOGÍAS HABILITANTES ACTUALES.....</b>	<b>56</b>
3.5.1	INTRODUCCIÓN .....	56
3.5.2	VIRTUALIZACIÓN DE FUNCIONES DE RED (NFV) .....	57
3.5.3	REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE (SDN) .....	59
3.5.4	MBMS (MULTIMEDIA BROADCAST MULTICAST SERVICE).....	61
3.5.4.1	Despliegue de MCPTT sobre portadora multicast.....	64
<b>3.6</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>67</b>
<b>4</b>	<b><u>REQUERIMIENTOS TÉCNICOS REDES PPDR SOBRE BB ..</u></b>	<b>69</b>
<b>4.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>69</b>
<b>4.2</b>	<b>RENDIMIENTO DE LOS SERVICIOS – INDICADORES (KPI) .....</b>	<b>70</b>
<b>4.3</b>	<b>COBERTURA Y USO DE RECURSOS RADIO .....</b>	<b>74</b>
4.3.1	INTRODUCCIÓN .....	74
4.3.2	TAMAÑO DEL PAQUETE MCPTT.....	75
4.3.3	CÁLCULO DEL NÚMERO DE LLAMADAS MCPTT POR MCS EN TRANSMISIONES UNICAST .....	76
4.3.4	CONSIDERACIONES EN TRANSMISIONES MULTICAST .....	82
4.3.5	CONCLUSIONES .....	86
<b>4.4</b>	<b>RESILIENCIA.....</b>	<b>87</b>
4.4.1	INTRODUCCIÓN .....	87
4.4.2	INFRAESTRUCTURA RAN.....	89
4.4.3	NODOS DE PROCESAMIENTO .....	90
4.4.4	PROPUESTAS DE DESPLIEGUE DEL SERVICIO MCPTT EN LOS NODOS .....	91
<b>4.5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>97</b>
<b>5</b>	<b><u>ANÁLISIS DEL ESCENARIO BASE DE CÁLCULO .....</u></b>	<b>99</b>
<b>5.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>99</b>
<b>5.2</b>	<b>ARQUITECTURA DE REFERENCIA .....</b>	<b>101</b>
<b>5.3</b>	<b>RENDIMIENTO DE LOS SERVICIOS – CÁLCULO KPIS .....</b>	<b>107</b>
5.3.1	KPI 1 (ACCESS TIME) .....	107
5.3.2	KPI 2 (ACCESS TIME END TO END).....	108
5.3.3	KPI 3 (MOUTH TO EAR) .....	109
5.3.4	TABLA DE CALCULO BASE .....	112
5.3.5	CONCLUSIONES.....	112
<b>5.4</b>	<b>COBERTURA: ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD MÁXIMA POR CELDA..</b>	<b>113</b>

5.4.1	INTRODUCCIÓN .....	113
5.4.2	CÁLCULO TRADICIONAL .....	113
5.4.3	CÁLCULO BASADO EN LOS PRB NECESARIOS POR MCS .....	115
5.4.3.1	CÁLCULO ENVIANDO UN PAQUETE MCPTT CADA 20 MS .....	115
5.4.3.2	CÁLCULO ENVIANDO 2 PAQUETES MCPTT CADA 40 MS .....	124
5.4.4	CÁLCULO BASADO EN LA LIMITACIÓN DEL PDCCH .....	130
5.4.5	CONCLUSIONES TRAS LOS CÁLCULOS .....	135
5.4.6	TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN CAPACIDAD/COBERTURA .....	136
<b>5.5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>140</b>
<b>6</b>	<b><u>ALTERNATIVAS DE DESPLIEGUE.....</u></b>	<b><u>143</u></b>
<b>6.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>143</b>
<b>6.2</b>	<b>DESPLIEGUE MEC .....</b>	<b>143</b>
6.2.1	MEC – DISTRIBUTED S/PGW CON LOCAL BREAKOUT (SGW-LBO) .....	145
6.2.2	MEC – DISTRIBUTED S/PGW .....	146
6.2.3	MEC – DISTRIBUTED EPC.....	148
<b>6.3</b>	<b>DESPLIEGUE CUPS .....</b>	<b>151</b>
<b>6.4</b>	<b>DESPLIEGUE 5G NSA.....</b>	<b>154</b>
<b>6.5</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>156</b>
<b>7</b>	<b><u>ANÁLISIS DE INDICADORES POR DESPLIEGUE.....</u></b>	<b><u>157</u></b>
<b>7.1</b>	<b>METODOLOGÍA DE CÁLCULO EMPLEADA .....</b>	<b>157</b>
7.1.1	FORMULACIÓN DE LOS INDICADORES DE SERVICIO .....	159
7.1.2	VALIDACIÓN DE LA FORMULACIÓN .....	160
7.1.3	ANÁLISIS COMPORTAMIENTO MCPTT AS Y SIP CORE EN ESCENARIO DE CARGA CONTROLADA .....	162
7.1.4	CONDICIONES DE CARGA DE LA RADIO ACCESS NETWORK (RAN) .....	165
<b>7.2</b>	<b>ROUND TRIP TIME.....</b>	<b>166</b>
<b>7.3</b>	<b>FORMULACIÓN POR ESTRATEGIA DE DESPLIEGUE.....</b>	<b>170</b>
<b>7.4</b>	<b>KPI 1 (ACCESS TIME) .....</b>	<b>174</b>
7.4.1	ESCENARIO BASE .....	174
7.4.2	MEC (DISTRIBUTED S/PGW LBO) .....	175
7.4.3	MEC (DISTRIBUTED EPC).....	177
7.4.4	5G NSA (NON-STANDALONE) .....	179
<b>7.5</b>	<b>KPI 2 (ACCESS TIME END TO END).....</b>	<b>181</b>
7.5.1	ESCENARIO BASE .....	181
7.5.2	MEC (DISTRIBUTED S/PGW LBO) .....	182
7.5.3	MEC (DISTRIBUTED EPC).....	183
7.5.4	5G - NSA (NON-STANDALONE) .....	184
<b>7.6</b>	<b>KPI 3 (MOUTH TO EAR) .....</b>	<b>186</b>
7.6.1	ESCENARIO BASE .....	186
7.6.2	MEC (DISTRIBUTED S/PGW LBO) .....	187
7.6.3	MEC (DISTRIBUTED EPC).....	189

7.6.4	5G - NSA (NON-STANDALONE) .....	190
<b>7.7</b>	<b>RESULTADOS DEL ANÁLISIS.....</b>	<b>192</b>
<b>8</b>	<b><u>CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS .....</u></b>	<b><u>199</u></b>
<b>8.1</b>	<b>APORTACIONES DE LA TESIS.....</b>	<b>200</b>
<b>8.2</b>	<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>202</b>
<b>8.3</b>	<b>CONTRIBUCIONES .....</b>	<b>202</b>
8.3.1	PUBLICACIONES.....	202
8.3.1.1	Publicaciones en revista.....	202
8.3.1.2	Presentaciones en congresos .....	204
8.3.1.3	Capítulos de libro.....	205
8.3.2	PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN .....	207
<b>8.4</b>	<b>LÍNEAS FUTURAS .....</b>	<b>208</b>
8.4.1	PROPUESTA DE ESCALABILIDAD DE MCPTT .....	210
8.4.2	DISPONIBILIDAD Y CONTINUIDAD DEL SERVICIO MCPTT .....	211
<b>9</b>	<b><u>ANEXO – ASPECTOS ADICIONALES CONSIDERADOS...215</u></b>	
<b>9.1</b>	<b>CUESTIONES DE IMPLEMENTACIÓN EN TERMINALES ANDROID...215</b>	
<b>9.2</b>	<b>SIMULADOR DE DESPLIEGUE MCPTT .....</b>	<b>218</b>
<b>10</b>	<b><u>GLOSARIO.....</u></b>	<b><u>231</u></b>
<b>11</b>	<b><u>BIBLIOGRAFÍA.....</u></b>	<b><u>241</u></b>

# Índice de figuras

Figura 1: Grafo general de tareas.....	10
Figura 2: Relación de especificaciones de misión crítica introducidas en LTE (R8..R13) [1].....	19
Figura 3: Componentes Arquitectura PoC [24].....	21
Figura 4: Pila de Protocolos PoC [33].....	22
Figura 5: Procedimiento de llamada PoC [33] [35].....	24
Figura 6: Arquitectura funcional MCPTT - Stage 2 (Release 14) [30].....	26
Figura 7: Funciones básicas del MCPTT Server [32] [33].....	27
Figura 8: MCPTT Private Call (On-demand with automatic commencement and prearranged) [28].....	30
Figura 9: Hoja de ruta de los estándares PTT de Banda Ancha.....	31
Figura 10: Arquitectura de red TETRA [37].....	39
Figura 11: Modos de operación en TETRA.....	41
Figura 12: Eficiencia Espectral.....	42
Figura 13: Detalle Arquitectura LTE [42].....	44
Figura 14: Detalle de los interfaces del estándar LTE V12.....	45
Figura 15: Detalle Arquitectura LTE simplificada.....	46
Figura 16: Relación anchos de banda / Throughput en Mbps.....	46
Figura 17: Distribución de los recursos físicos en el tiempo [44].....	48
Figura 18: Arquitectura del sistema 5G: Representación basada en servicios [48].....	52
Figura 19: Arquitectura General definida en 3GPP TS 38.300 [53].....	54
Figura 20: ETSI GS NFV-SWA 001 (2014).....	58
Figura 21: Diagrama conceptual SDN (ITU-T Recommendation Y. 3300).....	59
Figura 22: Controlador SDN desplegado sobre la arquitectura de referencia NFV [58].....	60
Figura 23: Interfaces del controlador SDN [58].....	60
Figura 24: GCS AS e MBMS – MCPTT Server TS 23.179.....	62
Figura 25: Notificación al UE del establecimiento de la portadora multicast.....	63
Figura 26: Establecimiento de la llamada sobre una portadora multicast.....	64
Figura 27: Notificación a los clientes del establecimiento de la portadora multicast.....	65
Figura 28: Interfaces MCPTT AS con LTE EPC Multicast (3GPP TS 26.346).....	66
Figura 29: Arquitectura 3GPP TS 26.346 E2E MCPTT – LTE EPC (Multicast/Unicast).....	66
Figura 30: MCPTT Access Time and Mouth-to-Ear Latency (Based on [61]).....	70
Figura 31: Dos Portadoras Unicast EPS.....	72
Figura 32: Portadoras EPS.....	73
Figura 33: Cálculo PDCCH – LTE 20 MHz - SISO.....	80
Figura 34: Arquitectura red LTE – Despliegue de servicios MCPTT.....	87
Figura 35: Propuesta de arquitectura – RAN Controller.....	90
Figura 36: Propuesta de arquitectura – Nodos Distribuidos.....	92
Figura 37: Propuesta 3GPP de eNB con capacidad IOPS y con al menos un EPC local [18].....	93
Figura 38: Propuesta 3GPP IOPS Mission Critical Networks [70].....	93
Figura 39: Propuesta de arquitectura – Nodos Mixtos.....	94
Figura 40: Propuesta de arquitectura – Disponibilidad MCPTT.....	96
Figura 41: Propuesta Funcional – Disponibilidad MCPTT.....	97
Figura 42: El proveedor de los servicios MCS y el operador de la red (PLMN) comparten el SIP CORE.....	100
Figura 43: Identificación de tiempos de proceso y red, en una arquitectura estándar LTE.....	101
Figura 44: Backhaul dependiendo de la arquitectura de la BTS.....	102
Figura 45: Evolución Backhaul de redes 4G a 5G xHaul [74].....	103
Figura 46: Traza real de una llamada privada MCPTT.....	105
Figura 47: Traza real de una llamada privada MCPTT - Simplificada.....	106
Figura 48: Señalización simplificada. Access Time en una llamada privada MCPTT.....	107

<i>Figura 49: Señalización simplificada. Access Time End to End en una llamada privada MCPTT</i>	108
<i>Figura 50: Señalización simplificada. Mouth to Ear</i>	109
<i>Figura 51: Detalle pila (ejemplo de Android [75])</i>	110
<i>Figura 52: Índice de capítulos referidos al cálculo de los indicadores de servicio KPI</i>	112
<i>Figura 53: Distribución número de llamadas 2000 PRBS – Tamaño paquete MCPTT 584 bits</i>	120
<i>Figura 54: Histograma de mosaico bivariado 2.000 PRB</i>	121
<i>Figura 55: Distribución número de llamadas 4000 PRBS – Tamaño paquete 2 x MCPTT = 1.168 bits</i>	126
<i>Figura 56: Histograma de mosaico bivariado 4.000 PRB</i>	126
<i>Figura 57: Número de llamadas MCPTT / MCS cada 20 ms</i>	134
<i>Figura 58: MCPTT <math>\leftrightarrow</math> DRX</i>	137
<i>Figura 59: MCPTT <math>\leftrightarrow</math> Tiempo de duración de la comunicación</i>	138
<i>Figura 60: TTI Bundling</i>	139
<i>Figura 61: MCPTT – Semi-Persistent Scheduling</i>	140
<i>Figura 62: El framework de MEC y la arquitectura de referencia están especificada en ETSI GS NEC 003 y están alineada con los principios NFV</i>	144
<i>Figura 63: Arquitectura de Referencia MEC [84]</i>	145
<i>Figura 64: Arquitectura MEC – Distributed SGW-LBO</i>	146
<i>Figura 65: Arquitectura MEC – Distributed S-GW and PGW MEC Deployment</i>	147
<i>Figura 66: Arquitectura MEC – Distributed EPC basada en [82] [86]</i>	148
<i>Figura 67: Arquitectura Distributed MEC – MCPTT</i>	149
<i>Figura 68: Arquitectura del modelo de referencia con separación del plano de control del plano de usuario</i>	151
<i>Figura 69: MCPTT en el Data Center. El control del servicio está centralizado, pero existe separación entre plano de control y usuario. Los datos de usuario no atraviesan el núcleo de red (EPC) aunque ascienden hasta el MCPTT que puede estar en el Data Center del Operador o en el CPD (Centro de Procesado de Datos) del proveedor del servicio. [88]</i>	152
<i>Figura 70: MCPTT Distribuido. El control del servicio está distribuido pero los datos de usuario no atraviesan el núcleo de red (EPC) ni sobrecargar el troncal IP del operador [88]</i>	153
<i>Figura 71: Arquitectura 5G NSA – CUPS</i>	155
<i>Figura 72: Identificación de tiempos uplink y downlink, en una arquitectura estándar LTE</i>	158
<i>Figura 73: MCPTT Private Call (On-demand with automatic commencement and prearranged) [28]</i>	159
<i>Figura 74: Captura realizada en la LTE Network EPC</i>	160
<i>Figura 75: Detalle de los tiempos medidos para el KPI 1 durante la validación de la formulación</i>	161
<i>Figura 76: Detalle de los tiempos medidos para el KPI 2 durante la validación de la formulación</i>	161
<i>Figura 77: Detalle diagrama de cálculo de los tiempos de procesamiento de IMS y AS</i>	164
<i>Figura 78: Tiempos de procesamiento de IMS y AS</i>	165
<i>Figura 79: LTE MIMO 2x2 5 MHz FDD RTT</i>	167
<i>Figura 80: LTE MIMO 2x2 5 MHz FDD UE <math>\leftrightarrow</math> EXTERNAL CLOUD RTT</i>	168
<i>Figura 81: RTT (Servidores MC desplegados en el Data Center del proveedor)</i>	168
<i>Figura 82: LTE MIMO 2x2 5 MHz FDD UE - LOCAL SERVER RTT</i>	169
<i>Figura 83: 5G UE - PGW RTT [90]</i>	169
<i>Figura 84: KPI1 – Arquitectura LTE estándar</i>	174
<i>Figura 86: KPI1 – MEC (Distributed S/PGW)</i>	176
<i>Figura 85: KPI1 – MEC (Distributed EPC)</i>	177
<i>Figura 87: KPI 1 – 5G NSA (Non-Standalone)</i>	179
<i>Figura 88: KPI 2 – Escenario base</i>	181
<i>Figura 90: KPI 2 – MEC – Distributed S/PGW</i>	182
<i>Figura 89: KPI 2 – MEC – Distributed EPC</i>	183

Figura 91: KPI 2: 5G – NSA (Non – Standalone).....	185
Figura 92: KPI <sub>3</sub> – Arquitectura LTE .....	186
Figura 94: KPI <sub>3</sub> – MEC (Distributed S/PGW).....	187
Figura 93: KPI <sub>3</sub> – MEC (Distributed EPC).....	189
Figura 95: KPI <sub>3</sub> – 5G NSA (Non-Standalone).....	190
Figura 96: 5G Frame and Subframe [91] .....	195
Figura 97: 5G NSA - KPI 3 (Red de acceso radio a media carga) .....	195
Figura 119: Opciones de escalabilidad servicios MCPTT.....	211
Figura 99: Estimación cuota de mercado de Android OS (by IDC) .....	216
Figura 100: Mouth to Ear por versión de Android .....	217
Figura 100: Latencia(ms) Mouth to Ear por versión de Android .....	217
Figura 101: Pantalla principal del simulador de despliegue del servicio MCPTT.....	218
Figura 102: OPCION 1: MCPTT desplegado en el Data Center del Operador .....	219
Figura 103: OPCION 2: MCPTT desplegado en el EDGE. Usuarios en el EDGE.....	220
Figura 104: OPCION 3: MCPTT desplegado en el EDGE del Operador. Usuarios distribuidos .....	220
Figura 105: Panel de Distribución de llamadas en la Opción 3.....	221
Figura 106: Panel de ajuste tiempos por componente.....	222
Figura 107: Panel de visualización de resultados .....	222
Figura 108: Panel de alfanumérico de resultados .....	222
Figura 109: KPI <sub>1</sub> – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE .....	223
Figura 110: KPI <sub>2</sub> – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE .....	224
Figura 111: KPI <sub>3</sub> – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE .....	224
Figura 112: KPI <sub>5</sub> – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 95 .....	225
Figura 113: KPI <sub>5</sub> – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 80 .....	225
Figura 114: KPI <sub>5</sub> – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 75 .....	226
Figura 115: KPI <sub>5</sub> – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 50 .....	226
Figura 116: KPI <sub>5</sub> – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 25 .....	227
Figura 117: KPI <sub>5</sub> – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 20 .....	227
Figura 118: Enlace satélite entre EDGE – MAIN (Orquestación).....	229



# Índice de tablas

Tabla 1: Requerimientos funcionales según NPSTC [8] .....	4
Tabla 2: Requerimientos técnicos según NPSTC [9] .....	5
Tabla 3: Relación de servicios de red de misión crítica de banda ancha [8] [10] [11] .....	7
Tabla 4: Relación de características técnicas de una red de misión crítica de banda ancha [9] [12] .....	7
Tabla 5: Relación de condicionantes tecno-económicos [1] .....	8
Tabla 6: Relación de tareas .....	10
Tabla 7: Relación de objetivos técnicos .....	10
Tabla 8: Relación de acciones / objetivos técnicos .....	12
Tabla 9: Relación de tareas / capítulos .....	13
Tabla 10: Hoja de ruta para la transición en Europa de las redes de radio privadas digitales a las redes de banda ancha de Misión Crítica [14] .....	16
Tabla 11: Proyectos relevantes TETRAPOL .....	37
Tabla 12: Velocidades de pico canales LTE .....	48
Tabla 13: MBMS bearer configuration .....	62
Tabla 14: Threshold defined for MCPTT KPIs .....	71
Tabla 15: Standard 3GPP LTE QoS Classes (reproduced from 3GPP TS23.203) .....	72
Tabla 16: Mapeo de QCI a clases de QoS estándar. [62] .....	72
Tabla 17: Número RB disponibles por ancho de banda .....	74
Tabla 18: Eficiencia Espectral (bps/Hz) .....	74
Tabla 19: Cabecera IPv4 (20 bytes) .....	76
Tabla 20: Muestra el mapeo entre el índice MCS (Esquema de modulación y codificación) .....	77
Tabla 21: N° bits / N° PRB en función del $I_{TBS}$ [46] .....	78
Tabla 22: Extracto de tabla generada para el cálculo .....	78
Tabla 23: Número grupos PHICH por canal y parámetro NG .....	81
Tabla 24: Tiempos de procesado y retardo .....	106
Tabla 25: Numero de veces que la Señalización y el Data Plane atraviesa cada componente de Escenario de Referencia LTE [28] .....	112
Tabla 26: Calculo tradicional del número de llamadas MCPTT por MCS .....	114
Tabla 27: Número de PRBs por MCS .....	115
Tabla 28: Calculo del número de llamadas MCPTT en función de PRB / MCS .....	117
Tabla 29: Diferencia en el número de llamadas (Método tradicional vs PRB/MCS) .....	118
Tabla 30: Rangos definidos para el experimento .....	120
Tabla 31: Relación MCS/PRB/CALL de la simulación 2.000 PRBS .....	122
Tabla 32: Número PRBs no usados cada 20 ms .....	123
Tabla 33: Número PRBs por MCS para 2 paquetes MCPTT .....	124
Tabla 34: Calculo llamadas MCPTT transmitiendo 2 paquetes MCPTT cada 40 ms .....	124
Tabla 35: Relación MCS/PRB/CALL de la simulación 4.000 PRBS .....	127
Tabla 36: Número PRBs no usados cada 40 ms .....	128
Tabla 37: Comparativa 2.000 PRB vs 4.000 PRB .....	129
Tabla 38: Cálculo de N° CCE disponibles por ancho de banda [1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz] .....	131
Tabla 39: Equivalencia MCS con las condiciones de radio .....	132
Tabla 40: Comparativa número de llamadas MCPTT dependiendo del calculo empleado .....	132
Tabla 41: Comparativa número de llamadas MCPTT PDCCH vs PRB .....	134
Tabla 42: Número de veces que la Señalización y el Data Plane atraviesa cada componente del escenario MEC (Distributed SGW-LBO MEC) .....	146
Tabla 43: Número de veces que la Señalización y el Data Plane atraviesa cada componente del escenario MEC (Distributed S/PGW) .....	147
Tabla 44: Número de veces que la Señalización y el Data Plane atraviesa cada componente del escenario MEC (Distributed EPC) .....	149

<i>Tabla 45: Número de veces que interviene cada componente en un despliegue.....</i>	<i>155</i>
<i>Tabla 46: Arquitectura funcional de la plataforma de pruebas .....</i>	<i>158</i>
<i>Tabla 47: Tabla resumen de cálculo.....</i>	<i>159</i>
<i>Tabla 48: Tiempo de procesado y retardo por KPI .....</i>	<i>160</i>
<i>Tabla 49: Número de veces que a atraviesa la señalización, cada componente en el escenario base para KPI 1 .....</i>	<i>175</i>
<i>Tabla 51: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed S/PGW) para KPI 1 .....</i>	<i>176</i>
<i>Tabla 50: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed EPC) para KPI 1 .....</i>	<i>178</i>
<i>Tabla 52: Comparativa LTE estándar – 5G NSA para KPI 1.....</i>	<i>179</i>
<i>Tabla 53: LTE estándar para KPI 2 .....</i>	<i>181</i>
<i>Tabla 55: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed S/PGW) para KPI<sub>2</sub>.....</i>	<i>182</i>
<i>Tabla 54: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed EPC) para KPI 2 .....</i>	<i>183</i>
<i>Tabla 56: Comparativa LTE estándar – 5G NSA para KPI 2.....</i>	<i>184</i>
<i>Tabla 57: KPI 3 en el escenario base.....</i>	<i>186</i>
<i>Tabla 59: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed S/PGW) para KPI<sub>3</sub>.....</i>	<i>188</i>
<i>Tabla 58: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed EPC) para KPI 3.....</i>	<i>189</i>
<i>Tabla 60: Comparativa LTE estándar – 5G NSA KPI<sub>3</sub>.....</i>	<i>191</i>
<i>Tabla 61: Impacto en MCPPT la evolución de eUTRAN hacia arquitecturas 5G .....</i>	<i>192</i>
<i>Tabla 62: Tabla comparativa LTE – New Radio [91] .....</i>	<i>193</i>
<i>Tabla 63: N<sup>o</sup> de NRB para la gama de frecuencias FR1.....</i>	<i>194</i>
<i>Tabla 64: N<sup>o</sup> de NRB para la gama de frecuencias FR2.....</i>	<i>194</i>
<i>Tabla 65: Tiempos de proceso de señalización / media en terminales Android [28] .....</i>	<i>215</i>

## 1 Introducción

<a href="#">1.1</a>	<a href="#">MOTIVACIÓN</a>	4
<a href="#">1.2</a>	<a href="#">OBJETIVOS</a>	9
<a href="#">1.3</a>	<a href="#">ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO</a>	12

**U**nos sistemas de comunicaciones seguros, disponibles y jerarquizados son fundamentales en las agencias [1] PPDR (Public Protection and Disaster Relief), para poder comunicarse y coordinar recursos durante la rutina diaria de trabajo y en situaciones de emergencias.

**Las radiocomunicaciones son extremadamente importantes para las agencias PPDR, ya que las comunicaciones de estas agencias dependen en un porcentaje muy alto de ellas. La realización de su trabajo en campo implica que muchas veces sea la única forma de comunicación existente.**

Las agencias PPDR aportan un valor fundamental a la sociedad actual, garantizando el cumplimiento de las leyes, el mantenimiento del orden público y protegiendo la vida de los ciudadanos. Las agencias PPDR de seguridad, bomberos, emergencias médicas (EMS) y servicios de rescate son pilares del servicio estatal de cualquier país del mundo. En la mayoría de los países están íntimamente relacionadas con el sector público ya sea directamente, como parte de la estructura de gobierno del país, o como una función que se subcontrata bajo un estricto control por parte del ministerio o departamento del gobierno de las que dependen.

**Esa fragmentación y un mercado objetivo relativamente pequeño ha provocado que la tecnología de comunicaciones de seguridad pública sea bastante cara y que sus funcionalidades hayan experimentado poco avance en el tiempo en comparación con los avances comerciales realizados en la red comercial de telefonía móvil.**

Tradicionalmente, las agencias PPDR han empleado tecnologías de radio móvil privada / profesional TETRA [2] y Project 25 (P25) [3] que fueron diseñadas y estandarizadas en la década de 1990. Ninguna de ellos domina el mercado, mientras TETRA, estandarizado por el ETSI en 1994 cuenta con el mayor número de despliegues en Europa, P25 se encuentra desplegado principalmente en Norte América, Australia y Singapur entre otros.

Si bien P25 es el estándar de radio móvil terrestre tradicional para la seguridad pública en Norte América, TETRA fue diseñado con el objetivo de servir a la comunidad de seguridad pública en todo el mundo. De ahí que hoy existen redes TETRA que atienden a agencias PPDR en Gran Bretaña, Alemania, Italia, Bélgica,

Países Bajos, España, Emiratos Árabes Unidos, Líbano, Sudáfrica, Rusia, Kazajstán, Uzbekistán, China, Corea del Sur, Malasia, Indonesia, Vietnam, México, Argentina, República Dominicana, Perú, Brasil, entre otros países.

Hace tiempo que los usuarios PPDR han identificado la conveniencia de emplear datos para completar a la voz: consultas avanzadas de datos, transferencia de mapas o fotografías, así como para la transmisión de video en tiempo real para labores de vigilancia y de control. Estas funcionalidades y servicios se encuentran ya disponibles para el ocio o el propósito general, a través de las redes cableadas de Internet o las redes celulares de banda ancha, pero no están disponibles en las redes de comunicaciones que emplean actualmente las agencias PPDR, debido a las limitadas capacidades de transmisión de datos que tienen la tecnología que emplean [4]. En este escenario, las comunicaciones de banda ancha (LTE para PPDR) se están consolidando como la tecnología que va a soportar las futuras comunicaciones de las agencias PPDR. El trabajo técnico se está llevando a cabo desde hace 5 años dentro del grupo SA6 del 3GPP, organización a cargo de la estandarización de LTE y que está incluyendo nuevas funcionalidades y capacidades al estándar LTE que aumentará su idoneidad para agencias PPDR. A continuación, se enumeran las principales funcionalidades que se han añadido al estándar LTE en cada una de las nuevas versiones del estándar LTE orientadas a las agencias PPDR: [5]

- **Release 12 (2015)**. Funciones facilitadoras de los nuevos servicios de misión crítica (MC) estandarizados por el 3GPP. Por ejemplo, los servicios de MC se benefician del uso de portadoras de multidifusión en LTE debido a la estandarización de eMBMS para MC y habilitadores del sistema de comunicación de grupo (GCSE) TR 36.868 [6]. Además, los servicios basados en la proximidad D2D (LTE-ProSe) TR 36.843 [7]. Pero el 3GPP todavía tenía que dar uno de los pasos más importante en la estandarización de las nuevas Redes de Misión Crítica de Banda Ancha: definir los servicios de misión crítica.
- **Release 13 (finales 2016)**. Estandarización del servicio Push to Talk de Misión Crítica (MCPTT).
- **Release 14 (junio 2017)**. Estandarización del servicio de datos de misión crítica (MCDATA) y estandarización del servicio de video de misión crítica (MCVIDEO)
- **Release 15 (marzo 2019)**. Interconexión entre las nuevas Redes de Misión Crítica de Banda Ancha (Mission Critical Mobile Broadband Networks) y las Redes de Seguridad Pública tradicionales (Public Safety Networks). Nuevos requisitos para los servicios de MC empleados en transporte marítimos y ferroviarios.
- **Release 16 (julio 2020) y Release 17**. Se está trabajando en la viabilidad del despliegue de los servicios MC en arquitecturas con acceso de radio no terrestres (inicialmente satélites, pero también estaciones base aerotransportadas) y a los aspectos marítimos (infra-buque, barco a tierra y barco a barco). Se incluye el concepto de alias funcional.

La llamada de grupo es un servicio clave para las agencias PPDR. Este tipo de comunicaciones requieren: solicitar permiso para hablar en el grupo mediante la pulsación de la pastilla del dispositivo del usuario PTT (Push to Talk), rapidez en el establecimiento de la llamada y baja latencia durante su mantenimiento. El permiso para hablar lo asigna la red a los usuarios en función de su prioridad. De tal forma que los usuarios prioritarios tengan garantizado poder hablar en un grupo y que las llamadas prioritarias y de emergencia puedan establecerse siempre con independencia de los recursos disponibles en la red.

**Las agencias PPDR actuales demandan poder acceder a servicios de comunicación de datos de alta velocidad, uno a uno y en grupos para llevar a cabo las misiones de una manera más rápida y efectiva.**

En esta tesis doctoral se van a evaluar los requerimientos y el comportamiento exigido a las nuevas redes de misión crítica de banda ancha mediante el análisis de los indicadores de rendimiento del servicio PTT estandarizado por el 3GPP en la Release 13, bajo la denominación MCPTT (Mission Critical Push To Talk), sobre un conjunto de alternativas de arquitectura de red que le pueden dar soporte.

La principal contribución de esta tesis es la identificación de la latencia que añaden al servicio MCPTT cada uno de los componentes que participan en: el establecimiento, mantenimiento y finalización de las llamadas y cómo éstos varían dependiendo de la arquitectura sobre la cual se despliega el servicio. De esta manera, se van a identificar cuáles son los más críticos de cara a salvaguardar los tiempos de latencia fijados por el 3GPP para cada uno de los indicadores del servicio.

La arquitectura Long Term Evolution (LTE) se ha definido como el escenario de referencia del estudio; a partir de ahí, se han evaluado diferentes propuestas de despliegue: LTE MEC (Multi-Access Edge Computing) y 5G. Para poder desplegar el servicio sobre las diferentes arquitecturas se han empleado tecnologías y paradigmas que se detallan en este documento y que han sido fundamentales para garantizar el rendimiento, la disponibilidad y continuidad del servicio.

Las conclusiones del presente documento dan respuesta al título de esta tesis doctoral "Análisis del despliegue de comunicaciones de misión crítica (MC) sobre redes 4G y 5G".

**En un futuro próximo, las agencias PPDR emplearán las mismas tecnologías de comunicación que el mercado de consumo, permitiendo reducciones de costes y capacidades mejoradas en el servicio de datos. Se deben analizar cómo éstas son capaces de proporcionar el mismo nivel de servicio requerido para labores de misión crítica.**

## 1.1 Motivación

El título de la presente tesis es: "Análisis del despliegue de comunicaciones de Misión crítica sobre redes 4G y 5G" por ello, la primera pregunta que se debe hacer es:

### *¿Cuáles son los requerimientos necesarios para desplegar Comunicaciones de Misión Crítica?*

Las agencias PPDR requieren aplicaciones en tiempo real además de las comunicaciones de voz (PTT). Algunas de estas aplicaciones como pueden ser la distribución de las llamadas entre los efectivos desplegados en campo o la transmisión de estados pueden ser realizadas empleando tecnologías de radio móvil privada / profesional (PMR) pero en cambio, otras aplicaciones como el video requieren de redes de banda ancha. Las comunicaciones de voz PTT siguen siendo el medio de comunicación más crítico para las agencias PPDR y no pueden ser comprometidas.

**Para que el despliegue del servicio PTT pueda ser considerado un Servicio de Misión Crítica debe de cumplir una serie de requerimientos funcionales desde el punto de vista del servicio y técnicos desde el punto de vista de la red de banda ancha que va a proveer de ese servicio. Se deben analizar cómo éstas son capaces de proporcionar el mismo nivel de servicio requerido para labores de misión crítica.**

Ya en 2013 el NPSTC [8] enumeraba en su informe "Push to Talk Over Long Term Evolution Requirements ", un conjunto de requerimientos que debía cumplir el servicio PTT (Push to Talk) al ser desplegado sobre redes de banda ancha. Estos requerimientos están basados en el servicio PTT PMR y en la experiencia de usuarios que trabajan diariamente con esta tecnología.

Uno de los objetivos del NPSTC era entonces que estos requerimientos fueran recogidos por los organismos de estandarización (especialmente el 3GPP a través del grupo de trabajo SA6) en las futuras versiones del estándar de LTE. Estos requerimientos se agrupan según su naturaleza:

Tabla 1: Requerimientos funcionales según NPSTC [8]

Naturaleza	Descripción
Llamada	Llamada a grupo, llamada privada y llamada a grupo con aceptación de llamada
Servicio	Rendimiento de las llamadas PTT, PTT Late Call Entry, gestión de grupos dinámicos y monitorización de las llamadas.
Prioridad	Priorización de las llamadas y llamadas de emergencia.
Seguridad y identificación	Identificación de la llamada, gestión de perfiles, seguridad y localización.

Además de estos requerimientos se incluían los requerimientos funcionales para llamadas directas PTT entre dispositivos que no se comunican a través de la red y define la operativa funcional para interoperar con recursos de emergencia que emplean redes PMR (P25, TETRA, DMR)

En 2014, el NPSTC [9] se centró en los requerimientos técnicos que debe cumplir la red para garantizar el rendimiento de las llamadas PTT.

Tabla 2: Requerimientos técnicos según NPSTC [9]

Requerimiento	Descripción
Consideraciones Medioambientales	Son circunstancias ambientales externas a la red pero que pueden provocar la discontinuidad del servicio.
Acuerdos Nivel Servicio (SLA)	Cada una de las agencias PPDR que operan en la red tienen diferentes requerimientos de seguridad, prioridad y servicios. Debe existir un acuerdo de servicio por cada una de las organizaciones.
Disponibilidad (Reliability)	Es la capacidad de la red para funcionar satisfactoriamente de forma continuada y mantener sus funciones, en circunstancias rutinarias, hostiles o inesperadas.
Continuidad (Resiliency)	Recuperación ante fallos.
Cobertura	La falta de cobertura puede provocar la pérdida de vidas humanas.
PTT	El concepto de Public Safety Grade (PSG) definido en [9] obliga a tomar decisiones de diseño de la red que permitan a los servicios de emergencia mantener la capacidad de comunicarse durante incidentes de misión crítica. Una red PSG es el resultado de aplicar implementaciones técnicas empleadas en el despliegue de las actuales redes de comunicaciones de emergencia (PMR/LMR) con el objetivo de lograr el nivel de disponibilidad y continuidad del servicio que requiere una red para respaldar las operaciones de misión crítica. En el informe de 2013, el NPSTC define a nivel funcional como debe operar PTT en redes LTE.
Aplicaciones desplegadas en red	Este informe no pretende ser una definición de requisitos (SoR) para el despliegue de aplicaciones en redes de banda ancha, sino que trata de identificar riesgos y proponer buenas prácticas que se deberían seguir a la hora de desarrollar o administrar esas aplicaciones: <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Identificación de los datos que el usuario final va a requerir en función del contexto en el que se esté desarrollando la misión.</li> <li>▪ Disponibilidad.</li> <li>▪ Modelo de datos común.</li> <li>▪ Interfaz centrado en el usuario.</li> <li>▪ Interoperabilidad entre los sistemas de mando y control empleados por las diferentes agencias PPDR.</li> <li>▪ Facilidad y sencillez para que los recursos (técnicos) de emergencia puedan establecer comunicaciones de voz y de datos.</li> <li>▪ Rendimiento de la aplicación en el dispositivo del cliente: consumos de batería, consumos de ancho de banda de la red, tiempos de respuesta del interfaz etc.</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Continuidad (Resiliency): Recuperación ante fallos.</li> <li>▪ Escalabilidad, adaptabilidad y portabilidad.</li> <li>▪ Seguridad en el acceso a los dispositivos, a las aplicaciones y sobre las comunicaciones de voz y datos. Tanto las transmitidas, como las recibidas.</li> <li>▪ Actualizaciones controladas del software.</li> </ul>
Ubicaciones	Relación de requerimientos que deben cumplir las ubicaciones de infraestructura en una red de misión crítica (PSG) y a las recomendaciones de instalación de cada uno de los elementos que la conforman.

Las comunicaciones son vitales para las agencias PPDR durante los servicios diarios rutinarios y situaciones de emergencia. Identifica a las redes de voz (LMR/PMR) como las más fiables porque inspiran confianza y seguridad. En el citado informe se indica que las redes inalámbricas comerciales no se construyen empleando el mismo estándar. Por tanto, en este informe, se identifica los requerimientos que debe cumplir una infraestructura de red para ser considerada como una red de comunicaciones de banda ancha de misión crítica.

Paralelamente en el tiempo existen 2 publicaciones de TCCA [10] [11] 2013-2014 y una posterior de Ramón Ferrus y Oriol Sallent [1] (2015) donde se indican los condicionantes que a su entender van a marcar la transición de las redes de seguridad públicas existentes en esos años a las redes de misión crítica de banda ancha. Estos son:

- Requerimientos funcionales [8] [10] [11]
- Requerimientos técnicos [9] [12]
- Condicionantes económicos o tecno-económica [1]

En base a toda esta bibliografía es posible a continuación resumir cuales son los condicionantes que entre los años 2013-2015 se identificaron a la hora de abordar la transición de las redes de seguridad existentes a redes de misión crítica de banda ancha.

## Requerimientos funcionales

La red de misión crítica de banda ancha debe proporcionar los siguientes servicios:

Tabla 3: Relación de servicios de red de misión crítica de banda ancha [8] [10] [11]

Servicios	Detalle
Llamadas a grupo	Comunicaciones a través de grupos de usuarios y múltiples grupos de usuarios (y otros servicios relacionados con la comunicación grupal, como administración de grupos, entrada tardía, grupos dinámicos, etc.)
Comunicación de dispositivo a dispositivo	Comunicaciones entre dispositivos móviles independientes de la red. (ProSe)
Push-to-Talk (PTT)	Comunicación a través de la red de radio móvil en la que los usuarios presionan una "tecla de conversación" para activar la ruta de transmisión de voz antes de hablar
Priorización y prevención	Capacidad para permitir que las llamadas más importantes se cursen en momentos de congestión
Llamadas de emergencia	Llamadas priorizadas sobre otro tráfico

## Requerimientos técnicos

La red de misión crítica de banda ancha debe tener las siguientes características técnicas con independencia de la tecnología empleada:

Tabla 4: Relación de características técnicas de una red de misión crítica de banda ancha [9] [12]

Servicios	Detalle
Acuerdos de Nivel de Servicio (SLA)	Define la calidad del servicio contratado por cada organización de seguridad, defensa y emergencias
Cobertura	La cobertura de radio debe cubrir cerca del 100% del área geográfica del país (para redes nacionales) más la posibilidad de operar incluso fuera de la cobertura de las redes (con comunicación de dispositivo a dispositivo)
Disponibilidad (Reliability)	Es la capacidad de la red para funcionar satisfactoriamente de forma continuada y mantener sus funciones, en circunstancias rutinarias, hostiles o inesperadas.
Continuidad (Resiliency)	Recuperación ante fallos
Seguridad	Múltiples niveles de encriptación para satisfacer las necesidades de las organizaciones de seguridad pública, tanto de extremo a extremo como de interfaz aérea.
Interoperabilidad	Capacidad de comunicación con otras redes de seguridad pública

## Condicionantes económicos o tecno-económicos

Hay tres condicionantes que marcan la transición de las redes de seguridad pública (LMR/PMR) a redes de banda ancha:

Tabla 5: Relación de condicionantes tecno-económicos [1]

Condicionantes	Detalle
Dimensión Tecnológica	Se refleja a través del trabajo de estandarización realizado por 3GPP para permitir que LTE se convierta en una tecnología de soporte para las redes PPDR. Estas normas deberían introducir las funcionalidades necesarias en los sistemas LTE para proporcionar servicios que ahora están disponibles solo en sistemas especializados de seguridad pública, como P25, TETRA o DMR.
Dimensión de red	Se refleja a través de diferentes modelos de entrega y de negocio que podrían aplicarse en la transición de las redes de seguridad pública de banda estrecha a banda ancha.
Dimensión del espectro	Se refleja a través de varias regulaciones que deben adoptarse a nivel local y global para encontrar un espectro que pueda utilizarse para las necesidades de seguridad pública y que posiblemente sean necesidades en todos los países

Las funcionalidades de PTT (Push to Talk) indicadas en [8] [10] [11] se encuentran definidas en el estándar del 3GPP desde finales de 2016 en la Release 13 de LTE y se han ido completando en siguientes versiones del estándar (Release 14 -16)

A los requisitos funcionales indicados tanto por el NPSTC como por la TCCA, se deben añadir los estrictos requerimientos definidos por el 3GPP respecto al rendimiento del servicio de llamadas de PTT para que pueda ser considerado, servicio de misión crítica. A tal efecto, el 3GPP ha definido unos indicadores para medir el rendimiento de cada una de las fases de una llamada PTT, así como fijado los tiempos límite (medidos en milisegundos) que se deben cumplir en el 90% de las llamadas para cada uno de los indicadores.

No se ha encontrado en publicaciones científicas, ni como producto comercial, métodos de cálculo de estos indicadores y se cree que es el requerimiento principal para considerar un servicio PTT como un servicio realmente de misión crítica MCPTT o por el contrario como simplemente un servicio PTT desplegado sobre una red de banda ancha.

**La complejidad para poder identificar los aspectos que más afectan al cumplimiento o no de los KPIs ha sido la motivación principal para la redacción de esta tesis. El objetivo final buscado es poder definir un método de cálculo empírico y replicable de los indicadores que definan el rendimiento de las llamadas PTT en redes de banda ancha.**

Este método de cálculo nos permitirá comparar el rendimiento del servicio MCPTT en cada de las arquitecturas de red 4G y 5G. **Estos resultados serán muy interesantes de cara a los futuros despliegues del servicio MCPTT en redes de banda ancha.** Se va a analizar el porcentaje en que cada componente que participa en la llamada añade latencia a la comunicación, aportando propuestas desde el punto de vista del servicio MCPTT enfocadas a disminuir esos tiempos de latencia.

**En esta tesis doctora, se va a definir una formulación para el cálculo de los indicadores de servicio, tomando como referencia un escenario base de cálculo sobre el cual validar la formulación obtenida. Una vez, aprobada la formulación será empleada para analizar el impacto del despliegue de los Servicios de Misión Crítica (MCS) en diferentes arquitecturas de red LTE y 5G. Se ha tomado como escenario base de cálculo, la arquitectura de referencia de LTE.**

**La continuidad y la disponibilidad del servicio se va a analizar tomando como referencia las recomendaciones del NPSTC [9].** Los acuerdos a nivel del servicio (SLA) firmado por el proveedor del servicio con el operador, garantiza al primero la continuidad y disponibilidad de los nodos de cómputo y de la red

Sin embargo, es responsabilidad del proveedor del servicio desplegar unos MCS en la infraestructura del operador, capaces de recuperarse ante fallos y asegurar la continuidad ante aumentos de capacidad no programados como pueden producirse derivadas de situaciones excepcionales de emergencia. Con independencia de los fenómenos naturales o sociales adversos que se produzcan y del efecto que esto provoque sobre la red del operador, el servicio siempre debe tener la capaz de estar operativo garantizando las comunicaciones de las agencias PPDR.

## 1.2 Objetivos

El objeto fundamental de esta tesis es:

**Analizar las diferentes alternativas de despliegue de los Servicios de Misión Crítica (MC) sobre las actuales redes de banda ancha 4G/5G y evaluar su influencia, especialmente en términos de rendimiento, sobre los requerimientos de despliegue**

Este objetivo requiere alcanzar un conocimiento avanzado tanto técnico como funcional del servicio MCPTT, de las redes de transporte de banda ancha LTE/5G y de las diferentes técnicas que se puedan emplear en ambas tipologías de red para lograr una mejora de la latencia y la continuidad del servicio.

Este análisis se ha dividido en acciones más simples a las que se ha asociado un objetivo. A lo largo de los siguientes capítulos se irán recorriendo cada una de esas acciones y concretando los diferentes objetivos marcados. A continuación, se presentan unas tablas que resumen el trabajo a través de sus acciones y objetivos.

Con objeto de que sea más sencillo su seguimiento se adjunta una tabla que relaciona las acciones con los capítulos de este documento.

Tabla 6: Relación de tareas

Id.	Descripción Tarea
A-1	Identificación de los requerimientos necesarios para desplegar redes de misión crítica de banda ancha.
A-2	Análisis del funcionamiento de las redes soporte y cómo su comportamiento puede afectar a los servicios de misión crítica desplegados sobre ella.
A-3	Análisis de las arquitecturas de despliegue para los servicios de misión crítica en las redes 4G-5G.
	A-3.1 Definición de un escenario base de despliegue A-3.2 Definición de una propuesta de alternativas de despliegue para los servicios de misión crítica en las redes 4G-5G.
A-4	Estudio del comportamiento de los indicadores de rendimiento de los servicios de misión crítica sobre la arquitectura de red soporte.
	A-4.1: Identificación de los factores que afectan al rendimiento de los servicios de misión crítica.
	A-4.2: Enumeración de los componentes que participan en un servicio de misión crítica con independencia de la arquitectura soporte sobre la que se despliegue
	A-4.3: Método de cálculo de los indicadores sobre una arquitectura estándar LTE. A-4.4: Extrapolación del método de cálculo a cada una de las alternativas de despliegue.
A-5	Definición de líneas futuras a partir de las conclusiones obtenidas

Para poder indicar de forma gráfica a lo largo de este documento la acción asociada al capítulo se ha diseñado el siguiente grafo de proceso, en el que el color oscuro indicará la acción en la que se encuentre el lector:

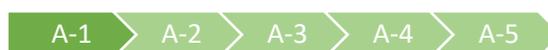


Figura 1: Grafo general de tareas

En la siguiente tabla se presenta el conjunto de objetivos técnicos a alcanzar gracias a la relación de las acciones indicadas anteriormente.

Tabla 7: Relación de objetivos técnicos

Id.	Descripción Objetivos
OT-1	Enumerar los requerimientos funcionales, técnicos y socioeconómicos necesarios para el despliegue de los servicios de misión crítica.
OT-2	Propuesta de técnicas que puedan minimizar el impacto

	Estudio del impacto de la red soporte en los servicios de misión crítica
OT-3	OT-3.1: Identificar el porcentaje de tiempo de retardo que añade cada componente que participa en un servicio de misión crítica. OT-3.2: Identificar la estrategia de despliegue que añade menor latencia a los servicios de misión crítica
OT-4	Propuesta de escalabilidad y disponibilidad del servicio de misión crítica MCPTT

A continuación, se va a ampliar la descripción de los objetivos técnicos indicados en la tabla anterior y su relación con acciones específicas:

- **OT-1:** Este objetivo es el pilar principal de esta tesis doctoral y por tanto al que se le ha dedicado una parte muy importante del tiempo a su investigación. Con este objetivo se pretende establecer una documentación técnica que pueda ser consultada por cualquier entidad que esté **evaluando la posibilidad de acometer un despliegue de los servicios de misión crítica**. Este objetivo engloba los tres requerimientos que se entiende deben de considerarse a la hora de abordar un despliegue de estos servicios: funcionales, técnicos y socioeconómicos. Estos, pueden ser de interés tanto para las agencias PPDR [13], como para los operadores de red encargados del: replanteo, dimensionamiento, planificación, puesta en marcha y mantenimiento de la red que dé soporte a los servicios y para los proveedores de los servicios de misión crítica.
- **OT-2:** Para la consecución de este objetivo, se han definido dos acciones. La primera está relacionada sobre las redes soporte sobre las que se van a desplegar los servicios. Se debe conocer en detalle aspectos funcionales y técnicos ligados al funcionamiento de estas redes. Se debe identificar cuáles son los componentes que afectan al rendimiento de los servicios de misión crítica desplegados y que, por tanto, añadirán retardos a las comunicaciones pudiendo poner en peligro el cumplimiento de los indicadores de servicio definidos por el 3GPP. Una vez identificados esos componentes críticos se deberá analizar si existen alternativas de despliegue que puedan minimizar el impacto de esos componentes en los servicios de misión crítica, así como las técnicas asociadas empleadas en cada despliegue. La suma de ambas acciones permitirá enumerar las propuestas técnicas que minimizan el impacto del despliegue en cada una de las redes.
- **OT-3:** En la acción **A-4** se va a analizar los indicadores de rendimiento de los servicios de misión crítica por cada una de las estratégicas de despliegue definidas en esta tesis. Para poder medir y evaluar ese impacto ha sido necesario definir un modelo de cálculo de estos indicadores que no existía con anterioridad. Para poder establecer la comparativa, se ha definido una arquitectura de referencia, denominada en esta tesis como "**Escenario Base de Cálculo**" en la que se han identificado cada uno de los componentes que afectan al rendimiento de los servicios de misión crítica y que, por tanto, deben aparecer en el modelo de cálculo a emplear. Una vez validado el modelo a

través de llamadas MCPTT completas realizadas en la infraestructura del laboratorio de investigación se ha aplicado a cada una de las estrategias de despliegue identificadas. Toda esta experimentación permitirá responder a **OT-3**, Identificando la estrategia de despliegue que añade menor latencia a los servicios de misión crítica

- **OT-4:** Se da respuesta a este objetivo a través de la acción **A-5**, donde quedan definidas las líneas futuras a partir de las conclusiones obtenidas en las acciones previas. Una línea de futuro en la que se está trabajando es en la disponibilidad y escalabilidad de los servicios de misión crítica para poder mejorar la resiliencia y los rendimientos de estos en cada una de las estrategias de despliegues enumeradas en la presente tesis. La escalabilidad está muy ligada a la continuidad de los servicios y a garantizar que estos, sean capaces de gestionar los aumentos puntuales de capacidad que requiere una situación de emergencia. Con la particularidad que cada emergencia es diferente y la concentración / dispersión de los recursos unido al aumento de estos deberán poder ser atendido por los servicios desplegados garantizando el correcto rendimiento de estos.

En la siguiente tabla se indica la acción que corresponde con el objetivo a alcanzar:

Tabla 8: Relación de acciones / objetivos técnicos

Id.	Descripción Acción	Objetivos Técnicos			
		OT-1	OT-2	OT-3	OT-4
A-1	Identificar los requerimientos necesarios para desplegar redes de misión crítica de banda ancha.	X			
A-2	Analizar el funcionamiento de las redes soporte y como su comportamiento puede afectar a los servicios de misión crítica desplegados sobre ella.		X		
A-3	Analizar las arquitecturas de despliegue para los servicios de misión crítica en las redes 4G-5G.		X		
A-4	Estudiar el comportamiento de los indicadores de rendimiento de los servicios de misión crítica sobre la arquitectura de red soporte.			X	
A-5	Definición de líneas futuras a partir de las conclusiones obtenidas				X

### 1.3 Organización del documento

Esta tesis está organizada en 11 capítulos. Los tres últimos corresponden a los **ANEXOS** capítulo 9, **GLOSARIO** capítulo 10 y el capítulo 11 contiene la **BIBLIOGRAFÍA** de esta tesis. A continuación, se incluye una tabla guía donde se relacionan los capítulos con las acciones antes indicadas. El objetivo es facilitar un acceso rápido a las acciones concretas que sean más del interés para el lector.

Tabla 9: Relación de tareas / capítulos

Id.	Descripción Acciones	Contenidos
A-1	Identificar los requerimientos necesarios para desplegar redes de misión crítica de banda ancha.	[1] Introducción [2] Hoja de ruta de estandarización redes PPDR BB [4] Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB
A-2	Analizar el funcionamiento de las redes soporte y como su comportamiento puede afectar a los servicios de misión crítica desplegados sobre ella.	[3] Análisis de la evolución de las Redes Radio
A-3	Analizar las arquitecturas de despliegue para los servicios de misión crítica en las redes 4G-5G.	[5] Análisis del escenario base de cálculo [6] Alternativas de Despliegue
A-4	Estudiar el comportamiento de los indicadores de rendimiento de los servicios de misión crítica sobre la arquitectura de red soporte.	[7] Análisis de Indicadores por despliegue
A-5	Definición de líneas futuras a partir de las conclusiones obtenidas	[¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.] ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.

El primer objetivo de esta tesis **OT-1** ha sido, enumerar los requerimientos funcionales, técnicos y socioeconómicos necesarios para el despliegue de los servicios de misión crítica. A través de los capítulos de Introducción, Hoja de ruta de estandarización de redes PPDR BB y Requerimientos técnicos de redes PPDR BB, se ha identificado los requerimientos necesarios para desplegar redes de misión crítica de banda ancha **A-1**.

En el capítulo de Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB se han definido los tres requerimientos más importantes, NPSTC [9] y Simón Forge en el informe "Is Commercial Cellular Suitable for Mission Critical Broadband?" [12] de MCS:

- **Rendimiento.** El 3GPP ha definido un conjunto de indicadores de rendimiento que debe cumplir el PTT desplegado sobre redes de banda ancha para ser considerado de misión crítica MCPTT.
- **Continuidad.** Recuperación ante fallos, orientada a los servidores que proveen de los MCS.
- **Disponibilidad:** Analizada desde el punto de vista de la cobertura.

Una vez conocidos los requerimientos necesarios, a través del capítulo 3 de Análisis de la evolución de las Redes Radio, se analizarán el funcionamiento de las arquitecturas que van a soportar los servicios de misión crítica y cómo su propia definición, naturaleza o funcionamiento pueden afectar en el rendimiento de los

servicios desplegados **A-2**. En esta tesis se ha elegido la arquitectura estándar LTE, en su versión 13 como escenario base de cálculo, sobre el que definir un método de cálculo empírico y replicable de los indicadores que definen el rendimiento de las llamadas PTT en redes de banda ancha. A lo largo del capítulo de Escenario Base de Cálculo se detalla este método que, posteriormente, en el capítulo de Alternativas de Despliegue, se aplica a diferentes arquitecturas de red de banda ancha **A-3**. Fruto del análisis de estas dos tareas se alcanza el objetivo **OT-2** con el que se identifican técnicas que pueden minimizar el impacto del despliegue del servicio sobre la arquitectura soporte.

En el capítulo de Análisis de Indicadores por despliegue, se aplica el modelo de cálculo definido para el escenario base (capítulo 5) sobre las alternativas de despliegue indicadas en el capítulo 6. La acción **A-4** concluye con un detallado análisis del impacto en el servicio de cada uno de los componentes que participan en el servicio MCPTT comparados por despliegues. Como resultado de esta acción se identifica el porcentaje de tiempo de retardo que añade cada componente que participa en un servicio de misión crítica **OT-3.1** y se identifica la estrategia de despliegue que añade menor latencia a los servicios de misión crítica **OT-3.2**

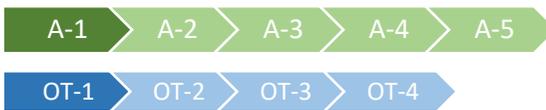
La última acción que queda por completar es la definición de líneas futuras a partir de las conclusiones obtenidas y es el capítulo de Conclusiones y Líneas donde se resume el trabajo realizado, así como las conclusiones que se han obtenido y presenta las aportaciones que realiza esta tesis. Esta **A-5** da respuesta al objetivo **OT-4** y se presenta una propuesta de escalabilidad del servicio de misión crítica MCPTT. Es una línea de investigación en curso en el departamento y su objetivo es garantizar el rendimiento y la continuidad del servicio, dando respuesta al capítulo de Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB.

# Hoja de ruta de estandarización redes PPDR BB

## 2 Hoja de ruta de estandarización redes PPDR BB

<b>2.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>15</b>
<b>2.2</b>	<b>OMA PoC (PUSH TO TALK OVER CELLULAR)</b>	<b>20</b>
2.2.1	INTRODUCCIÓN	20
2.2.2	COMPONENTES DE LA ARQUITECTURA	21
2.2.3	PROTOCOLOS PoC	22
2.2.4	PROCEDIMIENTO DE LLAMADA DE OMA PoC	23
<b>2.3</b>	<b>SERVICIOS DE MISIÓN CRÍTICA (MCS) – MCPTT</b>	<b>24</b>
2.3.1	INTRODUCCIÓN	24
2.3.2	COMPONENTES MCPTT	25
2.3.3	ROLES DEL MCPTT SERVER	27
2.3.4	PROCEDIMIENTO DE LLAMADA MCPTT	28
<b>2.4</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>31</b>

### 2.1 Introducción



**E**ste capítulo forma parte de acción **A-1** y al igual que en el capítulo anterior se continúa identificando los requerimientos necesarios para desplegar redes Public Protection Disaster Recovery Broadband (PPDR BB).

Se comienza representando a través de la Tabla 10 el conjunto de hitos marcados de 2014 a 2025 en la hoja de ruta para llevar a cabo la transición en Europa de las redes de radio privadas digitales a las redes de banda ancha de Misión Crítica.

Posteriormente este estudio se centra en aquellos hitos que desde 2008 han sido más relevantes en la hoja de ruta de las redes de emergencia de banda ancha.

Por la importancia y la relevancia que tiene dentro de esta tesis doctoral se han dedicado dos subcapítulos 2.2 y 2.3 al Push- To-Talk over Cellular (PoC) y a Mission Critical Push-To-Talk (MCPTT).

LTE ha sido diseñado para proporcionar una solución de conectividad IP de alta velocidad y baja latencia con un claro enfoque en las empresas, pero también a mercados de consumo. La conectividad IP que ofrece LTE a los clientes puede ser empleada por cualquier aplicación que emplee comunicaciones IP, lo que permite proporcionar una gran cantidad de servicios a través de las redes LTE.

Tabla 10: Hoja de ruta para la transición en Europa de las redes de radio privadas digitales a las redes de banda ancha de Misión Crítica [14]

Year	Expected milestones
2014	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trials by European PPDR organizations based on commercial networks started, first MVNO implementation by a PPDR organization</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3GPP Release 12 approved: ProSe (direct mode communications), GCSE (dynamic groups of mobile users), driven by European and US PPDR stakeholders</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CEPT technical work (part A of CEPT Report in response to the EC Mandate on 700MHz, band plan and block edge mask) for the 700 MHz completed (July 2014), with the exception of the technical studies of the optional 2 x 5 MHz of a dedicated PPDR spectrum</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Trials of dedicated PPDR LTE networks in the 400 MHz</li> </ul>
2015	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CEPT technical work for the 400 MHz completed</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ECC Report B on 'harmonized conditions and frequency bands for BB PPDR' approved, towards a new ECC decision or revision of ECC/DEC/(08)05</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ETSI approves the suite of first standards for critical communications</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• OMA 'PTT over cellular' standardization</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• First contract with a commercial operator for nationwide broadband PPDR service is expected</li> </ul>
2016	<ul style="list-style-type: none"> <li>• WRC15: co-primary mobile allocation in 694–790 MHz</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CEPT work on the refinement of the technical conditions for 700 MHz band to possibly increase the international harmonization (e.g. in line with Resolutions of WRC15) completed</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• EU and ECC decisions on the harmonization of the 694–790 MHz band approved</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ECC regulatory framework for PPDR is revised by adding spectrum within the 700 MHz band as a new harmonized broadband PPDR frequency range and upgrading parts of the 400 MHz band to the broadband PPDR frequency range' based on the LTE technology (either through revision of ECC/DEC/(08)05 or by developing a new ECC decision)</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3GPP Release 13 approved: MCPTT (mission critical push-to-talk over LTE may be expected), isolated E-UTRAN operation (resilience)</li> </ul>
2017	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LTE equipment compliant with 3GPP Rel.12 commercially available</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Review of the first results of initial implementations based on commercial networks</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combined LTE700/TETRA infrastructure solutions commercially available</li> <li>• Authorizations to mobile broadband of the 694–790 MHz range issued in a number of European countries; some countries may opt for dedicated solutions for PPDR</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3GPP is expected to create a new band class for LTE in the 400 MHz band</li> </ul>
2018–2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Roll-out of first commercial LTE networks in the 700 MHz range</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LTE equipment compliant with Rel.13 with enhanced PPDR functionality is commercially available</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Combined LTE/TETRA terminal equipment commercially available</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• First implementations of hybrid solutions based on commercial LTE networks in 700 MHz range</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Possible first implementations of dedicated PPDR LTE networks in the 400 MHz range</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3GPP Rel. 14 approved: possible enhancements of PPDR functionalities in Rel. 12/13</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PPDR operational procedures are gradually adjusted to include broadband communications</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• First trial of cross-border interoperability and roaming between PPDR broadband LTE networks according to the flexible harmonization concept in the 700 MHz range</li> </ul>
2020–2025	<ul style="list-style-type: none"> <li>• LTE equipment compliant with Rel.14 with full PPDR functionality is commercially available</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mission-critical broadband communications are introduced as trials</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voice (non-mission critical) and data integration within LTE networks</li> </ul>
Beyond 2025	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mission-critical voice and data are provided via LTE networks based on either commercial, hybrid or dedicated solutions, subject to national decisions</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• TETRA/TETRAPOL networks are gradually phased out</li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• DMO trials are conducted</li> </ul>

LTE resulta por tanto una tecnología adecuada para la implementación de una gran cantidad de aplicaciones de banda ancha móvil para PPDR, especialmente para las comunicaciones de datos, demandadas por estas agencias. Sin embargo, el estándar LTE requiere de una serie de características adicionales para poder ser considerada como una tecnología de misión de banda ancha y convertirse en una alternativa real a las redes de radio privada digital. [15] [16]

El 3GPP, a través de su grupo de trabajo SA6, consciente de esta carencia y atendiendo a la demanda de la industria y de las agencias PPDR, ha incluido a partir de la Release 12 nuevas características orientadas a proporcionar servicios de misión crítica sobre LTE:

- **Habilitadores del sistema de sistema de comunicaciones de grupo (GCSE)**, junto con la aplicación de voz, Push-to-Talk (PTT) y su evolución hacia comunicaciones de grupo multimedia (voz, datos, vídeo). GCSE está

soportado en la Release 12 por el servicio Mission Critical Push To Talk (MCPTT) estandarizado en la Release 13.

- **Servicios basados en proximidad (ProSe)** [17] permiten comunicaciones dispositivo a dispositivo sin necesitar cobertura de la infraestructura de red (off-network operation). Estandarizado en la Release 12 y completado en la 13. Las comunicaciones dispositivo a dispositivo junto con las comunicaciones de grupo y PTT son servicios fundamentales para las agencias PPDR, aunque la falta de disponibilidad de chipsets compatibles ha imposibilitado hasta la fecha su adopción.
- **IOPS (Isolated E-UTRAN Operation for Public Safety)** [18]. Esta funcionalidad permite que cualquier estación que haya perdido sus comunicaciones de backhaul reencamine las llamadas y los mensajes entre los usuarios conectados. Planificado para ser cubierto por la Release 12 y finalmente se contempló en la Release 13.
- **Terminales de alta potencia:** Permiten el uso de alta potencia de transmisión en bandas específicas para aumentar el rango de cobertura. En la Release 11 se ha definido una clase de transmisión de mayor potencia.
- **Priorización y funcionalidad para el control de la calidad del servicio (QoS):** LTE desde la Release 8 disponía de un conjunto de capacidades estándar para la gestión de la calidad del servicio. En posteriores versiones, hasta la Release 11 se han incluido mejoras adicionales para la gestión de servicios prioritarios.

Organizaciones como el The National Public Safety Telecommunications Council (NPSTC), Terrestrial Trunked Radio (TETRA), The Critical Communications Association (TCCA), el Comité Técnico de ETSI en TETRA y el Technical Committee (TC) Terrestrial Trunked Radio and Critical Communications Evolution (TCCE), han cooperado estrechamente con el 3GPP identificando requerimientos y aspectos técnicos que han ido apareciendo en las nuevas versiones de LTE. Actualmente la última versión es Release 16. [19]

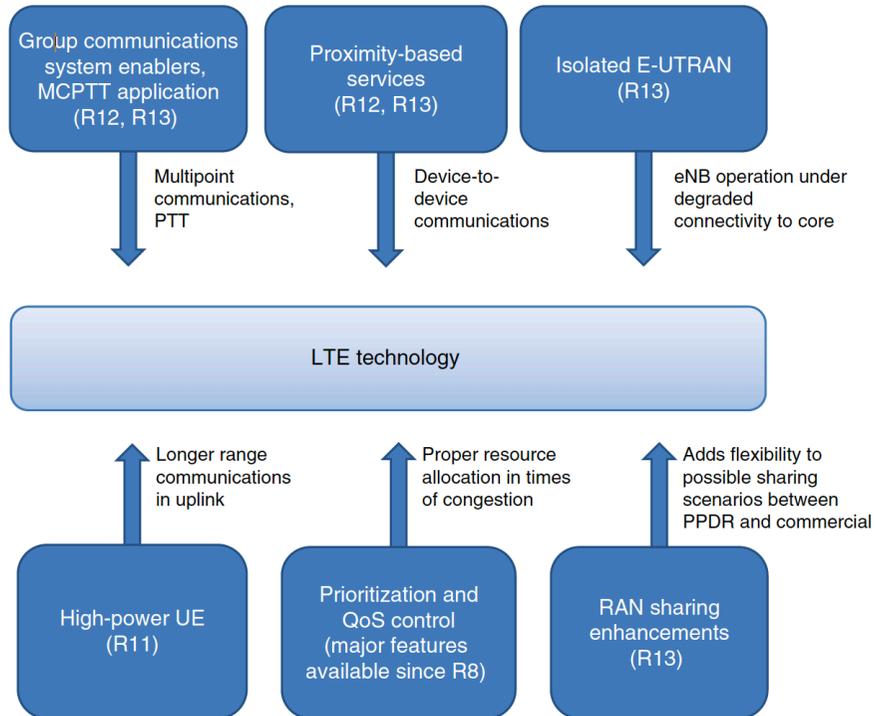


Figura 2: Relación de especificaciones de misión crítica introducidas en LTE (R8...R13) [1]

Otras organizaciones denominadas, Standard Development Organizations (SDOs), trabajan en la estandarización de la capa de aplicación (despliegue de servicios sobre la arquitectura de soporte, en nuestro caso, LTE) han complementado también el trabajo del 3GPP. A continuación, se va a citar los más relevantes:

- 3GPP WG SA6:** a finales de 2014 se creó este grupo de trabajo dentro del 3GPP encargado específicamente del trabajo de estandarización para aplicaciones en el espacio de comunicaciones de misión crítica [20]. En particular, WG SA6 es el responsable de la definición, evolución y mantenimiento de las especificaciones técnicas para los elementos funcionales de la capa de aplicación e interfaces que admiten comunicaciones críticas. El SA6, a partir de la transferencia técnica realizada por el OMA, estuvo centrado en adecuar sus especificaciones para que se adaptaran a los requisitos de las agencias PPDR [13]. Todo este trabajo culminó a finales de 2016, con la estandarización del servicio Push to Talk para Misión Crítica (MCPTT) en la Release 13 de LTE, en septiembre 2017 con la estandarización de los servicios de datos de misión crítica (MCDATA) y la estandarización del servicio de video de misión crítica (MCVIDEO). En la actualidad, el WG SA6 sigue trabajando en la Release 16-17 en viabilidad del despliegue de los servicios MC en arquitecturas con acceso de radio no terrestres (inicialmente satélites, pero también estaciones base aerotransportadas) y a los aspectos marítimos (infra-buque, barco a tierra y barco a barco).

- **ETSI TC TCCE:** Ha definido el modelo de referencia de arquitectura de comunicaciones críticas [21] y, sobre esta base, ha desarrollado la arquitectura o el servicio genérico de misión crítica equivalente a las tecnologías de banda estrecha existentes. Éste podría ser desplegado sobre una red inalámbrica de banda ancha, con enfoque específico para LTE [22].
- **Open Mobile Alliance (OMA):** OMA ha realizado la especificación de un precursor de los estándares MCPTT denominado Push-to-Communicate for Public Safety (PCPS), consolidando una solución previa conocida como Push-To-Talk over Cellular (PoC) que ha sido adoptada en el dominio comercial. OMA ha trabajado con 3GPP para encontrar el mejor método para la transferencia efectiva de esta especificación a 3GPP, de modo que pueda aprovecharse y continuarse dentro de 3GPP para cumplir con los requisitos de la comunidad PPDR [13].

En las próximas secciones se van a analizar las diferentes iniciativas de estandarización que se han ido sucediendo para desembocar en el conjunto de estándares MCPTT del 3GPP que centran esta tesis.

## 2.2 OMA PoC (Push to Talk over Cellular)

### 2.2.1 Introducción

El consorcio industrial OMA, que lidera la estandarización y promueve el uso de servicios de datos en redes móviles [23], especificó inicialmente un servicio de Push to Talk sobre redes móviles (PoC) sobre la capa IMS de 3GPP. El denominado OMA PoC es un sistema de comunicación de voz en tiempo real semidúplex, uno a uno o uno a muchos en tiempo real. Los usuarios seleccionan a las personas o grupos con los que desean hablar y presionan el botón para iniciar la conversación. La voz en OMA PoC a menudo se conecta automáticamente sin que los destinatarios respondan y escuchen de forma explícita, o alternativamente se puede elegir manualmente para aceptar la solicitud de llamada.

A diferencia del walkie talkie tradicional, PoC, es un servicio abierto y está estandarizado por OMA

Durante la conversación, el usuario puede solicitar hablar por orden de llegada o ser gestionado por un dispatcher que le concede el canal para que pueda hablar. Mientras tanto, el cliente PoC también puede participar en varias sesiones mediante la funcionalidad de sesión PoC simultánea. Los profesionales de la seguridad pública han estado confiando en servicios similares para comunicaciones especializadas durante mucho tiempo.

En comparación con VoIP y otras aplicaciones de acceso telefónico, PoC no necesita una marcación separada para cada usuario del grupo por lo que se puede usar directamente en escenarios de uno a muchos.

## 2.2.2 Componentes de la arquitectura

Los principales componentes de la arquitectura OMA PoC incluyen el terminal de usuario o UE, PoC Server, GLMS, eXtensible Mark-up Language (XML), Document Management Server (XDMs), IMS Core [24]

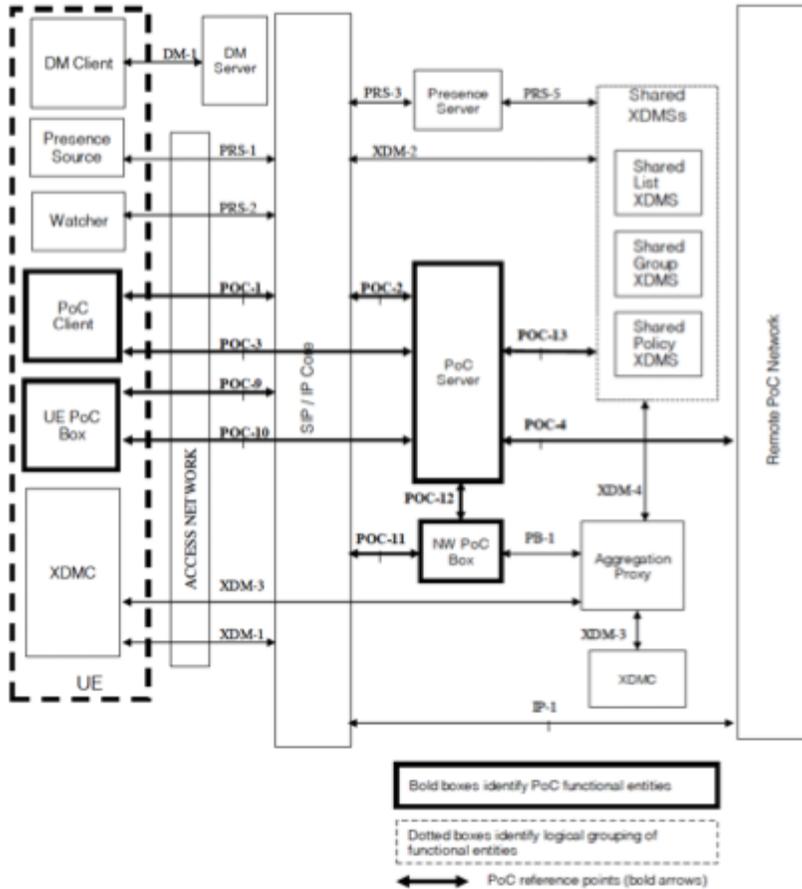


Figura 3: Componentes Arquitectura PoC [24]

El **servidor PoC** es un servidor de aplicaciones SIP que gestiona la configuración de la sesión PoC y los procedimientos de desconexión, control del uso del canal (Floor Control) y aplica la política definida para las sesiones grupales de PoC. Hay dos tipos de servidores PoC: [25].

- **PoC Controlling Server:** Uno por sesión. Lleva a cabo el manejo centralizado de la sesión SIP.
- **PoC Participating:** Uno o más por sesión. Se encarga del control de políticas y de cobros.

**XDMS** puede considerarse como el gestor de configuración de la aplicación. Permite crear, modificar, recuperar y eliminar información específica del usuario relacionada con el servicio en forma de documentos XML. XDMS utiliza un modelo cliente-servidor, y el protocolo de aplicación para admitir solicitudes y respuestas es el protocolo de transferencia de hipertexto (HTTP) [23]. XDMS es un marco general que puede manejar información asociada no solo a PoC y Presence, sino también a otros tipos de servicios existentes y futuros.

El **servidor de presencia y GLMS**, interactúan con el servidor PoC para proporcionar estados de suscriptor y manipulación de listas de recursos (mecanismo usado la generación y gestión de grupos y recursos en general).

### 2.2.3 Protocolos PoC

Los principales protocolos aplicados para el servicio PoC son: SIP, RTP y RTCP [26].

SIP se usa ampliamente en IMS para crear, modificar y finalizar sesiones multimedia entre dos o más partes. Es un protocolo de capa de aplicación basado en texto, que puede ejecutarse sobre TCP, UDP o el SCTP en la capa de transporte. SIP incorpora muchos elementos de HTTP en la capa de aplicación. Para OMA PoC, SIP se encarga principalmente de la señalización relacionada con el control de sesión.

Los protocolos RTP y RTCP se utilizan para el transporte de datos en tiempo real a través de redes de paquetes. Trabajan juntos para apoyar la transferencia de flujo de medios y su señalización de control de piso. Ambos corren sobre UDP sobre IP.

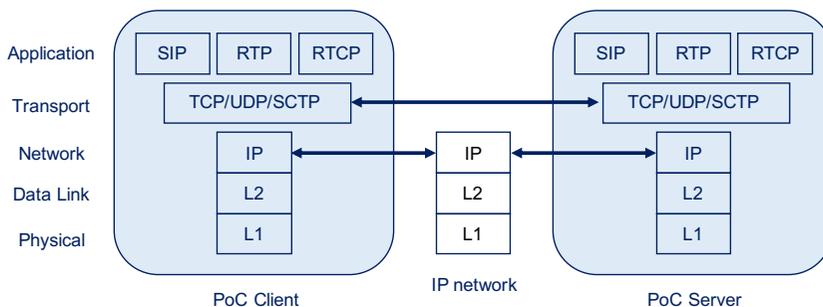


Figura 4: Pila de Protocolos PoC [33]

#### 2.2.4 Procedimiento de llamada de OMA PoC

En este apartado se detalla el procedimiento de establecimiento de una llamada en OMA PoC, que como más tarde se va a ver, es muy similar al procedimiento de llamada del servicio MCPTT.

- **Pasos 1-5:** El usuario A presiona el botón PTT para invitar a usuario B y C a una sesión de PoC. El UE A envía mensajes SIP INVITE hacia las direcciones de los UE de B y C. Los mensajes se envían al servidor PoC control / participante) en el que está registrado el usuario A (a través de su IMS CN, y luego a los servidores PoC de los receptores (participantes) a través de sus IMS CN.
- **Pasos 6-12:** El usuario B está configurado en modo de respuesta automática, por lo que se siguen los primeros procedimientos del modo de medios. El servidor PoC B envía una respuesta provisional SIP 183 al servidor PoC A y el mensaje INVITE al UE B
- **Pasos 26-37:** Al recibir la invitación de UE A, UE C envía una respuesta de 180 Ringing. Cuando el usuario C acepta manualmente la llamada de PoC, se transmite un mensaje 200 OK al servidor de PoC A través del servidor de PoC C. Luego se llevan a cabo procedimientos similares como el caso de UE B.
- **Pasos 38-43:** después de que el usuario A deja de hablar y suelta el botón PTT, UE A envía un mensaje de liberación de canal a su servidor PoC, y el servidor de control PoC A notifica el estado inactivo del canal a los clientes PoC B y C a través de sus servidores.
- **Pasos 44-62:** cuando el usuario B solicita hablar presionando el botón PTT, la solicitud de canal se retransmite desde UE B al servidor PoC A. Luego, los estados de canal se actualizan a UE B (FLOOR GRANTED y otros UE (FLOOR TAKEN) por el servidor de control y las ráfagas de conversación de UE B se entregan a los receptores a través de servidores PoC. Después de que el usuario B termina su discurso, se envían mensajes de liberación de permiso para hablar e inactivo como en los pasos 38-43.
- **Pasos 63-72:** en el caso de que transcurra un período de tiempo predefinido después de que los participantes suelten el botón PTT y abandonen la sesión, el servidor PoC de control termina la sesión de PoC en curso con los miembros del grupo. OMA POC establece las bases del actual MCPTT en términos de arquitectura tal y como se podrá comprobar al abordar en el siguiente apartado, dicho servicio de misión crítica.

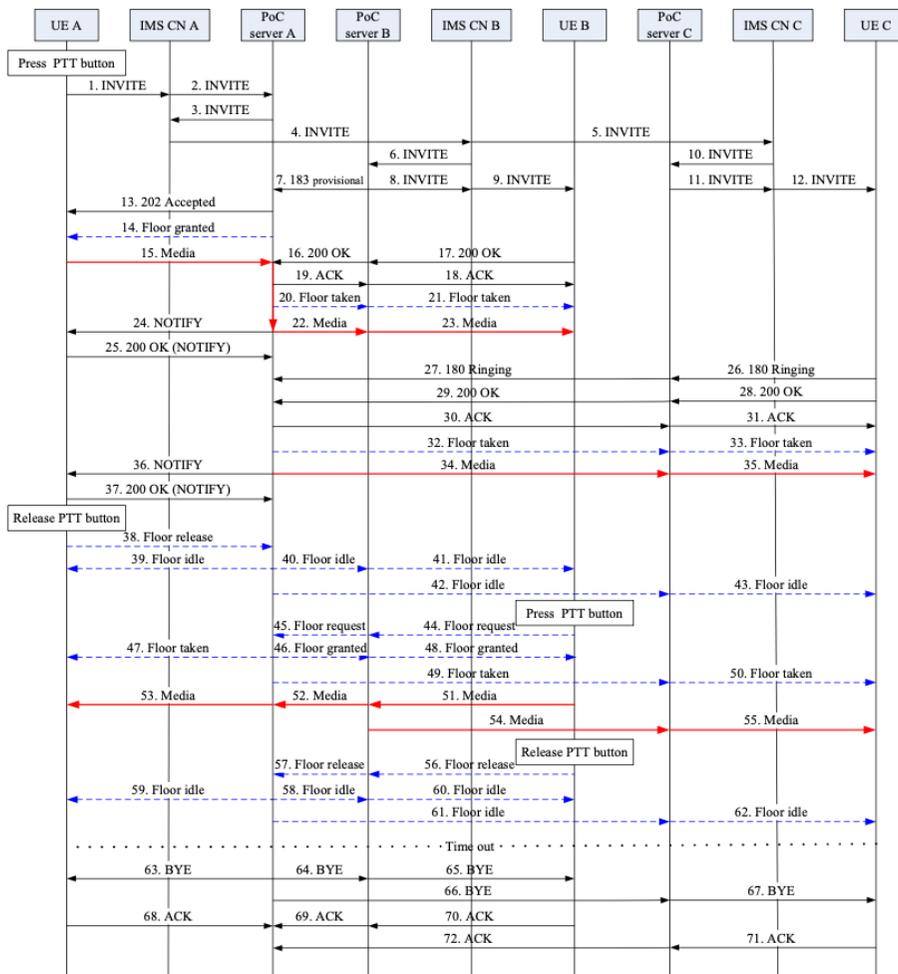


Figura 5: Procedimiento de llamada PoC [33] [35]

## 2.3 Servicios de Misión Crítica (MCS) – MCPTT

### 2.3.1 Introducción

MCPTT es el primero de una serie de servicios de misión crítica (MCS) impulsados por el grupo de trabajo SA6 de 3GPP. La estandarización de MCPTT sobre LTE comenzó en la versión 13, y se han ido agregado nuevas funcionalidades en las versiones posteriores (14, 15, 16) [27].

El servicio MCPTT permite la comunicación entre dos usuarios (llamadas privadas) y múltiples usuarios (llamadas grupales), donde cada usuario tiene permiso para hablar (transmitir voz / audio) en períodos de tiempo acordados. El sistema requiere que los participantes soliciten permiso para hablar. Tradicionalmente presionando un botón en el dispositivo del usuario. También proporciona un mecanismo prioritario para arbitrar la participación de los usuarios en la comunicación. Cuando varios usuarios solicitan poder hablar simultáneamente, la

elección de qué solicitud de usuario se acepta y qué solicitudes se rechazan o se ponen en cola se basa en una serie de características (incluidas las prioridades de los usuarios en disputa). El servicio MCPTT proporciona un método para que un usuario con una prioridad más alta (por ejemplo, en una situación de emergencia) anule la llamada que se encuentra en curso [28].

Finalmente, este servicio también implementa un mecanismo para limitar el tiempo que habla un usuario. De esta manera, cuando un usuario en una llamada consume todo su tiempo asignado, los usuarios de la misma prioridad o de menor prioridad tienen la oportunidad de obtener la autorización para hablar. Las características adicionales de un servicio MCPTT incluyen la supervisión de las llamadas grupales activas en las que participa un usuario, la entrada de llamadas tardías y la identificación del hablante actual en cada una de las llamadas grupales activas.

MCPTT comparte funcionalidades con el servicio OMA Push-to-Talk Over Cellular (POC), pero además proporciona integración con redes comerciales de telefonía móvil. Para permitir esta coexistencia, la red móvil debe ser complementada con características clave como acceso prioritario y preventivo y garantías de calidad de servicio (QoS) para flujos de medios. Para este propósito, 3GPP creó indicadores de clases de calidad (QCI) específicos del servicio que la red LTE debe asumir para alojar los servicios de MC. Actualmente, los operadores de red están evolucionando su infraestructura para admitir estos QCIs señalados a través de interfaces Policy and Charging (PCC). **El soporte de QCI permite a los operadores ofrecer servicios de MC que comparten la infraestructura de red entre usuarios comerciales y de misión crítica.** Además del cumplimiento de QCI, MCPTT también tiene que satisfacer sus propios KPIs, principalmente relacionados con la latencia. El cumplimiento de estos KPIs depende en gran medida de la arquitectura de la red, así como de la implementación del servicio [28].

### 2.3.2 Componentes MCPTT

La arquitectura funcional [29] de un servicio MCPTT se divide en dos grandes partes:

- **Plano de aplicación:** el plano de aplicación proporciona todos los servicios (por ejemplo, control de llamadas, control del canal de control) requeridos por el usuario junto con las funciones necesarias para soportar el servicio MCPTT. Utiliza los servicios del plano de control de señalización para soportar esos requisitos.
- **Plano de control de señalización:** el plano de control de señalización proporciona el soporte de señalización necesario para establecer la asociación de usuarios involucrados en un servicio MCPTT. El plano de control de señalización también ofrece acceso y control de servicios a través de servicios MCPTT. El plano de control de señalización utiliza los servicios del plano de señalización.

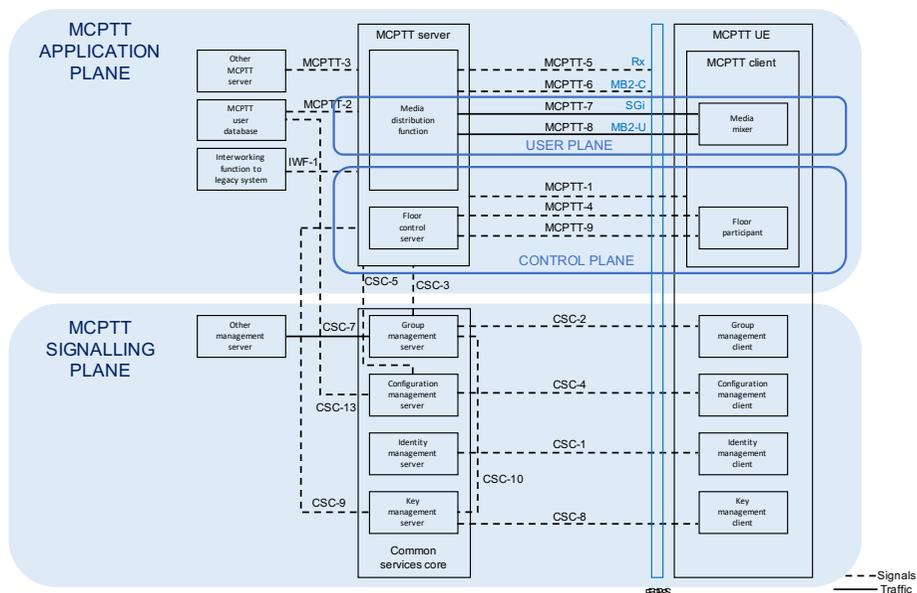


Figura 6: Arquitectura funcional MCPTT - Stage 2 (Release 14) [30]

Centrándose en el plano de aplicación MCPTT, las entidades dentro del plano de aplicación proporcionan funciones de control de aplicación, control de medios y distribución e incluyen los siguientes bloques funcionales: [31]

- **Cliente MCPTT:** Esta entidad funcional actúa como agente de usuario para todas las transacciones de la aplicación MCPTT.
- **Servidor MCPTT:** Esta entidad proporciona soporte centralizado para servicios MCPTT. La entidad funcional del servidor MCPTT es compatible con las entidades funcionales SIP AS, cliente HTTP y servidor HTTP del plano de control de señalización. Como se detallará más adelante, un servidor MCPTT puede admitir la función de **Controlling** y la función de **Participating**. El servidor MCPTT puede realizar la función de *controlling* para llamadas privadas y llamadas grupales. El servidor MCPTT que realiza la función de *controlling* para una llamada privada o llamada grupal también puede desempeñar una función *participating* para la misma llamada privada o llamada grupal. Para cada llamada privada y llamada grupal, sólo debe haber un servidor MCPTT asumiendo el rol de *controlling*, mientras que uno o más servidores MCPTT en el rol *participating* pueden estar involucrados.
- **Floor participant:** esta entidad funcional es responsable de las solicitudes del canal para poder hablar y está ubicada en la UE.
- **Floor control Server:** proporciona arbitraje entre solicitudes del canal de comunicaciones de diferentes usuarios, asigna el canal y gestiona colas de solicitud.
- **Media distribution function:** es responsable de la distribución de medios a partir de la información proporcionada por el servidor MCPTT (por ejemplo, direcciones IP, puertos de capa de transporte)

- **Media mixer:** esta entidad funcional existe en el UE y permite combinar múltiples flujos.
- **MCPTT user database:** esta entidad funcional contiene la información del perfil de usuario MCPTT asociado con un MCPTT\_ID que el proveedor de servicios MCPTT tiene en el plano de aplicación. El perfil de usuario MCPTT lo determina la organización de misión crítica, el proveedor de servicios MCPTT y, potencialmente, el usuario MCPTT.

La arquitectura MCPTT también incluye un conjunto de servicios comunes que se conocen como **COMMON SERVICES CORE (CSC)**, necesario para la gestión del servicio de voz, MCPTT: Gestión de identidad (IDMS), Gestión de grupo (GMS), Gestión de claves (KMS) y Gestión de configuración (CMS).

### 2.3.3 Roles del MCPTT server

El servidor de MCPTT según el estándar definido por el 3GPP tiene 2 roles [31]:

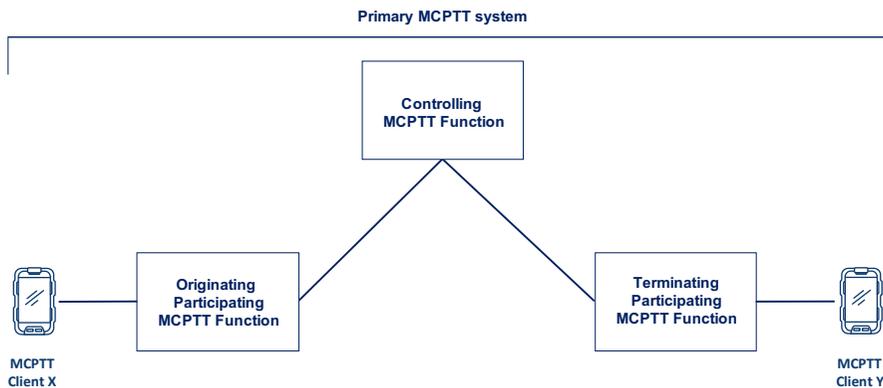


Figura 7: Funciones básicas del MCPTT Server [32] [33]

#### MCPTT AS Participating

- Control de los usuarios de una llamada privada o de grupo MCPTT.
- Soporte de afiliación a grupo para usuarios de MCPTT, incluida la aplicación del número máximo de afiliaciones simultáneas por parte de un usuario.
- Retransmitir los mensajes de control de llamada y de petición del canal (Floor Control) entre el cliente MCPTT y el servidor MCPTT que realiza las funciones de control
- Transcodificación, grabación, atiende las peticiones del UE para el cambio de transmisión a unicast.

#### MCPTT AS Controlling:

- Control de llamada en una llamada privada y de grupo.

- Interactúa con el GMS (Group Management Server) para obtener información sobre el estado de afiliación y la política de grupo de los usuarios afiliados a este servidor MCPTT.
- Gestiona el uso del canal de comunicaciones en una llamada a grupo y privada.
- Gestiona también la entidad de manejo de medios de la llamada: transcodificación, códec audio, seguridad etc.

#### 2.3.4 Procedimiento de llamada MCPTT

En este apartado se va a describir el procedimiento de una llamada privada donde **los usuarios están registrados y el receptor no necesita aceptar la llamada**. A través de este gráfico, se define la operativa completa de una llamada MCPTT privada extremo a extremo. No sólo es importante porque muestra toda la señalización de una llamada MCPTT, sino que además permite identificar los componentes por los que atraviesa la llamada durante el proceso de establecimiento, mantenimiento y finalización de esta.

El modelo de cálculo definido en capítulos posteriores para el cálculo de los indicadores de rendimiento de los servicios se obtiene de este diagrama. A la hora de medir los valores de los indicadores que posteriormente se presentarán en el capítulo 7, Análisis de Indicadores por despliegue, se considera que el **UE 2 se encuentra configurado en modo respuesta automática**, lo implica que UE 2 no tenga que aceptar la llamada manualmente ya esta circunstancia perturbaría los resultados obtenidos.

Al igual, que en el apartado anterior se ha descrito el procedimiento de llamada en PoC ahora se va a especificar para el servicio MCPTT:

- **Paso 1:** El recurso UE<sub>1</sub> quiere establecer una llamada privada MCPTT con el recurso UE<sub>2</sub>. En este supuesto el UE<sub>2</sub> tiene el cliente MCPTT configurado en **“automatic commencement mode”** (modo de comienzo automático). Eso quiere decir que el UE<sub>1</sub> no tiene que esperar hasta que UE<sub>2</sub> acepte la llamada manualmente. Esta configuración es muy útil a la hora de medir los KPIs de la llamada. La respuesta automática de aceptación de la llamada el único retardo que introduce en la llamada es debido al procesamiento por parte del cliente MCPTT del mensaje SIP, **“INVITE”** recibido del MCPTT AS Participating.
- **Paso 2:** El recurso UE<sub>1</sub> envía un mensaje SIP **“INVITE”** al servidor MCPT AS Participating 1. Este servidor es un AP (Application Server) de IMS y es por ello por lo que el **“INVITE”** llega primero al **Proxy** de IMS (P-CSCF) que lo envía al **Serving** de IMS (S-CSCF) donde, tras consultar al HSS o por configuración descubre el Public Service Identifier (PSI) con el que direccionar el AS (MCPT AS Participating 1) .
- **Paso 3:** El servidor MCPTT AS Participating 1 confirma al módulo S-CSCF que ha recibido el mensaje SIP **“INVITE”** devolviendo un mensaje SIP **“100 Trying”**. De forma simultánea, este servidor reenvía un mensaje SIP **“INVITE”** al servidor MCPTT AS Controlling” donde le indica el UE al que UE<sub>1</sub> está llamando. El **“Controlling”** notifica al **“Participating 1** que lo ha recibido mediante un

mensaje SIP "100 Trying" y paralelamente reenvía el mensaje SIP "INVITE" al servidor "MCPTT AS Participating 2" que en este caso será el encargado de llamar al UE2 y de supervisar toda su llamada.

- **Paso 4:** Como el servidor "Participating 2" no conoce el S-CSCF responsable de la IMPU de UE2 se lo consulta al módulo de IMS "I-CSCF" quien tras consultar el registro de UE2 en BD HSS obtendrá el S-CSCF que sirve al usuario. Si ha tenido éxito se lo indicará al "Participating 2" a través de un mensaje SIP "100 Trying" y reenviará el mensaje SIP "INVITE" al proxy IMS a través de C-CSCF.
- **Paso 5:** Como UE2 está configurado en modo "**automatic commencement**" no se utiliza el mensaje SIP "180 RINGING" que sería previo a que el UE2 aceptara la llamada. En nuestro caso UE<sub>2</sub> envía al "Participating 2" un mensaje SIP "100 Trying" a través de IMS indicando que ha recibido el mensaje SIP "INVITE". Inmediatamente después envía al "Participating 2" un mensaje SIP "200 OK" que indica el UE2 ha aceptado la llamada.
- **Paso 6:** Cuando el "Participating 2" recibe el mensaje SIP "200 OK" procedente del UE<sub>2</sub>, le devuelve un ACK, confirmando que todo va correctamente y que se quede a la espera en la dirección y puerto definidos. Simultáneamente envía el mensaje SIP "200 OK" al "Controlling" que contiene información del MCPTT AS Participating que está participando en la llamada, en nuestro caso, "Participating 1". Éste es el que conoce la ubicación en la red de UE<sub>1</sub> y se lo reenvía el proxy de IMS P-CSCF, que será el encargado de enviárselo al UE1.
- **Paso 7:** UE<sub>1</sub> al recibir el mensaje SIP "200 OK" notifica al "Participating 1" que está listo para comenzar a hablar, esto es "enviar tráfico RTP". El "Participating 1" se lo comunica al "Controlling" quien a través del mensaje de FLOOR CONTROL "Floor Taken by UE<sub>1</sub>" notifica al "Participating 2" que el control del medio está asignado a UE<sub>1</sub> y que UE<sub>2</sub> no está autorizado para hablar. "Participating 2" se lo reenvía a UE<sub>2</sub> quedando éste a la escucha.
- **Paso 8:** UE<sub>1</sub> comienza a hablar "Envía tráfico RTP". Cuando ya termina de hablar "suelta la pastilla o PTT" se lo indica al "Controlling" a través del mensaje de FLOOR CONTROL "Floor Release"
- **Paso 9:** El "Controlling" al recibir la notificación que UE<sub>1</sub> ha terminado de hablar, notifica tanto a UE<sub>1</sub> como a UE<sub>2</sub> que cualquiera de los dos puede hablar ya que el medio está disponible. Envía el mensaje de FLOOR CONTROL "Floor Idle" a los dos participantes de la llamada privada MCPTT "UE<sub>1</sub> y UE<sub>2</sub>".

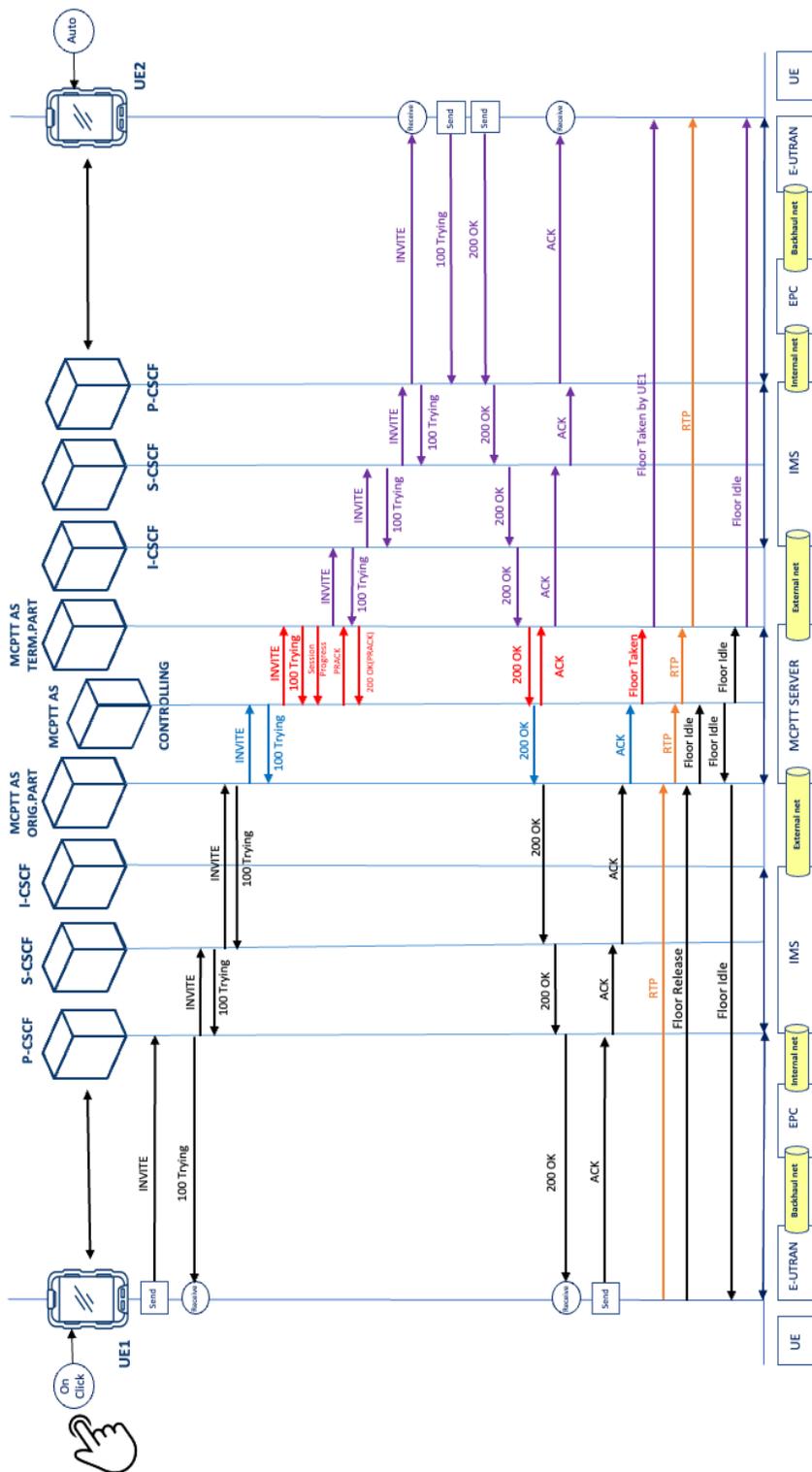


Figura 8: MCPTT Private Call (On-demand with automatic commencement and prearranged) [28]

## 2.4 Conclusiones

En este capítulo se ha presentado el trabajo realizado por el 3GPP para adaptar LTE (inicialmente diseñada para ofrecer servicios comerciales y domésticos) a los nuevos requerimientos por parte de las agencias PPDR. El 3GPP desde la Release 12 hasta las actuales, ha dotado a LTE de funcionalidades PPDR que hacen que sea la red de soporte de banda ancha candidata de convergencia de las redes privadas de radio digitales.

Toda la experiencia y requerimientos, tanto funcionales como operativos, que han aportado las agencias PPDR y el trabajo conjunto de la OMA con el grupo SA6 del 3GPP han posibilitado que el desarrollo en Release 13 de un servicio PTT de misión crítica sobre redes de banda ancha estandarizado. La estandarización de este servicio básico para las agencias PPDR permiten un marco de referencia único para todas las compañías que quieran ofrecer este servicio a las agencias PPDR. El estándar no sólo habla de requerimientos técnicos y funcionales, sino que va más allá y habla de cuál debe ser el rendimiento de este servicio para ser un PTT de misión crítica en lugar de uno orientado a sectores comerciales o no de misión crítica.

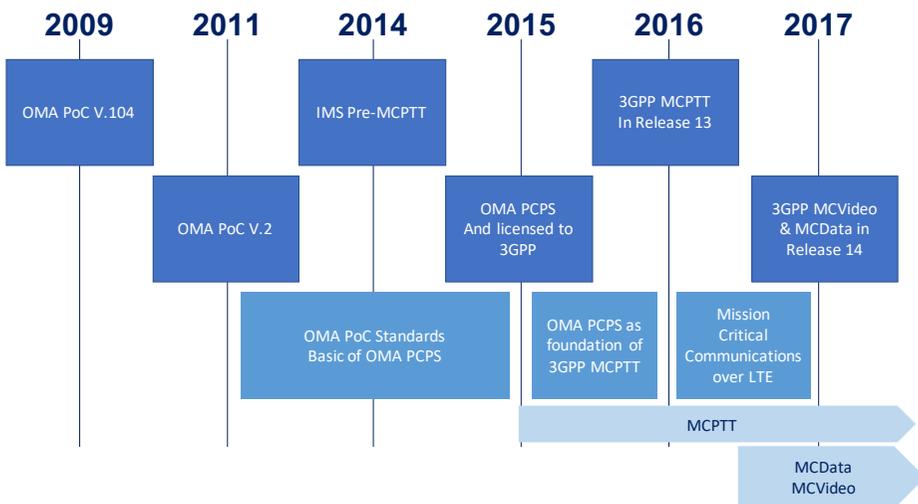


Figura 9: Hoja de ruta de los estándares PTT de Banda Ancha

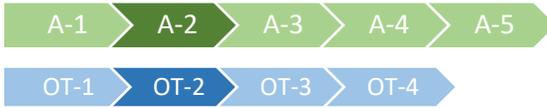
Esta tesis se va a centrar en los servicios de voz MCPTT, que son el pilar del funcionamiento de las agencias PPDR tanto en las labores diarias cotidianas como en las situaciones excepcionales de emergencia. Para entender mejor su funcionamiento y poder determinar los factores claves de su rendimiento es muy importante **conocer los orígenes del servicio y el uso que le dan los usuarios finales.**



## 3 Análisis de la evolución de las Redes Radio

<b>3.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>34</b>
3.1.1	EVOLUCIÓN TECNOLÓGICA PARALELA	35
3.1.2	LA PROVISIÓN DE LOS SERVICIOS	38
<b>3.2</b>	<b>ANÁLISIS DE REDES DE RADIO PRIVADAS DIGITALES</b>	<b>39</b>
3.2.1	INTRODUCCIÓN	39
3.2.2	TETRA – REQUISITOS BÁSICOS	39
3.2.3	TETRA – ARQUITECTURA DE RED	39
3.2.4	TETRA – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	41
3.2.5	TETRA – ¿CÓMO FUNCIONA?	43
<b>3.3</b>	<b>REDES DE BANDA ANCHA - LTE <math>\geq</math> 12</b>	<b>43</b>
3.3.1	INTRODUCCIÓN	43
3.3.2	ARQUITECTURA LTE	44
3.3.3	INTERFACES LTE	45
3.3.4	INTERFAZ RADIO LTE	46
3.3.5	CANALES DE RADIO LTE	47
3.3.6	LTE MIMO	50
3.3.7	CONCLUSIÓN	50
<b>3.4</b>	<b>REDES DE BANDA ANCHA - 5G</b>	<b>51</b>
3.4.1	INTRODUCCIÓN	51
3.4.2	ARQUITECTURA DE RED 5G	52
3.4.2.1	Componentes de la arquitectura 5G	52
3.4.2.2	Características generales de la arquitectura 5G	53
3.4.3	ALTERNATIVAS DE DESPLIEGUE 5G	53
3.4.3.1	Introducción	53
3.4.3.2	NSA (Non-Standalone)	55
3.4.3.3	5G Core Network Architecture – SA (Standalone)	56
<b>3.5</b>	<b>TECNOLOGÍAS HABILITANTES ACTUALES</b>	<b>56</b>
3.5.1	INTRODUCCIÓN	56
3.5.2	VIRTUALIZACIÓN DE FUNCIONES DE RED (NFV)	57
3.5.3	REDES DEFINIDAS POR SOFTWARE (SDN)	59
3.5.4	MBMS (MULTIMEDIA BROADCAST MULTICAST SERVICE)	61
3.5.4.1	Despliegue de MCPTT sobre portadora multicast	64
<b>3.6</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>67</b>

### 3.1 Introducción



Las agencias PPDR en el pasado reciente han empleado redes de radio privadas digitales, tales como redes TETRA, TETRAPOL o DMR. Estas redes son una evolución de las redes tradicionales de radio analógicas.

Las redes de radio privadas digitales que emplean las agencias PPDR en la mayoría de los países están gestionadas por el sector público, ya sea directamente o a través de un departamento específico del gobierno del país o como una función que se subcontrata bajo un estricto control por parte del ministerio de departamento del gobierno que las contrata. De forma generalizada, la cobertura está adscrita al ámbito de la administración que las gestiona: local, autonómica o nacional.

Por el contrario, la red comercial de telefonía móvil, cuyo objetivo como empresa es aumentar el número de abonados, realiza importantes inversiones en infraestructura de red con el objetivo de poder dar cobertura a mayor número de posibles clientes y además la dota de servicios de datos avanzados que atraigan al mayor número de clientes a su red. Evidentemente su despliegue de cobertura prioriza los núcleos de población donde haya mayor número de clientes objetivos y una vez cubierta estas áreas se extiende a zonas rurales, donde existe menor concentración de población y además las dificultades técnicas para establecer emplazamientos de infraestructura de red son mayores y sobre todo más costosas.

**Un mercado objetivo relativamente pequeño ha provocado que la tecnología de comunicaciones de las agencias PPDR sea bastante cara y que sus funcionalidades incluida la cobertura hayan sufrido poco avance en el tiempo en comparación con los avances comerciales realizados en la red comercial de telefonía móvil.**

La cobertura de voz y datos ofrecidos por las operadoras de telefonía móvil gracias a su gran inversión en infraestructuras de telecomunicaciones ha hecho que se postulen como *candidatas para dotar de comunicaciones de misión crítica a todos los servicios de emergencias.*

La infraestructura supone uno de los mayores costes operacionales (replanteo, diseño, puesta en marcha y mantenimiento). El disponer de una cobertura global facilita el acceso a estos servicios a organismos o instituciones menores que por coste nunca se lo han planteado antes. Estas pequeñas organizaciones locales son fundamentales en situaciones de emergencia o desastres naturales ya que disponen de un conocimiento local muy detallado y que puede suponer una

información vital de cara a reducir los tiempos de respuesta. En este tipo de circunstancias toda información jerarquizada, priorizada y asegurada puede ser muy valiosa de cara a la toma de decisiones.

### **Seguridad, Privacidad, Capacidad y Continuidad son las bases sobre las cuales se debe cimentar cualquier infraestructura de Comunicaciones de Misión Crítica**

El nivel de despliegue que ofrece la red comercial de telefonía móvil es claramente un factor por considerar, ya que garantiza que todos los miembros de un equipo tengan la posibilidad de recibir la información, con independencia de la situación geográfica en la que se encuentren.

Llegado a este punto surgen dos preguntas:

- 1) ¿Es posible desplegar servicios de misión crítica, en los mismos términos que ofrecen las redes de radio privadas digitales, en la red comercial de telefonía móvil y aprovechar la infraestructura radioeléctrica desplegada y el nivel de cobertura?
- 2) ¿Es posible proveer servicios multimedia adicionales, demandados por las agencias PPDR y que no pueden ser desplegados en las actuales de radio privadas digitales debido a la demanda de banda que requieren estos nuevos servicios?

#### **3.1.1 Evolución tecnológica paralela**

Tradicionalmente, las agencias PPDR han empleado las redes profesionales móviles de radio, como medio de comunicación entre todos sus recursos. Inicialmente eran analógicas y su única protección era la de operar en frecuencias de comunicación no difundidas públicamente y en las que solo podrían operar los transceptores de radio que estaban habilitados para operar en estas frecuencias. La seguridad residía no tanto en la encriptación de las comunicaciones (se operaba en abierto) sino en conocer o no, las frecuencias de operación y en disponer de transceptores que operaran en esas frecuencias. En aquellos años, Internet no era ni un proyecto, el mercado no era tan global y disponer de este tipo de equipos era casi exclusivo de las agencias PPDR.

**Las comunicaciones de radio analógicas eran inicialmente en abierto y eran susceptibles de ser escuchadas por cualquiera que dispusiera de escáneres de frecuencia.**

Se va a analizar, esta evolución para el caso de **España** ya que en fecha e hitos es extrapolable al resto de países. Además, resulta más interesante la secuencia de hitos que las propias fechas. La aparición de la telefonía móvil en España se remonta a 1976, de la mano de la entonces denominada Compañía Telefónica Nacional de España (CTNE, actual Telefónica), como un servicio limitado a Madrid y Barcelona y llamado "Teléfono automático en vehículos". En 1982, coincidiendo con el mundial de fútbol, la CTNE lanzó comercialmente un servicio más avanzado basado en el estándar nórdico NMT y denominado TMA-450 (de "telefonía móvil

automática" y la banda de frecuencias en que operaba, 450 MHz). Este fue el primer sistema de telefonía móvil celular automático instalado en España. En 1990, ante el crecimiento de la demanda y los primeros síntomas de saturación del espectro, se puso en el mercado un nuevo estándar llamado TMA-900 y derivado del sistema TACS. Este servicio recibió el nombre comercial de MovilLine (de 1990 hasta principios de 2003).

Durante su historia, el sistema analógico permitía ofrecer una huella de cobertura algo mayor a la digital, en especial en zonas rurales o muy apartadas. Sin embargo, esta cobertura era en líneas generales de peor calidad de sonido, susceptible de captación mediante escáneres de frecuencia y lenta en los servicios de transmisión de datos. En diciembre de 2003, se cerró el sistema MovilLine.

El mundo de la radio privada siguió caminos muy paralelos a los de la tecnología móvil y, así, en los años 80, surge el sistema trunking como evolución de radio analógica convencional. Nació de la necesidad de mejorar el uso de la restricción de canales radioeléctricos disponibles especialmente en la distribución de frecuencias por grupos de usuarios u organizaciones. Se presentaban casos en los que el uso real de la frecuencia asignada estaba muy por debajo de lo normal, provocando un bajo rendimiento de un recurso natural escaso, y por lo tanto una pérdida de capacidad de comunicación. El sistema trunking analógico estaba basado en la utilización de pocas frecuencias de una forma más eficiente, por ello se decidió que las frecuencias ya no pertenecieran a un único grupo de usuarios, sino que las frecuencias portadoras disponibles pudieran ser compartidas por otros grupos de usuarios. Así, el Trunking analógico incorpora un sistema de compartición de varias frecuencias radioeléctricas, de modo que, ante una solicitud de comunicación de voz por parte de un terminal móvil, el sistema trunking le asignará un canal libre. El sistema Trunking utiliza modulación FFSK con tonos de 1.800-1.200 Hz para la señalización en el canal de control, y la modulación de voz sigue siendo analógica en los canales de tráfico.

**La Compañía Telefónica Nacional de España (CTNE, actual Telefónica) aprovechando la infraestructura desplegada, lanza comercialmente como producto comercial el trunking analógico garantizando la cobertura en las principales ciudades españolas.**

La principal ventaja del sistema Trunking Analógico del CTNE frente a una red de radio privada analógica eran:

- **Cobertura.** La operadora, en este caso CTNE, disponía de la infraestructura y garantizaba la cobertura en las principales ciudades.
- **Mantenimiento.** La operadora, en este caso CTNE, disponía de la infraestructura y garantizaba la cobertura en las principales ciudades.
- **Solicitud y reserva del espacio radioeléctrico.** Al poner en marcha una red PMR se tiene que solicitar al ministerio de industria y telecomunicaciones una relación de frecuencias para operar, al que se debe adjuntar un replanteo de la infraestructura de red a instalar y se debe considerar la posibilidad que el espectro esté ocupado y no aprueben la solicitud.

De la misma forma que la telefonía analógica poco a poco se va apagando y se enciende la telefonía digital, el trunking analógico evoluciona de forma natural hacia el sistema TETRA (Terrestrial Trunked Radio). Así surge la red trunking digital, donde se deja de lado la modulación analógica y se introduce al mundo de la modulación digital, tanto para voz como para datos. Con este sistema se aprovecha la frecuencia asignada, puesto que en un solo canal de RF (frecuencia ascendente y descendente) pueden obtenerse hasta cuatro comunicaciones de voz, esto se da gracias a la técnica TDMA (Time Division Multiple Access).

En paralelo surge **TETRAPOL** como un sistema de comunicaciones digitales enfocadas a dar servicio de radiocomunicación a fuerzas y cuerpos de seguridad, aunque también se ha empleado por otras organizaciones de servicios públicos y transporte. Nace como sistema de comunicaciones digitales enfocadas a dar servicio a fuerzas y cuerpos de seguridad

El origen de esta tecnología está en el desarrollo realizado por la firma francesa 'MATRA COMMUNICATIONS' (actualmente integrada en AIRBUS DEFENSE) para la Gendarmería francesa a principio de los años 90. **Pudo ser un estándar ETSI**, pero en **1994** la mayoría de los fabricantes participantes en el desarrollo del estándar decidió apostar por TETRA. Así pues, en ese año se estableció TETRA como la tecnología del estándar ETSI, quedando el fabricante francés como el principal apoyo de TETRAPOL.

Desde el año 2000, se decidió esta tecnología para las transmisiones seguras de la Policía Nacional y la Guardia Civil. Se acordó darle el nombre de SIRDEE (Sistema de Radiocomunicaciones Digitales de Emergencia del Estado), siendo Telefónica la adjudicataria del servicio a nivel nacional. En un principio la red SIRDEE ha sido compartida por la Policía Nacional y la Guardia Civil, pero manteniendo sus comunicaciones por separado. Una de las principales ventajas de la red SIRDEE es que fue diseñada expresamente desde su origen para el uso por parte de los Cuerpos y Fuerzas de Seguridad, empleando las últimas tecnologías de comunicaciones digitales y por satélite. Según la información oficial de TETRAPOL [34] dispone de 85 redes desplegadas en más de 30 países. La mayoría de estas redes están destinadas a uso por agencias PPDR. A continuación, se cita algunos de los proyectos principales según [34]:

Tabla 11: Proyectos relevantes TETRAPOL

Proyecto	País
<ul style="list-style-type: none"> <li>• INTEGRAPOL - Federal Police network in Brazil</li> </ul>	Brasil
<ul style="list-style-type: none"> <li>• PEGAS - nationwide public safety network in the Czech Republic</li> </ul>	República Checa
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ministry for the economy and finances (Paris, France)</li> <li>• Palace of Versailles (France)</li> <li>• INPT - nationwide public safety network in France</li> <li>• RUBIS - nationwide network for the French Gendarmerie</li> <li>• Lille buses</li> </ul>	Francia
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tegel and Schönefeld, Berlin airports</li> </ul>	Alemania

<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berlin Brandenburg airport</li> <li>• Federal highways, Schleswig-Holstein and Hamburg</li> <li>• Rhein-Palatinate motorways</li> <li>• Hochbahn trains, Hamburg</li> <li>• HEAG Verkehrs-GmbH, Darmstadt</li> <li>• BVG, Berliner Verkehrsbetriebe buses</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• IRIS - nationwide public safety network in Mexico</li> </ul>	México
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Red SIRDEE</li> </ul>	España

TETRA fue diseñado para servir a la comunidad de seguridad pública en todo el mundo. Hoy existen redes TETRA [35] que atienden a usuarios de agencias PPDR en Gran Bretaña, Alemania, Italia, Bélgica, Países Bajos, España, Emiratos Árabes Unidos, Líbano, Sudáfrica, Rusia, Kazajstán, Uzbekistán, China, Corea del Sur, Malasia, Indonesia, Vietnam, México, Argentina, República Dominicana, Perú, Brasil y otros países.

Las agencias PPDR de forma generalizada han optado por instalar TETRA frente a TETRAPOL como red de comunicaciones de misión crítica. Incluso dentro de un mismo país, cada agencia ha desplegado su propia red.

Las razones para que cada agencia despliegue su propia red, pueden ser las siguientes:

- 1) Cada servicio de emergencia gestiona su red y por tanto sus usuarios y los niveles de autorización y priorización en la red de estos. Pueden configurar los grupos de llamadas de forma más optimizada según las necesidades propias del servicio. La administración, gestión de usuarios y servicios asociados son uno de los grandes hándicaps a superar cuando se gestionan diversas organizaciones con jerarquías operativas y de mando no coincidentes.
- 2) La cobertura. Al tratarse de servicios que se prestan dentro de un ámbito geográfico concreto solo necesitan poder comunicarse dentro de ese entorno, no requieren de una cobertura global.

### 3.1.2 La provisión de los servicios

En el punto anterior se constata como tecnológicamente las redes de radio privadas digitales no son tan diferentes de las redes comerciales de telefonía móvil. La diferencia la marca fundamentalmente la provisión de los servicios que ofrecen cada una de ellas:

Redes de telefonía móvil	Redes privadas de radio
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientadas a comunicaciones 1:1</li> <li>• Comunicaciones Full Duplex</li> <li>• 2 hablan y escuchan</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Orientadas a grupos.</li> <li>• Comunicaciones Half Duplex</li> <li>• 1 habla y el resto escuchan</li> </ul>

## 3.2 Análisis de Redes de Radio Privadas Digitales

### 3.2.1 Introducción

En esta tesis, cuando se refiere a redes de radio privadas digitales, a partir de este momento, se considera exclusivamente la red TETRA que fue estandarizada por el ETSI en 1994. [36] TETRA. Fue diseñada desde el principio para satisfacer las necesidades particulares de las agencias PPDR.

### 3.2.2 TETRA – Requisitos Básicos

La especificación para el estándar TETRA se basó en una serie de requisitos fundamentales que aún son válidos hoy en día [36]:

- Priorización y acceso preferente al canal, permitiendo que las llamadas más importantes se conecten en momentos de congestión.
- Llamadas de emergencia, priorizadas por encima de otro tráfico, que pasan incluso si la red está ocupada, y alertan automáticamente a los controladores.
- Área amplia, configuración rápida de llamadas, llamadas grupales de "red informada".
- Operación en modo directo (DMO) que permite comunicaciones directas entre terminales de radio, sin estar conectados a la red del operador.
- Terminales independientes de la red.
- Cifrado de voz de alto nivel para satisfacer las necesidades de seguridad de las organizaciones de seguridad pública.
- Voz dúplex completa para comunicaciones telefónicas PABX y PSTN.

### 3.2.3 TETRA – Arquitectura de red

En la figura siguiente se representa los principales elementos e interfaces de la infraestructura de red TETRA:

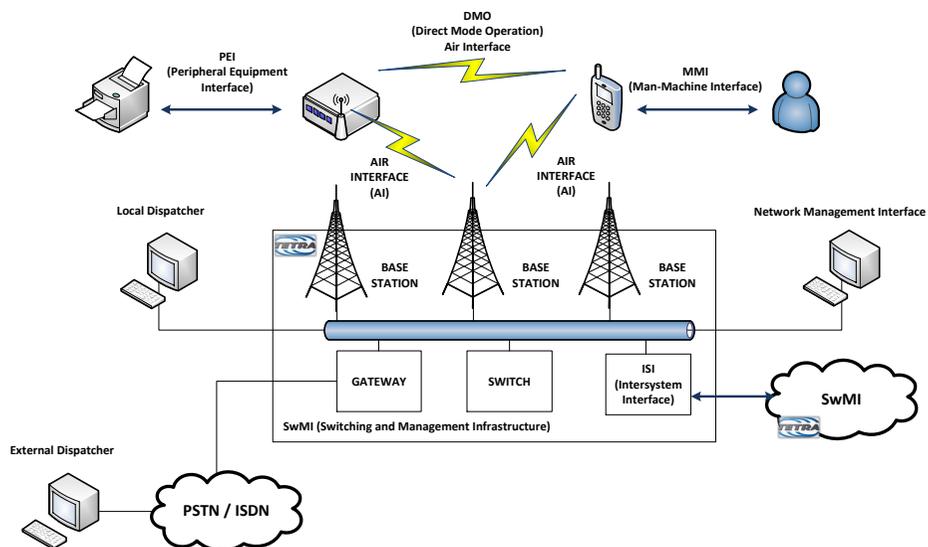


Figura 10: Arquitectura de red TETRA [37]

Estos son los principales elementos e interfaces de la infraestructura de red TETRA definidos en el estándar:

- **Estación móvil (MS):** el equipo móvil que se utiliza para acceder a los servicios de red TETRA.
- **Estación base (BS):** el punto de acceso a la infraestructura de red TETRA para los MS que trabajan en TRUNKED MODE.
- **Infraestructura de conmutación y gestión (SwMI):** que se refiere a todos los equipos y subsistemas dentro de una red TETRA, que también incluye BS, puertas de enlace, conmutadores y cualquier otro equipo que permita la comunicación. El estándar TETRA no define ninguna parte interna de la red TETRA y su configuración y diseño se deja a elección del fabricante, a fin de proporcionar una mayor flexibilidad y competencia entre los diferentes fabricantes.
- **Interfaz aérea (AI):** es la interfaz entre una MS y una BS cuando se trabaja en modo de enlace troncal y la interfaz entre dos MS cuando se trabaja en modo directo. La IA es la interfaz más importante y compleja en el estándar TETRA [38].
- **Puerta de enlace:** que permite la conexión a otros tipos de redes, como las redes telefónicas públicas conmutadas (PSTN), las redes digitales de servicios integrados (ISDN) o las redes de datos por paquetes (PDN) [39] [40].
- **Interfaz de Dispatcher remoto:** en las primeras etapas de la estandarización TETRA, se pretendía proporcionar una interfaz universal para las salas de control y operaciones. Sin embargo, esta interfaz no se desarrolló más debido a los problemas de rendimiento que se originaron al conectar la infraestructura TETRA (**Motolola, Teltronic, EADS, Hytera**) al software y hardware de dispatcher existente en las salas de control. Se pensó que el diseño de una interfaz universal eficiente sería demasiado complejo y, por lo tanto, solo existen especificaciones de interfaz específicas del fabricante.
- **Interfaz de equipo periférico (PEI):** define la conexión entre un terminal de radio y un equipo periférico. Es posible transferir datos entre aplicaciones que residen en el dispositivo periférico y el terminal de radio.
- **Interfaz entre sistemas (ISI):** permite la interoperabilidad entre usuarios que residen en dos redes TETRA diferentes. Estas redes pueden ser de diferentes fabricantes. [2]
- **Interfaz de administración de red (NMI):** en el proceso de estandarización se llegó a la conclusión de que una interfaz común de administración de red no sería práctica y el modo de control de red se dejó a elección del fabricante.
- **Interfaz hombre-máquina (MMI):** interfaz para la interacción entre usuarios y equipos terminales.

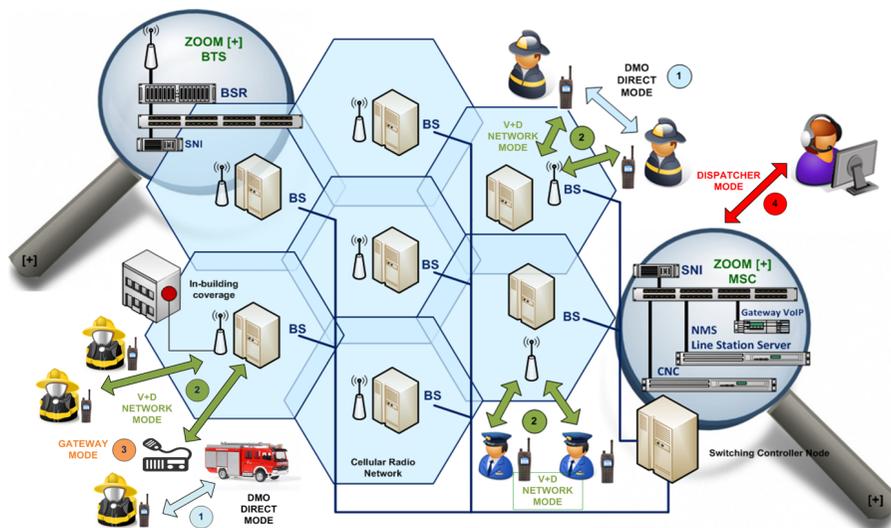


Figura 11: Modos de operación en TETRA

En el esquema anterior, se identifican dos métodos:

- 1) **DMO – Modo Directo.** Los equipos de radio se comunican directamente entre sí, sin emplear la red de transmisión. Cada grupo de trabajo se fija a una frecuencia, en el momento que se selecciona el grupo, se va a poner en TX/RX en esa frecuencia.
- 2) **V+D – Modo de Red.** Los equipos de radio están registrados en la red y para poder comunicarse deben situarse dentro de la cobertura de la red. Es el método tradicional de operar. El servicio más empleado es el de llamada en grupo. Se trata de comunicaciones HALF-DUPLEX. Uno habla y el resto del grupo espera a que acabe, una vez que el canal queda libre, los usuarios compiten por el canal. Es el servicio estrella dentro de una red TETRA, pulsar y hablar. La comunicación se establece de forma inmediata.
- 3) **GATEWAY - Modo Mixto.** Se puede emplear un modo mixto que consiste en hablar en modo directo y uno de los equipos en modo pasarela permitiendo poner en contacto a los usuarios que operan en modo directa con usuarios registrados en la red.
- 4) **DISPATCHER – Modo Despacho.** Empleando el Interfaz LINE DISPATCHER, una aplicación software se conecta con el MSC de la red, vía IP y empleando la Gateway VoIP de la infraestructura, el operador de la aplicación puede ponerse en contacto con los usuarios registrados de la red.

### 3.2.4 TETRA – Características Técnicas

TETRA es un sistema de transmisión totalmente digital, con modulación DQPSK y división en el tiempo TDMA, (también puede utilizar TDD /FDD), lo que supone un mejor aprovechamiento del espacio radioeléctrico ya que permite hasta 4 canales físicos de comunicación sobre una misma portadora o frecuencia RF, lo que origina una alta eficiencia espectral. La separación entre portadoras es de 25 kHz y las bandas de trabajo de TETRA son 380-400 / 410-430 / 450-470 MHz. La potencia

de sus equipos móviles es de 1, 3 y 10w frente al de las estaciones base que varían desde los 0.6w hasta los 40w.

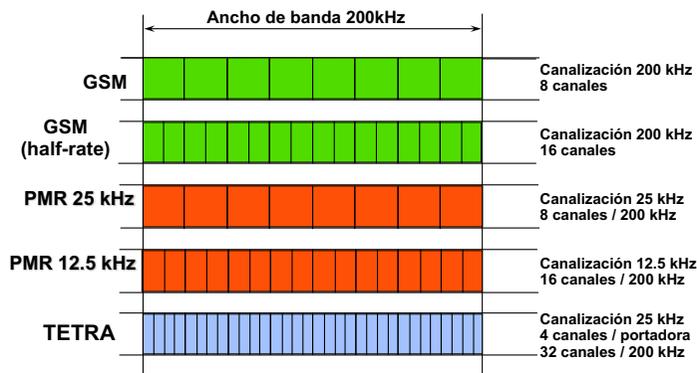


Figura 12: Eficiencia Espectral

La unidad básica es un time slot (14,166 ms) en el que se alojan 510 bits. Cada trama TDMA está formada por 4 time slots (56,664 ms). Además del concepto de trama en TETRA se maneja el concepto de multitrama = 18 tramas TDMA (1.02 s) y hipertrama = 60 tramas TDMA (61.20 s). Cada trama TDMA ascendente (uplink) se encuentra retardada 2 time slot respecto a la trama descendente (downlink).

Los canales físicos pueden ser de tres tipos: control, tráfico y no asignados. El canal de control principal suele ir en el time slot 1 de la portadora principal. Los mensajes cortos y de estado son enviados directamente por los canales de control. Pero además de canales físicos en TETRA se han definido canales lógicos. Son canales de comunicación lógicos entre el terminal y la estación base. Los canales lógicos, son el interfaz entre el protocolo aire y el subsistema de radio. Por tanto, utilizan como soporte de transmisión los canales físicos. Existen dos tipos de canales lógicos:

- **Control:** Transportan señalización y paquetes de datos:
  - Información de la red (BNCH).
  - Información de sincronismo y aleatorización (BSCH).
  - Información específica para un terminal o grupo de ellos (SCH/F, SCH/HU, SCH/HD).
  - Información downlink sobre derechos de uso de los time slots (AACH).
  - Señalización de control sobre canal físico de tráfico (STCH).
  - Canales para uso durante la linealización de los transmisores (CLCH, BLCH).
- **Tráfico:** Transportan voz y datos en modo de conmutación de circuitos:
  - Información de Voz (TCH/S).
  - Datos en modo circuitos (TCH/2.4, TCH/4.8, TCH/7.2).

El *Codec* de audio empleado en TETRA es **ACELP** (Algebraic Code Excited Linear Prediction) a 4,56 Kbps. Este *Codec* está diseñado para reproducir alta calidad de voz en condiciones de funcionamiento adversas. Convierte la señal de voz muestreada por un convertidor A/D a 8 KHz en un conjunto de códigos incluidos

en un 'diccionario'. La información ya codificada incorpora código de redundancia cíclica y un potente corrector de errores. Para la transmisión de esta información de voz se emplea un solo slot a 7,2 Kbps (TCH/S) en cada trama TDMA.

### 3.2.5 TETRA – ¿Cómo funciona?

Las redes se estructuran en divisiones llamadas flotas, las cuales constituyen en si grupos cerrados, de forma que solamente los terminales registrados a una flota determinada tienen acceso a la misma. Cada flota se puede segmentar en grupos según sea conveniente para la estructura organizativa requerida.

Cada uno de los terminales debe ser personalizado para que tenga acceso a la red y a los grupos a los que está destinado, así el usuario podrá efectuar las llamadas al grupo o grupos o terminales individuales que le hayan sido asignados. Los terminales buscan las BTS que tienen a su alcance escogiendo la que reciben con mejor señal. Si el terminal está en movimiento, se irá conectado y desconectando de las distintas BTS que haya en el territorio, según se aproxime o aleje del área de cobertura de cada una de ellas. Cada BTS dispone de un canal de control, mediante el cual identifica los terminales que están a su alcance y da acceso a los que están registraos en la red, rechazando los que no lo están.

Para iniciar una comunicación, el terminal envía una petición de llamada a la BTS, ésta le asigna un canal libre (éste protocolo siempre se transmite mediante el canal de control), a continuación, el usuario recibe una señal que le indica que la comunicación está abierta, simultáneamente se establece un tiempo límite, transcurrido el cual se cerrará la comunicación, el sistema cerrará el canal automáticamente en caso de quedar inactivo.

## 3.3 Redes de Banda Ancha - LTE ≥12

### 3.3.1 Introducción

A lo largo de los años, las redes de comunicación móvil han evolucionado:

<p><b>Redes GSM</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conmutación de circuitos (CS).</li> <li>• Orientadas a voz (3GPP Rel. 99)</li> </ul> <p><b>Redes UMTS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Conmutación de paquetes (PS)</li> <li>• 3GPP Release 4</li> </ul>	<p><b>Redes HSPA</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta velocidad</li> <li>• Hasta 3GPP Rel. 6</li> </ul> <p><b>Redes HSPA +</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• 3GPP Release 6 y posterior</li> </ul>
---	--

LTE es el siguiente paso de estandarización 3GPP de las redes de acceso a un sistema ALL-IP:

- **Release 8:** LTE Introduced.
- **Release 9:** Enhancement to LTE.
- **Release 10:** LTE Advanced.
- **Release 11:** Enhancement to LTE Advanced.
- **Release 12:** Further Enhancement to LTE Advanced Advanced.

### 3.3.2 Arquitectura LTE

La arquitectura de red LTE [41] se divide en un núcleo central (CN – CORE NETWORK) y una red de acceso de radio (RAN), interconectadas a través del backhaul móvil.

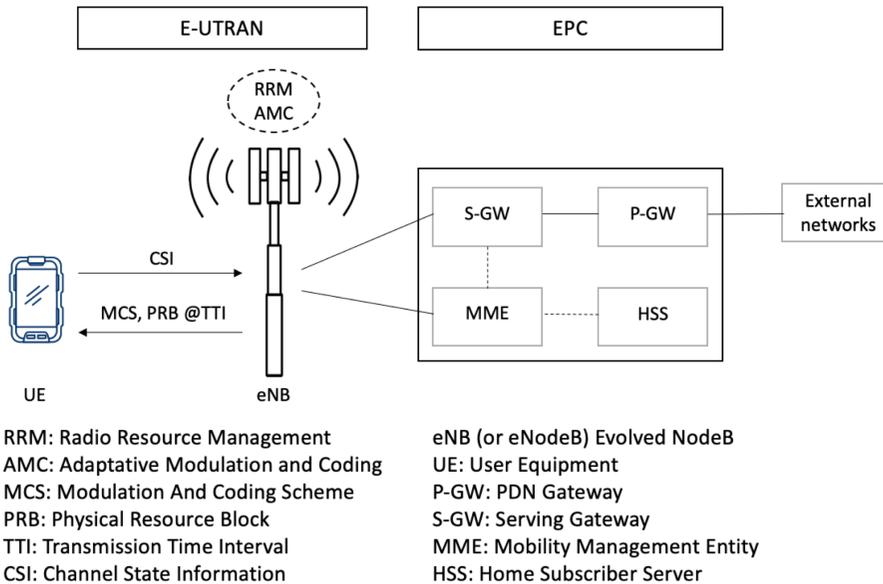


Figura 13: Detalle Arquitectura LTE [42]

- **EVOLVED PACKET CORE (EPC)** implementa todas las funcionalidades requeridas de la CN. En resumen, los elementos principales del EPC y sus funcionalidades son:
  - **Home Subscriber Server (HSS):** la base de datos que almacena información relacionada con el usuario y la suscripción.
  - **Serving Gateway (S-GW):** el ancla de nivel IP en relación con la movilidad del usuario y host handovers intra/inter-tecnología.
  - **Packet Data Network Gateway (P-GW):** la puerta de enlace IP entre la red LTE y las redes IP externas.
  - **Entidad de gestión de movilidad (MME):** el nodo de control principal para el acceso LTE, que implementa varias funciones relacionadas con el usuario y la topología.
- **EVOLVED UNIVERSAL TERRESTRIAL RADIO ACCESS NETWORK (E-UTRAN)** es el segmento de red encargado de implementar la interfaz de radio para el equipo de usuario (UE). En LTE, todas las funciones de control de radio dentro de una celda LTE se implementan en un elemento funcional único denotado como Nodo B Evolucionado (eNB o eNB).

### 3.3.3 Interfaces LTE

En esta imagen se representa los interfaces del estándar LTE V12 del 3GPP y se identifica el plano de control (CP) mediante línea discontinua y plano de usuario (UP) mediante línea continua

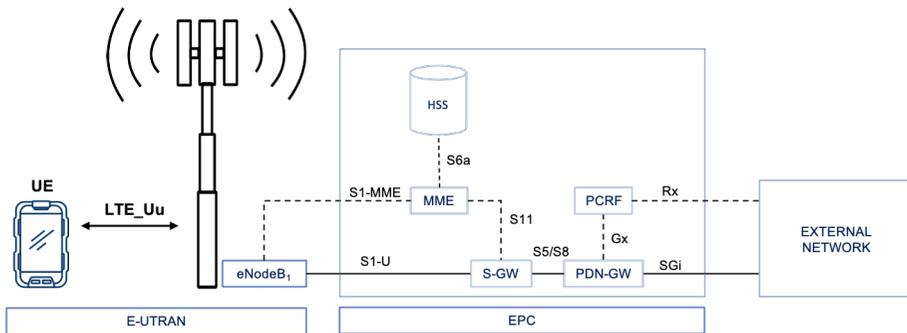


Figura 14: Detalle de los interfaces del estándar LTE V12

#### MME Interfaces:

- S1-MME al eNB (CP)
  - S1-MME punto de referencia entre MME-eNB.
  - Utilizado por el MME para intercambiar información de control y configuración de las sesiones de datos de usuario.
- S6a punto de referencia entre MME-HSS.
  - Permite la transferencia de datos de suscripción y autenticación para verificar y autorizar el acceso de los usuarios al EPC.
  - Se comunica con el MME: autenticación de datos de usuario y ubicación roaming.
- S11 al SGW (CP).
- S13 al EIR.
- X1\_1 y X2 (IRI).

#### SGW Interfaces:

- S5 desde PGW (CP) & (UP).
- S8 desde SGW a PGW (roaming), (CP) & (UP).
- S11 al MME (CP).
- S1-U al eNB (UP).

#### PGW Interfaces:

- S5 desde SGW (CP) & (UP).
- S8 desde SGW a PGW (roaming), (CP) & (UP).
- SGI a la red externa de datos (UP).
- Gx al PCRF (policy control).

#### PCRF Interfaces:

- Gx al PCEF (policy control).
- Sp al SPR (subscriber repository).

### HSS Interfaces:

- Sh/LDAP desde PCRF a HSS.
- S6a/S13 desde MME a HSS

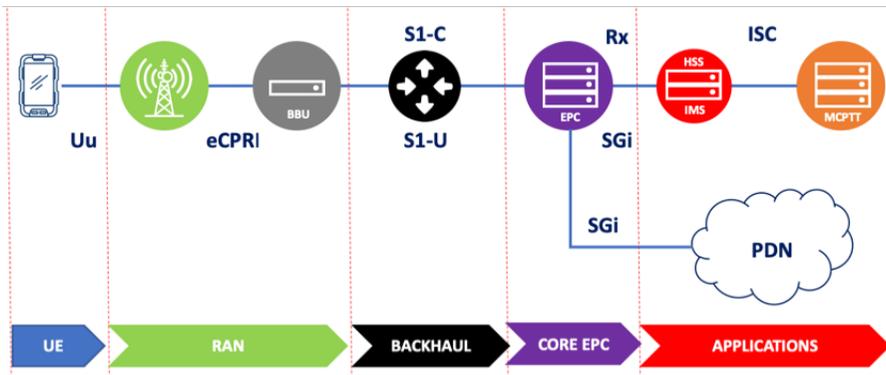


Figura 15: Detalle Arquitectura LTE simplificada

### 3.3.4 Interfaz radio LTE

Las principales características del interfaz de radio LTE son las siguientes:

- Basado en OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) [43]
  - Robustez frente interferencias, multitrayectos y atenuación selectiva
  - Usado en otros sistemas (ej. Wifi, WiMAX y DVB-T).
- Ancho de banda dividido en numerosas subportadoras (de 15 KHz en LTE) ortogonales entre sí
  - Evita interferencias cruzadas y necesidad de bandas de guarda
- Solución escalable sin más que aumentar el ancho de banda usado:
  - En LTE, se contemplan anchos de banda entre 1,4 MHz y 20 MHz

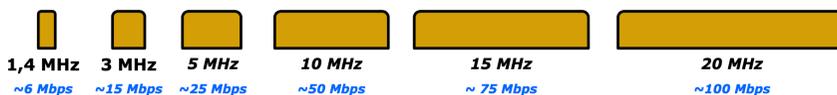


Figura 16: Relación anchos de banda / Throughput en Mbps

- Bandas de frecuencias para sentido ascendente/descendente separadas o común: FDD (Frequency Division Duplex) o TDD (Time Division Duplex) [42]
- LTE, 3GPP R9 determina 29 bandas de frecuencia diferentes:
  - 21 bandas de frecuencia (LTE Band 1 a LTE Band 21) se definen para FDD en el rango de 700 MHz (LTE Band 12) a 2600 MHz (LTE Band 7)
  - 8 bandas de frecuencia (banda LTE 33 a banda LTE 40) para TDD en el rango de 1900 MHz (banda LTE 35) a 2620 MHz (banda LTE 38).
- LTE, para las especificaciones LTE-A, 3GPP hasta R12 determina 15 nuevas bandas LTE: 11 nuevas bandas (LTE Band 22 a LTE Band 32) para FDD, en el rango de 450 MHz (LTE Band 31) a 3500 MHz (LTE Band 22); 4 nuevas bandas (LTE Band 41 a LTE Band 44) para TDD, en el rango de 700 MHz (LTE Band 44) a 3700 MHz (LTE Band 43).

### 3.3.5 Canales de Radio LTE

A continuación, se analizan las características de los canales de radio LTE., que son relevantes de cara a identificar la capacidad real de la red para soportar llamadas MCPTT tal y como se analizará en las secciones 4.3.3 y 5.4. En la primera de las secciones se definen los métodos de cálculo y el segundo se realizan los cálculos de capacidad. Antes, es preciso conocer su nomenclatura:

- **PRB** es el mínimo elemento de información que asigna un eNB a un UE. [44] [45]
- Un **PRB** contiene:
  - En el dominio de la frecuencia: un bloque de 12 subportadoras separadas 15 kHz entre sí, las cuales, en conjunto, ocupan 180 KHz de ancho de banda (12x15 kHz).
  - En el dominio del tiempo: un intervalo con 6 o 7 símbolos OFDM, de 0,5 ms, correspondiente a la duración de un slot de una trama LTE. En el dominio del tiempo, los recursos físicos se distribuyen a través de estructuras de trama.
- **RE** (recurso elemental): es una subportadora modulada en el tiempo de un símbolo. Un PRB dispone de 7 símbolos con 12 subportadoras asociadas a cada uno de ellos. Por tanto, un PRB dispone de 84 RE (12x7) en donde se ubican los símbolos QPSK, 16QAM o 64 QAM.
- UN PRB dispone de 85 RE.
- El ancho de banda de una **PRB** es de 180 kHz.
- Si, por ejemplo, se utiliza la modulación de 64 QAM se transmite 6 bits/símbolo, entonces en un PRB se puede transmitir hasta 504 bits (84x6) cada 0.5 ms, es decir, aproximadamente **1Mbps**.
- El número de subportadoras en un canal es  $12 \times (\text{número de PRB}) + 1$ , ya que se considera la subportadora central (DC) que no se utiliza para transmitir información, sino para facilitar los mecanismos de ajuste y sincronización en frecuencia del receptor.

Conocer cómo se reparten los recursos en el tiempo [44] [45], nos permitirá calcular, la cantidad de recursos radio disponibles para establecer las llamadas MCPTT:

- Capacidad real de la red para soportar llamadas MCPTT. Secciones 4.3.3 y 5.4.
- Analizar técnicas de optimización de la red LTE. Sección 5.4.6.

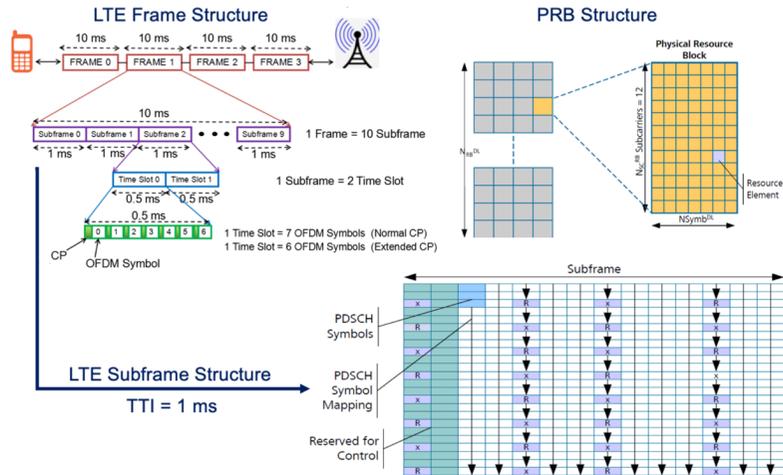


Figura 17: Distribución de los recursos físicos en el tiempo [44]

Dentro de cada TTI (**Transmission Time Interval**), el eNB necesita asignar las demandas de transmisión de datos al conjunto de recursos de radio disponibles. Estos PRB se multiplexan en tiempo y frecuencia a lo largo del TTI y el ancho de banda del canal, respectivamente.

Tabla 12: Velocidades de pico canales LTE

Velocidades de pico canales LTE						
Ancho de banda	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
Número de PRB	6	15	25	50	75	100
Velocidad pico (Mbps)	6	15	25	50	75	100
Velocidad pico bruta de usuario (Mbps)	5.1	12.8	21	42.5	63.7	85

Típicamente, para calcular la velocidad de pico de un canal [44] [45] se considera la velocidad de transmisión pico en un PRB. Los valores de velocidad pico incluyen datos codificados de usuario, canales de control y señalización propia de la capa física del sistema. Los recursos destinados a control y señalización en LTE oscilan alrededor de un 15% del total disponible, si a la velocidad de pico se le resta este porcentaje se obtiene la velocidad pico bruta de usuario.

El rendimiento de la célula LTE puede medirse por medio del rendimiento total logrado en un escenario multiusuario. Para cumplir con este requisito, cada UE

necesita operar con el esquema de transmisión más eficiente soportado en todo momento, lo que a su vez se traduce en usar el MCS más alto posible. **El valor MCS determina la eficiencia de transmisión de radio en términos de número de bits de datos por símbolo de modulación.** El mapeo entre la información CSI informada por los UE y el MCS que se utilizará en el siguiente intervalo de transmisión se especifica en 3GPP TS 36.213 [46].

La modulación adaptativa y codificación (AMC) perfecta, con conocimiento de un CSI ideal no es realista en las implementaciones del mundo real, ya que esto implicaría una serie de cuellos de botella de rendimiento, especialmente en los canales de uplink.

**El 3GPP no especifica el esquema específico utilizado por el eNB para asignar los PRB disponibles entre diferentes usuarios. Por lo tanto, se han diseñado e implementado varios algoritmos de planificación para hacer frente a diferentes objetivos de rendimiento y equidad más allá del rendimiento total de la celda.**

### 3.3.6 LTE MIMO

A pesar de esta tesis no contempla el cálculo de llamadas MCPTT en una disposición de antenas MIMO es **necesario hablar de esta alternativa como una técnica de radio frecuencia que utiliza más de una antena** como sucede en SISO para proporcionar mejoras en el rendimiento de la red.

MIMO se basa en la utilización de la propagación de señales multi trayecto que está presente en todas las comunicaciones terrestres. En lugar de proporcionar interferencia, estos caminos se pueden utilizar con ventaja. El transmisor y el receptor disponen de más de una antena y, utilizando la potencia de procesamiento disponible en cada extremo del enlace, pueden utilizar las diferentes rutas que existen entre las dos entidades para proporcionar mejoras en la velocidad de datos de la señal al ruido.

El uso de la tecnología MIMO se ha introducido sucesivamente en las diferentes versiones de los estándares LTE. MIMO ha sido una piedra angular del estándar LTE, pero inicialmente, en las versiones 8 y 9, no se admitían múltiples antenas de transmisión en el UE porque, en interés de la reducción de potencia, se suponía que sólo se empleaba un amplificador de potencia de RF. Fue en Rel. 10 cuando se introdujeron una serie de nuevos esquemas. Multiplexación espacial en bucle cerrado para SU-MIMO, así como múltiples antenas en el UE.

Por ejemplo, si se utilizan técnicas MIMO 4x4 y un ancho de banda de 20 MHz, la velocidad de transmisión pico alcanzadas en LTE será alrededor de 300 Mbps en downlink y 75 Mbps en uplink. Eso es desde un punto de vista teórico, porque en la práctica las velocidades de pico de un usuario dependen de: **la calidad del canal de radio, el número de usuarios simultáneos en la celda, del tipo de despliegue realizado por el operador, del tipo de servicio considerado y la calidad QoS asociada y de la capacidad del UE.**

Por tanto, ¿Cuál es la velocidad máxima de pico que se puede alcanzar en LTE?

Teóricamente en LTE-A se puede llegar a 3 Gbps en Downlink y 1,5 en Uplink, para lo cual se debería emplear las siguientes técnicas:

- **Agregación de portadora.** Que permite trabajar con un ancho de banda de hasta 100 MHz con el uso de 5 componentes de portadora de 20 MHz.
- **Técnica MIMO 8x4:** 8 capas en el DL y 4 en el UL.

### 3.3.7 Conclusión

La velocidad de datos final que puede alcanzar cada usuario y la célula LTE de manera agregada depende tanto de la función de programación como del esquema AMC desplegado en el eNB. La combinación de PRB y MCS asignados determina la cantidad total de bits transportados por un bloque de transporte (TB), denotado como tamaño de bloque de transporte (TBS)" [42].

## 3.4 Redes de Banda Ancha - 5G

### 3.4.1 Introducción

Aunque los servicios de comunicaciones de misión crítica se han definido hasta el momento para redes 4G, resulta recomendable analizar el posible impacto que la actual evolución hacia 5G puede suponer en este tipo de redes.

La implementación de una arquitectura 5G supone un impacto significativo en las redes móviles actuales en términos de redes físicas, instalaciones informáticas, los sistemas de alojamiento e implementación y la orquestación de servicios e infraestructura.

El aumento en la densidad de capacidad de las redes 5G da como resultado una mayor capacidad por sitio en las redes de acceso por radio (RAN) y una red mucho más densa de estaciones base 5G. Este aumento de densidad en la tradicional configuración de celdas permite la transmisión inalámbrica de datos desde micro celdas a macro celdas. Esto significa que la demanda de infraestructura 5G está más distribuida en muchas estaciones base. Los datos que atraviesan la red tienen que hacer un viaje más corto entre el usuario y su destino.

En esta nueva arquitectura, la conectividad entre las RRUs (Radio Remote Unit) con las BBUs (Band Base Unit) denominado Fronthaul y la conectividad entre las BBUs y el data center del operador toman mayor importancia que en las redes LTE:

- **Fronthaul Radio:** es el enlace que une los dos componentes de una estación base:
  - El módulo de sistema o banda base. Lleva el control centralizado del nodo y el procesamiento de los datos de usuario y control que se conecta al núcleo de red mediante el backhaul.
  - El módulo radio o cabeza remota. Lleva los transceptores radio que realizan la conversión a radio frecuencia que se conecta a las antenas.
- **Backhaul:** Es un enlace IP entre el módulo de sistema o BBU (Band Base Unit) y el núcleo de red. Si el backhaul falla se pierde la comunicación entre las estaciones base y el núcleo de red y por tanto con los servidores que se encuentran situada en la red IP externa. Si esto ocurre, no habría conectividad entre todos los usuarios conectados a la red. En este escenario, solo podrían hablar los usuarios conectados en los puestos de mando de escritorio, siempre y cuando la red IP externa esté operativa.

Según los análisis del 5G-PPP [47], el data center del operador de la red se conectará a través de una red troncal a los nodos de cómputo distribuidos situados en los extremos de la red. Estos centros de cómputo se encontrarán cerca del usuario final. La ejecución de los servicios en el extremo de la red permitirá obtener unos mejores tiempos de respuesta ya que el tráfico data no tendrá que subir hasta el data center del operador para su procesamiento.

### 3.4.2 Arquitectura de red 5G

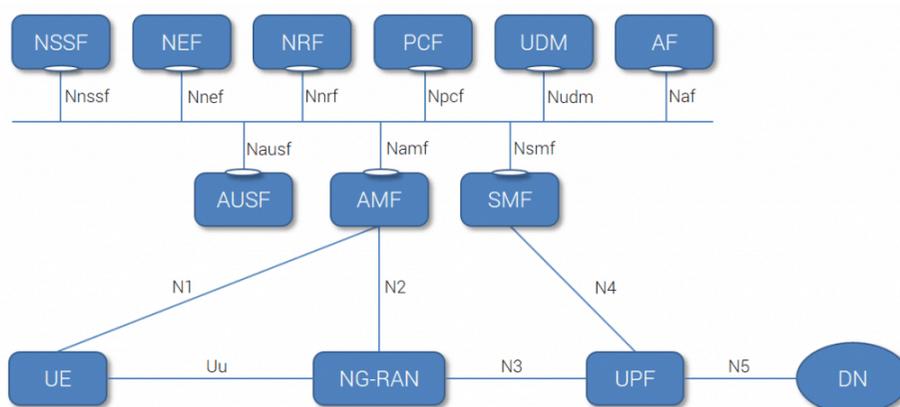


Figura 18: Arquitectura del sistema 5G: Representación basada en servicios [48]

El documento de referencia para la arquitectura 5G es la TS 23.501 del 3GPP [49]. En esta representación de la arquitectura, las funciones del plano de control, que se muestran dentro de la línea de puntos, se conectan entre sí a través de interfaces basadas en servicios.

La función de gestión de acceso y la función de gestión de sesión se conectan a los nodos del plano de usuario a través de N1, N2 y N4 para gestionar la conexión, las sesiones y la movilidad del suscriptor. La representación de los interfaces N2 y N3 dependerá de cómo el 5G RAN se conecte al núcleo.

#### 3.4.2.1 Componentes de la arquitectura 5G

La arquitectura 5G está compuesto por los siguientes componentes:

- **AMF - Función de gestión de acceso y movilidad:** Gestiona el control de acceso y la movilidad. El AMF también incluye la función de selección de corte de red (NSSF).
- **SMF - Gestión de sesión:** Configura y gestiona sesiones, de acuerdo con la política de red.
- **UPF - Función de plano de usuario:** los UPF se pueden implementar en varias configuraciones y ubicaciones, según el tipo de servicio. Estos son equivalentes a los GW en 4G.
- **PCF - Función de control de políticas:** proporciona un marco de políticas que incorpora la división de la red, la itinerancia y la gestión de la movilidad. Equivalente a un PCRF en 4G.
- **UDM - Gestión unificada de datos:** almacena datos y perfiles de suscriptores. Similar a un HSS en 4G, pero se usará tanto para acceso fijo como móvil.
- **NRF - Función de repositorio de NF:** esta es una nueva funcionalidad que proporciona funcionalidad de registro y descubrimiento para que las funciones de red (NF) puedan descubrirse entre sí y comunicarse a través de APIs.

- **NEF – Network Exposure Function:** esta interfaz proporciona de una manera segura servicios y capacidades de la red a usuarios externos. Permitiendo a empresas u operadores asociados, monitorizar y definir políticas de servicio a nivel de aplicación para usuarios dentro de la red. [50]
- **AUSF - Función del servidor de autenticación:** como su nombre lo indica, este es un servidor de autenticación (especificado por SA WG3).

### 3.4.2.2 Características generales de la arquitectura 5G

El aumento exponencial de tráfico de datos que requiere la industria y en particular las organizaciones de defensa, seguridad y emergencias requiere una adaptación de la parte RAN que permita un aumento en la velocidad de transferencia de datos entre los UE y los gNB (5G-NR) y una disminución de la latencia entre ambos. Pero también requiere de un nuevo núcleo de red que permita la gestión de ese aumento de tráfico. Estas son las principales características de esta nueva arquitectura [51]

- **CUPS – Separación del Plano de Control y Plano de usuario** para permitir la escalabilidad independiente y la evolución técnica desacoplada. Esto también admitirá implementaciones flexibles tanto en ubicaciones centralizadas y en los extremos. CUPS también se puede aplicar al EPC en 4G.
- **Diseño de funciones modulares.** Esta es una forma de desagregación funcional de tal manera que se puede crear una función compuesta de múltiples módulos de acuerdo con los requisitos del caso de uso; por ejemplo, los segmentos de red A y B pueden tener requisitos diferentes.
- **Minimiza las dependencias entre la red de acceso (AN) y la red central (CN).** Esto permitirá a los operadores construir una red central convergente de acceso múltiple, con interfaces AN-CN comunes, que integran diferentes tipos de acceso 3GPP y no 3GPP.
- **Marco de autenticación unificado:** Permite a los operadores ofrecer servicios de "seguimiento del usuario", independientemente del método de acceso.
- **Admite funciones de red "sin estado".** El procesado de un servicio es independiente de la ubicación en la que se encuentre almacenado ese servicio.
- **Exposición de capacidad de red.** Se espera poder exponer información sobre las capacidades de la red a aplicaciones internas y externas en redes 5G. Esta funcionalidad es especialmente útil para los operadores que desean integrar 5G con los denominados sectores verticales de la industria.
- **Acceso concurrente a servicios desplegados en el extremo y centralizados.** Los servicios pueden desplegarse en el extremo de la red o sobre el cloud principal, dependerá básicamente de la latencia requerida por esos servicios y de la capacidad de cómputo que requiera su ejecución.

### 3.4.3 Alternativas de Despliegue 5G

#### 3.4.3.1 Introducción

[52] NG-RAN (Next Generation Radio Access Network) es parte de la arquitectura 3GPP 5G. Es el responsable de proveer de acceso radio (RAN) a la red 5G. Tal y

como se define en 3GPP TS 38.300 [53] los nodos NG-RAN pueden ser gNB o NG-eNB

Los nodos gNB proporcionan acceso 5G NR a los usuarios al proporcionar control NR y terminación del protocolo del plano del usuario hacia el lado del equipo del usuario. Los nodos NG-eNB proporcionan acceso de radio LTE a los usuarios o proporciona control E-UTRA y terminación del protocolo del plano del usuario hacia el lado del equipo del usuario.

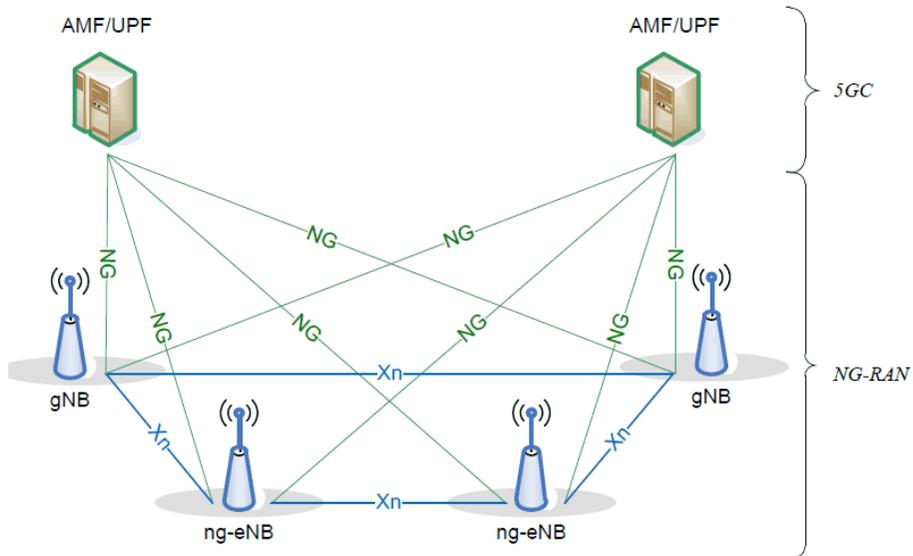


Figura 19: Arquitectura General definida en 3GPP TS 38.300 [53]

La figura anterior, representa la arquitectura de red de alto nivel que puede verse como una evolución de la arquitectura 4G, pero simplificando el núcleo 5G en una función combinada que termina el plano de control y el plano de usuario en la entidad AMF / UPF. Además de eso, el estándar considera desde el principio una red heterogénea compuesta con una mezcla de nodos 4G y 5G, que define el concepto del nodo NG-RAN como gNB, proporcionando terminaciones de protocolo de plano de usuario NR y plano de control hacia el UE; o un ng-eNB, que proporciona el plano de usuario E-UTRA y las terminaciones de protocolo del plano de control hacia el UE.

Los gNB y ng-eNB están interconectados entre sí mediante la interfaz Xn. Los gNB y los ng-eNB también están conectados por medio de las interfaces NG al 5GC, más específicamente a la AMF (Función de gestión de acceso y movilidad) a través de la interfaz NG-C y a la UPF (Función del plano del usuario) por medio de la interfaz NG-U.

En esta arquitectura se puede observar la integración de los eNB de LTE con los gNB NR de 5G. Por lo menos en la fase inicial de 5G la convivencia entre nodos LTE

y 5G será la nota predominante además estos nodos 4G pueden seguir siendo empleados para la Voz HD y así liberar de ese tráfico a los nodos 5G.

Una de las características principales de NG RAN es la capacidad de operar tanto en el modo denominado "Standalone" (SA) como en el modo "Non-Standalone" (NSA). En el modo SA, el gNB está conectado a la Red Central 5G (5GC); en el modo de operación NSA, tanto 5G NR, como LTE están estrechamente integrados y se conectan a la red central 4G (EPC) existente, aprovechando la conectividad dual (DC) hacia el terminal. En una arquitectura de conectividad dual, un nodo maestro (MN) y un nodo secundario (SN) proporcionan simultáneamente recursos de radio hacia el terminal para mejorar las tasas de bits del usuario final. Las opciones de arquitectura NSA y SA se especifican como parte de los estándares 5G del 3GPP. Son siete las opciones de arquitectura definidas y concretamente NSA es la opción 2 y SA es la opción 3.

#### 3.4.3.2 NSA (Non-Standalone)

Los operadores que implementan esta opción deben separar el plano de usuario y el plano de control para poder alcanzar las velocidades de datos 5G esperadas. El SCG (Secondary Cell Group) permite que el S-GW envíe flujos separados de datos del plano de usuario al nodo RAN maestro o secundario. El en-gNB (versión de NR gNB trabajando como EN-DC) secundario también puede dividir los datos que recibe de la red central y, por lo tanto, el S-GW se divide en eNB maestro y en-gNB directamente para lograr las velocidades de datos más altas esperadas.

Para los operadores móviles que buscan ofrecer principalmente conectividad de alta velocidad a los consumidores con dispositivos habilitados para 5G, el modo NSA permite a los operadores aprovechar sus activos de red existentes en lugar de implementar una red 5G de extremo a extremo completamente nueva. Sin embargo, los operadores que quieran enfocarse en nuevos servicios para Internet de las cosas (IoT), máquina a máquina (M2M) u ofrecer banda ancha móvil en el mercado, deberán implementar la arquitectura 5G SA desde el principio.

NSA permite al operador desplegar 5G rápidamente, permitiendo que la banda ancha móvil de alta velocidad sea validada por los actuales clientes LTE.

Esta es la arquitectura que vamos a emplear como alternativa de despliegue de servicios MCPTT sobre redes 5G que se analizará en la sección 6.4. Vamos a considerar un núcleo de red EPC con SGW y PGW desplegados en los extremos de la red. Esta distribución del EPC junto al empleo de la técnica LBO (Local Break Out) permitirá establecer la separación del tráfico de control, de los datos media pudiendo aprovechar el aumento de capacidad y disminución de latencia que ofrecen los nodos gNB. Los nodos gNB proporcionaran acceso 5G NR (New Radio) a los usuarios.

### 3.4.3.3 5G Core Network Architecture – SA (Standalone)

5G SA (Standalone) será la arquitectura elegida por los nuevos operadores 5G que no tienen que amortizar una arquitectura 4G previa y que por tanto sus clientes serán directamente 5G o los que quieran sacar el máximo provecho a la reducción de latencia y mecanismos de gestión avanzados de un núcleo 5G. En la arquitectura 5G (Standalone) todo es de 5G. Esto quiere decir que existe un núcleo 5G denominado 5GC y en la parte radio, nodos gNB 5G NR. En la arquitectura SA, la estación base NR (nodo lógico "gNB") se conecta entre sí a través de la interfaz Xn. La arquitectura NG-RAN para SA se conecta a la red 5GC utilizando la interfaz NG.

La arquitectura SA soporta de forma nativa: Network Slicing, Banda ancha móvil mejorada (eMBB), Comunicaciones masivas de tipo máquina (mMTC) y Comunicaciones ultra confiables y de baja latencia (URLLC)

## 3.5 Tecnologías habilitantes actuales

### 3.5.1 Introducción

Este capítulo forma parte de la acción A-2. Las secciones que se presentan a continuación detallan el funcionamiento de dos tecnologías o paradigmas que van a dar respuesta al objetivo OT-2.

Actualmente la virtualización de funciones de red – Network Function Virtualization (NFV) y las redes definidas por software - Software Defined Networking (SDN) se perfilan como dos tecnologías habilitantes que permiten desplegar de forma eficiente servicios y funciones de red, en esta subsección se van a describir brevemente ambos conceptos para ver después en los capítulos 6, Alternativas de Despliegue y 7, Análisis de Indicadores por despliegue, cómo van a contribuir a mejorar el rendimiento de los servicios MCPTT.

NFV supone un cambio importante en la forma de operar e interaccionar de las redes hardware y software. Junto con la SDN, la NFV crea un entorno amplio en capacidades de automatización y programación. La NFV también constituye una oportunidad para implementar una infraestructura de red más centrada en el cliente que puede adaptarse de manera dinámica a las necesidades y a los requisitos del cliente para los operadores y proveedores de servicios. Los operadores de redes grandes están recurriendo a la NFV debido a su capacidad de programación y al empleo de estándares abiertos.

La proliferación de los servicios en la nube y los estrictos requerimientos de los usuarios de estos servicios han provocado un rápido avance de la tecnología de virtualización en toda la cadena de prestación de servicios (redes de acceso, procesamiento, almacenamiento y servicios) y de la tecnología de monitorización encargadas de garantizar los tiempos de respuesta y los niveles de continuidad y la disponibilidad de los servicios contratados por los clientes. Esta rápida evolución tecnológica a nivel de hardware, software y firmware unido a ahorros importantes debido a la disminución de la infraestructura de soporte que mantener las han convertido en tecnologías habilitadoras para las redes de banda ancha.

Tras describir las capacidades de NFV y SDN como tecnologías habilitantes, se terminará este capítulo profundizando en una tecnología relevante a la hora de garantizar la disponibilidad de los servicios de PPDR mediante el mejor aprovechamiento de la cobertura por parte de los UE conectados a un eNB. LTE Broadcast o eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Services) permite que se entregue el mismo contenido a un gran número de usuarios al mismo tiempo. El consumo de ancho de banda no dependerá de la cantidad de usuarios simultáneos, sino de la cantidad de canales simultáneos que el operador desee emplear. Es una tecnología muy interesante a la hora de considerar desplegar servicios a grupos como puede ser MCPTT, donde el número de usuarios que tiene un grupo puede ser un factor limitante en situaciones de congestión de red o debido la distancia de los usuarios respecto del eNB.

### 3.5.2 Virtualización de Funciones de Red (NFV)

Consiste en la sustitución de dispositivos hardware dedicados por dispositivos de red software que se ejecutan como máquinas virtuales en servidores estándares. NFV desacopla las funciones de la red de los dispositivos de hardware dedicados y las traslada a los servidores virtuales. De esta manera, se consolidan múltiples funciones de red en un único servidor físico. Esta implementación reduce los costes y minimiza la necesidad de mantenimiento de hardware específico ya que estos dispositivos virtuales se implementarán en servidores de propósito general. [54]

El gestor de la red dispone de funciones de **orquestración** y administración que permiten la coordinación de los dispositivos virtuales que se ejecutan en la red. Los dispositivos virtuales a criterio del administrador de la red pueden elegirse e implementarse para dar respuesta a las necesidades cambiantes de la red. Por ejemplo: si un cliente requiere de una función de red, el proveedor del servicio puede activar una máquina virtual para poder proveer de esa funcionalidad requerida y con la misma facilidad podrá desactivarla cuando ya no sea necesaria.

La virtualización de las funciones de red reduce la dependencia de los dispositivos de hardware dedicados para los operadores de red. Mejora la escalabilidad, el uso de los recursos y la personalización de la red. La NFV es diferente de una función virtual de red (**VNF**). Éste es un término que se emplea para describir una función de red que se ejecuta en el software de una VM.

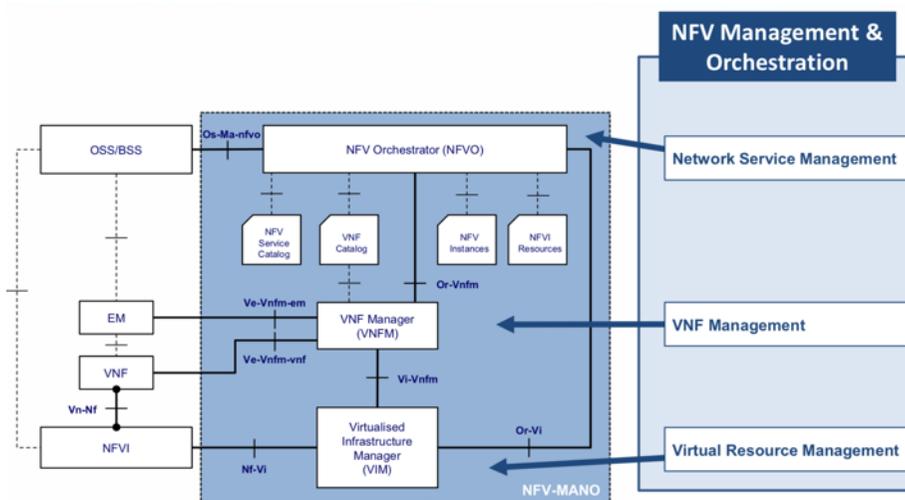


Figura 20: ETSI GS NFV-SWA 001 (2014)

La arquitectura de referencia NFV MANO tiene tres componentes principales: [55]

- **NFV Orchestrator (NFVO).** Sus principales funciones son:
  - Gestiona el ciclo de vida de NS (Network Service).
  - Expone las interfaces de administración del ciclo de vida de NS al OSS / BSS.
  - Envía notificaciones de gestión del ciclo de vida de NS al OSS / BSS.
  - Gestiona recursos virtualizados a través de las interfaces expuestas por el VIM.
  - Expone las interfaces de administración de recursos virtualizadas al VNFM.
  - Envía notificaciones de gestión de recursos virtualizadas a VNFM.
  - Gestiona el ciclo de vida de VNF a través de las interfaces expuestas por VNFM.
- **VNF Manager (VNFM).** Sus principales funciones son:
  - Maneja el ciclo de vida de las VNF.
  - Gestiona el ciclo de vida de VNF a través de las interfaces expuestas por VNF.
  - Expone las interfaces / API de administración del ciclo de vida de VNF a VNF, EM y NFVO
  - Envía notificaciones de gestión del ciclo de vida de VNF a VNF, EM y NFVO.
  - Administra los recursos virtualizados asociados al VNF que administra a través de las interfaces expuestas por el VIM o NFVO.
- **Virtualised Infrastructure Manager (VIM)**
  - Gestiona los recursos de infraestructura de NFV (computación, red y almacenamiento) en uno o más NFVI-PoPs.
  - Expone interfaces / API de gestión de recursos virtualizados a VNFM y NFVO.
  - Envía notificaciones de gestión de recursos virtualizadas a VNFM y NFVO.

Las principales ventajas, por el uso de NFV son las siguientes:

- Menos espacio necesario para el hardware de red.
- Menor consumo energético de la red.
- Menor coste de mantenimiento de la red
- Actualizaciones de red más sencillas y rápidas.

### 3.5.3 Redes definidas por Software (SDN)

Las redes definidas por software permiten el despliegue de los servicios en la red de una forma determinista, dinámica y estable, facilitando al administrador de red su gestión. Se basa en la separación efectiva de los planos de control y de datos.

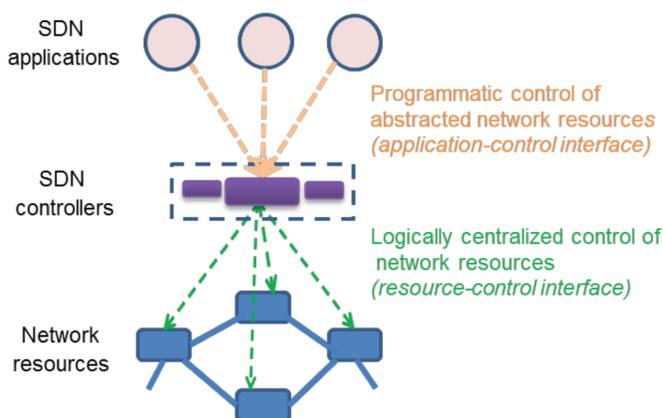


Figura 21: Diagrama conceptual SDN (ITU-T Recommendation Y. 3300)

Esto es, la diferenciación entre aquella parte de la arquitectura de un router que se ocupa de elaborar el mapa de red y de procesar el tráfico que mantiene su funcionalidad, y aquella que decide qué hacer con los paquetes que aterrizan en un interfaz de entrada, trasladando la información desde su punto de origen hasta su destino final. De modo que, en la práctica, la gestión de las redes ya no dependería de una solución de hardware, sino de un controlador de software más inteligente y preparado para exprimir el rendimiento al máximo. SDN permite a los administradores disponer de herramientas centralizadas de programación, virtualización y monitorización de la situación en tiempo real de la red, permitiendo su adaptación de forma eficiente a las necesidades concretas de cada momento. Con SDN el procesamiento de paquetes ya no deriva de una serie de ficheros de configuración estáticos en cada uno de sus cientos de nodos sino en una organización dinámica a través de una capa de software que Virtualiza la red y la independiza de la infraestructura física subyacente [56].

Los beneficios derivados del uso de SDN son los siguientes:

- Reduce el Capex (*Capital Expenditures*): Reutilización de hardware.
- Reduce el Opex (*Operating Expense*): SDN hace más sencillo la configuración y gestión de las redes.

- Agilidad y flexibilidad: SDN permite a las organizaciones desplegar aplicaciones, servicios e infraestructuras rápidamente para alcanzar los objetivos propuestos por empresas en el menor tiempo posible.
- Permite innovación: permite crear nuevos tipos de aplicaciones y modelos de negocio por parte de las empresas, que las beneficia y aumenta el valor de sus redes [57]

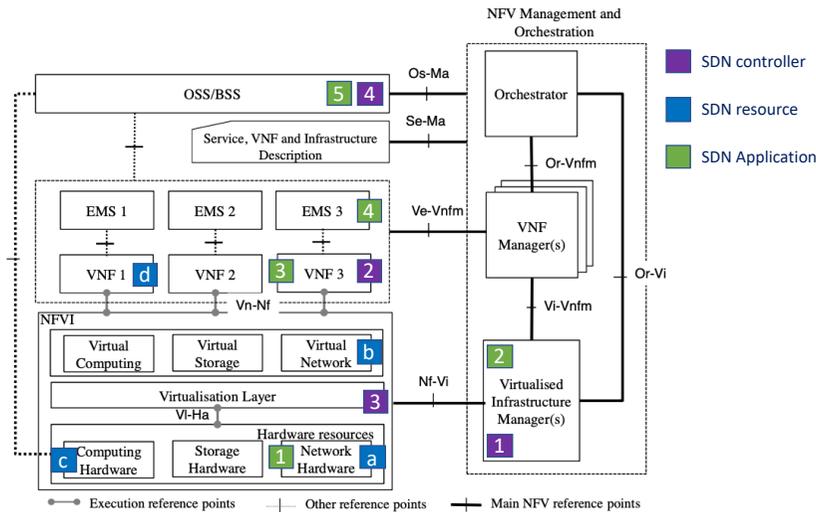


Figura 22: Controlador SDN desplegado sobre la arquitectura de referencia NNFV [58]

Gracias a SDN se va a poder separar el tráfico de control del de datos de esta manera el primero atravesará la red hasta el Data Center del operador mientras que el de datos no necesitará subir porque los usuarios destinatarios se encontrarán en los extremos de la red, lo que supondrá una mejora en la latencia de los servicios sin ser necesario una mejora de latencia en la parte RAN de la arquitectura.

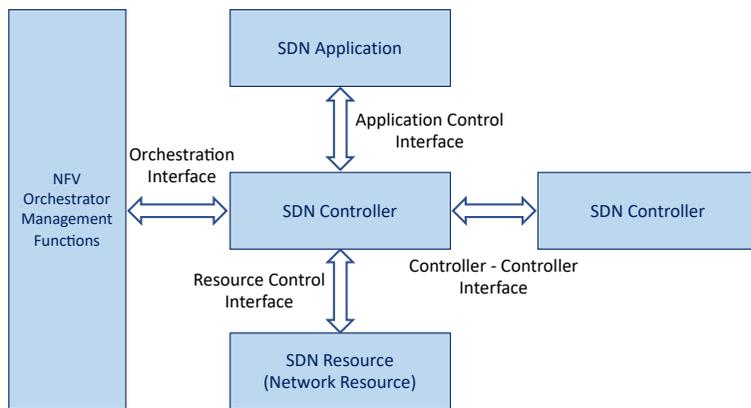


Figura 23: Interfaces del controlador SDN [58]

El SDN Controller se comunica con el orquestador NFVO que es el que define los recursos de red que van a requerir en un momento concreto los NS desplegados en las VNF. El orquestador dispondrá de un conjunto de reglas que en función de las métricas de infraestructura, servicio y red que reciba de los sistemas de monitorización modificará la configuración de los diferentes recursos de red para adaptarlos a las nuevas necesidades demandadas por el NFVO. El SDN Controller será una pieza fundamental de esa arquitectura de cara a poder trocear la red en función de los SLA de las organizaciones que empleen la infraestructura de red. SDN por tanto se convierte en una pieza clave para poder garantizar dentro de una red de banda ancha pública los requerimientos de ancho de banda y latencia que requieren los MCS.

#### **3.5.4 MBMS (Multimedia Broadcast Multicast Service)**

LTE Broadcast o eMBMS (evolved Multimedia Broadcast Multicast Services) es una especificación disponible en LTE desde la Release 9.

La ventaja de utilizar la transmisión de difusión a través de LTE es que muchos usuarios pueden recibir el mismo contenido simultáneamente. El consumo de ancho de banda no depende de la cantidad de usuarios simultáneos, sino de la cantidad de canales simultáneos que el operador desea transmitir.

Como ya se ha indicado previamente, en el servicio MCPTT mientras uno habla los demás miembros del grupo escuchan. Todos los miembros del grupo reciben la misma información. El número de UE que puede gestionar un eNB no es ilimitado y el throughput que asignará a cada uno de ellos dependerá del MCS que asigne el eNB al UE dependiendo de la cobertura que este tenga en cada momento, pudiendo producirse discontinuidad del servicio de los miembros de un grupo en función de su localización y del nivel de carga del eNB.

Si se emplea eMBMS en lugar de tener una portadora unicast con un throughput asegurado se tendrá una única multicast a la que se conectan todos los miembros del grupo. Se produce un mejor aprovechamiento del throughput del eNB.

El servidor MCPTT es capaz, a través de la interfaz MB2, de solicitar la creación de portadores MBMS y asociar un Temporary Mobile Group Identity (TMGI) único o una combinación de un TMGI y un identificador de flujo (ver 3GPP TS 23.468 [59]). El servidor MCPTT puede determinar el área de difusión de MBMS en función de las identidades de celda de los miembros del grupo afiliado recibidos por MCPTT-1.

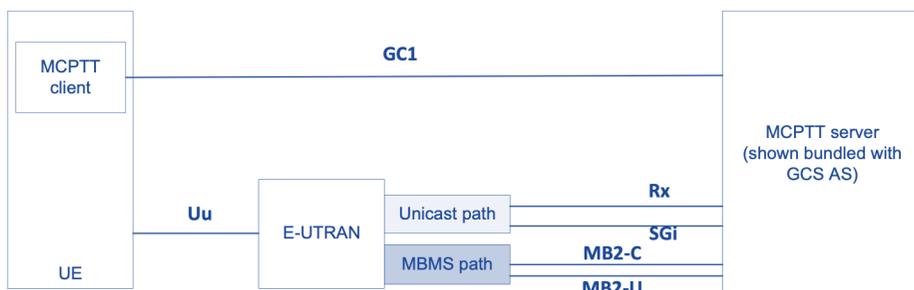


Figura 24: GCS AS & MBMS – MCPTT Server TS 23.179

Una portadora de MBMS (red y parte de radio) se identifica de manera única a través de un Temporary Mobile Group Identity (TMGI) o mediante una combinación de un TMGI y un identificador de flujo (ver 3GPP TS 23.246 [60]).

Tabla 13: MBMS bearer configuration

Information element	Status	Description
Multicast IP address	M	Multicast IP address of MBMS bearer
TMGI	M	TMGI Information
QCI	M	QCI information used by the ProSe UE-Network Relay to determine the ProSe Per-Packet Priority value to be applied for the multicast packets relayed to Remote UE over PC%

En la sección 2.3, se ha descrito el servicio MCPTT, presentado sus componentes principales y analizado una llamada a grupo MCPTT. La llamada descrita se ha establecido empleando portadoras unicast. Esto supone que por cada uno de los usuarios que forman parte de la llamada a grupo establecen una portadora unicast entre cada de ellos y el servidor MCPTT AS.

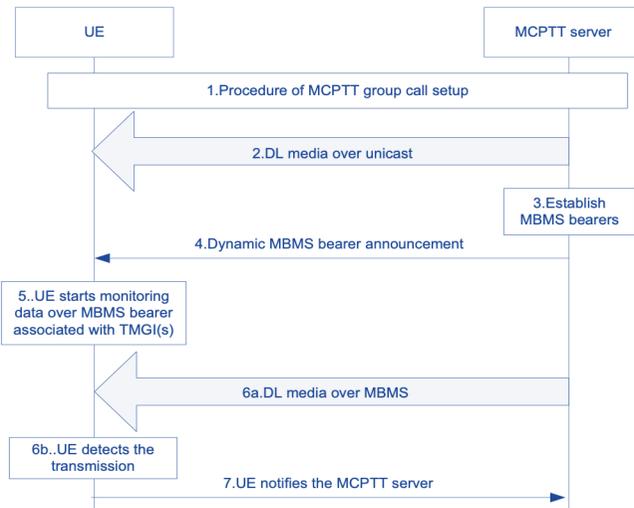


Figura 25: Notificación al UE del establecimiento de la portadora multicast

En la sección 4.3.3 se detallará cómo calcular de forma teórica el número de llamadas por MCS y en la sección 5.4, se calcula numéricamente las llamadas MCS MCPTT por MCS. Todos estos cálculos se han realizado considerando que las portadoras que se han establecido son unicast. En el capítulo 4, se analiza los Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB y como parte de estos requerimientos, en la sección 4.3.4 Consideraciones en transmisiones multicast, se aborda el servicio eMBMS como alternativa o complemento a las portadoras unicast. Pero antes, se define en esta sección el funcionamiento del servicio.

A continuación, se va a describir el procedimiento para establecer una portadora multicast que pueda ser empleada por todos los miembros del grupo. Las operaciones de ACTIVACIÓN, DESACTIVACIÓN, MODIFICACIÓN de la portadora multicast en MCPTT están especificadas en 3GPP TS 23.468 [59] y se realiza a través de la función GCS AS.

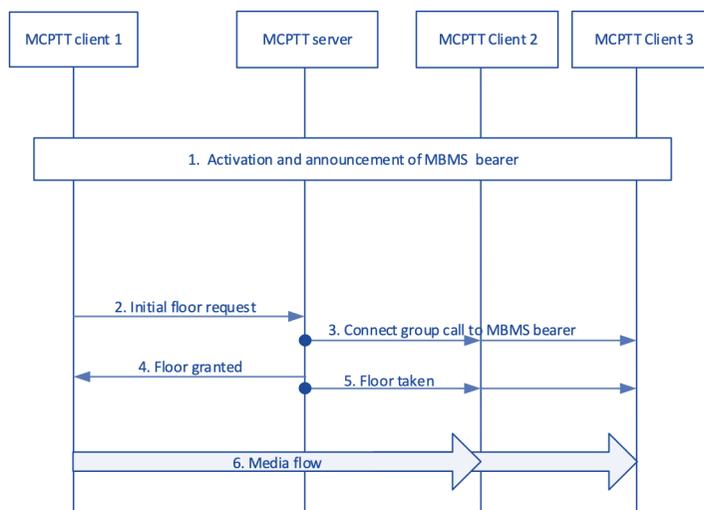


Figura 26: Establecimiento de la llamada sobre una portadora multicast

#### 3.5.4.1 Despliegue de MCPTT sobre portadora multicast

Los clientes de una llamada grupo MCPTT pueden configurar una portadora unicast en el enlace ascendente y simultáneamente una portadora multicast en el enlace descendente.

Los clientes MCPTT son los que **informan al servidor MCPTT AS** de la posibilidad de establecer una portadora multicast y es el servidor MCPTT AS el que establece la portadora multicast.

El servidor MCPPT AS puede preestablecer la portadora multicast. Una portadora multicast puede contener el tráfico de varias llamadas a grupo. Las llamadas a grupo pueden cambiar de una portadora unicast a portadora multicast.

¿Cuál es el procedimiento de establecimiento de una portadora multicast?

- El servidor MCPTT proporciona una dirección IP de multidifusión grupal a los UE (dirección IP de destino de los paquetes RTP y Floor Control).
- BM-SC recibe paquetes sobre MB2-U.
- Los paquetes se colocarán en el soporte de MBMS asociado con TMGI / identificador de flujo del grupo MCPTT.

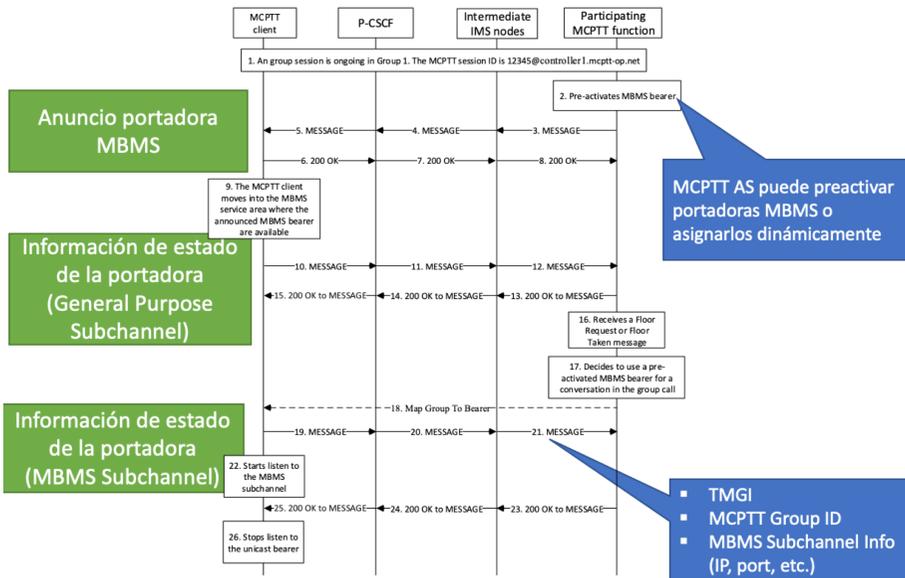


Figura 27: Notificación a los clientes del establecimiento de la portadora multicast

En la figura anterior se observa el detalle de notificación al cliente MCPTT el establecimiento de una portadora multicast para la llamada a grupo que el cliente MCPTT ha iniciado. El servidor MCPTT puede preestablecer una portadora multicast por la que además puede que exista tráfico de otras llamadas a grupo.

- 1) Cuando el cliente MCPTT inicia la llamada a grupo, no conoce la disponibilidad de la portadora multicast por ello el enlace ascendente Cliente MCPTT -> MCPTT AS Participating es unicast
- 2) El MCPTT AS Participating informa a través del comando MESSAGE que existe una portadora multicast establecida.
- 3) El cliente MCPTT solicita información al servidor sobre los datos para reconectar su tráfico a la portadora multicast
- 4) El servidor MCPTT AS Participating recibe la solicitud de uso del canal (FLOOR REQUEST) y el servidor decide concederle a la llamada a grupo un subcanal de la portadora multicast preestablecida.
- 5) El cliente informa al servidor MCPTT Participating su TMGI que ha sido asignada por el BM-SC durante el establecimiento de la portadora multicast, su identificador de grupo MCPTT (MCPTT Group IP) y la información del subcanal que le han asignado (IP, PORT etc.). En este punto el cliente MCPTT ya está escuchando el subcanal asignado de la portadora multicast asignada.
- 6) El cliente recibe la notificación del servidor MCPTT Participating indicando que tiene la información y es entonces cuando el cliente MCPTT deja de escuchar la portadora unicast que ha dado lugar a la llamada.

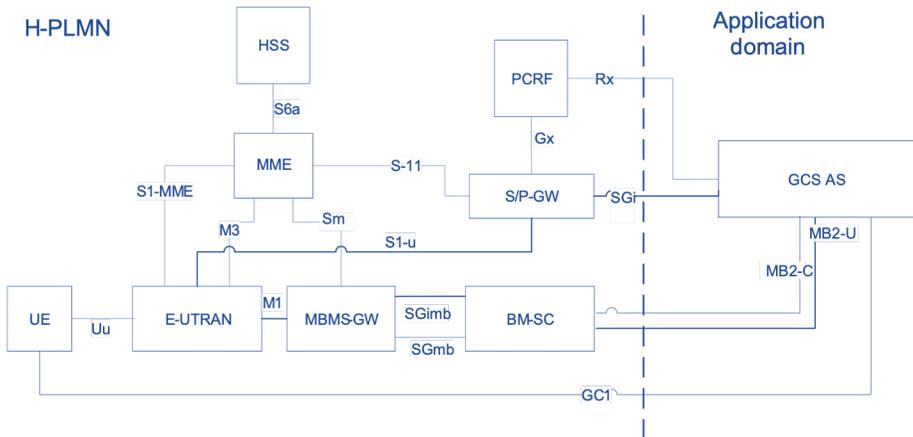


Figura 28: Interfaces MCPTT AS con LTE EPC Multicast (3GPP TS 26.346)

MCPTT ha sido el primer servicio 3GPP que ha incorporado las características de Group Communication Enabler (descritas en 3GPP TS 26.346) para beneficiarse de la arquitectura MBMS de LTE. Un servidor MCPTT puede comportarse como un GCS-AS que se comunica con el nodo BM-SC en el EPC a través de la interfaz MB2-C para obtener los parámetros necesarios para señalar los canales de difusión que se utilizarán en la comunicación.

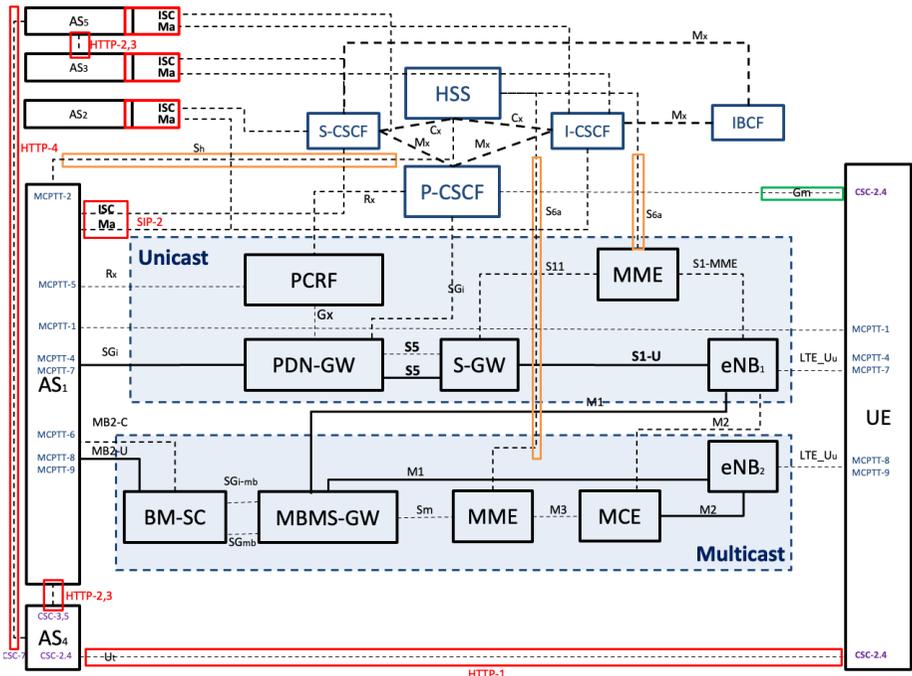


Figura 29: Arquitectura 3GPP TS 26.346 E2E MCPTT - LTE EPC (Multicast/Unicast)

### 3.6 Conclusiones

Para poder responder al objetivo **OT-2** y proponer técnicas y paradigmas que puedan minimizar el impacto del despliegue de los servicios de misión crítica sobre las redes soporte, se ha definido la acción **A-2** donde se analiza el funcionamiento de las arquitecturas LTE y 5G sobre las que se van a desplegar estos servicios

Desde el punto de vista de las arquitecturas soporte en redes LTE y 5G, el operador debe garantizar la continuidad, la disponibilidad, la gestión de aumento de la capacidad de red y la disminución de los tiempos de latencia extremo a extremo.

Las redes de radio privada digitales no son tan diferentes de las redes comerciales de telefonía móvil. Precisamente el grado de cobertura de las segundas que inicialmente es una gran ventaja hace que estas sean menos robustas (mayor infraestructura de red a redundar) frente a las primeras.

Las agencias PPDR demanda comunicaciones de datos, pero la voz sigue teniendo una importancia fundamental en la coordinación de los recursos que gestionan las agencias PPDR.

Los operadores conscientes del aumento de la demanda de tráfico de datos por parte de los usuarios están inmersos en la virtualización de sus redes y servicios, en forma de servicios en la nube y virtualización de redes definidas por software (SDN) / funciones de red (NFV).

El empleo de **NFV y SDN** en las arquitecturas 4G y 5G permite encaminar de forma mucho más flexible el tráfico y desplegar servicios sobre diferentes nodos de cómputo. Adicionalmente, el empleo de técnicas de **SLICING** permite a los operadores gestionar de una forma sencilla los requerimientos de QoS de sus Operadores Virtuales MVNO (Mobile Virtual Network Operator).

Gracias a **SDN** se puede encaminar el tráfico desde los nodos de cómputo desplegados en el extremo hacia el Data Center del operador, de esta forma el plano de control sigue en el Data Center del operador y el plano de usuario lo que se tiene en los extremos de la red. De esta manera, el posible aumento de tráfico de datos que prevén los operadores no afectará al tráfico de control del operador y por ello es posible gestionar un previsible aumento de datos.

**NFV** permite la virtualización del servicio MCPTT y su distribución en los extremos de la red y **SDN** gestiona y coordina, los flujos de información entre los servicios desplegados en el extremo, con los servicios instalados en el Data Center.

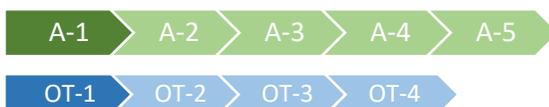
La **ejecución de los servicios cerca del usuario que los consume disminuye los tiempos de respuesta (latencia)** y si a eso se le une la disminución de la latencia que ofrece las redes 5G, el usuario tendrá una sensación de disponer de comunicaciones de misión crítica instantáneas. Estas tecnologías además facilitan la continuidad, disponibilidad y gestión de capacidad de los servicios.

El **servicio eMBMS** es una alternativa o complemento a las portadoras unicast en redes LTE. Su empleo puede aumentar el número de llamadas MCPTT por TTI en cada eNB, pero como veremos el capítulo 4 dependerá de la distribución de los UE en la celda. En la sección 4.3.4 se aborda más en detalle esta cuestión, una vez que se ha explicado técnicamente el funcionamiento de eMBMS en la sección 3.5.4

## 4 Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB

<b>4.1</b>	<b><a href="#">INTRODUCCIÓN</a></b> .....	<b>69</b>
<b>4.2</b>	<b><a href="#">RENDIMIENTO DE LOS SERVICIOS – INDICADORES (KPI)</a></b> .....	<b>70</b>
<b>4.3</b>	<b><a href="#">COBERTURA Y USO DE RECURSOS RADIO</a></b> .....	<b>74</b>
4.3.1	<a href="#">INTRODUCCIÓN</a> .....	74
4.3.2	<a href="#">TAMAÑO DEL PAQUETE MCPTT</a> .....	75
4.3.3	<a href="#">CÁLCULO DEL NÚMERO DE LLAMADAS MCPTT POR MCS EN TRANSMISIONES UNICAST</a> .....	76
4.3.4	<a href="#">CONSIDERACIONES EN TRANSMISIONES MULTICAST</a> .....	82
4.3.5	<a href="#">CONCLUSIONES</a> .....	86
<b>4.4</b>	<b><a href="#">RESILIENCIA</a></b> .....	<b>87</b>
4.4.1	<a href="#">INTRODUCCIÓN</a> .....	87
4.4.2	<a href="#">INFRAESTRUCTURA RAN</a> .....	89
4.4.3	<a href="#">NODOS DE PROCESAMIENTO</a> .....	90
4.4.4	<a href="#">PROPUESTAS DE DESPLIEGUE DEL SERVICIO MCPTT EN LOS NODOS</a> .....	91
<b>4.5</b>	<b><a href="#">CONCLUSIONES</a></b> .....	<b>97</b>

### 4.1 Introducción



**E**n este capítulo se analizan los requerimientos más importantes que se demandan a una red PPDR BB, tomando como referencia el trabajo del NPSTC [9] y Simon Forge en el informe “Is Commercial cellular Suitable for Mission Critical Broadband” [12] de acuerdo con las siguientes categorías:

- **Rendimiento de los servicios – Indicadores (KPI):** El grupo de trabajo SA6 del 3GPP ha definido un conjunto de indicadores de rendimiento que debe cumplir el PTT desplegado sobre redes de banda ancha para ser considerado de misión crítica MCPTT.
- **Disponibilidad - Cobertura:** El operador debe garantizar la máxima cobertura posible en el área geográfica en la que se despliegan los recursos de misión crítica. Dependiendo de la cobertura que dispongan cada uno de los medios desplegados, la estación base les asignará una mayor o menor ancho de banda (throughput). Se debe garantizar el mínimo que requiere el servicio MCPTT.
- **Continuidad – Servidores MCPTT:** Los servicios MCPTT deben estar siempre disponibles y en el supuesto de problemas poderse recuperar lo más rápido posible. Una red de banda ancha de misión crítica debe garantizar un funcionamiento del 99,999 %. La disponibilidad del 99,999% supone menos de 5,26 minutos de tiempo de inactividad por año

A continuación, se va a analizar cada uno de estos requerimientos que marcan la diferencia entre ser un PTT comercial y un servicio de misión crítica MCPTT. Es importante incidir que un servicio PTT desplegado sobre una arquitectura de red inalámbrica de banda ancha no es por defecto un servicio de misión crítica.

## 4.2 Rendimiento de los servicios – Indicadores (KPI)

El NPSTC en su informe “Push to Talk over Long Term Evolution Requirements” [8] enumera un conjunto de requerimientos que debe cumplir el servicio PTT (Push to Talk) al ser desplegado sobre redes de banda ancha. Dentro de estos requerimientos enumerados en la Tabla 1 de esta tesis, figura en la fila correspondiente al servicio el “Rendimiento de las llamadas PTT”. Esta relación de requerimientos funcionales está basada en el servicio PTT en redes PMR/LMR y en la experiencia de usuarios que diariamente trabajan con esta tecnología.

El objetivo del NPSTC en 2013 era que estos requerimientos fueran recogidos por el 3GPP (Third Generation Partnership Project) en las futuras versiones del estándar de LTE. Y así ocurrió cuando a finales de 2016 quedó reflejado en la Release 13. El 3GPP para poder cuantificar este rendimiento ha definido un indicador para cada una de las fases de una llamada de misión crítica PTT: establecimiento, mantenimiento e inclusión en una llamada existente. Su definición, así como los retardos que se deben cumplir y el porcentaje de llamadas que lo deben cumplir se encuentran indicados en 3GPP TS 22.179 [61]

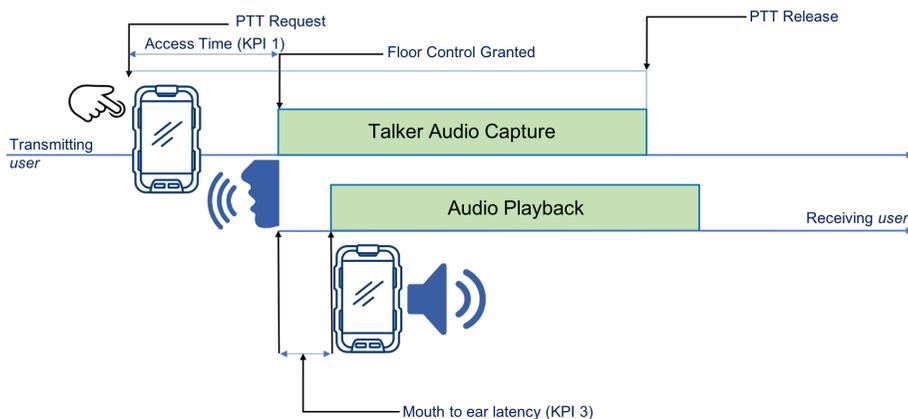


Figura 30: MCPTT Access Time and Mouth-to-Ear Latency (Based on [61])

Los indicadores de rendimiento definidos por el 3GPP [61] que se van a analizar son los siguientes:

- **KPI 1 - Tiempo de acceso.** Se define como el tiempo entre el momento en que un usuario de MCPTT solicita hablar (presionando el botón MCPTT en el Equipo de usuario de MCPTT (UE)) y el momento en que este usuario recibe la

autorización para hablar. Este tiempo no incluye las confirmaciones de los usuarios receptores o el tiempo para afiliarse al grupo.

- **KPI 2: Tiempo de acceso de extremo a extremo.** Se define como el tiempo entre el momento en que un usuario MCPTT solicita hablar y el momento en que este usuario recibe una señal para comenzar a hablar, incluido el establecimiento de la llamada MCPTT (si corresponde) y el reconocimiento del primer receptor/usuario antes de que se pueda transmitir la voz.
- **KPI 3: Mouth to Ear Latency.** Es el tiempo que transcurre desde que el emisor habla y la reproducción de la emisión en el altavoz del usuario receptor.

El 3GPP en TS 22.179 V14.3.0 (2016-12) [61] define la latencia máxima medida en milisegundos para cada uno de los indicadores de servicio descritos anteriormente y el porcentaje de llamadas que deben de cumplir estos tiempos máximos. En la tabla siguiente se muestran cada uno de estos valores para los 3 KPIs más relevantes:

Tabla 14: Threshold defined for MCPTT KPIs

MCPTT KPIs	Threshold	Likelihood	LTE Packet Delay Budget
MCPTT KPI 1 – Access Time	< 300 ms	95% of all MCPTT requests	< 60 ms
MCPTT KPI 2 – End-to-End Access Time	< 1000 ms	N/A	< 60 ms
MCPTT KPI 3 – Mouth-to-Ear Latency	< 300 ms	95% of all voice bursts	< 75 ms

El cumplimiento de estos requisitos depende de la arquitectura de la red, así como de la calidad de la implementación del servicio. Esta sección 4.2, se encuentra dentro de la acción **A-1** y junto al capítulo 1 y 2, identifica los requerimientos necesarios para desplegar redes de misión crítica de banda ancha. Esta acción tiene por objetivo **OT-1**.

El término portadora se refiere a un elemento de separación de tráfico que utiliza un tratamiento de diferenciación del tráfico en función de sus requisitos de QoS (capacidad, retraso, índice de pérdida de paquetes, tasa de error, etc.) entre el UE y el PGW. Una portadora radio se corresponde con un canal lógico que se establece entre UE y eNB. Hay dos tipos de portadoras: portadora predeterminada y portadora dedicada.

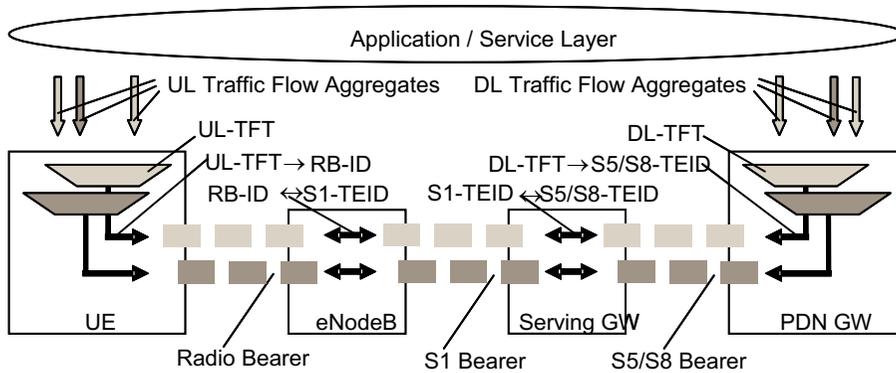


Figura 31: Dos Portadoras Unicast EPS

El servicio MCPTT necesita de unas garantías de funcionamiento. Por lo tanto, es muy importante que el operador de la red de acceso radio (RAN) pueda garantizar que a los servicios de MCPTT se le asigne una portadora con las características definidas en la siguiente tabla.

Tabla 15: Standard 3GPP LTE QoS Classes (reproduced from 3GPP TS23.203)

QCI	Resource type	Priority level	Packet delay budget	Packet error loss rate	Example Services
65	GBR	0,7	75 ms	$10^{-2}$	Mission critical user plane push to talk voice (e.g., MCPTT)
69	NON-GBR	0,5	60 ms	$10^{-6}$	Mission critical delay sensitive signaling (e.g., MC-PTT signaling)

El operador de la red móvil preconfigurará los valores de QCI más allá de estas 9 categorías.

Tabla 16: Mapeo de QCI a clases de QoS estándar. [62]

QCI	Resource type	Priority level	Packet delay budget	Packet error loss rate	Example Services
1	GBR	2	100 ms	$10^{-2}$	Conversational voice
2		4	150 ms	$10^{-3}$	Conversational video (live streaming)
3		3	50 ms	$10^{-3}$	Real time gaming
4		5	300 ms	$10^{-6}$	Non-conversational video (buffered streaming)
65		0,7	75 ms	$10^{-2}$	Mission critical user plane push to talk voice (e.g., MCPTT)
66		3	100 ms	$10^{-2}$	Non-mission critical user plane push to talk voice
5	Non-GBR	2	100 ms	$10^{-6}$	IMS signaling

6		6	300 ms	$10^{-6}$	Video (buffered streaming) TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p, file sharing, progressive video, etc.)
7		7	100 ms	$10^{-3}$	Voice Video (live streaming) Interactive gaming
8		8	300 ms	$10^{-6}$	Video (buffered streaming) TCP-based (e.g., www, e-mail, chat, ftp, p2p, file sharing, progressive video, etc.)
9		9			
69		0,5	60 ms	$10^{-6}$	Mission critical delay sensitive signaling (e.g. MC-PTT signaling)
70		5,5	200 ms	$10^{-6}$	Mission critical data (e.g., example services are the same as QCI 6/8/9)

El identificador de clase de QoS (QCI), es un número que se usa como un índice para cierto conjunto de parámetros que están relacionados con el control del tratamiento de paquetes de datos a nivel de portadora (por ejemplo, programación de pesos para el scheduling, control de admisión, gestión de tamaños de colas, configuración de protocolo de capa de enlace, etc.). El mapeo de los QCI a ciertos conjuntos de parámetros ha sido estandarizado por el 3GPP.

Garantizar un “Packet Delay Budget” para el servicio de MCS MCPTT depende del QoS de LTE y este a su vez depende directamente del concepto de portadora [63] [64].

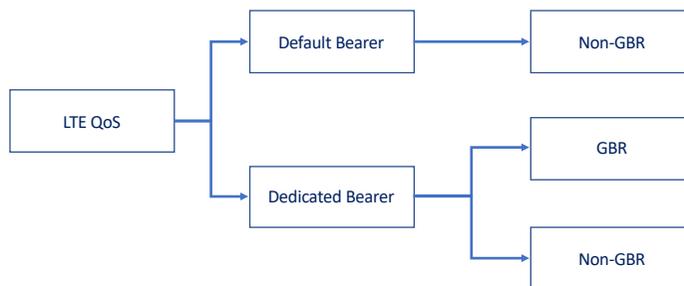


Figura 32: Portadoras EPS

Existen dos tipos de portadoras con diferentes características típicas:

#### Una portadora predeterminada

- No proporciona una tasa de bits garantizada (GBR).
- Se puede especificar valores QCI para Non-GBR entre 5 y 9.
- Se inicia y establece en el tiempo de configuración del UE para transportar todo el tráfico.

#### Una portadora dedicada

- Puede proporcionar ambos tipos de servicios portadores (GBR y no GBR) [64]
- Se crea cada vez que se establece un nuevo servicio

## 4.3 Cobertura y uso de recursos radio

### 4.3.1 Introducción

Tradicionalmente se ha considerado que los bajos requisitos de bitrate de las llamadas de voz (del orden de 10s de kbps) no supondrían un desafío para celdas LTE capaces de proporcionar valores de pico agregados de cientos e incluso miles de Mbps.

En este apartado, se va a llevar a cabo un análisis detallado de esa capacidad, desde la aproximación errónea anterior hasta una descripción de las limitaciones relacionadas con la señalización de trama, pasando por el impacto de la modulación utilizada por cada usuario en función de la calidad del canal que percibe.

El throughput de una celda LTE depende de los siguientes parámetros:

- **Ancho de Banda:** De acuerdo, con las especificaciones del 3GPP el ancho de banda de los canales LTE pueden ser 1.4, 3, 5, 10, 15, 20 Mhz. Cuanto mayor sea el ancho de banda, mayor el throughput. A continuación, se presenta una tabla que relaciona el ancho de banda con los Resource Blocks (RB) disponibles.

Tabla 17: Número RB disponibles por ancho de banda

Bandwidth (MHz)	1.4	3	5	10	15	20
Nº Resource Block	6	10	25	50	75	100

Para la realización de los cálculos se va a considerar un ancho de banda de 20 Mhz, por tanto, el número de RB disponibles será de 100.

- **Calidad del canal:** Las condiciones de radio afectan a las tasas de bits de los usuarios. Cuanto mejores son las condiciones de radio, mayor es el throughput disponible y viceversa. El eNB selecciona el MCS (Modulation and Coding Scheme) en función de las condiciones de radio actuales. Es el UE (User Equipment) el que mide la calidad del canal de radio y manda un CQI (Channel Quality Indicator) al eNB. Cuanto mayor sea el MCS (0-28) más bits se pueden transmitir por unidad de tiempo.

Tabla 18: Eficiencia Espectral (bps/Hz)

CQI index	modulation	code rate x 1024	efficiency
0	out of range		
1	QPSK	78	0,1523
2	QPSK	120	0,2344
3	QPSK	193	0,3770
4	QPSK	308	0,6016

5	QPSK	449	0,8770
6	QPSK	602	1,1758
7	16QAM	378	1,4766
8	16QAM	490	1,9141
9	16QAM	616	2,4063
10	64QAM	466	2,7305
11	64QAM	567	3,3223
12	64QAM	666	3,9023
13	64QAM	772	4,5234
14	64QAM	873	5,1152
15	64QAM	948	5,5547

- **Carga de la red:** Los recursos de radio disponibles se dividen entre los usuarios registrados. Por tanto, cuantos más usuarios estén registrados y reciban / transmitan datos, menos recursos estarán disponible para ser asignados a nuevos usuarios.

A continuación, se va a calcular el tamaño de un paquete MCPTT y, en función de los recursos de red disponible, analizar el número máximo de llamadas MCPTT por eNB en cada TTI. Tras explicar la composición de un paquete de datos MCPTT, se va a definir tres modos de calcular el número máximo de llamadas por unidad de tiempo en una celda y por cada MCS, del peor (MSC=0) al mejor (MSC=28). Posteriormente en la sección 5.4, se analizarán los resultados numéricos de cada uno de los métodos y se establecerán conclusiones en base a estos resultados. Los cálculos se van a realizar considerando una red LTE 20 Mhz con montaje de antenas SISO.

#### 4.3.2 Tamaño del paquete MCPTT

El códec de audio elegido por el 3GPP para MCPTT es **AMR-12.65** (Adaptive Multi Rate -Wide Band Codec) [3GPP TS 26.114 version 15.4.0 15.4.0 Release 15]. Este codificador genera 263 bits de voz codificada cada **20 ms**, aunque siempre se considera este dato redondeado. Por tanto, se considera su **RTP payload de 264 bits**.

A cada RTP payload se debe agregar cabeceras de protocolo:

- Cabecera RTP (generalmente 12 bytes).
- Cabecera UDP (8 bytes)
- Cabecera IP (20 bytes para IPv4).

En la tabla que se muestra a continuación, se detalla el contenido de una cabecera IP v4.

Tabla 19: Cabecera IPv4 (20 bytes)

IPv4	
Version	4 bits, IPv4 = 4
Header length	4 bits, 4 = 20 bytes
TOS (Type of Service)	8 bits, unused
Packet length	16 bits, (0-65535)
Identifier for fragment reassembly	16 bits
Flags (3 bits)	1 = more fragments follow, 0 = last/only fragment
Fragmentation offset	13 bits (0-8191)
TTL, Time to Live	8 bits (255-0), decrement each hop, discard if 0
Upper layer protocol	8 bits, 6 = TCP, 17 = UDP
Header checksum	16 bits
Source IP address	32 bits
Destination IP address	32 bits
Options (if any)	0-10 32-bit words
Data	0-65515 bytes

El tamaño del paquete MCPTT con todos los encabezados será: Bits de Códec + encabezado RTP + encabezado UDP + encabezado IP = 264 bits + 12 \* 8 (= 96 bits) + 8 \* 8 (= 64 bits) + 20 \* 8 (= 160 bits). Esto da como resultado la longitud total del paquete de 584 bits. Por tanto, **cada 20 ms un usuario de MCPTT enviará un paquete de datos (voz) con un tamaño de 584 bits.**

#### 4.3.3 Cálculo del número de llamadas MCPTT por MCS en transmisiones unicast

En los tres cálculos que se van a definir a continuación se empleará la tabla 7.1.7.1-1 definida en el 3GPP TS 36.213 versión 13.0.0 (ejemplo seleccionado de Release 13) que permitirá, a partir de un valor de MCS, obtener un índice  $I_{TBS}$  con el que acceder a la tabla 7.1.7.2.1.-1 incluida en la TS 36.213 versión 13.0.0 [Pág. 69 -70] y  $N_{PRB} = 100$  obtener el throughput por celda supuesta una ocupación completa.

Tabla 20: Muestra el mapeo entre el índice MCS (Esquema de modulación y codificación) Índice TBS (Tamaño del bloque de transporte) [41]

MCS Index	Modulation	TBS Index	MCS Index	Modulation	TBS Index
0	QPSK	0	17	64QAM	15
1		1	18		16
2		2	19		17
3		3	20		18
4		4	21		19
5		5	22		20
6		6	23		21
7		7	24		22
8		8	25		23
9		9	26		24
10	16QAM	9	27	25	
11		10	28	26	
12		11	29	QPSK	Reserved
13		12	30	16QAM	
14		13	31	64QAM	
15		14			
16		15			

En el **primer cálculo simplificado** se obtiene el número de llamadas por la división de la tasa de bits por celda y la tasa de bits por llamada MCPTT. Básicamente se divide el throughput disponible en la celda en cada MCS entre el consumo en bits de cada llamada MCPTT. Este cálculo se corresponde con la estimación intuitiva (pero como se verá incorrecta) de que los flujos MCPTT de unos pocos kbps son fácilmente gestionables en una red LTE (del orden de 100s de Mbps), de ahí que reciba el apelativo “tradicional”.

Por tanto, si de la Tabla 21, se extrae la columna  $N_{PRB} = 100$  y se multiplica cada valor por 1.000 se obtendrá en Mbps el **throughput máximo de la celda** supuesta una ocupación completa para cada MCS. Para completar el cálculo del número de llamadas solo queda dividir el throughput obtenido entre el bitrate por llamada. En sección anterior ya se ha calculado el tamaño de paquete MCPTT en bits.

#### Cálculo tradicional

Bitrate pico por celda (supuesta ocupación entera) / Bitrate por llamada MCPTT

Tabla 21: N° bits / N° PRB en función del I<sub>TBS</sub> [46]

I <sub>TBS</sub>	N <sub>PRB</sub>									
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
0	2536	2536	2600	2600	2664	2664	2728	2728	2728	2792
1	3368	3368	3368	3496	3496	3496	3496	3624	3624	3624
2	4136	4136	4136	4264	4264	4264	4392	4392	4392	4584
3	5352	5352	5352	5544	5544	5544	5736	5736	5736	5736
4	6456	6456	6712	6712	6712	6968	6968	6968	6968	7224
5	7992	7992	8248	8248	8248	8504	8504	8760	8760	8760
6	9528	9528	9528	9912	9912	9912	10296	10296	10296	10296
7	11064	11448	11448	11448	11448	11832	11832	11832	12216	12216
8	12576	12960	12960	12960	13536	13536	13536	13536	14112	14112
9	14112	14688	14688	14688	15264	15264	15264	15264	15840	15840
10	15840	16416	16416	16416	16992	16992	16992	16992	17568	17568
11	18336	18336	19080	19080	19080	19080	19848	19848	19848	19848
12	20616	21384	21384	21384	21384	22152	22152	22152	22920	22920
13	23688	23688	23688	24496	24496	24496	25456	25456	25456	25456
14	26416	26416	26416	27376	27376	27376	28336	28336	28336	28336
15	28336	28336	28336	29296	29296	29296	29296	30576	30576	30576
16	29296	30576	30576	30576	30576	31704	31704	31704	31704	32856
17	32856	32856	34008	34008	34008	35160	35160	35160	35160	36696
18	36696	36696	36696	37888	37888	37888	37888	39232	39232	39232
19	39232	39232	40576	40576	40576	40576	42368	42368	42368	43816
20	42368	42368	43816	43816	43816	45352	45352	45352	46888	46888
21	45352	46888	46888	46888	46888	48936	48936	48936	48936	51024
22	48936	48936	51024	51024	51024	51024	52752	52752	52752	55056
23	52752	52752	52752	55056	55056	55056	55056	57336	57336	57336
24	55056	57336	57336	57336	57336	59256	59256	59256	61664	61664
25	57336	59256	59256	59256	61664	61664	61664	61664	63776	63776
26	66592	68808	68808	68808	71112	71112	71112	73712	73712	75376

En el **segundo cálculo** se accede a la Tabla 7.1.7.2.1.-1 a partir del tamaño de un paquete MCPTT expresado en bits. El procedimiento inicial, consiste en localizar qué celdas contienen un número de bits por TBS mayor que el tamaño del paquete MCPTT. De todas las celdas seleccionadas por MCS se considera el primer número de PRBs que puede contener el paquete MCPTT. Interesa el mínimo, ya que a partir de éste encaja en todos los posteriores.

Tabla 22: Extracto de tabla generada para el cálculo

I <sub>TBS</sub>	N <sub>PRB</sub>	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	22	16	32	56	88	120	152	176	208	224	256
1	17	24	56	88	144	176	208	224	256	328	344
2	14	32	72	144	176	208	256	296	328	376	424
3	11	40	104	176	208	256	328	392	440	504	568
4	9	56	120	208	256	328	408	488	552	632	696
5	7	72	144	224	328	424	504	600	680	776	872
6	6	328	176	256	392	504	600	712	808	936	1032
7	5	104	224	328	472	584	712	840	968	1096	1224
8	5	120	256	392	536	680	808	968	1096	1256	1384
9	4	136	296	456	616	776	936	1096	1256	1416	1544
10	4	144	328	504	680	872	1032	1224	1384	1544	1736
11	3	176	376	584	776	1000	1192	1384	1608	1800	2024
12	3	208	440	680	904	1128	1352	1608	1800	2024	2280
13	3	224	488	744	1000	1256	1544	1800	2024	2280	2536
14	3	256	552	840	1128	1416	1736	1992	2280	2600	2856
15	2	280	600	904	1224	1544	1800	2152	2472	2728	3112
16	2	328	632	968	1288	1608	1928	2280	2600	2984	3240
17	2	336	696	1064	1416	1800	2152	2536	2856	3240	3624
18	2	376	776	1160	1544	1992	2344	2792	3112	3624	4008
19	2	408	840	1288	1736	2152	2600	2984	3496	3880	4264
20	2	440	904	1384	1864	2344	2792	3240	3752	4136	4584
21	2	488	1000	1480	1992	2472	2984	3496	4008	4584	4968
22	2	520	1064	1608	2152	2664	3240	3752	4264	4776	5352
23	2	552	1128	1736	2280	2856	3496	4008	4584	5160	5736
24	1	584	1192	1800	2408	2984	3624	4264	4968	5544	5992

Para realizar este cálculo, se ha generado la tabla anterior a partir de la Tabla 7.1.7.2.1.-1 (version 13.0.0 Release 13) Pág. [65 -70]. Ésta representa el **número de PRB necesarios para contener un paquete MCPTT por cada MCS**. La tabla representada anteriormente es un extracto representativo de la que se ha generado para el cálculo. Por ejemplo, se puede observar como para I<sub>TBS</sub> = 24 para N<sub>PRB</sub>=1 el TBS ya contiene los 584 bits necesarios para poder transportar el paquete

MCPTT. Sin embargo, ya para  $I_{TBS} = 23$  son necesarios 2 PRBs. Empleando la tabla 7.1.7.1-1 definida en el 3GPP TS 36.213 y presentada en páginas anteriores se obtendrá su equivalente MCS, de esta manera,  $I_{TBS} = 24 \rightarrow I_{MCS} = 26$  y  $I_{TBS} = 23 \rightarrow I_{MCS} = 25$ . Si se continúa con esta metodología de búsqueda y identificación, se generará una nueva tabla que contendrá una columna con todos los  $I_{MCS}$  y otra denominada "Nº PRB necesarios para cada MCS". Así, por ejemplo, para el peor  $I_{MCS} = 0$  serán necesarios  $N_{PRB} = 22$ . En la sección 5.4, se presentarán las tablas completas y será el momento de realizar consideraciones con los valores obtenidos.

De momento, en este segundo método de cálculo se ha obtenido el número de PRB necesarios por MCS, pero el objetivo en este cálculo es obtener el número máximo de llamadas MCPTT por MCS. El ancho de banda de los canales LTE de nuestro eNB 20 Mhz, lo que implica que se dispone de 100 PRB.

#### Cálculo número de llamadas por MCS

(Número total de PRB disponibles / PRB necesarios dependiendo del MCS) \*  
frecuencia de envío de cada trama MCPTT (20 segundos).  
Nota: Se considera todos los usuarios en un mismo MCS

Así, por ejemplo, para MCS = 26  $\rightarrow$  Nº Llamadas MCPTT = 2.000 mientras que para MCS = 25  $\rightarrow$  Nº Llamadas MCPTT = 1.000 y para MCS = 0  $\rightarrow$  Nº Llamadas MCPTT = 80. **Estos resultados son teóricos ya que todos los usuarios registrados en un eNB es muy difícil que se encuentren en el mismo MCS.** Si se retoma los datos indicados anteriormente se observa como basta que 2 usuarios registrados tengan un MCS = 0 para que consuman el 44% del ancho de banda disponible quedando disponibles 56 PRB, si se considera que el resto de los usuarios están con una cobertura perfecta MCS=28, el número máximo de llamadas MCPTT que se podrían establecer simultáneamente serían  $(66 / 1) * 20 = 1320$  llamadas MCPTT. Para este cálculo se consideran todos los usuarios en el mismo MCS.

El impacto de los 2 usuarios en mala cobertura es muy grande, es necesario emplear demasiados PRB para atender a estos usuarios

**En la sección 5.4, se analizará en detalle cómo afecta la distribución de los usuarios dentro de la celda al número de llamadas MCPTT simultáneas dentro de la celda.**

El último cálculo que se presenta es el más realista de los tres. En LTE, el canal de control PDCCH (Physical Downlink Control Channel) informa al UE sobre la ubicación de la información de los datos en el canal PDSCH (Physical Downlink Control Channel) de modo que, si no existe una entrada en el PDCCH, el usuario no podrá localizar sus datos. El número de llamadas MCPTT simultáneas en una celda dependerá por tanto del número de usuarios que es capaz de direccionar el PDCCH en cada TTI.

Una subtrama LTE está compuesta por información de control (PDCCH) y información de datos (PDSCH). Esto implica lo siguiente

- Todo el tamaño de una subtrama no está dedicada a los datos.
- Si se disminuyen los recursos PDCCH se aumentan los recursos disponibles PDSCH en una subtrama LTE y por lo tanto habrá disponibles más bits / ms

**Cálculo considerando las limitaciones PDCCH**  
 Número de usuarios totales gestionados en cada TTI \* Número de TTI

Un PRB en el dominio del tiempo tiene una duración de 1 slot o 7 símbolos FDD y una subtrama son 2 slots => cada subtrama tiene 14 símbolos.

Un PDCCH está compuesto de CCE (elementos de control de canal). Cada CCE se compone de 36 RE (Resource Element). PDCCH utiliza el concepto de capas de agregación para denominar a esta agrupación de CCE. Pudiendo ser:

- 1 CCE: Muy buenas condiciones de radio.
- 2 CCE: Condiciones normales de radio.
- 4 CCE: Utilizado para asignar información de señalización y control.
- 8 CCE: Condiciones muy malas de radio.

A continuación, se procede a detallar cómo calcular el número de usuarios que puede programar el PDCCH en una trama LTE, considerando como ejemplo un eNB de 20 MHz SISO (Single Input Single Output) que emplea 1 puerto CRS (Cell Specific Reference Signal). [65]

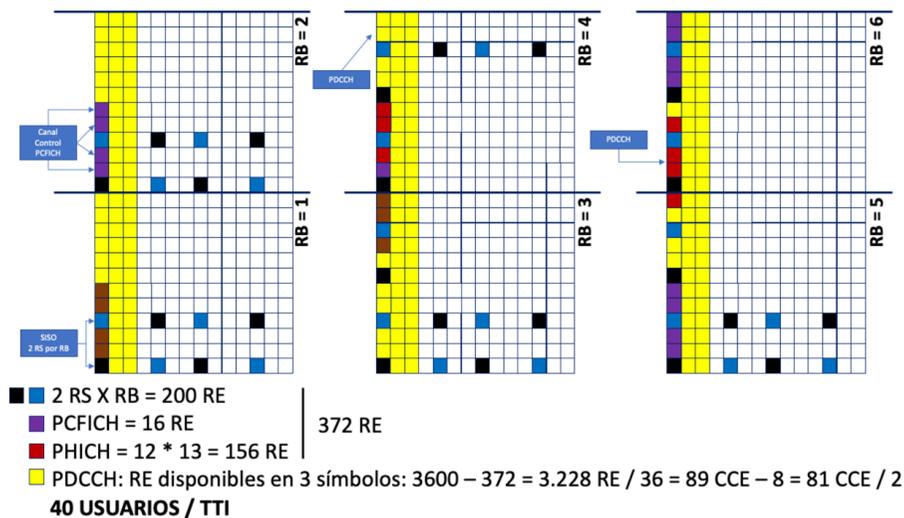


Figura 33: Cálculo PDCCH – LTE 20 MHz - SISO

Un PDCCH puede abarcar máximo 3 símbolos y mínimo un símbolo. En un canal de 20 MHz el número de RB = 100 y por tanto el número máximo de RE por símbolo es de 1200 RE. En el primer símbolo se dispone de 1 RS X RB para cada puerto de antena => 2 RB y dado que se tiene 100 RB => el recuento total de RS será de 200 RE.

Además, se tiene:

- Un canal de control PCFICH que abarca 4 REG = 16 REs
- Los grupos PHICH ocupa 3 REG = 12 REs
- Si el parámetro NG = 1 => 13 grupos PHICH en 20 MHz
- La sobrecarga será de PHICH = 12 \* 13 = 156

Tabla 23: Número grupos PHICH por canal y parámetro NG

N_RB \ Ng	1/6	1/2	1	2
6 (1.4 MHz)	1	1	1	2
15 (3 MHz)	1	1	2	4
25 (5 MHz)	1	2	4	7
50 (10 MHz)	2	4	7	13
75 (15 MHz)	2	5	10	19
100 (20 MHz)	3	7	13	25

Resumiendo:

- Número de RE en un símbolo es 1200 REs
- Sobrecarga en el símbolo 1 = 200 RE (RS) + 16 RE (PCFICH) + 156 RE (PHICH) = 372 REs
- Sobrecarga en el símbolo 2 = 0 REs
- Sobrecarga en el símbolo 3 = 0 REs
- Número total de REs por PDCCH (3 símbolos) = 3600 – 372 = 3228 REs
- Número total de CCEs disponibles para PDCCH = 3228 RE / 36 = 89 CCEs

Si todos los usuarios están en buenas condiciones de radio puede haber 89 usuarios programados en 1 TTI (1 ms) con 3 símbolos PDCCH [66].

La primera conclusión que se obtiene llegados a este punto, es que, de los 100 usuarios teóricamente disponibles por cada TTI, tal y como se ha calculado antes, realmente solo serán gestionables 89 en cada milisegundo.

Sin embargo, **esto no es del todo cierto debido a que las condiciones de radio de los usuarios generalmente se distribuyen** y hay asignaciones comunes como los comandos TPC (control de potencia de transmisión) que generalmente se encuentran en una capa de agregación más grande ya que lleva asignaciones para múltiples usuarios. Entonces, si hay un comando TPC que requiere 8 CCE, quedan alrededor de 81 CCE. Estos CCE se dividirán entre asignaciones de datos de enlace

descendente y enlace ascendente. Por lo general, los datos de enlace descendente son más, por lo que la mayoría de las asignaciones se toman por enlace descendente. Los usuarios están en buenas condiciones y requieren 2 CCE cada uno, entonces puede haber 38 usuarios en cada TTI ( $81 * 2 = 40$  CCE) con 3 símbolos PDCCH.

Esto quiere decir que, en cada TTI, si todos los usuarios están en buenas condiciones de radio, el número máximo de usuarios que pueden ser gestionados por el eNB al que están conectados es de 40.

#### 4.3.4 Consideraciones en transmisiones multicast

Los cálculos teóricos para determinar el número de llamadas MCPTT por MCS que se han presentado en la sección anterior, se han realizado considerando portadoras unicast. Las llamadas a grupo MCPTT suponen un gran esfuerzo a nivel de recursos radio. En una llamada MCPTT a grupo, el audio del UE que esta hablando tiene que llegar a todos los UEs que forman parte de ese grupo con independencia de que se encuentren escuchando o no. Simplemente por el echo de pertenecer al grupo y estar registrados en la red, recibirán el tráfico de datos. Esto supone que el dispatcher del eNB tiene que asignar recursos de red a cada uno de esos UE. Destinando recursos de red a usuarios a usuarios que quizás nunca hablen y que quizás nunca escuchen. Toda esta asignación de recursos permanece hasta la finalización de la llamada.

Como se ha detallado en la sección 3.5.4, una llamada a grupo se puede establecer empleando una portadora unicast, y el cliente MCPTT puede notificar al servidor que se encuentra en zona de cobertura multicast. Una llamada a grupo siempre se establece en unicast, una vez establecida, los receptores pueden decidir si se unen o no a una portadora multicast, liberando portadoras unicast del eNB.

Nuevamente la localización de los UE en la celda va a ser determinante a la hora de determinar si es mejor emplear portadoras unicast o multicast. Una llamada a grupo se inicia en unicast, pero a priori, es más óptimo que los receptores, se unan en multicast. El problema puede venir si tenemos muchos usuarios de ese grupo en los extremos de la celda.

Cuando empleamos portadoras unicast, el eNB le asigna a cada uno de los UE un MCS y en función de éste adapta su modulación, su bitrate y su potencia. Se ajustan los recursos de la red en función de la cobertura de los UE.

Ahora en multicast, el problema que se encuentra el eNB es cómo determinar el MCS que tiene que asignar a la portadora multicast, para que todos los participantes del grupo puedan recibir su tráfico de voz.

Tal y como se indica en [67], se pueden definir tres enfoques para la selección del MCS durante las transmisiones multicast en función de un objetivo de eficiencia espectral concreto:

- 1) **Prestación de servicios garantizada:** Asegura que todos los usuarios, incluso aquellos con el Signal to Interference plus Noise Ratio (SINR) más bajo, recibirán el servicio multicast. Para lograr este objetivo, el algoritmo ubica al usuario con el SINR mínimo y el MCS que corresponde al SINR mínimo se obtiene del paso de Selección del MCS.

Calculamos primero la calidad de las conexiones inalámbricas en una red LTE (SINR)

$$SINR(m) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{w(\tau_i(m) + \delta_j) P_j}{q_i(m)}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(1 - w(\tau_i(m) + \delta_j)) P_j}{q_i(m)} + N_0}$$

con:

$$w(\tau) = \begin{cases} 1 & 0 \leq \tau < T_{CP} \\ 1 - \frac{\tau - T_{CP}}{T_u} & T_{CP} \leq \tau < T_{CP} + T_u \\ 0 & otherwise \end{cases}$$

donde  $P_j$  es la potencia media asociada a la trayectoria  $j$ ,  $\tau_i(m)$  es el retardo de la propagación de la estación  $i$ ,  $\delta_j$  el retardo adicional generado por la trayectoria  $j$ ,  $q_i(m)$  es la pérdida de la trayectoria desde la estación base  $j$ ,  $T_{CP}$  es la longitud del prefijo cíclico (CP),  $T_u$  es la longitud del ancho de señal útil y  $N_0$ , es la potencia de la señal ruido.

$$Throughput = BW \cdot e(SINR) \cdot (1 - BLER(SINR))$$

siendo **BLER** la relación entre el número de bloques erróneos y el número total de bloques transmitidos, **SE** la eficiencia espectral, **BW** el ancho de banda de transmisión y el **Throughput** la tasa de transferencia efectiva.

$$SE = \frac{Throughput}{BW}$$

De la ecuación previa, se obtienen el throughput medio correspondiente y la Spectral Efficiency (SE). Este enfoque asegura que todos los usuarios en el área eMBMS recibirán ininterrumpidamente el servicio MBMS, independientemente de las condiciones que experimenten en términos de SINR.

---

**Algoritmo: 1<sup>er</sup> Enfoque**

---

```
for i = 1: total_usuarios
    % Calculo del SINR de todos lo usuarios
    Calcular SINR (i)
end
% Localizar el menor SINR de todos los usuarios
min (SINR) = min (SINR)
% Selección del MCS que corresponde a ese SINR mínimo
select_MCS = fMCS(min_SINR)
% Cálculo del throughput para el MCS seleccionado
throughput = fthroughput(selected_MCS, min_SINR)
% Cálculo de la eficiencia espectral
Calculo SE
```

---

Sin embargo, el hecho de que el usuario con el SINR mínimo determine el MCS utilizado para todo el grupo supone un desperdicio de recursos radio que puede tener un impacto significativo en la que mejora que supone el uso de multicast frente a múltiples flujos unicast idénticos en una llamada de grupo.

- 2) **Máxima eficiencia espectral:** Selecciona el MCS que garantiza el rendimiento medio máximo y el SE sobre todos los usuarios en el área MBSFN.

$$SINR(m) = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{w(\tau_i(m) + \delta_j) P_j}{q_i(m)}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \frac{(1 - w(\tau_i(m) + \delta_j)) P_j}{q_i(m)} + N_0}$$

---

**Algoritmo 2<sup>o</sup> Enfoque**

---

```
for i = 1: total_users
    % Cálculo del SINR para todos los usuarios
    Calculate SINR(i)
end
for MCS = 1:15 % Calculo del throughput y SE para cada MCS
    for j = 1: total_users
        throughput (MCS, j) = fthroughput (MCS, SINR(j))
    end
    avg_throughput (MCS) = average (throughput (MCS, :))
    % Cálculo de la eficiencia espectral por cada MCS
    Calculate SE(MCS)
end
% Encontrar máxima eficiencia espectral y seleccionar el
correspondiente MCS
SE = max (SE (:))
```

---

Al principio, el algoritmo calcula el valor SINR para cada usuario usando la ecuación previa. Luego, el algoritmo escanea todos los MCS. Para cada MCS, el algoritmo calcula el rendimiento por usuario dependiendo de los SINR calculados y obtiene el rendimiento promedio y el SE total. Se selecciona el MCS que garantiza el rendimiento medio máximo y, por lo tanto, el SE total máximo. Esto puede suponer que no todos los usuarios inicialmente considerados sean capaces de mantener la cobertura multicast, debiéndose mantener éstos en unicast.

- 3) **Eficiencia espectral objetivo:** El objetivo es encontrar el MCS más bajo que logre un SE objetivo (generalmente igual a  $1 \text{ (bit / s) / Hz}$ ) para la celda [68]. Inicialmente, el algoritmo calcula el valor SINR para cada usuario. Luego procede con el escaneo de los MCS para calcular el rendimiento por usuario. A partir del MCS más bajo, el algoritmo calcula el rendimiento por usuario y obtiene el rendimiento promedio y el SE total para cada MCS. Si durante el procedimiento de escaneo un MCS asegura que el SE total es igual o mayor que el SE objetivo, la operación se detiene sin escanear los MCS restantes y el algoritmo selecciona este MCS para la entrega de los datos del MBMS. En otras palabras, el objetivo de este enfoque es encontrar el MCS más bajo que permita alcanzar una SE objetivo. El procedimiento de escaneo comienza desde el MCS más bajo para atender a tantos usuarios como sea posible. Si el procedimiento de escaneo comienza desde el MCS más alto, entonces el objetivo de SE, se logra muy rápidamente utilizando un MCS alto y, por lo tanto, solo los usuarios que experimentan SINR altos reciben el servicio multicast. En el caso del SE de destino no pueda lograrse, este enfoque tiene un tendrá funcionamiento idéntico al segundo enfoque (es decir, selecciona el MCS que asegura el máximo SE total).

---

### Algoritmo 3<sup>er</sup> Enfoque

---

```

for i = 1: total_users % SINR calculation for all users
    % Cálculo de SINR para todos los usuarios
    Calculate SINR(i)
end
% Recorrer los MCS y calcular la eficiencia espectral (SE)
for MCS = 1:15
    for j = 1: total_users
        throughput (MCS, j) = fthroughput (MCS, SINR(j))
    end
    avg_throughput (MCS) = average (throughput (MCS, :))
    Calculate SE(MCS)
    % Consultar si el SE objetivo está alcanzado
    if SE(MCS) >= target_SE then % target is achieved
        % Si el objetivo ha sido alcanzado para de buscar
        break;
    else
        % Si el objetivo no se ha alcanzado
        SE = max (SE (:))
    end
end
end
% Seleccionar el MCS que haya logrado el objetivo

```

---

---

% o el que haya obtenido la máxima eficiencia espectral  
% si no se ha alcanzado el objetivo de eficiencia espectral marcado.  
SE = SE(MCS)

---

El objetivo que se persigue es conseguir el mayor número de UE en llamada MCPTT por cada eNB y parece evidente que en una situación de emergencia, los UE van a estar muy concentrados en la celda o celdas donde se localice ésta. Como se ha comentado en los diferentes tipos de algoritmo a elegir, no resulta a priori sencillo de determinar que el empleo de portadoras multicast sea siempre lo más eficiente desde el punto de vista del servicio MCPTT (al depender de múltiples factores como el tamaño de los grupos, la posición de los usuarios, los objetivos planteados al definir el MCS de la portadora multicast). Puesto que cada emergencia es un escenario totalmente aleatorio y muchas veces dinámico, parece que la mejor solución debe de venir de una coordinación a nivel de orquestación del operador de red y del servicio MCPTT con objeto de configurar en cada momento el escenario que posibilite maximizar los recursos radio y el número de usuarios en llamadas MCPTT.

Deberá ser objeto de futuras investigaciones la simulación de escenarios de emergencia donde se calcule el número máximo de usuarios en llamada MCPTT considerando la utilización de portadoras multicast y unicast. En esta tesis, se ha abierto el camino a ese estudio, calculando ese número de llamadas MCPTT empleando portadoras unicast, queda completarlo con el estudio empleando portadoras multicast.

#### 4.3.5 Conclusiones

Durante esta sección 4.3 se ha planteado la base teórica para el los requerimientos de recursos radio de MCPTT a través del cálculo del número de usuarios máximos MCPTT para un eNB 20 Mhz SISO en transmisiones unicast Para explicar cada uno de los métodos se han obtenido unos primeros valores que hacen intuir que la distribución de los usuarios en el eNB, es decir, la cobertura de cada uno de los usuarios que se encuentran en el área de influencia del eNB afecta respecto al número máximo de llamadas MCPTT simultáneas que se puedan cursar en ese eNB.

En las transmisiones multicast, la localización de los clientes todavía es más determinante ya que en función de estas se debe elegir entre garantizar la prestación de los servicios a todos los clientes (penalizando la eficiencia espectral de alguno de ellos), seleccionar sola aquellos clientes cuyo MCS pueda garantizar la máxima eficiencia espectral o seleccionar los usuarios en función de una eficiencia espectral objetivo.

Será objeto de futuras investigaciones, el definir un algoritmo de selección cuyo objetivo sea conseguir el número máximo de llamadas MCPTT en una transmisión multicast para posteriormente cuantificarlo, igual que se ha realizado en la presente tesis doctoral para los cálculos del número de llamadas MCPTT para cada uno de los MCS, en transmisiones unicast.

## 4.4 Resiliencia

### 4.4.1 Introducción

La resiliencia se define como la capacidad que tiene un sistema de recuperarse rápidamente de las dificultades.

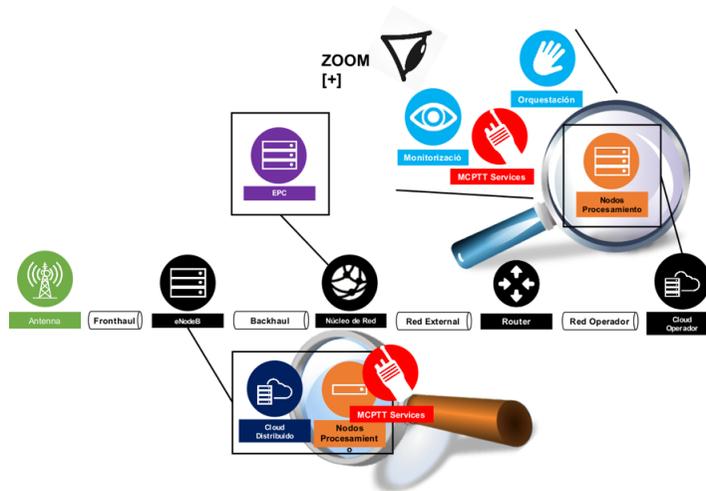


Figura 34: Arquitectura red LTE – Despliegue de servicios MCPTT

Las redes de comunicación crítica de banda ancha deben garantizar la continuidad de las comunicaciones. La disponibilidad de los servicios de misión crítica MCPTT dependen:

- 1) **Infraestructura RAN:** El operador de la red debe garantizar el correcto funcionamiento de la red, tanto en la parte del fronthaul y el backhaul:



#### eNB:

- Fuente de alimentación ininterrumpida.
- Refuerzo equipos de refrigeración.
- Seguridad perimetral.



#### Backhaul:

Redundando los enlaces de cada eNB con el EPC del operador.



#### Núcleo de red:

Redundando los EPC del operador en los extremos de red (IOPS) o en diferentes Data Centers distribuidos que disponga el operador a lo largo de la infraestructura de red.

- 2) **Nodos de procesamiento:** se redundan en los centros de cálculo del operador y en los extremos de la red.



Se distribuyen a lo largo de la red del operador, permitiendo ejecutar servicios como MCPTT muy cerca del usuario y por tanto disminuyendo los retardos, algo fundamental en las comunicaciones de misión crítica. Se convierten en Data Centers distribuidos redundantes que son gestionados desde el Data Centers principal del operador

- 3) **Redundancia de los Servicios:** Se debe poder redundar el servicio de misión crítica MCPTT para garantizar que siempre esté disponible.



La existencia de los nodos de procesamiento en los extremos de la red habilita el despliegue de los servicios de misión crítica MCPTT. Además de la disminución de los retardos, aseguran de la continuidad de los servicios ante fallos en la red cableada del operador.

- 4) **Monitorización:** Los nodos de procesamiento y los servicios que se ejecutan sobre ellos requieren de una gestión por un supervisor de alto nivel que conozca en todo momento el estado de la infraestructura y de los servicios que sobre ellas están operando.



La infraestructura de red, los nodos de procesamiento y el servicio MCPTT proporcionan métricas de operación que son recolectadas por un mecanismo de **monitorización** que en función de unas reglas definidas previamente puede notificar (incluso de forma predictiva) a una entidad superior, la posibilidad de una discontinuidad del servicio debido a problema de infraestructura.

- 5) **Orquestador:** Esta entidad superior es el **orquestador** que obtiene información en tiempo real del estado de todo el sistema.



De la misma manera, el servicio MCPTT publica sus métricas de estado.

El mecanismo de monitorización es el encargado de generar la alerta de disponibilidad al orquestador para que este actúe y resuelva el incidente. Es el único que tiene la capacidad de actuar sobre la infraestructura de red y los nodos de cómputo.

- 6) **Un mecanismo que detecte un posible problema de disponibilidad y actúe en consecuencia.** Esta responsabilidad se cede al orquestador que se encargará de monitorizar todos los componentes: RAN, núcleos de cómputo, servicio MCPTT.

La disponibilidad de los servicios tiene una dependencia con la **infraestructura de red y los nodos de procesamiento**. La infraestructura tiene que garantizar la continuidad de la conectividad entre los recursos desplegados en campo y los servicios de misión crítica ofrecidos por la red de comunicaciones. Por otra parte,

los servicios necesitan de recursos de cómputo para poder ejecutarse y por tanto es necesario asegurar que en todo momento se puede asegurar la capacidad de cómputo que requiere los servicios MCPTT con independencia del aumento de capacidad que soporta la red de comunicaciones.

Pero esto no es suficiente para garantizar la disponibilidad. Debe ser el propio servicio MCPTT el que garantice su propia disponibilidad y cómo hacerlo no es una tarea fácil de abordar. A continuación, se enumeran los principales problemas de disponibilidad que puede sufrir los servicios:

- **Funcional:** Los servicios MCPTT son desarrollos software. A nivel funcional, deben de cumplir con todos los estándares definidos por el 3GPP y son sometidos a unos protocolos de prueba muy estrictos tanto a nivel funcional, como de carga. Además, para garantizar la interoperabilidad del estándar son sometidos a jornadas de prueba por parte de terceras empresas desarrolladoras de clientes consumidores de los servicios ofrecidos por los servidores. A pesar de todas estas pruebas, puede producirse un error de programación que detenga el servicio. El servicio debe estar preparado para detectarlo y automáticamente levantarse y, a partir de información de contexto, restaurar las comunicaciones a la situación previa a la caída.
- **Operacional:** Son problemas que pueden surgir durante la operativa normal del sistema. En previsión de estos fallos, los servicios almacenan información de contexto. Con esta información, posteriormente a la caída podrán analizar el escenario exacto en el que ocurrió el problema que provocó la parada del servicio. Este tipo de problemas pueden darse en la fase de despliegue y puesta en marcha de los servicios de misión crítica. Durante este periodo la red de comunicaciones está funcionando en pruebas y lo que se pretende es ajustar el sistema para que ofrezca el mayor rendimiento. El posterior análisis del contexto en el que se ha producido la discontinuidad nos permite ajustar los servicios y los recursos asignados.
- **Capacidad:** Un aumento de capacidad no prevista provocada por una situación excepcional puede desencadenar retardos debidos a la incapacidad de poder procesar la información que está llegando a los servidores. Para poder responder a este incremento con la suficiente anticipación es necesario un proceso de monitorización que detecte el problema, un subsistema de alertas / alarmas que lo notifique y un supervisor que actúe sobre la infraestructura de red, los nodos de procesamiento y los servicios MCPTT para adecuarlos a las nuevas necesidades que requiere el nuevo escenario.

#### 4.4.2 Infraestructura RAN

La red inalámbrica del operador es la puerta de acceso de los recursos desplegados en campo a los servicios MCPTT. En la sección 4.3 se ha abordado la "Cobertura" como ejemplo de disponibilidad, sin ella los usuarios no pueden acceder a los servicios, ni establecer comunicaciones de misión crítica. Este apartado se centra en la continuidad de la infraestructura de red que es la responsable de proveer de la cobertura. El operador no sólo debe garantizar la cobertura a todos los recursos desplegados, sino que además debe hacerlo de una forma continuada en el

tiempo. Lo que se necesita es que cada uno de los usuarios que se encuentren en la cobertura de la celda disponga del throughput necesario para que se cumplan los KPIs requeridos por el 3GPP. Los servidores MCPTT deben publicar las métricas de servicio, de igual forma la infraestructura de red pública sus métricas de operación. Debe existir en el operador de la infraestructura RAN un mecanismo de monitorización que detecte en tiempo real si alguno de los recursos desplegados que están en llamada MCPTT está notificando KPIs más altos que los intervalos marcados por el 3GPP. De esta manera, si es un problema de ancho de banda, será capaz de aumentar los recursos de esa celda donde los usuarios conectados están reportando latencias altas, pudiendo dar lugar a la caída de las llamadas y por tanto discontinuidad del servicio. En el módulo de monitorización es donde se definen las alertas de operación de los servicios. Estas son notificadas al **coordinador de la infraestructura de red del operador** y él es el encargado de actuar sobre el RAN Controller consiguiendo mantener las llamadas MCPTT operativas con el QoS garantizado.

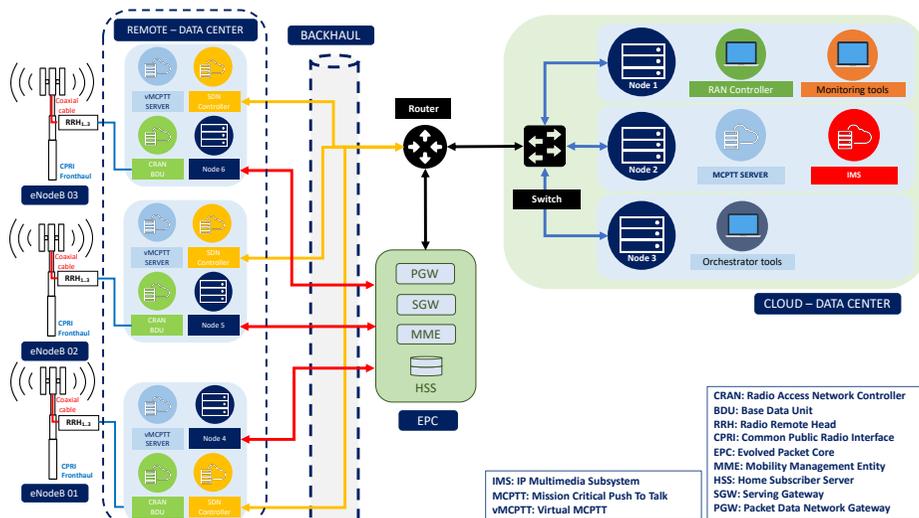


Figura 35: Propuesta de arquitectura – RAN Controller

#### 4.4.3 Nodos de procesamiento

Tradicionalmente los nodos de procesamiento estaban centralizados en el centro de proceso de datos central del operador. Gracias a tecnologías como la Virtualización de Funciones de Red (NFV) y a Redes definidas por Software (SDN) es posible la redundancia de los nodos de cálculo y computo en los extremos de la red. En base a estas nuevas tecnologías los operadores de la infraestructura pueden extender su Data Center a los extremos de la red. Por tanto, dentro de una arquitectura de proveedor actual los nodos de procesamiento pueden estar desplegados de cuatro formas diferentes:

- 1) **Nodos de procesamiento centralizado:** Toda la potencia de computo, se encuentra centralizada en el Data Center del operador. Estos nodos de

procesamiento suelen tener una gran capacidad de procesamiento y cálculo. Debido fundamentalmente a la disponibilidad de grandes recursos: disco, memoria y procesadores. Estos nodos de procesamiento requieren de una temperatura de trabajo y un consumo eléctrico que es difícil de garantizar en otros puntos de la arquitectura del proveedor. De ahí que en los extremos de la red los nodos de procesamiento sean más compactos

- 2) **Nodos Distribuidos:** Se mantienen los nodos de procesamiento en el Data Center del operador y además el operador dispone de nodos de procesamiento en los extremos de la red. Algunos servicios de cliente final se ejecutan en el Data Center y otros se ejecutan en los extremos de la red.
- 3) **Nodos redundantes:** Se diferencian de los distribuidos en que en el Data Center y en los extremos de la red se ejecutan los mismos servicios, pero los usuarios solo tienen acceso a los servicios del Data Center, solo en casos excepcionales, los servicios de los nodos de procesamiento de los extremos son accesibles.
- 4) **Nodos mixtos:** Son una mezcla de todos los anteriores. Los nodos de procesamiento siempre están operativos tanto en el Cloud, como. en los extremos, pero los servicios serán desplegados en función de las demandas de servicio por parte de los usuarios. Un orquestador general tiene que ser el que, en función del volumen de usuarios conectados a la infraestructura, garantice que los usuarios puedan acceder a los servicios con los niveles de calidad contratada.

#### 4.4.4 Propuestas de despliegue del servicio MCPTT en los nodos

A continuación, se enumeran diferentes alternativas de despliegue del servicio MCPTT en base a la implementación de nodos de procesamiento dentro de su arquitectura de red. El despliegue de los servicios MCPTT en nodos de procesamiento centralizado se ha explicado en páginas anteriores y por tanto se va a centrar en las otras tres alternativas de despliegue.

**Nodos Distribuidos:** Se mantienen los nodos de procesamiento en el Data Center del operador y además el operador dispone de nodos de procesamiento en los extremos de la red: en los eNB o en infraestructuras de red que se encargan de gestionar varios eNB. A su vez, estas infraestructuras son las que se conectan con el EPC. Desde el punto de vista del despliegue del servicio MCPTT en esta arquitectura, se recuerda lo ya indicado en la **Figura 6: Arquitectura funcional MCPTT - Stage 2 (Release 14)**, el servicio MCPTT se divide en **plano de aplicación** (MCPTT Application Plane) y **plano de señalización** (MCPTT Signaling Plane). A nivel de plano de aplicación se encuentran dos módulos principales: Media Distribution Function (MDF) y Floor Control Server (FCS). Es posible mantener en el Data Center, el plano de señalización (CSC – Common Services Core) y desplegar en los nodos remotos el plano de aplicación. De esta forma, todo el tráfico de data media no tendrá que atravesar el backhaul, el núcleo ni la red interna del operador. Se producirá una mejora en la latencia del servicio MCPTT y al liberar ancho de banda, éste se dedicará al plano de señalización mejorando sus tiempos de respuesta.

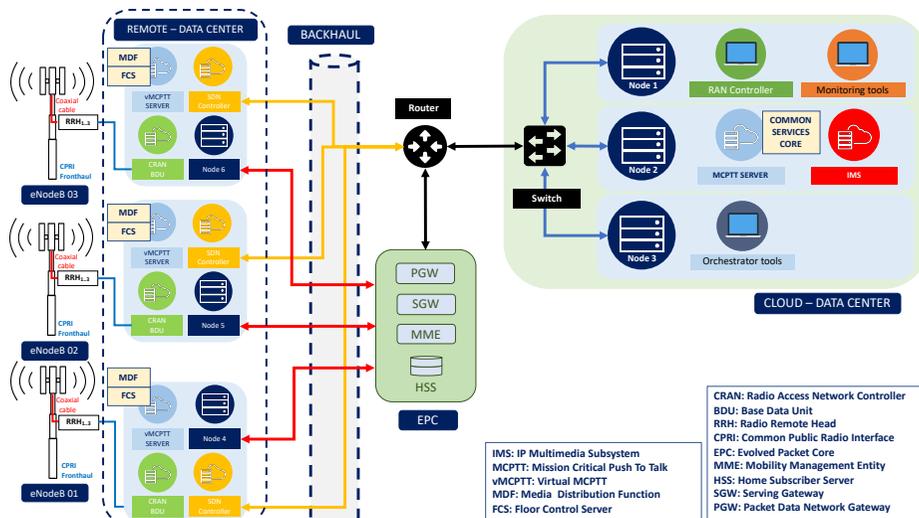


Figura 36: Propuesta de arquitectura – Nodos Distribuidos

**Nodos Redundantes:** En condiciones normales de operación, los servicios en los nodos redundantes se encuentran desplegados, pero no son accesibles por los usuarios que deben acceder hasta el Data Center. Las comunicaciones atraviesan el núcleo de red del operador y la parte IP Ethernet hasta el Data Center del operador. Si se produce una caída del backhaul del operador, los eNB quedarían aislados y por tanto los clientes no podrían acceder a los servicios y por tanto se producirían una discontinuidad del servicio. En este supuesto, cada eNB detectaría la discontinuidad del servicio y él tendría la capacidad de desplegar un Virtualized EPC (vEPC) que se encargaría del registro y autorización de los clientes conectados al eNB y sería el que asignaría la nueva dirección del APN en la que se encuentra desplegados los servicios de MCPPTT. El modo en el que opera la red en este supuesto se denomina Isolated E-UTRAN Operation for Public Safety (IOPS). [18] [69] [70]. Esta alternativa tiene dos inconvenientes:

- 1) **Sincronización de los vEPC con el EPC:** El vEPC debe tener información de registro de todos los usuarios y eso implicaría que estuviera sincronizada la información de registro.
- 2) **Discontinuidad del servicio:** En el momento de producirse la caída las llamadas están progresando hasta el Data Center, lo que quiere decir que todas las llamadas caen. **Salvo que el eNB tenga información de contexto, de las llamadas que lo atraviesan.** El eNB, puede llegar a tener, información de los usuarios registrados, pero no de la llamada en la que participan. El cliente MCPPTT al detectar la caída reintentará establecerla, dispone del identificador de llamada, pero el MCPPTT Server que se ha levantado en el eNB no tiene información de contexto. No sabe cuál era la situación en el momento de la caída. Podría teóricamente establecer una llamada de grupo entre el y el usuario que está reintentado conectarse e incluir en esa llamada a los futuros usuarios que reintenten comunicarse. Si un usuario estaba registrado en otro eNB, no se podrá incluir en la llamada.

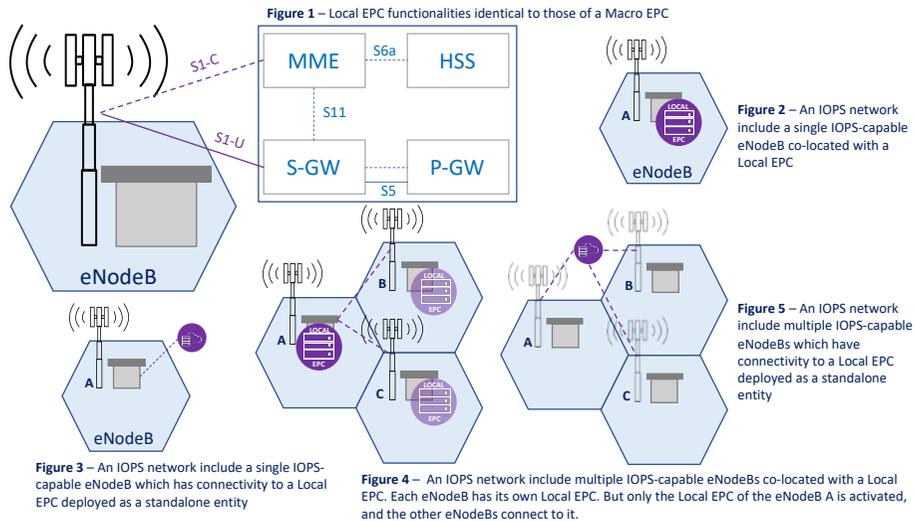


Figura 37: Propuesta 3GPP de eNB con capacidad IOPS y con al menos un EPC local [18]

Una red IOPS incluye múltiples eNB con capacidad IOPS ubicados junto con un EPC local. Cada eNB tiene su propio EPC local. Pero solo se activa el EPC local del eNB, y los otros eNB se conectan a él. Otra posibilidad es que cada eNB active una funcionalidad diferente y juntos operen como un EPC local con las funcionalidades distribuidas.

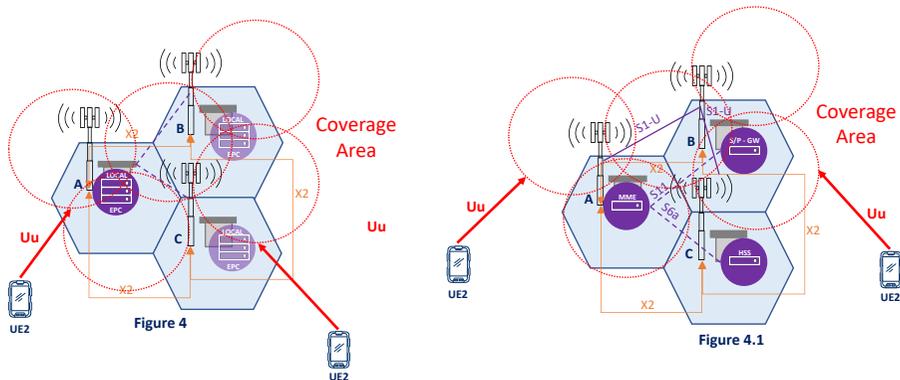


Figura 38: Propuesta 3GPP IOPS Mission Critical Networks [70]

En este escenario, se garantiza la continuidad del servicio MCPTT de los usuarios conectados a cada eNB. El supuesto básico es cuando todos los usuarios que están conectados al eNB pertenecen al mismo grupo y la complejidad viene dada cuando en una llamada grupo existen usuarios que están registrados en otro eNB, donde también estará desplegado el servicio MCPTT. Como ya se ha indicado anteriormente cuando se ha hablado del servidor MCPTT, éste asume dos roles: Controlling (gestiona las llamadas privadas y de grupo activas) y Participating que gestiona los usuarios de cada una de las llamadas. En el segundo supuesto, los

controladores de las llamadas deben compartir información sobre el estado de las llamadas para determinar donde un determinado usuario se encuentra. Como se observa, la redundancia de los nodos de procesamiento son sin duda una garantía para la continuidad del servicio. Sin embargo, la complejidad técnica de esta solución es compleja y además no está al 100 % estandarizada por el 3GPP.

**Nodos Mixtos:** La solución de los modos mixtos, es una mezcla de las dos propuestas anteriores. La arquitectura en condiciones normales de carga solo tiene desplegados los servicios en el Data Center del operador. Los nodos de cómputo del Data Center tienen mayor capacidad de proceso y aumentan un mayor número de llamadas en grupo que los nodos distribuidos. Si es necesario y gracias a esa diferencia de capacidad pueden desplegar más número de instancias de MCPTT Server, pudiendo balancear cargas entre los diferentes servidores MCPTT desplegados en el nodo central. El procesamiento de la señalización de las llamadas MCPTT tal requiere de pocos recursos hardware. Sin embargo, toda la gestión del balanceo de carga entre los diferentes servidores MCPTT desplegados requiere disponer de mucha información de contexto de toda la red para que el balanceador de cargas adopte la solución más eficiente.

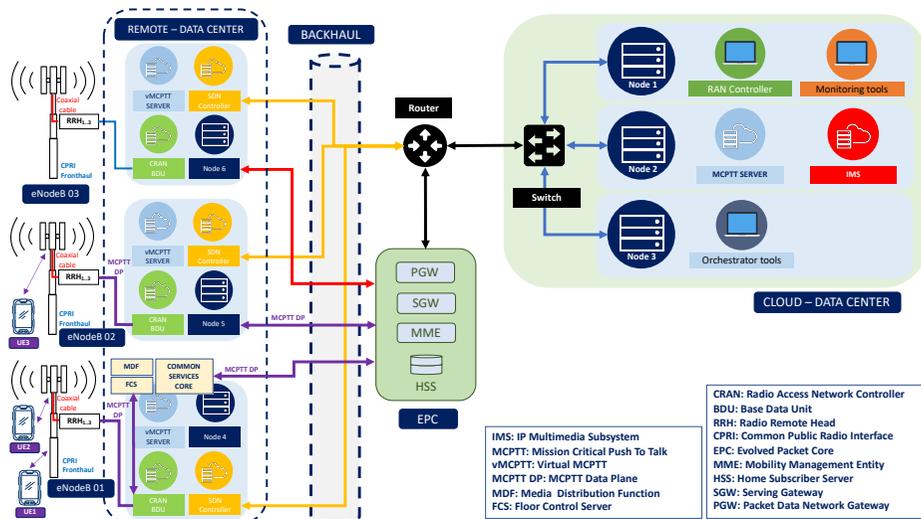


Figura 39: Propuesta de arquitectura – Nodos Mixtos

En una situación de emergencia, se suele producir una concentración muy rápida de usuarios desplegados en torno a un mismo eNB o macro celda y puede ser optimo el despliegue de los servicios MCPTT en ese nodo de computo. El orquestador general tiene la información de localización de todos los usuarios que se encuentran en llamada. Si detecta que en ese eNB se concentra la mayor parte de los usuarios que están interviniendo en las llamadas a grupo:

- 1) El orquestador ordena al controlador del nodo remoto el despliegue de los servicios de MCPTT en ese nodo.

- 2) El MCPTT Controlling del Data Center que hasta ahora se estaba encargado de gestionar la llamada, transfiere la llamada al MCPTT Controlling del modo remoto desplegado.
- 3) El MCPTT Controlling local se encarga de incluir en la nueva llamada a grupo a todos los clientes implicados apoyándose en los MCPTT Participating (dependiendo del número de usuarios) que haya desplegado.
- 4) El servidor MCPTT del Data Center cede todo el control al MCPTT desplegado en el nodo remoto.

En este escenario, IMS no se despliega en los nodos remotos. Esto quiere decir que la señalización de todos los usuarios tiene que subir hasta el Data Center. Sin embargo, en el caso de los usuarios conectados al eNB donde se ha desplegado el servicio MCPTT los datos media no tienen que subir hasta el Data Center. Para el resto de los usuarios, el plano de datos, tendrán que subir hasta el Data Center y bajar hasta el nodo remoto. Para estos segundos tipos de usuarios su latencia aumentará, pero los implicados en la emergencia tendrán unos tiempos de respuesta garantizados conforme al estándar del 3GPP.

La Virtualización de las Funciones de Red (NFV) y las Redes definidas por Software (SDN) son fundamentales para poder plantear una estrategia de cara a evitar la discontinuidad de los servicios MCPTT y en base a ellos se puede resolver las necesidades que requiere una arquitectura que evite la discontinuidad de los servicios:

- Tecnología que permita la virtualización de servicios y la creación de Network Services MCPTT que puedan ser desplegados cuando sean requeridos.
- Tecnología como NFV que permita administrar y desplegar los servicios de misión crítica MCPTT bajo demanda tanto en el Data Center del operador, como en los extremos de la red gracias al empleo de Controlador SDN que permiten encaminar los planos de datos y de señalización de los servicios desplegados a lo largo de la infraestructura de red.
- Monitorización en tiempo real de los recursos de red y de cómputo sobre los cuales se despliegan los servicios y de la misma manera se necesita recoger métricas específicas de esos servicios desplegados.
- Módulo de análisis / alertas que de forma automatizada y predictiva pueda notificar al orquestador general el estado global del sistema.
- Orquestador general que en base a las alertas recibidas despliegue servicios MCPTT, cuando sea necesario, con el objetivo de garantizar la continuidad y la disponibilidad.

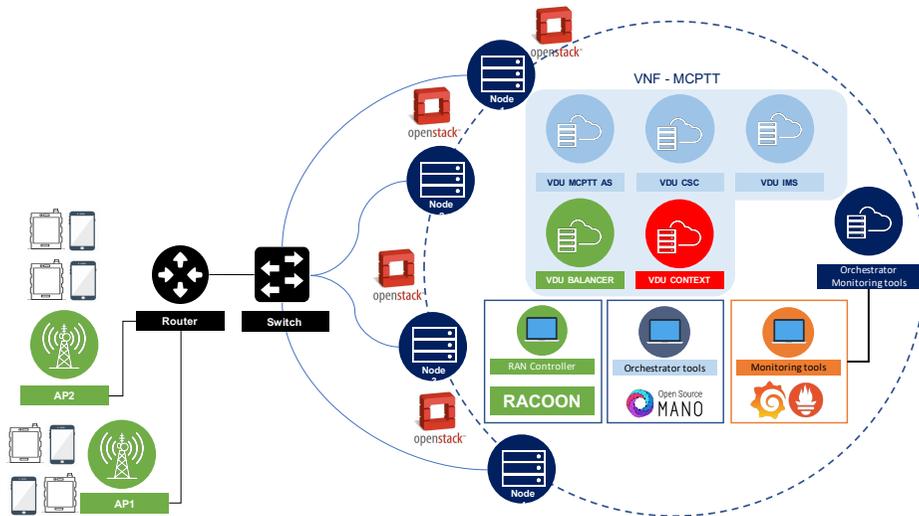


Figura 40: Propuesta de arquitectura – Disponibilidad MCPTT

De forma muy esquemática e inicial la figura anterior es una primera propuesta diseñada para garantizar la disponibilidad de los servicios. Se considerará posibles evoluciones como líneas futuras.

De una forma resumida es posible garantizar la disponibilidad, de la siguiente manera:

- En condiciones normales se desplegará un servidor MCPTT CAS (Controlling) y varios servidores MCPTT PAS (Participating).
- Si se trata de una red con muchos grupos sería posible desplegar más de un CAS
- La gestión del despliegue de las instancias de CAS o de PAS es responsabilidad del orquestador que toma la decisión a partir de los datos de monitorización (servicio y operación) y las reglas de escalado que se hayan configurado para el servicio.

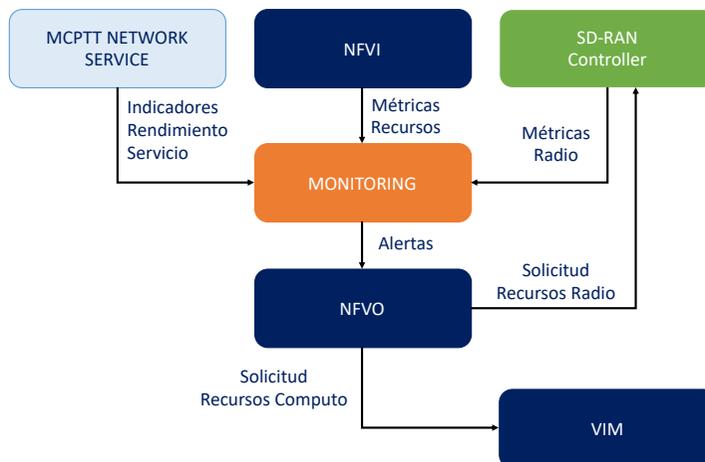


Figura 41: Propuesta Funcional – Disponibilidad MCPTT

## 4.5 Conclusiones

Tanto el NPSTC, ETSI TC TCCE, el TCCA, TETRA TCCA, TCCA OMA y el 3GPP han recogido los requerimientos técnicos de las agencias PPDR y han elegido LTE como la arquitectura soporte de banda ancha para proveer de los servicios de voz y datos demandados por las agencias PPDR, para ello ha sido necesario evolucionar el estándar LTE desde la Release 8 hasta la Release actuales.

Los servicios de MCPTT, MCDATA y MCVIDEO cumplen con **los estrictos requerimientos de rendimiento marcados por el 3GPP (KPI). No perdiendo de vista la continuidad y disponibilidad de los servicios.**

Tecnologías habilitadoras como NFV y SDN están siendo fundamentales tanto para proveedores de servicios como de infraestructura de red, para garantizar esos requerimientos técnicos de NPSTC. El **supervisor u orquestador** es la entidad dentro de la arquitectura de provisión de servicios encargada de gestionar: la red de acceso radio, la infraestructura de red, los nodos de procesamiento, los servicios desplegados y la calidad de servicio contratada por los clientes.

La necesidad de disminuir los costes operacionales de mantenimiento de los operadores de red junto con un aumento exponencial de la demanda en la transferencia de grandes volúmenes de datos por parte de los clientes finales ha provocado que los fabricantes de infraestructuras de red y los operadores de estas redes hayan apoyado iniciativas de código libre que han permitido poder satisfacer el crecimiento exponencial de las necesidades de los usuarios finales y la calidad de servicio contratada por los clientes.

Tecnologías como NFV y SDN ya tienen gran relevancia dentro de las infraestructuras de red. Actualmente gran parte de los usuarios se encuentran en movilidad, en lugar de los clientes tradicionales que accedía a los contenidos a través de una conexión cableada con la red troncal IP. Este nuevo escenario ha provocado que los problemas de discontinuidad y continuidad se puedan dar

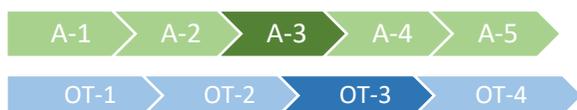
simultáneamente en la parte de red de acceso inalámbrica (RAN) como en la red troncal donde los servicios desplegados deben estar diseñado para soportar un aumento de capacidad no contemplado previamente. Por esta razón, estas tecnologías debían tener su capítulo dentro de esta tesis.

Es muy importante tener presente que si no se cumple con los requerimientos indicados en el capítulo 2 no se puede hablar de redes de misión crítica y por tanto no se está satisfaciendo los requerimientos demandados por las agencias PPDR BB.

## 5 Análisis del escenario base de cálculo

<b>5.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>99</b>
<b>5.2</b>	<b>ARQUITECTURA DE REFERENCIA</b>	<b>101</b>
<b>5.3</b>	<b>RENDIMIENTO DE LOS SERVICIOS – CÁLCULO KPIS</b>	<b>107</b>
5.3.1	KPI 1 (ACCESS TIME)	107
5.3.2	KPI 2 (ACCESS TIME END TO END)	108
5.3.3	KPI 3 (MOUTH TO EAR)	109
5.3.4	TABLA DE CALCULO BASE	112
5.3.5	CONCLUSIONES	112
<b>5.4</b>	<b>COBERTURA: ANÁLISIS DE LA CAPACIDAD MÁXIMA POR CELDA</b>	<b>113</b>
5.4.1	INTRODUCCIÓN	113
5.4.2	CÁLCULO TRADICIONAL	113
5.4.3	CÁLCULO BASADO EN LOS PRB NECESARIOS POR MCS	115
5.4.3.1	CÁLCULO ENVIANDO UN PAQUETE MCPTT CADA 20 MS	115
5.4.3.2	CÁLCULO ENVIANDO 2 PAQUETES MCPTT CADA 40 MS	124
5.4.4	CÁLCULO BASADO EN LA LIMITACIÓN DEL PDCCH	130
5.4.5	CONCLUSIONES TRAS LOS CÁLCULOS	135
5.4.6	TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN CAPACIDAD/COBERTURA	136
<b>5.5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>140</b>

### 5.1 Introducción



En el documento de especificaciones técnicas [71] del 3GPP, “**Common functional architecture to support mission critical services**” en la sección 9.2.2 “**Deployment scenarios**” se describen cinco escenarios de despliegue para los servicios de MC (MCS). En esta tesis doctoral se ha elegido el escenario **9.2.2.1.5**, como escenario base de referencia. Representa un escenario donde los MCS no son ofrecidos por el operador PLMN, sino que existe un proveedor de servicios MCS externo que los ofrece.

En este escenario, el Core SIP (IMS), es administrado por ambas entidades. De esta forma, el **proveedor del servicio de MC oculta al EPS todas las entidades y la señalización de estas, en su capa de servicios a nivel de aplicación**. Gracias a la gestión compartida del IMS, el proveedor del servicio puede ocultar identidades y información sensible sobre los usuarios de los servicios MCS al operador de la red (PLMN). La seguridad, privacidad y confidencialidad de las entidades, organizaciones o recursos que emplean los servicios MC es un requerimiento fundamental de las agencias PPDR. En las redes PMR (Narrow Band)

tradicionalmente privadas, el operador de la red era quien ofrecía los servicios PTT. Actualmente con el despliegue de los servicios de MC sobre redes de banda ancha (broadband), debemos considerar el escenario más genérico aquel en el que el proveedor de los servicios (MC) no sea el operador de la infraestructura PLMN.

La figura que se muestra a continuación es una adaptación de la figura 9.2.2.1.5-1 definida en el TS 23.280 [71] a la que se ha añadido las diferentes redes que atraviesa la señalización y los datos de los servicios MC. Además, en la parte derecha se detalla cada una de las entidades que componen el escenario de cálculo definido.

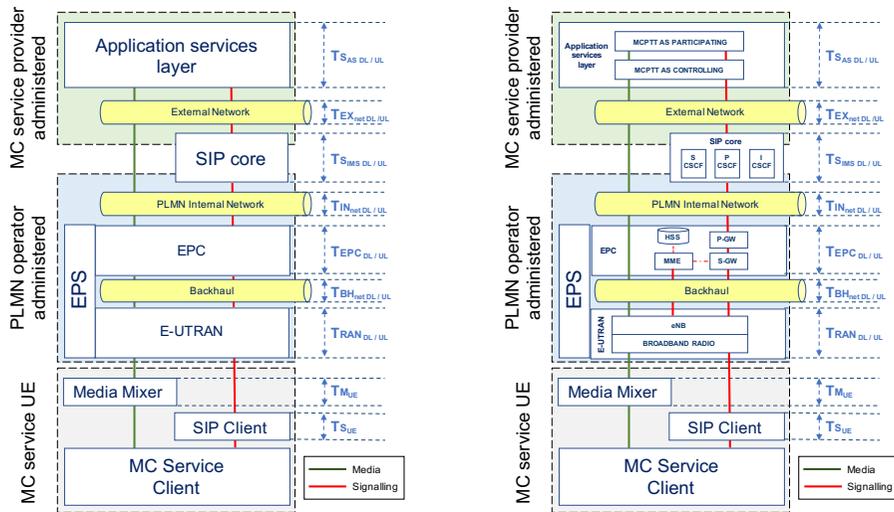


Figura 42: El proveedor de los servicios MCS y el operador de la red (PLMN) comparten el SIP CORE

En este escenario, la gestión del SIP CORE es compartida. Un ejemplo de esa gestión compartida podría ser: el S-CSCF administrado por el proveedor del servicio (SIP Core Registrar - [71] 7.4.3.1.3.4) y el I-CSCF (SIP Core Registrar Finder - [71] 7.4.3.1.3.3), junto con el P-CSCF (SIP Core Proxy) administrado por operador de la red PLMN.

En la figura previa, Public land mobile network (PLMN) Internal Network, representa la red IP interna del operador que conecta el PGW del EPC al proxy (P-CSCF) del SIP CORE y External Network, representa la red externa que conecta el S-CSCF del SIP CORE con los servidores MC desplegado en el Data Center del operador.

Sin embargo, para realizar los cálculos y análisis que se presentan en esta tesis se ha empleado una plataforma de pruebas de laboratorio donde el SIP CORE y los servidores MC se han desplegado siempre juntos, tanto en local como cuando se ha realizado en una Data Center externo, a la red troncal de la universidad UPV/EHU. Por tanto, en el conjunto de pruebas realizadas, el SIP CORE ha estado conectado a los servidores MC a través de una red IP interna y al PGW del EPC a través de una red externa.

Con el objeto, de poder medir los indicadores en un entorno más genérico posible, en el conjunto de las pruebas realizadas, la red externa ha sido siempre internet directamente, y no se han empleado VPNs que pudieran haber ofrecido una latencia de red menor.

En el capítulo 2 de Hoja de ruta de estandarización redes PPDR BB, se ha descrito el servicio MCPTT, en el capítulo 4 Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB, se ha descrito los indicadores de rendimiento definidos por el 3GPP para el servicio MCPTT y en el capítulo 3 Análisis de la evolución de las Redes Radio se ha analizado en detalle LTE, por lo tanto se ha presentado las bases para poder definir el escenario base de cálculo.

## 5.2 Arquitectura de referencia

En esta sección, se va a definir un escenario base sobre el que analizar el comportamiento del servicio MC, MCPTT de cara a analizar los diferentes indicadores de rendimiento del servicio (KPI) para posteriormente trasladar estas conclusiones a diferentes alternativas de arquitecturas de redes soporte.

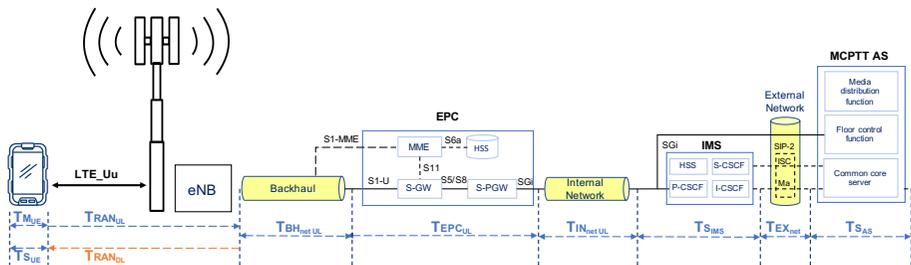


Figura 43: Identificación de tiempos de proceso y red, en una arquitectura estándar LTE.

En las dos figuras anteriores, se pueden identificar los componentes que participan en una llamada MCPTT, extremo a extremo. A continuación, se definen cada uno de ellos:

- **UE (Cliente MCPTT):** En nuestro caso es un terminal donde se instala la aplicación cliente MCPTT. Tal y como se puede apreciar en la Figura 42, en el UE se ejecutan dos entidades: **SIP Client** que gestiona la señalización del UE y **Media Mixer** encargado de la gestión de todo el tráfico media que envía y recibe el UE. Un cliente MCPTT puede tener varias llamadas a grupo activas al mismo tiempo, aunque solo puede hablar por la que tenga activa en cada momento, podría escuchar audio del resto de ellas, de forma simultánea. Precisamente esta funcionalidad da nombre a la entidad. Cada una de las entidades tiene asociado un tiempo de procesamiento tanto en la señalización  $TS_{UE}$  como en el procesado del tráfico media (decodificación y codificación de los paquetes RTP)  $TM_{UE}$ .
- **LTE\_Uu:** Es la parte radio de E-UTRAN. Conecta el UE con el eNB. Este se encarga de asignar recursos radio al UE, Physical Resource Blocks (PRB). Al planificar los PRB que va a destinar al UE, estima la calidad del canal inalámbrico del UE y adapta los parámetros de transmisión: esquema de

codificación seleccionado (MCS) y modo de transmisión, para conseguir un, Block Error Rate (BLER) entorno al 10% [72]. Los procedimientos de señalización involucrados en la transferencia de paquetes en LTE son diferentes en el uplink y en el downlink y por tanto añaden diferentes tiempos de latencia en la comunicación. Los valores de la latencia de cada componente que participa en el procedimiento de señalización de UL y DL han sido calculados en [73]. Aunque estos tiempos puedan fluctuar dependiendo del fabricante de la infraestructura, queda evidenciado que los tiempos de uplink son superiores a los de downlink. Esta es la razón, por la cual se haya decidido diferenciar en la Figura 43:  $TRAN_{UL}$  y  $TRAN_{DL}$ . En esta figura, no se ha representado el "Fronthaul" que conecta la, Base Band Unit (BBU) con la, Remote Radio Head (RRH).

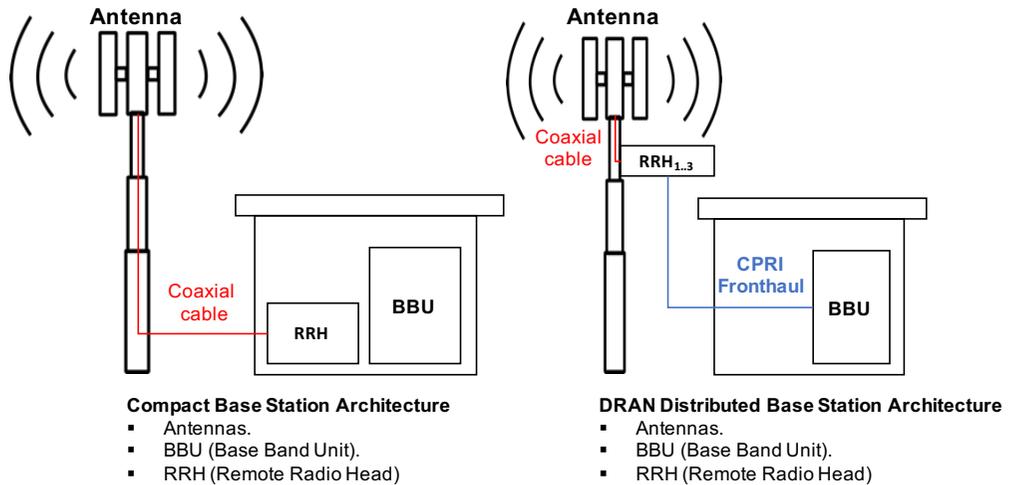


Figura 44: Backhaul dependiendo de la arquitectura de la BTS

En la figura anterior, se muestra dos alternativas de instalación del backhaul. En esta tesis se considera, la segunda de ellas: RRH instalada en la torre, cercana a los elementos radiantes (antenas) y conectada a la BBU que se encuentra en una Base Station (BTS) enlazados por fibra bajo el protocolo CPRI. Tanto la RRH como la BBU tienen un puerto CPRI que permiten establecer entre ellos el canal de transmisión de datos. La velocidad de transmisión es de 10-25G por sector, con una latencia de 30 – 75  $\mu s$ . Son tiempos que se pueden considerar despreciables para un estudio macro, como el que se está haciendo en esta tesis.

- **Backhaul.** Conecta las BBU al 4G Evolved Packet Core (EPC). Con la llegada de 5G, las nuevas radios (NR) se conectan a las nuevas BBU, que serán desagregadas y virtualizadas en unidades (CU) y en unidades distribuidas (DU).

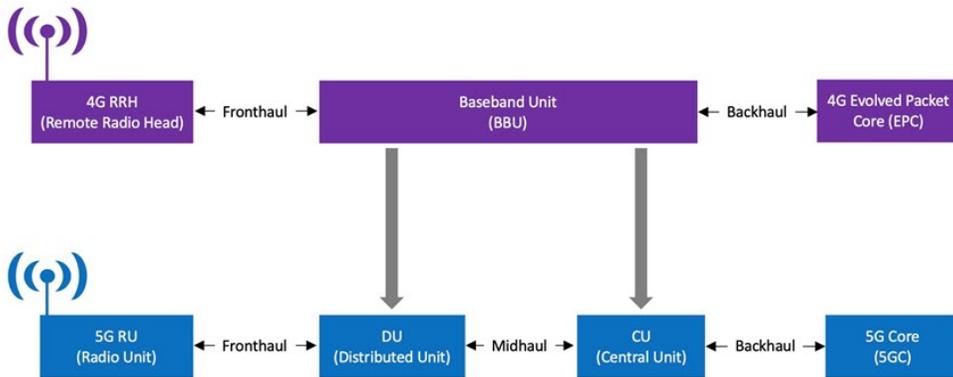
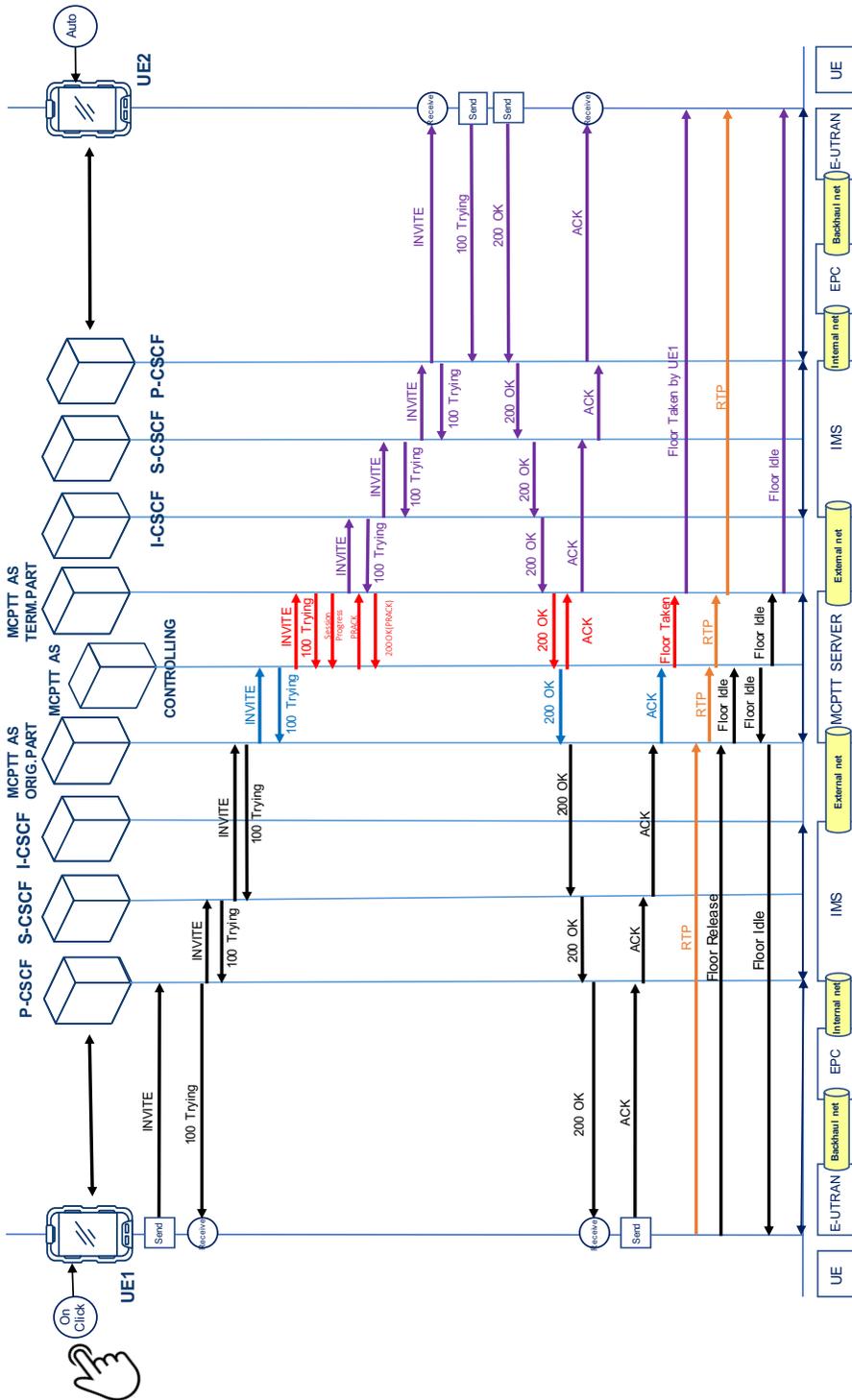


Figura 45: Evolución Backhaul de redes 4G a 5G xHaul [74]

- **EPC (Evolved Packet Core):** El Backhaul es un enlace IP entre el módulo de sistema o BBU (Band Base Unit) y el núcleo de red EPC (en la figura queda representado por el interfaz S1 que se divide en el plano de control S1-MME y el plano de usuario S1-U. Dentro del EPC se encuentra el módulo PGW (PDN Gateway) que se encarga de conectar el EPC con la red externa IP. Si el backhaul falla se pierde la comunicación entre las estaciones base y el núcleo de red y por tanto con los servidores que se encuentren situada en la red IP externa.
- **Internal Network:** Forma parte de la red del operador de la red de telefonía y conecta el PGW con el proxy de la arquitectura IMS (P-CSCF).
- **IMS (IP Multimedia Subsystem).** Es el SIP CORE representado en la figura 1, sobre el cual se despliegan los servidores de aplicación (Application Server – SA). En las redes actuales, los operadores de telefonía implementan IMS como un subsistema centralizado conectado al EPC de cada operador.
- **External Network:** es la red IP que conecta al operador de red con el proveedor del servicio. Dependiendo de la distancia que exista entre ambos, se incrementa más o menos latencia a las comunicaciones MC. Actualmente se trabaja en arquitecturas y en tecnologías habilitadoras que posibiliten desplegar los servicios cerca del consumidor de los servicios. Esto permitirá disminuir las latencias en las comunicaciones. Tanto, la señalización como los datos media no tendrán que atravesar la red externa hasta el Data Center del proveedor de servicios.
- **MCPTT AS (Mission Critical Push-to-Talk):** representan los servidores de aplicación desplegados en el Data Center del proveedor del servicio. Proporcionan los servicios de misión crítica (MCS).

Se ha elegido la

Figura 46, para representar todos los componentes que participan en la señalización de una llamada MCPTT por su sencillez y por su modularidad. Esto ha obligado a representar por duplicado en la figura los componentes **RAN** y **IMS**. Realmente no existen 2 (tal y como se puede comprobar en Figura 42 y Figura 43), sino uno por cada caso. Esta forma de representación permite analizar la señalización, extremo a extremo de una forma más sencilla y sobre todo los diagramas quedan muchos más limpios y sencillos de comprender y seguir. Algo parecido ocurre con el servidor MCPTT. Como ya se ha indicado en el **capítulo 2**, sección 2.3, Servicios de Misión Crítica (MCS) – MCPTT, el servidor MCPTT tiene dos roles: MCPTT<sub>CONTROLLING</sub> se encarga de la gestión de la llamada y el MCPTT<sub>PARTICIPATING</sub> que se encarga de la gestión de los componentes de la llamada. Realmente no es imprescindible que sean 2 servidores MCPTT<sub>PARTICIPATING</sub> diferentes, pero de esta manera queda claro que por usuario existe un servidor que se encarga de enviar la señalización que tiene su origen en el MCPTT<sub>CONTROLLING</sub>.



Traza real de una llamada privada MCPTT

Figura 46: Traza real de una llamada privada MCPTT

La Figura 46, representa una traza real de una llamada privada MCPTT con respuesta automática. La llamada se realiza sin que el receptor (UE 2) tenga que aceptar la llamada. Para comprender mejor la traza, en la Figura 47 se ha simplificado la Figura 46., incluyendo los mensajes principales y los tiempos de procesamiento implicados.

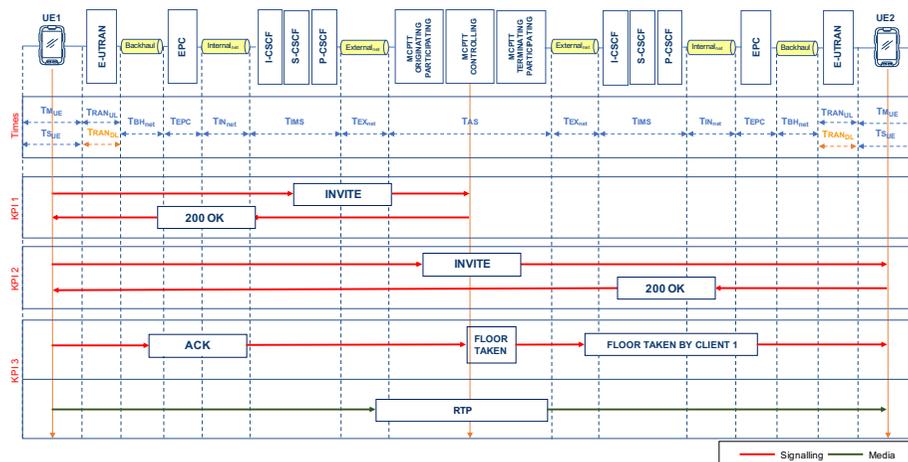


Figura 47: Traza real de una llamada privada MCPTT - Simplificada

Los tiempos de retardo asociados a cada KPI se muestran en esta figura. La señalización está representada por líneas discontinuas y el plano de datos se ha representado como líneas continuas. El tiempo de latencia involucrado en cada KPI se calcula como la suma de los tiempos de procesamiento correspondientes a los componentes implicados. Los tiempos de procesamiento que se han tenido en cuenta son:

Tabla 24: Tiempos de procesado y retardo

	Tiempo de Procesado		Retardo
TS <sub>UE</sub>	Señalización en el cliente	TRAN <sub>UL,DL</sub>	Tiempo E-UTRAN (uplink & downlink)
TM <sub>UE</sub>	Datos media en el cliente UE	TBH <sub>net</sub>	Tiempo de backhaul
TS <sub>IMS</sub>	Señalización IMS	TIN <sub>net</sub>	Tiempo de internal network
TS <sub>AS</sub>	Señalización Servidores MCPTT	TEX <sub>net</sub>	Tiempo de external network
TM <sub>AS</sub>	Datos media Servidores MCPTT		

El tiempo de procesamiento media  $TM_{UE}$  en el UE, incluye los procesos de captura, codificación y cifrado del audio del UE que emite el audio, así como el descifrado, decodificación y emisión del UE que recibe el audio.

A continuación, se detalla el cálculo de los indicadores: KPI 1 (Access Time), KPI 2 (Access Time End to End) y KPI 3 (Mouth to Ear).

### 5.3 Rendimiento de los Servicios – Cálculo KPIs

En la sección 4.2, **Rendimiento de los servicios – Indicadores (KPI)**, se han definido cada uno de los indicadores de rendimiento del servicio MCPTT. En esta sección se va a definir la formulación para cada uno de los indicadores, tomando como referencia la señalización de la llamada privada MCPTT definida en la Figura 47. Esta formulación, permitirá en el capítulo 7 “Análisis de Indicadores por despliegue” obtener valores numéricos de estos para cada una de las estrategias de despliegue propuestas en esta tesis.

#### 5.3.1 KPI 1 (Access Time)

Como se ha comentado en la sección 4.2 Rendimiento de los servicios – Indicadores (KPI), el **KPI 1 (Access Time)** se define como el tiempo entre el instante en que un usuario MCPTT solicita hablar (**normalmente presionando la pastilla o el pulsador PTT en el UE MCPTT**) y cuando este usuario recibe la autorización para comenzar a hablar. [58]

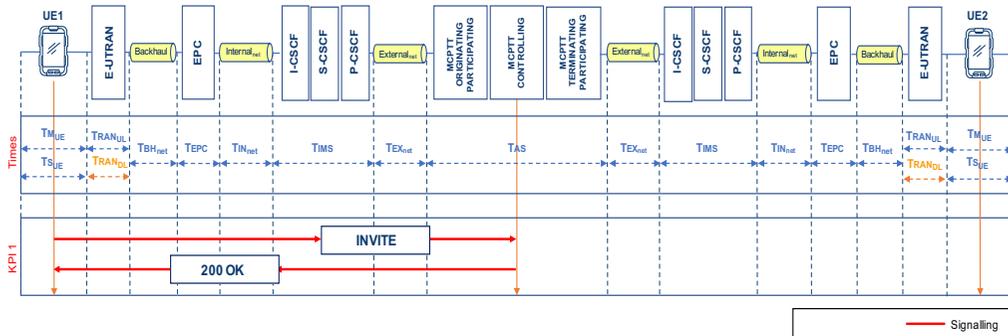


Figura 48: Señalización simplificada. Access Time en una llamada privada MCPTT

El KPI 1 es aplicable tanto a las solicitudes de establecimiento de llamada de grupo MCPTT como en las solicitudes MCPTT posteriores que forman parte de la misma llamada. El **KPI 1** para las solicitudes de MCPTT posteriores puede tardar un poco menos de tiempo que la primera solicitud de establecimiento de MCPTT de la misma llamada debido a su posible necesidad de asignación de recursos en términos de establecimiento de la portadora. Sin embargo, desde la perspectiva del usuario final, no es necesario diferenciar el rendimiento requerido para una solicitud de establecimiento de llamada de grupo MCPPT y las solicitudes MCPTT posteriores. [61]

La solicitud comienza con el INVITE enviado por el UE 1 que atraviesa los componentes radio ( $T_{\text{TRAN}_{UL}}$ ), el núcleo de red ( $T_{\text{CN}_{UL}}$ ) hasta llegar al IMS ( $T_{\text{SIMS}}$ ). Aquí el proxy P-CSCF se lo envía al I-CSCF y al S-CSCF que se lo envían al servidor MCPTT ( $\text{MCPTT}_{\text{Participating}}$ ) que es el que se encarga de hacerlo llegar hasta el servidor MCPTT ( $\text{MCPTT}_{\text{Controlling}}$ ). Este servidor, en el supuesto, que toda la información recibida y la que dispone de la llamada en curso a la que se quiere

volver a incluir sea correcta, responderá al UE 1 con un comando **200 OK**, que deberá recorrer el camino inverso hasta el UE<sub>1</sub>. El tiempo de latencia de **ACCESS TIME** de una llamada MCPTT, será la suma de los tiempos de procesamiento de los componentes que atraviesa, de ida y de vuelta. En la figura, se representan los flujos de los mensajes INVITE y 200 OK, SIP respectivamente:

- $INVITE_{UE1\ SEND} = T_{SUE1\ (ON\ CLIK)} + TRAN_{UL} + TBH_{net\ UL} + TEPC_{UL} + TIN_{net\ UL} + TSIMS + TEX_{net\ UL} + TSAS$
- $200\ OK_{MCPTT\ CONTROLLING\ SEND} = TSAS + TEX_{net\ DL} + TSIMS + TIN_{net\ DL} + TEPC_{DL} + TBH_{net\ DL} + TRAN_{DL} + T_{SUE1\ (200\ OK)}$

KPI 1 (Access Time)

$TRAN_{UL} + 2(T_{SUE1} + TBH + TEPC + TIN_{net} + TSIMS + TEX_{net} + TSAS) + TRAN_{DL}$

El valor de este indicador de servicio en el 95 % de las llamadas debe ser inferior a **300 ms**. En este indicador se debe **vigilar especialmente el retardo de la propia red LTE (TRAN<sub>UL</sub> y TRAN<sub>DL</sub>) y del procesamiento de señalización en el terminal móvil T<sub>SUE</sub>**.

### 5.3.2 KPI 2 (Access Time End to End)

En el KPI 2 se calcula el tiempo que transcurre durante el establecimiento de una llamada MCPTT entre los usuarios UE 1 y UE 2. El primero de ellos, UE 1 quiere hablar con UE 2 para lo cual le invita a formar parte de su conversación.

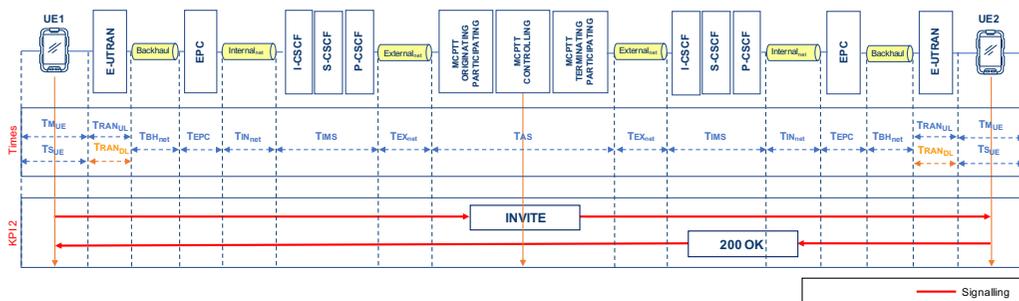


Figura 49: Señalización simplificada. Access Time End to End en una llamada privada MCPTT

En este caso, la señalización es muy parecida a la del KPI 1, lo que ocurre es que ahora no se queda en el servidor MCPTT (MCPTT<sub>Controlling</sub>) sino que considera el tiempo completo hasta que se acepta la llamada. Esto es, se añade el tiempo necesario para que el (MCPTT<sub>Controlling</sub>) envíe el comando INVITE al servidor MCPTT (MCPTT<sub>Participating</sub>) encargado de localizar al UE 2 y a través de IMS envía a través de RAN el comando INVITE a UE<sub>2</sub> y éste contesta. El cliente se encuentra configurado en modo de respuesta automática. Eso quiere decir que no se tiene que esperar a que el usuario físicamente a través de la interfaz del teléfono móvil acepte la llamada, sino que automáticamente cuando el teléfono móvil recibe el INVITE si no hay ningún problema que lo impida, acepta la llamada enviando de vuelta un mensaje 200 OK. Este mensaje a través de los componentes RAN y IMS alcanzarán

de nuevo a los servidores MCPTT quien renviarán el mensaje 200 OK al UE 1 a través de los componentes IMS y RAN hasta alcanzar el usuario UE 1.

Al igual que antes, el tiempo de ACCESS TIME END TO END será la suma de los tiempos del comando INVITE y su confirmación a través del mensaje 200 OK. No se consideran para el cálculo los tiempos marcados con (\*).

- $INVITE_{UE1\ SEND} = T_{SUE1\ (ON\ CLIK)} + T_{RAN_{UL}} + T_{BH_{net\ UL}} + T_{EPC_{UL}} + T_{IN_{net\ UL}} + T_{SIMS} + T_{EX_{net\ UL}} + T_{SAS} + T_{EX_{net\ DL}} + T_{SIMS} + T_{IN_{net\ DL}} + T_{EPC_{DL}} + T_{BH_{net\ DL}} + T_{RAN_{DL}} + T_{SUE2\ (INVITE)}$
- $200\ OK_{UE2\ SEND} = T_{RAN_{UL}} + T_{BH_{net\ UL}} + T_{EPC_{UL}} + T_{IN_{net\ UL}} + T_{SIMS} + T_{EX_{net\ UL}} + T_{SAS} + T_{EX_{net\ DL}} + T_{SIMS} + T_{IN_{net\ DL}} + T_{EPC_{DL}} + T_{BH_{net\ DL}} + T_{RAN_{DL}} + T_{SUE1\ (200\ OK)}$

KPI 2 (Access Time End to End)

$$2(T_{RAN_{UL}} + T_{SUE1} + T_{SAS}) + 4(T_{BH_{net}} + T_{EPC} + T_{IN_{net}} + T_{SIMS} + T_{EX_{net}}) + T_{SUE2} + 2T_{RAN_{UL}}$$

El valor de este indicador de servicio en el 95 % de las llamadas debe ser inferior a **1.000 ms**. Sin entrar en profundizar mucho más ahora, esto quiere decir, que el establecimiento de una llamada nueva dispone de algo de 3 veces más de tiempo para realizarse que si la llamada está ya establecida y se quiere incluir a ella de nuevo.

### 5.3.3 KPI 3 (Mouth to Ear)

Una vez, que el UE 1 recibe la confirmación del UE 2, a través del mensaje SIP (200 OK) que está preparado para establecer una llamada MCPTT, UE1 envía un mensaje SIP (ACK) al servidor MCPTT<sub>Controlling</sub> indicándole que la negociación de establecimiento ha progresado correctamente. En este momento es cuando este servidor informa al UE 2 a través del servidor MCPTT<sub>Participating</sub> que se encarga de gestionar a este usuario que el canal se le ha concedido al UE<sub>1</sub> para iniciar la comunicación. Con anterioridad, UE 1 había recibido de servidor MCPTT<sub>Controlling</sub> el mensaje de (Floor Granted), informándole que tenía asignado el canal y podía hablar. En la figura 4, se puede observar en detalle toda esta señalización.

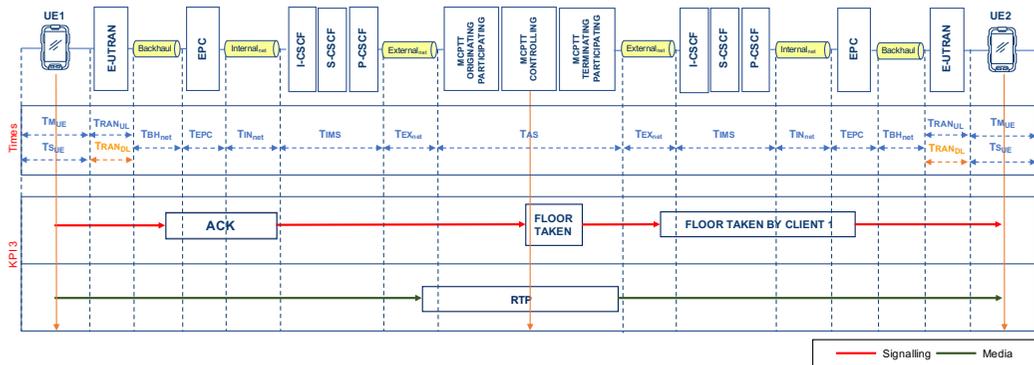


Figura 50: Señalización simplificada. Mouth to Ear

El cálculo del KPI 3 comienza en el momento que el UE 1 recibe el mensaje 200 OK del servidor MCPTT<sub>Participating</sub> y comienza a hablar. En la fuente, el audio se codifica, y en el destino, el receptor decodifica los datos. En el servicio MCPTT el tráfico RTP atraviesa los servidores MCPTT<sub>Controlling</sub> y MCPT<sub>Participating</sub>, aunque el payload no se procese hasta llegar a UE 2 a través de **TRAN<sub>DL</sub>**.

$$\text{KPI 3 (Mouth to Ear)}$$

$$T_{\text{TRAN}_{UL}} + T_{\text{MUE1}} + 2(T_{\text{BH}_{net}} + T_{\text{EPC}} + T_{\text{IN}_{net}} + T_{\text{EX}_{net}}) + T_{\text{MAS}} + T_{\text{MUE2}} + T_{\text{TRAN}_{DL}}$$

El valor de este indicador de servicio en el 95 % de las llamadas debe ser inferior a **300 ms**. En el cálculo del KPI 3 no intervienen los tiempos de señalización y son todos tiempos o de RAN o de procesado de media (voz) en el caso del servicio MCPTT:

- **T<sub>MUE1</sub>** es el tiempo que transcurre desde que el recurso emisor habla al micrófono de su terminal hasta que se codifica en un paquete RTP que es enviado a través de la portadora ya establecida en la parte RAN.
- **T<sub>MUE2</sub>** es el tiempo que transcurre desde que el paquete RTP llega al teléfono móvil Android hasta que sale audio por el altavoz del teléfono del recurso receptor tras ser decodificado.

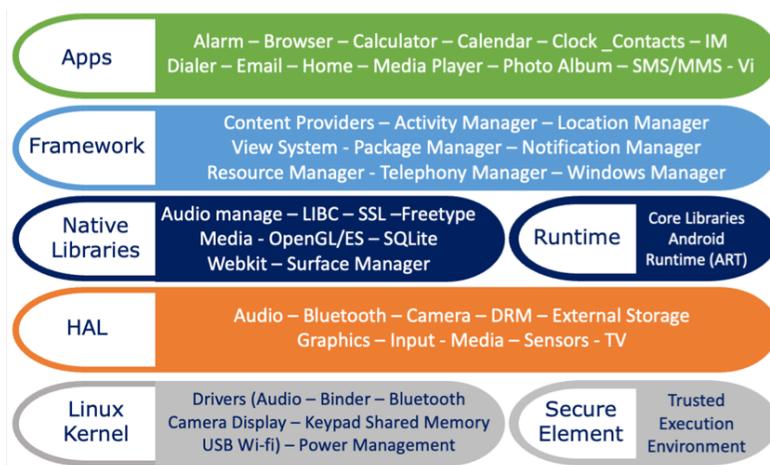


Figura 51: Detalle pila (ejemplo de Android [75])

En el proceso de codificación y decodificación del audio en el terminal interviene el hardware del fabricante y el sistema operativo del dispositivo. La velocidad de codificación y decodificación del audio es proporcional a la potencia de cómputo del dispositivo. Cuanto mayor sea ésta, menor es la latencia que se añade a la comunicación, pero no es la única. Tanto las funciones que gestionan el hardware a través del sistema operativo, como las aplicaciones que hacen uso de esas funciones añaden latencia a la comunicación de audio.

Como ya se ha indicado en páginas anteriores, la latencia es el tiempo que demora una señal a la hora de atravesar un sistema (dispositivo emisor + infraestructura de red + dispositivo receptor). A continuación, se detallan los diferentes tipos de latencia más comunes relacionados con las aplicaciones de audio [76]:

- **La latencia de salida de audio** es el tiempo que transcurre entre el momento en que una aplicación genera una muestra de audio y la reproducción de la muestra a través de un conector de auriculares o un altavoz incorporado.
- **La latencia de entrada de audio** es el tiempo que transcurre entre el momento en que la entrada de audio de un dispositivo, como un micrófono, recibe una señal de audio y el momento en que esos datos de audio están disponibles para una aplicación.
- **La latencia de ida y vuelta** es la suma de la latencia de entrada, el tiempo de procesamiento de la aplicación y la latencia de salida.

En el estándar de MCPTT el tráfico RTP tiene que atravesar los servidores MCPTT AS. Tal y como se representa en la Figura 50, el tráfico RTP será enviado por el UE 1 hasta el MCPTT<sub>Participating</sub> encargado de gestionar el origen de la llamada MCPTT, este se lo reenvía al MCPTT<sub>Controlling</sub> que es el que tiene el control de todas las llamadas en curso y de todos los usuarios en llamada.

En la arquitectura funcional MCPTT [30], aparecen como componentes principales los MC Service Servers y los Common Services Core. El MCPTT Server está compuesto por el Floor Control Server que se encarga de la gestión del plano de control (Control Plane) y el Media Distribution Function que se encarga del plano de usuario (User Plane). Este es el que se encarga de la distribución del tráfico RTP. El estándar del 3GPP obliga a que todo el tráfico pase por el MCPTT Server. El UE 1 no puede enviar el tráfico directamente a los clientes UE 2...n., no conoce su ubicación. El MCPTT Server cuando actúa como Participating, conoce el mapeo entre el MCPTT-Id de UE 2...n con IMPU (IMS Public User Identity), pero no su IP. De hecho, solo IMS conoce las IP destino de los UE.

El tráfico RTP enviado por el UE 1, tiene que atravesar la parte aire en uplink  $T_{\text{TRANUL}}$ , el núcleo de red  $T_{\text{BH}} + T_{\text{EPC}} + T_{\text{INnet}}$  y la red externa  $T_{\text{EXnet}}$  que conecta al operador de la red (MNO) con el proveedor del MCS y una vez conocida la ubicación del UE2 el tráfico RTP recorrerá el camino inverso. Los tiempos de la red externa  $T_{\text{EXnet}}$  dependerán de la distancia a la que se encuentre el data center del proveedor de MCS del SIP Core del operador de la red (MNO).

### 5.3.4 TABLA DE CALCULO BASE

A continuación, se resumen los tiempos de procesamiento involucrados en el cálculo de los KPIs.

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	TBH <sub>net</sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI <sub>1</sub>	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A
KPI <sub>2</sub>	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x
MEDIA	TRAN <sub>UL</sub>	TM <sub>UE1</sub>	TBH <sub>net</sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TM <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TM <sub>UE2</sub>
KPI <sub>3</sub>	1x	1x	2x	2x	2x	N/A	2x	1x	1x	1x

Tabla 25: Numero de veces que la Señalización y el Data Plane atraviesa cada componente de Escenario de Referencia LTE [28]

Esta tabla representa, para cada KPI, el tiempo de procesamiento correspondiente a cada etapa de la llamada MCPTT de extremo a extremo. Los KPI 1 y 2 sólo consideran los mensajes de señalización y el cálculo de KPI 3 sólo contempla mensajes de medios. Esta tabla va a tener gran importancia a lo largo de esta tesis ya que va a servir de referencia respecto de las diferencias alternativas de despliegue. Por cada una de ellas se va a obtener una tabla igual a ésta y así, de un vistazo, se va a poder comprobar qué mejora, qué empeora y sobre todo qué es importante considerar a la hora de desplegar servicios de misión crítica MCPTT.

### 5.3.5 CONCLUSIONES

Tras haber presentado en el capítulo 2, que es un servicio de misión crítica Push to Talk (MCPTT), sus orígenes y características comunes con el servicio Push to Talk que ofrecen las actuales redes (Private Mobile Radio) PMR; en el capítulo 4 se ha estudiado los principales indicadores de servicio definidos por el 3GPP para el servicio MC, MCPTT. En el capítulo 5, se ha definido una formulación para cada uno de los indicadores, tomando como referencia la señalización de la llamada privada MCPTT definida en la Figura 47. Formulación que será aplicada en el capítulo 7, al conjunto de estrategias de despliegue definidas en el capítulo 6.

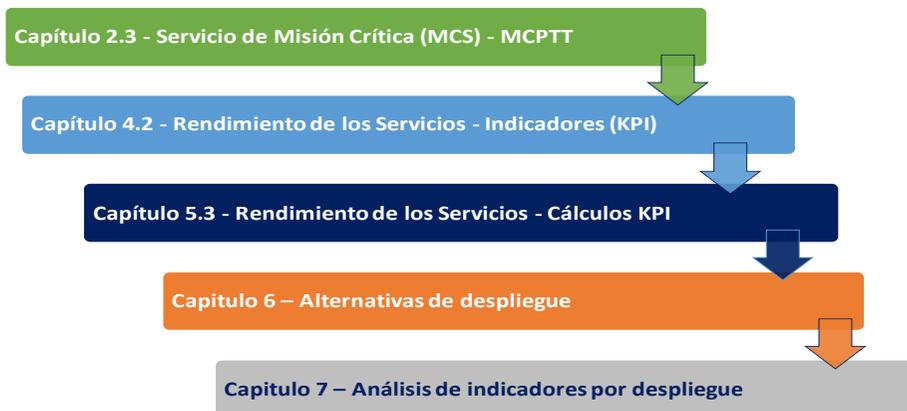


Figura 52: Índice de capítulos referidos al cálculo de los indicadores de servicio KPI

## 5.4 Cobertura: análisis de la capacidad máxima por celda

### 5.4.1 INTRODUCCIÓN

Una cuestión es la capacidad teórica que pueda tener una celda (sección 4.3.1), considerando el conjunto de PRB disponibles en cada TTI y los requerimientos de dichos recursos por los UE que se encuentran en la celda y otra es la capacidad máxima real. A través de las secciones 4.3.2 y 4.3.3 hemos analizado los diferentes factores que inciden en la celda para que esa capacidad máxima no sea tan fácil de calcular como una simple división de los recursos de red máximos disponibles entre los recursos que requieren los UEs que se encuentran en esa celda.

Todos los usuarios de la celda no se encuentran normalmente juntos, sino que estarán distribuidos a lo largo y ancho de la celda y en función de esa localización, la modulación que asigna para ese UE el eNB que da cobertura a la celda será diferente y eso afectará, como se ha visto anteriormente en la sección 4.3.3., al bitrate disponible por cada UE para transmitir o para recibir información. Pero, además, cada trama LTE no es aprovechable al 100% para datos, sino que debe incluir la señalización que permite localizar en la propia trama la formación de usuario. En esta sección 5.4 se va a calcular numéricamente las capacidades máximas, considerando las limitaciones, anteriormente descritas.

### 5.4.2 CÁLCULO TRADICIONAL

Este cálculo corresponde a la idea tradicional optimista de que la capacidad típica de LTE (con picos máximos de 100s de Mbps) será capaz de cursar un número muy alto de llamadas MCPTT ya que éstas tienen unos requisitos muy bajos en cuanto a throughput (del orden de 10s de kbps). El número de llamadas se obtiene, por tanto, de forma extremadamente simplificada, mediante la división de la tasa de bits por celda y la tasa de bits por llamada MCPTT. Por tanto, resulta de dividir el throughput disponible en la celda en cada MCS entre el consumo en bits de cada llamada MCPTT.

El tamaño en bits de cada TBS depende del MCS y del número de PRB disponibles, tal y como se indicaba en la sección 3.3 **Redes de Banda Ancha - LTE  $\geq 12$** , cuando se describían en la sección 3.3.5, Canales de Radio LTE.

Para obtener este dato, se debe acceder a Tabla 7.1.7.2.1.-1 incluida en la versión 13.0.0 Release 13 [Pág. 69 -70] y para cada  $I_{TBS}$  se obtendrá en la columna  $N_{PRB} = 100$  este valor 3GPP TS 36.213

Para poder acceder a esta tabla previamente se ha tenido que acceder a la **Tabla 20**: Muestra el mapeo entre el índice MCS (Esquema de modulación y codificación) que nos permitirá a partir de un valor de MCS obtener un índice  $I_{TBS}$  con el que acceder a la Tabla 21:  $N^{\circ}$  bits /  $N^{\circ}$  PRB en función del  $I_{TBS}$  Obteniendo Los resultados que se presentan en la tabla adjunta:

Tabla 26: Calculo tradicional del número de llamadas MCPTT por MCS

I_MCS	Modulación	I_TBS	Bitrate pico celda supuesto ocupación entera	Número Llamadas (throughput celda/bitrate por llamada)
0	QPSK	0	2.792.000	95
1	QPSK	1	3.624.000	124
2	QPSK	2	4.584.000	156
3	QPSK	3	5.736.000	196
4	QPSK	4	7.224.000	247
5	QPSK	5	8.760.000	300
6	QPSK	6	10.296.000	352
7	QPSK	7	12.216.000	418
8	QPSK	8	14.112.000	483
9	QPSK	9	15.840.000	542
10	16QAM			
11	16QAM	10	17.568.000	601
12	16QAM	11	19.848.000	679
13	16QAM	12	22.920.000	784
14	16QAM	13	25.456.000	871
15	16QAM	14	28.336.000	970
16	16QAM 64QAM	15	30.576.000	1.047
17				
18	64QAM	16	32.856.000	1.125
19	64QAM	17	36.696.000	1.256
20	64QAM	18	39.232.000	1.343
21	64QAM	19	43.816.000	1.500
22	64QAM	20	46.888.000	1.605
23	64QAM	21	51.024.000	1.747
24	64QAM	22	55.056.000	1.885
25	64QAM	23	57.336.000	1.963
26	64QAM	24	61.664.000	2.111
27	64QAM	25	63.776.000	2.184
28	64QAM	26	75.376.000	2.581
28A	64QAM	26A	66.592.000	2.280

El mejor escenario suponiendo que todos los usuarios en llamada tienen un **MCS=28** el número máximo de llamadas es de **2.581** y en el peor escenario **MCS = 0** el número de llamadas máximas es de **95**.

La diferencia es muy importante, lo que nos lleva a la primera conclusión importante:

La ubicación de los usuarios en la celda cubierta por el eNB influye de forma dramática en el número de llamadas totales que el eNB soporte de forma simultánea.

En estos cálculos **se considera que todos los usuarios están en el mismo MCS**. Este primer cálculo, el más teórico de los tres que se van a presentar, sirve para empezar a tener una idea del número máximo de llamadas MCPTT que puede gestionar un eNB, pero veremos enseguida cómo **se trata de una simplificación demasiado optimista**. Sin embargo, está alineada con las estimaciones del 3GPP en el documento TS 22.179 version 15 – Anexo C, el 3GPP [77] en el que se indica lo siguiente:

“El servicio MCPTT debería soportar 2.000 usuarios MCPTT dentro de un grupo MCPTT o como combinación de varios en cada celda del sistema MCPTT”

### 5.4.3 CÁLCULO BASADO EN LOS PRB NECESARIOS POR MCS

#### 5.4.3.1 CÁLCULO ENVIANDO UN PAQUETE MCPTT CADA 20 MS

Para el primer cálculo se asume que en general se va a transmitir cada trama de voz en un paquete RTP cada 20ms que se envían directamente a los UE sin bufferizar en el eNB. Por tanto, para los 584 bits resultantes se recorre la Tabla 7.1.7.2.1.-1 definida en el 3GPP TS 36.213 version 13.0.0 Release 13 y se localiza aquellos valores que puedan contener un número de bits por TBS mayor que el tamaño del paquete MCPTT (los 584 bits mencionados). A partir, de los datos obtenidos se genera la **Tabla 22**: Extracto de tabla generada para el cálculo de donde se obtienen los siguientes valores:

Tabla 27: Número de PRBs por MCS

L_MCS	Nº PRB / MCS
0	22 PRBs
1	17 PRBs
2	14 PRBs
3	11 PRBs
4	9 PRBs
5	7 PRBs

6	6 PRBs
7	5 PRBs
8	5 PRBs
9	4 PRBs
10	
11	4 PRBs
12	3 PRBs
13	3 PRBs
14	3 PRBs
15	3 PRBs
16	2 PRBs
17	
18	2 PRBs
19	2 PRBs
20	2 PRBs
21	2 PRBs
22	2 PRBs
23	2 PRBs
24	2 PRBs
25	2 PRBs
26	1 PRBs
27	1 PRBs
28	1 PRBs
28A	1 PRBs

Hasta ahora, se ha obtenido el número de PRB necesarios por MCS, pero el objetivo es obtener el número máximo de llamadas MCPTT por MCS. El ancho de banda de los canales LTE de las celdas consideradas en este escenario base es de 20 Mhz, lo que implica que se dispone de 100 PRB. Por tanto, el número de llamadas será el resultado de dividir el número total de PRBs disponibles entre los PRBs necesarios dependiendo del MCS y multiplicarlo por la frecuencia de envío de cada trama MCPTT (20 milisegundos). **A la hora de obtener el número de llamadas MCPTT se considera que todos los usuarios se encuentran en el mismo MCS.** Una vez,

realizada las operaciones para cada uno de los MCS, se obtiene la tabla que contiene el número de llamadas.

Tabla 28: Calculo del número de llamadas MCPTT en función de PRB / MCS

I_MCS	Modulación	I_TBS	Nº PRB / MCS	Número Llamadas
0	QPSK	0	22	90
1	QPSK	1	17	117
2	QPSK	2	14	142
3	QPSK	3	11	181
4	QPSK	4	9	222
5	QPSK	5	7	285
6	QPSK	6	6	333
7	QPSK	7	5	400
8	QPSK	8	5	400
9	QPSK	9	4	500
10	16QAM			
11	16QAM	10	4	500
12	16QAM	11	3	666
13	16QAM	12	3	666
14	16QAM	13	3	666
15	16QAM	14	3	666
16	16QAM 64QAM	15	2	1.000
17				
18	64QAM	16	2	1.000
19	64QAM	17	2	1.000
20	64QAM	18	2	1.000
21	64QAM	19	2	1.000
22	64QAM	20	2	1.000
23	64QAM	21	2	1.000
24	64QAM	22	2	1.000
25	64QAM	23	2	1.000
26	64QAM	24	1	2.000
27	64QAM	25	1	2.000
28	64QAM	26	1	2.000
28A	64QAM	26A	1	2.000

Al comparar los valores de la tabla obtenidos, con los de la Tabla 26, se observa como el número de llamadas del cálculo tradicional es más optimista que el obtenido a partir de los PRB que son necesarios para transmitir en un MCS determinado el paquete MCPTT de 584 bits. En la siguiente tabla se puede ver una comparativa del número de llamadas MCPTT que se pueden realizar simultáneamente en un eNB dependiendo del MCS que les haya sido asignado por este a los usuarios.

Tabla 29: Diferencia en el número de llamadas (Método tradicional vs PRB/MCS)

L_MCS	Número Llamadas Cálculo Tradicional	Número Llamadas PRB / MCS	Diferencia Número Llamadas	% Diferencia Número Llamadas
0	95	90	5	5,26%
1	124	117	7	5,65%
2	156	142	14	8,97%
3	196	181	15	7,65%
4	247	222	25	10,12%
5	300	285	15	5,00%
6	352	333	19	5,40%
7	418	400	18	4,31%
8	483	400	83	17,18%
9	542	500	42	7,75%
10				
11	601	500	101	16,81%
12	679	666	13	1,91%
13	784	666	118	15,05%
14	871	666	205	23,54%
15	970	666	304	31,34%
16	1.047	1.000	47	4,49%
17				
18	1.125	1.000	125	11,11%
19	1.256	1.000	256	20,38%
20	1.343	1.000	343	25,54%
21	1.500	1.000	500	33,33%
22	1.605	1.000	605	37,69%
23	1.747	1.000	747	42,76%

24	1.885	1.000	885	46,95%
25	1.963	1.000	963	49,06%
26	2.111	2.000	111	5,26%
27	2.184	2.000	184	8,42%
28	2.581	2.000	581	22,51%
28A	2.280	2.000	280	12,28%

La diferencia se hace mucho más significativa entre los MCS del 20 al 25, ambos incluidos.

Si todos los usuarios se encontraran en la mejor cobertura **MCS=28**, el número máximo de llamadas MCPTT en base al cálculo de PRBs necesarios por MCS sería de **2.000 llamadas** y si los usuarios se encontrarán en la peor zona de cobertura de la celda **MCS=0**, sería de **90 llamadas**.

En una situación normal, **todos los usuarios no se encuentran siempre en el mismo MCS**, se encontrarán distribuidos a lo largo de los diferentes MCS de la celda y se estarán moviendo a lo largo de ellos en función de diferentes condiciones de propagación, desvanecimientos etc. Esa evolución dependerá del modelo de movilidad que represente de forma fehaciente como los usuarios se distribuyen dentro de la celda en una situación normal -estática- o ante una emergencia.

En esta tesis se ha generalizado ese comportamiento y se ha analizado el aumento o disminución en el número de llamadas MCPTT en función de los diferentes MCS que obtienen los usuarios al desplazarse dentro de la celda.

Consideraciones particulares que se han adoptado en la simulación de este evento concreto

1. Se han definido **35 rangos de MCS**, dentro de los cuales se pueden encontrar los usuarios.
2. Se han considerado, **2.000 PRB** disponibles en un eNB 20 Mhz SISO cada 20 ms.
3. Para un cálculo promedio, se han seleccionado aleatoriamente los MCS de cada llamada dentro de los valores mínimo y máximo definidos por cada rango.
4. Cada llamada MCPTT ha consumido un número PRBs dependiendo del MCS del usuario que la establezca que se ha restado al número de PRBs disponibles para las siguientes llamadas MCPTT.
5. Se ha repetido este proceso, hasta que el número de PRB ha sido cero en cada ejercicio de *scheduling*, o hasta que ha sido tan pequeño que ese rango no se puede establecer ninguna llamada MCPTT. El número de llamadas establecidas se han totalizado por rango.
6. Se ha repetido el experimento **1.000 veces por cada rango**.

7. Se ha obtenido una tabla que contiene el número total de llamadas MCPTT establecidas por cada uno de los 35 rangos definidos en cada una de las 1.000 repeticiones analizadas.

Se ha elegido un histograma 3D para representar cómo se distribuye el número de llamadas MCPTT a lo largo de los MCS de la celda a la que da cobertura el eNB de estudio.

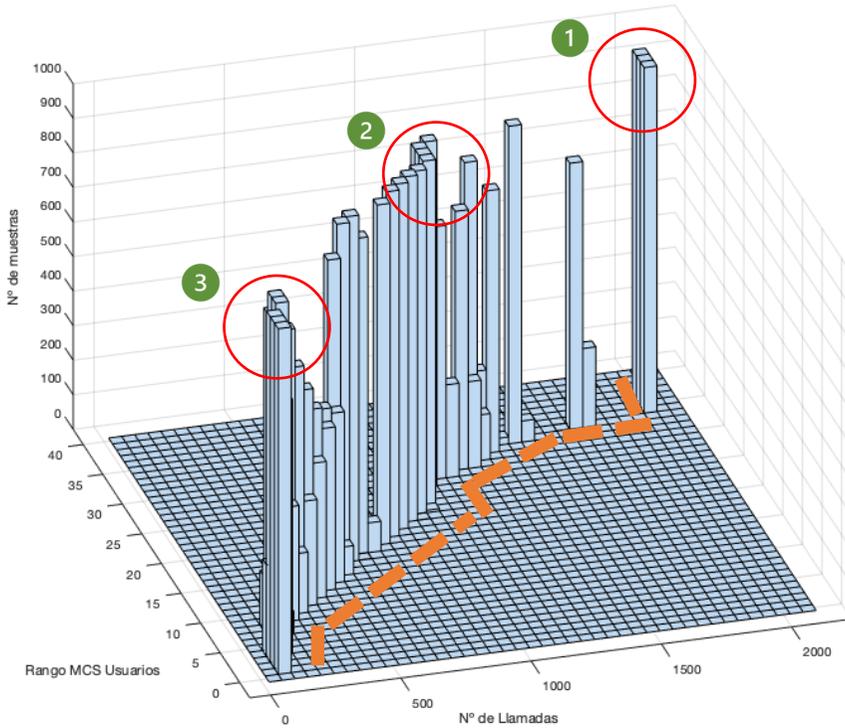


Figura 53: Distribución número de llamadas 2000 PRBS – Tamaño paquete MCPTT 584 bits

En la tabla siguiente, se muestran la relación de intervalos que se han definido en el experimento. Se han definido 35 rangos y por cada uno de ellos se ha definido un límite mínimo y otro máximo.

Tabla 30: Rangos definidos para el experimento

Rango	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R <sub>MIN</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	3	4	5	6	7	8
R <sub>MAX</sub>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Rango	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31
R <sub>MIN</sub>	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
R <sub>MAX</sub>	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	28	28	28

Rango	32	33	34	35
R <sub>MIN</sub>	25	26	27	28
R <sub>MAX</sub>	28	28	28	28

Se analizan a continuación estos mismos resultados, pero a través de un histograma de mosaico bivariado, que permitirá determinar los rangos en las que se han establecido el mayor número de llamadas.

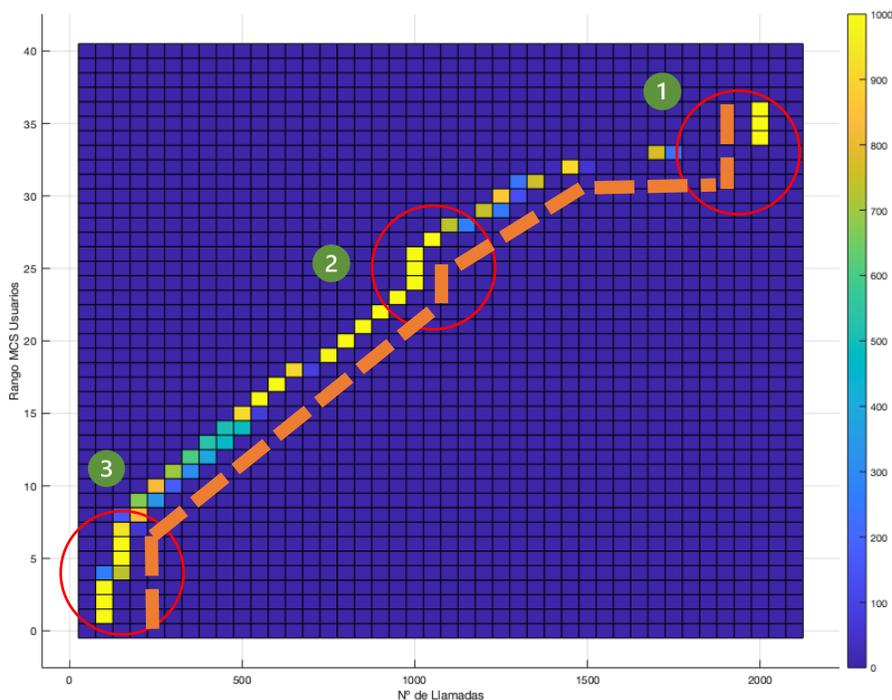


Figura 54: Histograma de mosaico bivariado 2.000 PRB

Se puede observar:

Una mayor frecuencia en los extremos: **(3 del gráfico)** rango [0-3] y **(1 del gráfico)** rango [33-35] en la parte central, **(2 del gráfico)** rango [19-26] aunque lo que cambia es el número de llamadas: entre [50-100] en los intervalos inferiores, de [2.000] en los intervalos superiores. mientras que el centro de los rangos está entre [750 – 1.050] llamadas MCPTT.

La concentración del número de llamadas se ve ilustrado en la Figura 54, a través del color amarillo intenso. En la siguiente se analiza en detalle cada una de las tres áreas indicadas en la Figura 53 y Figura 54.

Tabla 31: Relación MCS/PRB/CALL de la simulación 2.000 PRBS

Interval	Range	UE MCS		PRB / UE / MCS		CALL	
		R <sub>MIN</sub>	R <sub>MAX</sub>	PRB <sub>MIN</sub>	PRB <sub>MAX</sub>	CALL <sub>MAX</sub>	CALL <sub>MIN</sub>
3 [0-3]	0	0	0	22	22	90	90
	1	0	1	22	17	90	117
	2	0	2	22	14	90	142
	3	0	3	22	11	90	181
2 [24-35]	23	16	23	2	2	1.000	1.000
	24	17	24	2	2	1.000	1.000
	25	18	25	2	2	1.000	1.000
	26	19	26	2	1	1.000	2.000
1 [32-35]	32	25	28	2	1	1.000	2.000
	33	26	28	1	1	2.000	2.000
	34	27	28	1	1	2.000	2.000
	35	28	28	1	1	2.000	2.000

El **intervalo 3** representa el desplazamiento de los usuarios en el extremo de la celda. La simulación comienza con todos los usuarios en el extremo de la celda MCS=0, donde el máximo de llamadas es de 90 y los usuarios se van desplazando desde el **MCS 0 al 3**, pero siempre considerando usuarios en el **MCS 0**, lo que supone un consumo muy elevado de PRB (22), limitando el número máximo de llamadas. El **intervalo 1**, representa el escenario más optimista, todos los usuarios están en la mejor zona de cobertura lo que les permite consumir muy pocos PRBs (1 o 2) y por tanto permiten establecerse un gran número de llamadas. El **intervalo 2**, es quizás el más realista de los escenarios, los usuarios están entre el **MCS 16 y el 26**, el número de PRB que requieren los usuarios en este MCS es 2 y esos permite una media de 1.000 llamadas dentro de ese intervalo.

El mosaico bivariado Figura 54, representa el análisis cuantitativo del número de llamadas / intervalo. En nuestro caso, el color representa la frecuencia de las observaciones. Es decir, cuantas veces de las 1.000 simulaciones realizadas por intervalo tienen un número de llamadas concreto. Cuando la distribución de los usuarios por los MCS es mayor la frecuencia de las coincidencias por simulación disminuyen y por el ello, el color es menos intenso. En color naranja se ha representado como se distribuyen el número de llamadas a lo largo de los intervalos.

El impacto de los usuarios a los que el eNB les ha asignado un **MCS bajo** en el conjunto de llamadas MCPTT totales del eNB es muy importante. Se debe recordar cómo un único usuario en MCS=0 requiere de 22 PRB de los 100 PRBs disponibles en cada TTI. Cuando se produce una situación de emergencia se concentran una gran cantidad de usuarios en una misma celda y es muy aventurado asumir que todos vayan a tener el mismo MCS. Esto dependerá de la ubicación del eNB y de la

localización de la emergencia dentro de la celda. Un paquete de voz MCPTT de **584 bits** se envía cada 20 ms. Dependiendo del MCS que el eNB haya asignado al usuario, se desaprovecharán un número mayor de PRBs en cada transmisión. En la Tabla 32 se analiza por MCS el número de PRBs que se desaprovechan cada 20 ms.

Tabla 32: Número PRBs no usados cada 20 ms

MCPTT	L_TBS	NPRB	Bits	Bits No usados	20 ms	PRB No Usados
584	0	22	600	16	320	0
	1	17	600	16	320	0
	2	14	616	32	640	0
	3	11	616	32	640	0
	4	9	632	48	960	1
	5	7	600	16	320	0
	6	6	600	16	320	0
	7	5	584	0	0	0
	8	5	680	96	1920	2
	9	4	616	32	640	0
	10	4	680	96	1920	2
	11	3	584	0	0	0
	12	3	680	96	1920	2
	13	3	744	160	3200	3
	14	3	840	256	5120	5
	15	2	600	16	320	0
	16	2	632	48	960	1
	17	2	696	112	2240	2
	18	2	776	192	3840	4
	19	2	840	256	5120	5
	20	2	904	320	6400	6
	21	2	1000	416	8320	7
	22	2	1064	480	9600	8
	23	2	1128	544	10880	9
	24	1	584	0	0	0
	25	1	616	32	640	0
	26	1	712	128	2560	3
	26A	1	632	48	960	1

### 5.4.3.2 CÁLCULO ENVIANDO 2 PAQUETES MCPTT CADA 40 MS

Tal y como hemos indicado a lo largo de esta tesis doctoral el códec de audio que emplea MCPTT es AMR-WB 12.65 kbps (Adaptive Multi Rate -Wide Band Codec – 12.65) y transmite una trama MCPTT cada 20 ms. Se van a repetir los cálculos realizados para sección anterior, transmitiendo dos tramas cada 40 ms. Esto es, en el eNB se esperará a disponer de dos paquetes MCPTT (1.168 bits) en el buffer para transmitirlos intentando aprovechar mejor los recursos de red, intentando optimizar el llenado de los PRB. Cabe señalar que cada 40 ms se dispone de 4.000 PRBs en un eNB 20 Mhz SISO.

Lo primero que se ha realizado ha sido generar, partir de la Tabla 7.1.7.2.1.-1 (version 13.0.0 Release 13) Pág. [65 -70]. la tabla, que indique el número de PRBs que se necesitan para cada MCS.

Tabla 33: Número PRBs por MCS para 2 paquetes MCPTT

I_TBS	NPRB	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	43	16	32	56	88	120	152	176	208	224
1	33	24	56	88	144	176	208	224	256	328
2	27	32	72	144	176	208	256	296	328	376
3	21	40	104	176	208	256	328	392	440	504
4	17	56	120	208	256	328	408	488	552	632
5	14	72	144	224	328	424	504	600	680	776
6	12	328	176	256	392	504	600	712	808	936
7	10	104	224	328	472	584	712	840	968	1096
8	9	120	256	392	536	680	808	968	1096	1256
9	8	136	296	456	616	776	936	1096	1256	1416
10	7	144	328	504	680	872	1032	1224	1384	1544
11	6	176	376	584	776	1000	1192	1384	1608	1800
12	6	208	440	680	904	1128	1352	1608	1800	2024
13	5	224	488	744	1000	1256	1544	1800	2024	2280
14	5	256	552	840	1128	1416	1736	1992	2280	2600
15	4	280	600	904	1224	1544	1800	2152	2472	2728
16	4	328	632	968	1288	1608	1928	2280	2600	2984
17	4	336	696	1064	1416	1800	2152	2536	2856	3240
18	4	376	776	1160	1544	1992	2344	2792	3112	3624
19	3	408	840	1288	1736	2152	2600	2984	3496	3880
20	3	440	904	1384	1864	2344	2792	3240	3752	4136
21	3	488	1000	1480	1992	2472	2984	3496	4008	4584
22	3	520	1064	1608	2152	2664	3240	3752	4264	4776
23	3	552	1128	1736	2280	2856	3496	4008	4584	5160
24	2	584	1192	1800	2408	2984	3624	4264	4968	5544
25	2	616	1256	1864	2536	3112	3752	4392	5160	5736
26	2	712	1480	2216	2984	3752	4392	5160	5992	6712
26A	2	632	1288	1928	2600	3240	3880	4584	5160	5992

A partir de esta tabla, y aplicando el proceso de cálculo en función de los PRBs que consumen los 2 paquetes MCPTT, se han obtenido el número de llamadas MCPTT suponiendo todos los usuarios en el mismo MCS.

Tabla 34: Calculo llamadas MCPTT transmitiendo 2 paquetes MCPTT cada 40 ms

I_MCS	Modulación	I_TBS	Nº PRB / MCS	Número Llamadas
0	QPSK	0	43	186
1	QPSK	1	33	242
2	QPSK	2	27	296
3	QPSK	3	21	380
4	QPSK	4	17	470
5	QPSK	5	14	571
6	QPSK	6	12	666

7	QPSK	7	10	800
8	QPSK	8	9	888
9	QPSK	9	8	1.000
10	16QAM		8	1.000
11	16QAM	10	7	1.142
12	16QAM	11	6	1.333
13	16QAM	12	6	1.333
14	16QAM	13	5	1.600
15	16QAM	14	5	1.600
16	16QAM	15	4	2000
17	64QAM		4	2.000
18	64QAM	16	4	2000
19	64QAM	17	4	2.000
20	64QAM	18	4	2.000
21	64QAM	19	3	2.666
22	64QAM	20	3	2.666
23	64QAM	21	3	2.666
24	64QAM	22	3	2.666
25	64QAM	23	3	2.666
26	64QAM	24	2	4.000
27	64QAM	25	2	4.000
28	64QAM	26	2	4.000
28A	64QAM	26A	2	4.000

Se ha generado el histograma 3D, manteniendo las mismas consideraciones indicadas anteriormente salvo el punto 2, que se sustituye por esta nueva consideración:

- Se han considerado, 4.000 PRB disponibles en un eNB 20 Mhz SISO cada 40 ms.
- 2 paquetes MCPTT (584 x 2 = 1.168 bits).

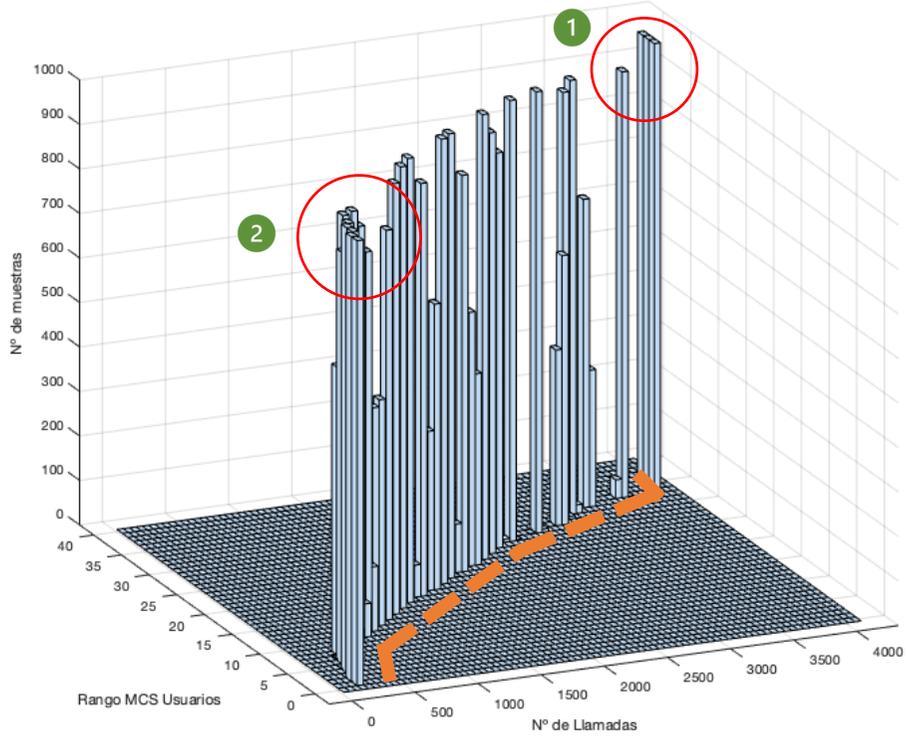


Figura 55: Distribución número de llamadas 4000 PRBS – Tamaño paquete 2 x MCPTT = 1.168 bits

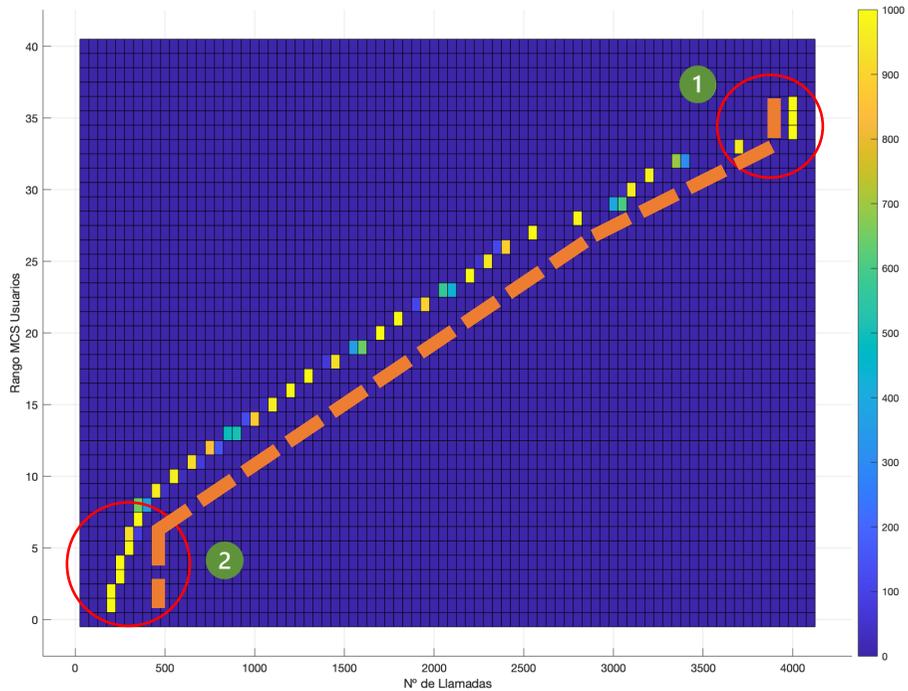


Figura 56: Histograma de mosaico bivariado 4.000 PRB

De la misma manera, que se ha realizado anteriormente, para 2.000 PRB ahora para 4.000 PRB se presenta los resultados a través de un histograma de mosaico bivariado, que permite determinar los rangos en las que se han establecido el mayor número de llamadas. Los colores de este mosaico nos indica la frecuencia de las observaciones del número de llamadas por rango.

Se puede observar, una mayor frecuencia en los extremos: **(2 del gráfico)** rango [1-5] y **(1 del gráfico)** el número de llamadas es de [150-450] en los intervalos inferiores y de [4.000] en los intervalos superiores, mientras que el centro de los rangos el número de llamadas está más distribuidas que en la simulación realizada para los 2.000 PRBs

De forma general la frecuencia de llamadas se distribuye de forma bastante distribuida a lo largo de los diferentes rangos. Desde el punto de vista de las llamadas totales, se puede observar como en los MCS iniciales [0-8] y en los centrales del [11-15] aumentan respecto a transmitir un paquete MCPTT para 20 ms.

En los intervalos extremos es donde se concentran el mayor número de coincidencias.

Tabla 35: Relación MCS/PRB/CALL de la simulación 4.000 PRBs

Interval	Range	UE MCS		PRB / UE / MCS		CALL	
		R <sub>MIN</sub>	R <sub>MAX</sub>	PRB <sub>MIN</sub>	PRB <sub>MAX</sub>	CALL <sub>MAX</sub>	CALL <sub>MIN</sub>
2 [0-3]	0	0	0	43	43	90	90
	1	0	1	43	33	90	117
	2	0	2	43	27	90	142
	3	0	3	43	21	90	181
1 [32-35]	32	25	28	3	2	2.666	4.000
	33	26	28	2	2	4.000	4.000
	34	27	28	2	2	4.000	4.000
	35	28	28	2	2	4.000	4.000

Al igual que en la simulación anterior, el mosaico bivariado Figura 56, representa el análisis cuantitativo del número de llamadas / intervalo.

La intensidad del color representa la frecuencia de las observaciones de las 1.000 simulaciones. Al igual que las Figura 54 y Figura 55, la línea naranja representa las distribuciones de las llamadas por los intervalos definidos. Igual que en la simulación realizada para 2.000 PRB, la distribución es exponencial, aunque en este caso, mucho más homogénea y mejor distribuida.

Inicialmente esta tendencia debería estar relacionada con un mejor aprovechamiento de los recursos radio. En la Tabla 36 se ha calculado el número

de PRBs que se desaprovechan cada 40 ms y en la Tabla 37 se ha realizado la comparativa, entre ambas simulaciones y así determinar en las condiciones en las que se ha realizado las simulaciones, cuales de las dos es más optima.

Tabla 36: Número PRBs no usados cada 40 ms

MCPTT	I_TBS	NPRB	Bits	Bits No usados	20 ms	PRB No Usados
1168	0	43	1.192	24	480	0
	1	33	1.192	24	480	0
	2	27	1.192	24	480	0
	3	21	1.224	56	1.120	0
	4	17	1.192	24	480	0
	5	14	1.224	56	1.120	0
	6	12	1.224	56	1.120	0
	7	10	1.224	56	1.120	0
	8	9	1.256	88	1.760	0
	9	8	1.256	88	1.760	0
	10	7	1.224	56	1.20	0
	11	6	1.192	24	480	0
	12	6	1.352	184	3.680	2
	13	5	1.256	88	17.60	0
	14	5	1.416	248	4.960	3
	15	4	1.224	56	1.120	0
	16	4	1.288	120	2.400	1
	17	4	1.416	248	49.60	3
	18	4	1.544	376	7.520	4
	19	3	1.288	120	2..400	1
	20	3	1.384	216	4.320	2
	21	3	1.480	312	6.240	3
	22	3	1.608	440	88.00	4
	23	3	1.736	568	11.360	6
	24	2	1.192	24	480	0
	25	2	1.256	88	1.760	0
	26	2	1.480	312	6.240	3
	26A	2	1.288	120	2.400	1

En la siguiente tabla se va a comparar los PRBs no usados transmitiendo cada 20 ms o 40 ms. La columna "PRB mejora" representa el número de PRB que se gana en la segunda simulación respecto transmitir con la frecuencia estándar de 20 ms.

Tabla 37: Comparativa 2.000 PRB vs 4.000 PRB

L_TBS	No Usados 2.000 PRB	No Usados 4.000 PRB	PRB Mejora
0	0	0	0
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	1	0	1
5	0	0	0
6	0	0	0
7	0	0	0
8	2	0	2
9	0	0	0
10	2	0	2
11	0	0	0
12	2	2	0
13	3	0	3
14	5	3	2
15	0	0	0
16	1	1	0
17	2	3	0
18	4	4	0
19	5	1	4
20	6	2	4
21	7	3	4
22	8	4	4
23	9	6	3
24	0	0	0
25	0	0	0
26	3	3	0
26A	1	1	0

Las conclusiones que se obtienen después de realizar los cálculos transmitiendo un paquete MCPTT cada 20 ms o juntando 2 paquetes MCPTT y transmitirlos cada 40 ms son:

- Solo para el MCS=17 es peor el uso que se hace de los PRB en el supuesto de transmitir 2 paquetes MCPTT cada 40 ms [se desperdicia 1 PRB].
- Es muy interesante observar en la Tabla 37, como en los MCS bajos 4, 8, 10, se mejora el uso de los PRBs 1, 2 y 2 PRBs respectivamente.
- Los datos presentados indican que resulta mucho más eficiente la transmisión de 2 paquetes MCPTT cada 40 ms en lugar de 1 paquete MCPTT cada 20 ms. Se optimiza el uso de los recursos de red y se mejora en el número total de llamadas MCPTT que se pueden gestionar en un eNB de 20 MHz con un sistema de antenas SISO. El "único" problema asociado es el retardo adicional de 20ms.
- La mayor mejora, se obtiene en los MCS 19, 20, 21 y 22 mejorando 4 PRB en 40 ms

#### 5.4.4 CÁLCULO BASADO EN LA LIMITACIÓN DEL PDCCH

Como ya se ha comentado previamente en la sección 4.3, el PDCCH informa al UE sobre la ubicación de la información de los datos dentro del canal PDSCH. Esto quiere decir que por mucha capacidad que tenga la red para transportar datos, si esa información no está indexada en los tres símbolos que se reserva por trama LTE cada TTI, ésta no es localizable por el usuario y por tanto no se puede considerar información útil.

Por tanto, no se puede centrar el cálculo únicamente en la capacidad bruta (en términos de PRBs en cada trama/TTI) para realizar el cálculo del número de llamadas MCPTT. En la sección 4.3, se ha detallado el funcionamiento del PDDCH y la cantidad de recursos radio que consume la información de control necesaria para localizar dentro de cada trama la información de datos: en nuestro caso los paquetes MCPTT se transmiten cada 20 ms.

Este último método de cálculo aportará un cálculo mucho más ajustado respecto al número máximo de llamadas MCPTT por eNB. Al igual que los cálculos anteriores, se considera red LTE de 20 MHz con un sistema de antenas SISO.

Tabla 38: Cálculo de N° CCE disponibles por ancho de banda [1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz]

	1.4 MHz	3 MHz	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
N° Subportadoras / RB	12	12	12	12	12	12
N° RB	6	15	25	50	75	100
RE / Símbolo	72	180	300	600	900	1.200
N° Símbolos	3	3	3	3	3	3
2RS / Símbolo 1 (SISO)	12	30	50	100	150	200
PCFICH / Símbolo 1	16	16	16	16	16	16
PHICH / Símbolo 1	12	24	48	84	120	156
Símbolo 1	40	70	114	200	286	372
Símbolo 2	0	0	0	0	0	0
Símbolo 3	0	0	0	0	0	0
PDCCH	176	470	786	1.600	2.414	3.228
N° CCE disponibles	4	13	21	44	67	89
TPC (CCE)	8	8	8	8	8	8
N° CCE disponibles	-4	5	13	36	59	81
Muy buenas (1 CCE)	-4	5	13	36	59	81
Normales (2 CCE)	-2	2	6	18	29	40
Malas (4 CCE)	-1	1	3	9	15	20
Muy malas (8 CCE)	0	0	1	4	7	10

La sobrecarga del Símbolo 1 se calcula como la suma de Número de RB \* 2 (RS) + PCFICH + PHICH, en el caso de 20 MHz se obtiene  $(100 * 2) + 16 + 156 = 372$  RE. El número total de REs por PDCCH (3 símbolos) = RE/símbolo – RE empleados en la sobrecarga del símbolo 1 =  $3600 - 372 = 3.228$  RE. Por tanto, el número de CCE disponibles para PDCCH =  $3.228 \text{ RE} / 36 = 89$  CCE.

Las cuatro últimas filas de la Tabla 38: Cálculo de N° CCE disponibles por ancho de banda [1.4, 3, 5, 10, 15, 20 MHz], nos indica el número de usuarios que es posible gestionar en cada TTI, dependiendo de las condiciones de radio en la que se encuentren estos. En el mejor de los casos solo es necesario emplear 1 Control Channel Element (CCE), es decir, 9 Resource Element Group (REG), por tanto, el número de usuarios disponibles sería de 81 por cada TTI. En entornos reales, los usuarios en el mejor de los casos se consideran que están en condiciones normales de red, disminuyendo la disponibilidad de 81 a 40 por cada TTI.

Tabla 39: Equivalencia MCS con las condiciones de radio

I_MCS		Condiciones de Red
MCS <sub>MIN</sub>	MCS <sub>MAX</sub>	
0	6	Muy malas
7	15	Malas
16	25	Normales
26	28A	Muy buenas

Si todos los usuarios se encuentran **en las mejores condiciones radio** (color verde), habría teóricamente 89 usuarios disponibles en cada TTI es decir **1.780** cada 20 ms. Sin embargo, en la práctica hay que emplear comandos TPC (control de potencia de transmisión) que requieren 8 CCE, con lo que finalmente se dispone de 81 usuarios cada TTI o **1.620** cada 20 ms.

Sin embargo, este dato sigue siendo demasiado optimista y lo normal es que los usuarios se encuentren en diversas condiciones de radio y que se requiera al menos de 2 CCE por cada usuario en lugar de un CCE si se encontraran en las mejores condiciones de radio. Con estas condicionantes se obtienen 81 CCEs disponibles / 2 CCEs por usuario => 40 usuarios cada TTI o **800** usuarios por cada 20 ms.

La primera conclusión que se obtiene comparando con el cálculo, suponiendo los PRB disponibles es que se tiene 200 llamadas MCPTT menos por cada 20 ms, en la parte central de los MCS entre el 18 y el 25. En la siguiente tabla, se va a comparar los valores obtenidos considerando para el cálculo, los PRBs disponibles y la limitación debido al PDCCH

La Tabla 38, contiene el cálculo del número de usuarios que se pueden gestionar en función de las condiciones de red: muy buenas, normales, malas y muy malas. La Tabla 39, contiene las equivalencias entre el MCS que ha asignado el eNB a cada usuario y las condiciones de red, tal y como han sido consideradas en el presente estudio. Pudiendo generar la Tabla 40

Tabla 40: Comparativa número de llamadas MCPTT dependiendo del calculo empleado

I_MCS	Modulación	Llamadas Throughput de pico	Llamadas PRB	Llamadas PDCCH
0	QPSK	95	90	200
1	QPSK	124	117	200
2	QPSK	156	142	200
3	QPSK	196	181	200

4	QPSK	247	222	200
5	QPSK	300	285	200
6	QPSK	352	333	200
7	QPSK	418	400	405
8	QPSK	483	400	405
9	QPSK	542	500	405
10	16QAM			
11	16QAM	601	500	405
12	16QAM	679	666	405
13	16QAM	784	666	405
14	16QAM	871	666	405
15	16QAM	970	666	405
16	16QAM	1.047	1.000	800
17	64QAM			
18	64QAM	1.125	1.000	800
19	64QAM	1.256	1.000	800
20	64QAM	1.343	1.000	800
21	64QAM	1.500	1.000	800
22	64QAM	1.605	1.000	800
23	64QAM	1.747	1.000	800
24	64QAM	1.885	1.000	800
25	64QAM	1.963	1.000	800
26	64QAM	2.111	2.000	1.620
27	64QAM	2.184	2.000	1.620
28	64QAM	2.581	2.000	1.620
28A	64QAM	2.280	2.000	1.620

En esta tabla, se puede observar como para los primeros MCS, concretamente, del 0 al 3, se pueden planificar más llamadas MCPTT que recursos de red se encuentran disponibles. Por tanto, el número de llamadas coincidirán con el número de llamadas PRB.

La siguiente figura ilustra gráficamente cuáles de los cálculos suponen finalmente una limitación en la capacidad efectiva de transmisión de llamadas MCPTT concurrentes usando portadoras unicast en función de un hipotético MCS común para todos esos usuarios.

### Limitación de Llamadas MCPTT por PDCCH

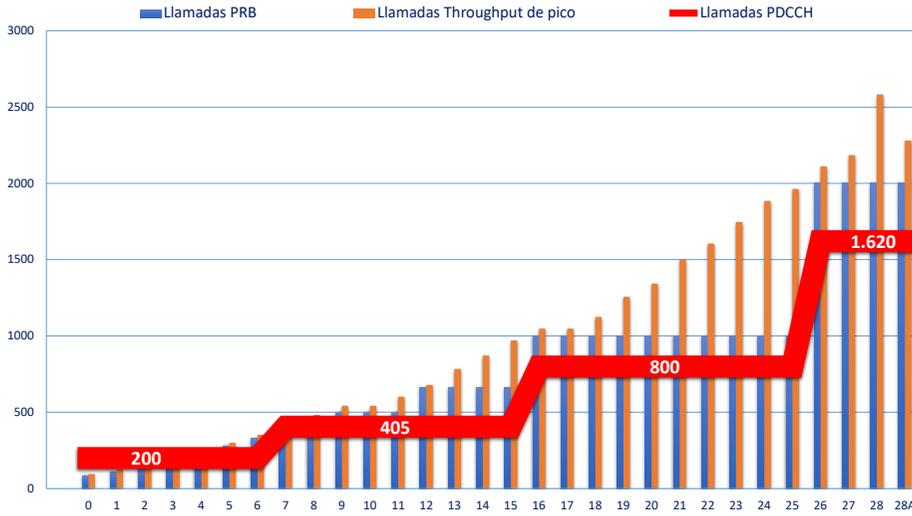


Figura 57: Número de llamadas MCPTT / MCS cada 20 ms

En la Tabla 41, se detalla el número de llamadas MCPTT que se pueden establecer, dependiendo del MCS en el que se encuentren, considerando la limitación del PDCCH.

Tabla 41: Comparativa número de llamadas MCPTT PDCCH vs PRB

L_MCS	Modulación	Llamadas Throughput de pico	Llamadas PRB	Llamadas PDCCH	Llamadas MCPTT
0	QPSK	95	90	200	90
1	QPSK	124	117	200	117
2	QPSK	156	142	200	142
3	QPSK	196	181	200	181
4	QPSK	247	222	200	200
5	QPSK	300	285	200	200
6	QPSK	352	333	200	200
7	QPSK	418	400	405	400
8	QPSK	483	400	405	400
9	QPSK	542	500	405	405
10	16QAM				
11	16QAM	601	500	405	405
12	16QAM	679	666	405	405
13	16QAM	784	666	405	405
14	16QAM	871	666	405	405

15	16QAM	970	666	405	405
16	16QAM	1.047	1.000	800	800
17	64QAM				
18	64QAM	1.125	1.000	800	800
19	64QAM	1.256	1.000	800	800
20	64QAM	1.343	1.000	800	800
21	64QAM	1.500	1.000	800	800
22	64QAM	1.605	1.000	800	800
23	64QAM	1.747	1.000	800	800
24	64QAM	1.885	1.000	800	800
25	64QAM	1.963	1.000	800	800
26	64QAM	2.111	2.000	1.620	1.620
27	64QAM	2.184	2.000	1.620	1.620
28	64QAM	2.581	2.000	1.620	1.620
28A	16QAM	2.280	2.000	1.620	1.620

Al analizar este resumen, se observa la disminución de llamadas en el cálculo de MCPTT en un eNB (20 MHz – SISO) al considerar el PDCCH.

#### 5.4.5 CONCLUSIONES TRAS LOS CÁLCULOS

Una vez, realizados los cálculos numéricos para cada uno de los métodos definidos: tradicional, basado en los PRB por MCS y en la limitación del PDCCH se han obtenido las siguientes conclusiones:

- El cálculo tradicional nos ofrece un primer orden de magnitud respecto al número máximo de llamadas MCPTT por eNB. Fija el límite máximo de **2.581** llamadas para el MCS = 28.
- Se han calculado los PRBs que consume un usuario al transmitir un paquete MCPTT de 584 bits en cada TTI, así como el número de llamadas MCPTT posibles con los recursos de red disponibles. Para MCS=28, atendiendo a los recursos de red y a su capacidad se puede fijar el número máximo en **2.000**.
- Se ha aplicado la lógica de gestión de red a la transmisión de los paquetes de red y se ha demostrado numéricamente como no es posible direccionar tantos paquetes MCPTT por TTI. Por tanto, quedan recursos de radio sin emplear porque no pueden ser asignados a ningún usuario.
- Se ha logrado una mejora del aprovechamiento de los PRBs, juntando dos paquetes MCPTT y transmitiéndolos cada 40 ms en lugar de cada 20 ms.
- El número máximo teórico de llamadas MCPTT en una eNB LTE 20Mhz – SISO es de **1.620 llamadas MCPTT** concurrentes para el caso ideal -pero poco realista- de todos los usuarios en el mejor MCS.

- En el peor escenario, donde los UE tengan un **MCS entre 0 y 3**, se observa que el PDCCH podría gestionar entre **80-200 llamadas MCPTT**. Pero sólo hay recursos de red para **181 llamadas MCPTT** en el caso de **MCS=3**.
- A partir del **MCS=4** el número de llamadas MCPTT bajo la limitación PDCCH es menor a las capacidades reales, en cuanto, a recursos de red disponibles. Esto quiere decir, que se quedan recursos sin aprovechar por la imposibilidad de direccionar a tantos UE en el mismo TTI.
- Hasta el **MCS=15** el **número de llamadas MCPTT son 405**, pero ya en **MCS=16** se produce un salto a **800 llamadas MCPTT**, que se mantienen hasta el **MCS=25**. Este es el rango, donde deberían estar el mayor número de UE ya que es el más óptimo. **MCS=26-28** son condiciones ideales de red y es complicado que el eNB asigne este rango a los UE.

#### 5.4.6 TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN CAPACIDAD/COBERTURA

Una vez, se ha obtenido el número máximo teórico de llamadas MCPTT, se ha analizado un conjunto de técnicas de optimización que ya se emplean en VoLTE sobre redes LTE y podrían ser válidas para MCPTT.

##### Recepción discontinua (DRX)

Esta técnica propiamente dicha, no optimiza la capacidad o la cobertura. El método DRX es utilizado en comunicaciones móviles para conservar la batería del terminal. Si se ha deshabilitado la opción DRX, el UE monitorizará el PDCCH en cada subtrama y si se ha habilitado, el UE monitorea el PDCCH durante un tiempo predefinido y luego se pone en suspensión.

En llamadas MCPTT se genera un paquete de datos cada 20 ms, por esta razón, lo normal es que su DRX sea de 20ms. El UE puede despertarse cada 20 ms y luego volver a dormirse. En la red comercial, por ejemplo, los dispositivos de Apple requieren un DRX de 40 ms por lo que la red LTE híbrida probablemente ya esté configurada, en la mayoría de los casos, con un ciclo de 40 ms. Se debe recordar que el Delay Budget de MCPTT es de 75 ms.

En la Figura 58, se explica de forma gráfica el funcionamiento de DRX aplicado a las llamadas MCPTT. Si no hay DRX el paquete puede ser transmitido desde el buffer del eNB al UE en cualquier momento. Los bloques representados en verde muestran la oportunidad de programación. Si la primera o la segunda transmisión no tienen éxito hay muchas oportunidades para retransmitir el paquete (dependiendo del umbral máximo de retransmisión configurado en el HARQ).

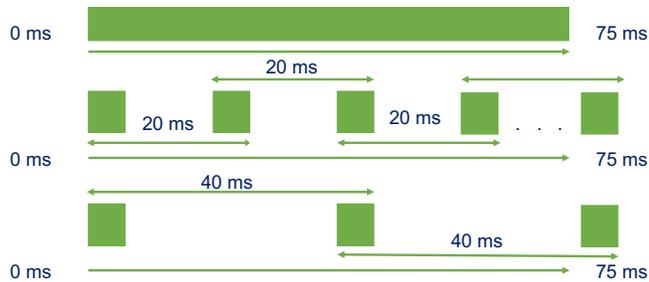


Figura 58: MCPTT & DRX

Considérese un escenario, donde se tenga un ciclo DRX de 20 ms. En este caso, se dispondrá de 3, 4 oportunidades de programación para que el UE sea planificado. El UE tiene una buena probabilidad de obtener el paquete en 75 ms. Sin embargo, para DRX 40 ms, tiene 1,2 oportunidades de programación para que el UE reciba el paquete en 75 ms. **Esto hace muy importante que la primera transmisión se realice correctamente, porque el paquete podría perderse.**

Si el UE no puede decodificar el paquete en el PDSCH, el UE enviará un NACK y el eNB retransmitirá el paquete después de 8 ms. Si el UE se despierta durante 10 ms y luego duerme durante 30 ms, tendrá un ciclo de 40 ms.

Ahora, considérese el escenario, donde el UE se despierta y en ese momento, el eNB envía un paquete MCPTT al UE. Sin embargo, el UE no estaba monitorizando el canal PDCCH y por tanto no tiene información para decodificar el PDCCH. En este caso, el UE no enviará ningún NACK ya que el UE ni siquiera sabe que se envió un paquete al UE. El eNB considerará esto como un DTX y reenviará el paquete después de 8 ms. Pero si el segundo paquete tampoco se recibe debido a PDCCH, el UE volverá a dormir durante 30 ms y el eNB no podrá programar ese paquete. [78]

Si el tiempo de duración de conexión es de 5 ms y el tiempo de suspensión es de 35 ms, entonces el UE solo tendrá una oportunidad de recibir el PDCCH con éxito para recibir el paquete. Por lo tanto, cuanto mayor sea el tiempo de suspensión y menor el tiempo de duración activada, mayor será la probabilidad de pérdida de paquetes, pero reducirá el consumo de batería.



Figura 59: MCPTT & Tiempo de duración de la comunicación

Además del PDCCH, el PDSCH también debe ser más robusto para el tráfico MCPTT. Esto se puede hacer usando un MCS más bajo para MCPTT. Por ejemplo, si el usuario está usando 64QAM para datos, y si hay un paquete MCPTT, entonces el usuario puede ser programado en 16QAM para ese TTI para que el paquete MCPTT tenga un BLER más bajo y una mayor probabilidad de decodificación exitosa.

### TTI Bundling

El propósito de TTI Bundling es mejorar la cobertura del borde de la celda y la recepción interna de voz. Cuando la estación base detecta que el móvil no puede aumentar su potencia de transmisión y la recepción empeora, puede indicarle al dispositivo que active la agrupación TTI y envíe el mismo paquete, pero con diferentes bits de detección y corrección de errores en 2, 3 o incluso 4 consecutivos. La ventaja de enviar el paquete en un solo TTI y luego detectar que no se recibió correctamente, lo que a su vez daría lugar a una o más retransmisiones, es que ahorra una gran cantidad de sobrecarga de señalización.

Cuando se configura en el UE la agrupación TTI, el DRX se desactiva. Por lo tanto, significa que los umbrales de TTI Bundling se pueden emplear como técnica para mejorar la calidad el número de llamadas MCPTT y también para deshabilitar DRX, lo que a su vez aumentará las oportunidades de programación para los usuarios en malas condiciones de radio.

La latencia también se reduce ya que no se requiere tiempo de espera entre las retransmisiones. En caso de que el paquete no se reciba correctamente, se repite de la misma manera que una transmisión ordinaria de un paquete. **Holma y Toskala** [79] anticipan una ganancia de borde de celda de 4dB para VoIP con esta característica. [80] [81]

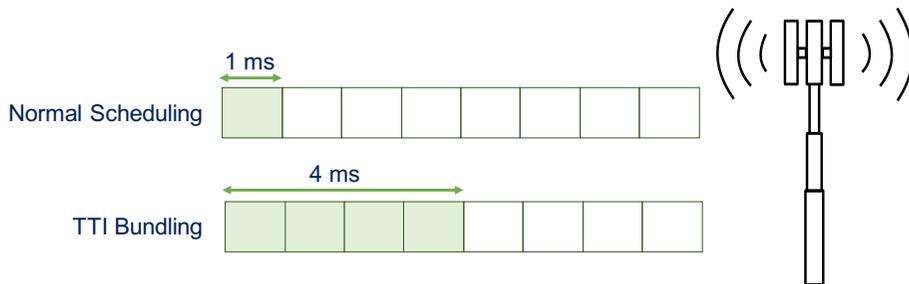


Figura 60: TTI Bundling

### Semi-Persistent Scheduling (SPS)

SPS es una función que reduce significativamente la sobrecarga del canal de control para aplicaciones que requieren asignaciones continuas de recursos de radio, como son los servicios de misión crítica MCPTT. Como se ha indicado en la sección 4.3.3, en LTE el canal de control de DL físico (PDCCH) debe indicar qué usuarios deben decodificar el canal compartido de DL físico (PDSCH) en cada subtrama y qué usuarios pueden transmitir en el canal compartido de UL físico (PUSCH) en cada subtrama.

Sin SPS, cada asignación de bloque de recursos físicos (PRB) DL o UL debe concederse mediante un mensaje de concesión de acceso en el PDCCH. Este procedimiento funciona perfectamente para aquellas aplicaciones que transmiten paquetes de gran tamaño permitiendo programar pocos usuarios en cada subtrama. Sin embargo, servicios como MCPTT requieren el envío de pequeños paquetes de datos (584 bits) cada 20 ms, provocando la sobrecarga del canal de control, tal y como se ha indicado en la sección 4.3.3 La técnica SPS introduce una asignación continua de los PRBs que debería esperar en DL o que puede transmitir en UL. En la figura que se muestra a continuación, se muestra la forma más apropiada de configurar SPS para las llamadas MCPTT:

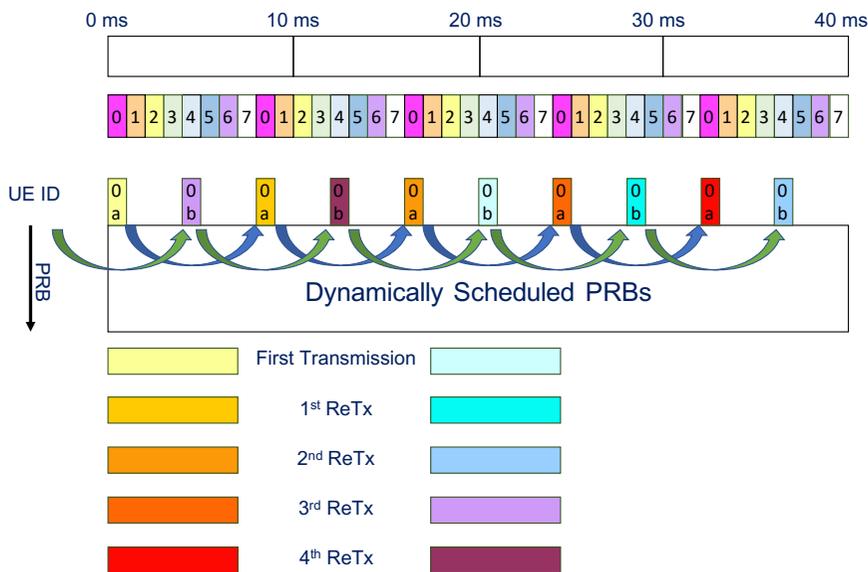


Figura 61: MCPTT – Semi-Persistent Scheduling

Como ya se ha indicado en la sección 4.3.2, en el servicio MCPTT se transmiten **paquetes de 584 bits cada 20 ms**. En LTE, el tiempo de la interfaz HARQ es de 8 ms, lo que significa que las retransmisiones de PRB que no se han decodificado pueden ocurrir cada 8 ms. En la figura anterior se observa, 1 transmisión y 4 retransmisiones por cada paquete de voz de 20 ms con dos procesos HARQ paralelos. Cada 20 ms se envía un nuevo paquete de MCPTT. El receptor requiere de un buffer de 20 ms para gestionar las cuatro retransmisiones, pero esto generalmente se considera una buena compensación para maximizar la capacidad / cobertura (en comparación con enviar solo un máximo de dos retransmisiones).

Si analizamos la Tabla 40, donde se compara el número de llamadas MCPTT que se pueden establecer atendiendo al número de recursos de radio disponibles vs las llamadas que se puede planificar por PDCCH tenemos que para los MCS más bajos, concretamente del 0-3 que corresponde a usuarios que se encuentran en muy mala cobertura, podemos planificar más llamadas que recursos disponibles. En el caso extremo, tenemos que para MCS=0 podemos programar 200 y solo se dispone de recursos de radio 90 llamadas. Mediante la técnica SPS descrita, podríamos realizar 4 retransmisiones por cada paquete de MCPTT de esta forma nos aseguráramos de que el UE sería capaz de decodificar cada paquete de datos, no perdiendo ninguno a pesar de estar en condiciones de cobertura muy malas.

## 5.5 Conclusiones

El análisis del escenario base de cálculo tiene por objetivo definir un método que permita calcular los indicadores de rendimiento del servicio MCPTT desplegado sobre una arquitectura estándar LTE.

Para ello, inicialmente se han identificado todos los componentes de esta arquitectura extremo a extremo, es decir, desde que un usuario habla hasta que otro le escucha y que añaden retardos a la llamada MCPTT durante su establecimiento, mantenimiento e inclusión de nuevos UE a la llamada.

Para formular cada uno de los indicadores de rendimiento se ha tomado como referencia la sección 4.2, Rendimiento de los servicios – Indicadores (KPI) y la sección 2.3, Servicios de Misión Crítica (MCS) – MCPTT donde se muestra la traza completa de una llamada MCPTT.

Las figuras que se han incluido en este capítulo son una simplificación de Figura 8, que presenta la traza completa. Se ha decidido realizar esta simplificación para poder entender de una forma más clara los componentes que participan cada vez y el número de veces que participan.

En el cálculo del rendimiento de los servicios, tal y como se ha descrito por cada KPI, la parte RAN (Radio Access Network) interviene de forma directa. Tanto desde el punto de vista del retardo que añade a las comunicaciones MCPTT, como a la continuidad de estos.

La red LTE tiene un número de recursos máximos disponibles para planificar la transmisión de los paquetes MCPPT. El objetivo de los cálculos que se han presentado es determinar el número teórico máximo de llamadas MCPTT que se puede establecer primero cada TTI y posteriormente cada 20 ms que es la frecuencia de envío de los paquetes de voz que requiere en códec empleado en MCPTT.

Por esta razón, se ha incluido en el análisis del escenario base de cálculo, el comportamiento de la red LTE a la hora de planificar los paquetes MCPTT tanto en UL como en DL.

Este tipo de servicios requieren un envío de paquetes pequeños (584 bits) y además de forma continua o persistente (20 ms). Esto implica una señalización del canal de control muy elevada que puede provocar que no sea posible emplear todos los recursos de radio disponibles ya que no hay espacio para ser planificado en el canal de control. Esto ha quedado demostrado en los cálculos que se han presentado. En una red LTE 20 MHz (SISO) se dispone de PRB para 2.000 llamadas MCPTT, sin embargo, sólo se puede planificar en el caso ideal 1.630 suponiendo todos los UE con el MCS=28.

Por tanto, lejos de las estimaciones del 3GPP en el documento TS 22.179 version 15 – Anexo C, el 3GPP [77] en el que se indica lo siguiente: **“El servicio MCPTT debería soportar 2.000 usuarios MCPTT dentro de un grupo MCPTT o como combinación de varios en cada celda del sistema MCPTT”**

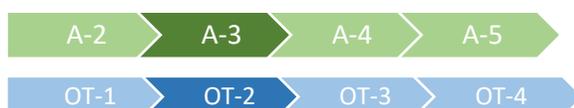
No debemos olvidar que **1.630 llamadas**, se pueden llegar a establecer en el mejor de los escenarios posibles: usuarios con MCS entre 28 y 28A, es decir condiciones de radio "**Muy Buenas**". Sin embargo, este escenario no es muy realista. En el peor escenario donde los UE se encuentran en los bordes de la celda con un MCS=0, solo es posible establecer **90 llamadas**. De cara, a definir un número promedio de llamadas, se ha considerado que los UE se encuentren en condiciones "**Normales y Malas**" de red, es decir, con un MCS entre 25 y 7. De esta manera, cubrimos un rango mucho más realista y en el que tenemos que poner nuestra atención. Por tanto, bajo las condiciones de red, indicadas anteriormente el **número promedio de llamadas MCPTT** que se pueden establecer con un es de **613 (LTE 20 Mhz SISO)**.

Esta misma problemática ya se ha producido antes en las llamadas **VoLTE** que tiene la misma frecuencia de transmisión de los paquetes de voz 20 ms. Por ello, se han incluido en este capítulo, las principales técnicas de optimización que se emplean en VoLTE y que se creen sean extrapolables a las comunicaciones MCPTT: **DRX, SPS y TTI Bundling**.

## 6 Alternativas de Despliegue

<b>6.1</b>	<b><u>INTRODUCCIÓN</u></b> .....	<b>143</b>
<b>6.2</b>	<b><u>DESPLIEGUE MEC</u></b> .....	<b>143</b>
6.2.1	<u>MEC – DISTRIBUTED S/PGW CON LOCAL BREAKOUT (SGW-LBO)</u> .....	145
6.2.2	<u>MEC – DISTRIBUTED S/PGW</u> .....	146
6.2.3	<u>MEC – DISTRIBUTED EPC</u> .....	148
<b>6.3</b>	<b><u>DESPLIEGUE CUPS</u></b> .....	<b>151</b>
<b>6.4</b>	<b><u>DESPLIEGUE 5G NSA</u></b> .....	<b>154</b>
<b>6.5</b>	<b><u>CONCLUSIONES</u></b> .....	<b>156</b>

### 6.1 Introducción



Lo que se presenta en este capítulo 6, es el análisis teórico de cómo evolucionan los cálculos de los indicadores de rendimientos de los servicios (KPIs) definidos en el capítulo anterior, en las diferentes arquitecturas propuestas de evolución a 5G.

Tanto el capítulo 6, como el 7 está englobados dentro de la acción **A-3** “Análisis de despliegue para los servicios de misión crítica en redes LTE y 5G”, el objetivo juntamente con la **A-2** es **OT-2** “Propuestas Técnicas que puedan minimizar el impacto”

### 6.2 Despliegue MEC

Multi-Access Edge Computing (MEC) [82] [83], es una arquitectura de red propuesta por el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (ETSI) que tiene como objetivo mover aplicaciones del Data Center del operador al extremo de la red (al borde), cerca de los usuarios finales. Como resultado, las latencias de servicio se reducen gracias a la cercanía con el usuario final y la red troncal IP del operador se libera de todo este tráfico de red.

Desde un punto de vista de alto nivel, MEC puede considerarse una entidad de computación en la nube con acceso y capacidades para realizar tareas en el borde de las redes móviles. MEC tiene la capacidad de aplicar reglas de tráfico para programar la ruta de datos y redirigir el tráfico al proveedor de servicios correspondiente, ya sea local o remoto reduciendo la latencia. De esta manera, el servicio puede ser manejado por el servidor correspondiente para mejorar la experiencia del usuario percibida de una manera totalmente transparente.

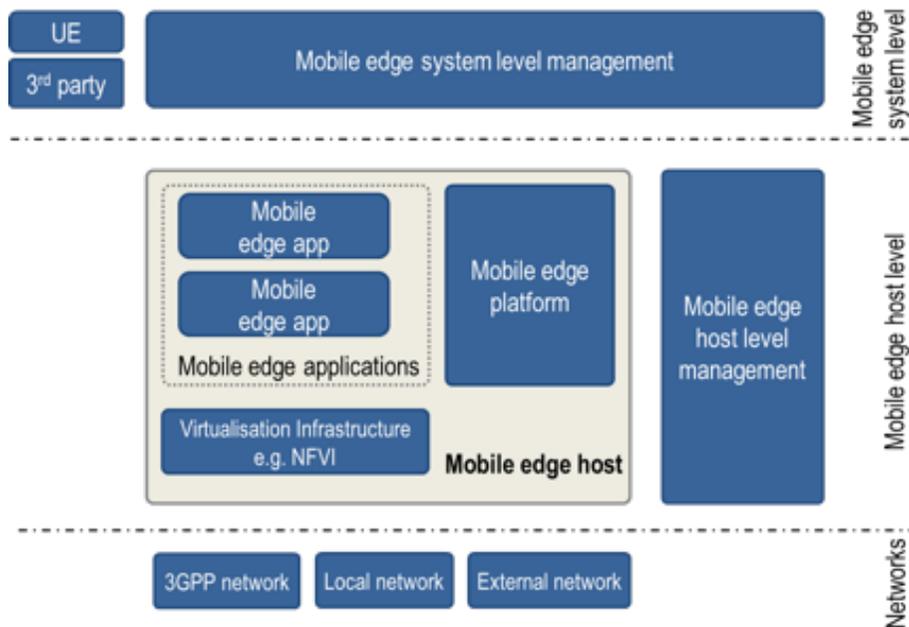


Figura 62: El framework de MEC y la arquitectura de referencia están especificada en ETSI GS NEC 003 y están alineada con los principios NFV.

La idea básica de MEC (Multi-Access Edge Computing) [84] comprende:

- 1) **Acercar el Data Center del operador al extremo de la red (Data Center – Cloud).** Aparece el concepto de Data Center Distribuido, que se refiere a la distribución de servicios del Data Center fuera de los centros de datos físicos del proveedor de la nube, pero controlados por el proveedor. En un Data Center distribuido, el proveedor es responsable de todos los aspectos de la arquitectura del servicio, el despliegue, su operación, la gestión y las actualizaciones. Esa evolución del Data Center público centralizado al Data Center público distribuido [85] resuelve tanto problemas técnicos como la latencia como desafíos regulatorios como la soberanía de datos mientras aúna los beneficios de un servicio de nube pública junto con los beneficios de una nube privada local.
- 2) **Permitir el despliegue de soluciones de terceros en el extremo de la red.** El procesamiento de información, la recopilación y entrega de contenido se ubican más cerca de las fuentes de información. Gracias a esta idea de computación en el extremo o EDGE COMPUTING se reduce la latencia de los servicios desplegados en los extremos de la red y al ser un tráfico local, no sobrecarga la red troncal del operador de la red permitiendo la orquestación de los servicios desplegados en el extremo desde la red a través del plano de control y la información de contexto que obtiene el orquestador directamente de los servicios desplegados en el extremo.

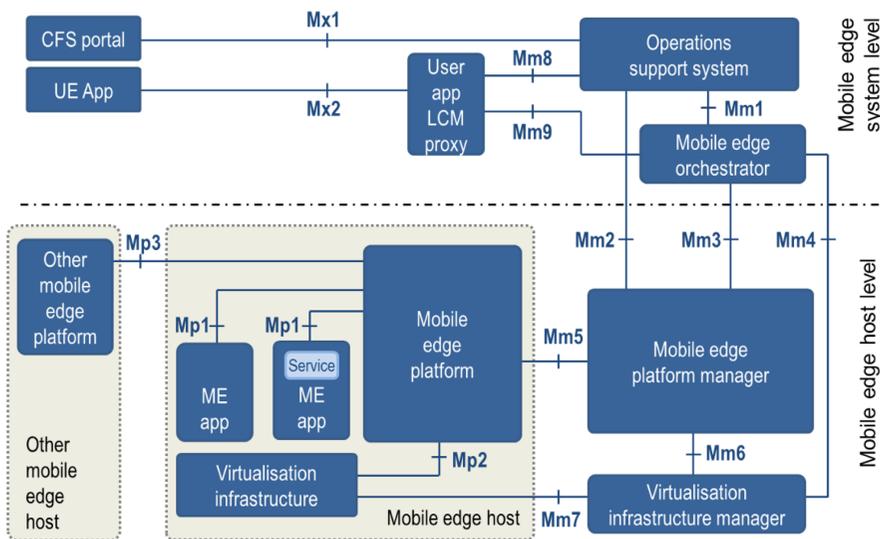


Figura 63: Arquitectura de Referencia MEC [84]

Para comprobar el efecto sobre los indicadores de rendimiento se va a considerar el despliegue de los servicios MCPTT en dos posibilidades de la arquitectura MEC [86]: Distributed S/PGW LBO y Distributed EPC.

La diferencia está en cómo desplegar el EPC. En el primero, solo las entidades SGW y PGW se implementan en el sitio de borde, mientras que las funciones del plano de control como Mobility Management Entity (MME) la Entidad de administración de movilidad (MME) y el Home Subscriber Server (HSS) que se encuentran en el núcleo de red del operador. En el segundo, el servicio MCPTT se coloca con el EPC completo del operador también desplegado en el borde. MEC – Distributed SGW con Local Breakout (SGW-LBO).

### 6.2.1 MEC – Distributed S/PGW con Local Breakout (SGW-LBO)

LOCAL BREAKOUT en el SGW es una nueva arquitectura para MEC que surge del deseo de los operadores de tener un mayor control sobre la granularidad del tráfico que necesita ser redirigido. Gracias a esta arquitectura los usuarios puedan acceder tanto a las aplicaciones MEC como a la aplicación del sitio central del operador de manera selectiva a través de un mismo APN.

Con la implementación de SGW distribuido, uno de los escenarios de implementación de MEC opcionales es la ubicación conjunta de hosts MEC con la SGW. Tanto la aplicación SGW-LBO como la aplicación MEC pueden alojarse como VNF en la misma plataforma MEC. La siguiente figura describe la ubicación conjunta de hosts MEC con el SGW en una red móvil donde el sistema MEC y el SGW distribuido se ubican en el borde.

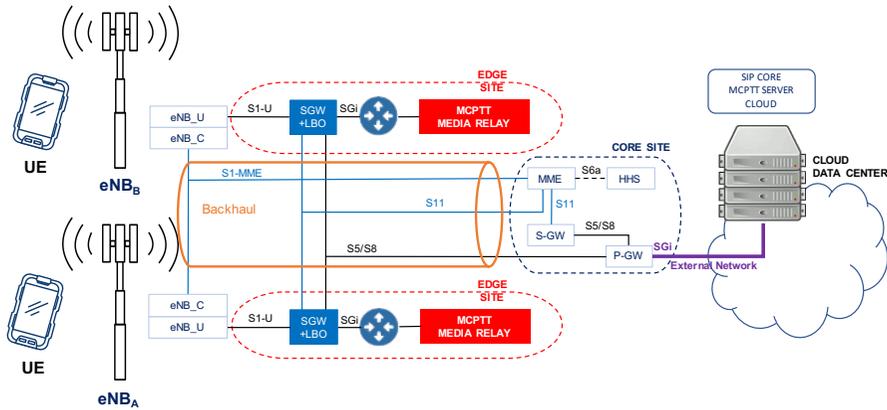


Figura 64: Arquitectura MEC – Distributed SGW-LBO

En este despliegue, al igual que ocurría para el caso anterior, la señalización cruza la red troncal IP del operador, de manera que KPI 1 y KPI 2 no se mejoran en comparación con el escenario de referencia. Por el contrario, la latencia de Mouth to EAR (KPI 3) se reduce, ya que el plano de datos se ha movido hacia el borde.

La pasarela SGW- Local Break Out habilita la separación del tráfico y permite el mismo nivel de seguridad de una solución compatible con 3GPP mediante filtros de tráfico. En el caso del MCPTT, todo el tráfico de datos RTP entre los usuarios conectados al mismo eNB puede quedarse en el MEC o podría subir hasta el servicio MCPTT AS centralizado si fuera necesario. El SGW-LBO ofrece la posibilidad de dirigir el tráfico en función de cualquier combinación elegida por el operador de los conjuntos de políticas, como APN e identificador de usuario y otros parámetros de nivel de IP, incluida la versión de IP y el marcado DSCP.

Tabla 42: Número de veces que la Señalización y el Data Plane atraviesa cada componente del escenario MEC (Distributed SGW-LBO MEC)

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	TB <sub>Hnet</sub>	TE <sub>PC</sub>	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI 1 (S/PGW LBO)	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A
KPI 2 (S/PGW LBO)	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x
MEDIA	TRAN <sub>UL</sub>	TM <sub>UE1</sub>	TB <sub>Hnet</sub>	TE <sub>PC</sub>	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TM <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TM <sub>UE2</sub>
KPI 3 (S/PGW LBO)	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x

La tabla muestra la contribución a la latencia de los diferentes componentes de esta propuesta de despliegue. Como se puede observar, en este caso del KPI3 TB<sub>Hnet</sub> y TEX<sub>net</sub> pasan a estado N/A ya que los datos "media" no atraviesan el EPC del operador ni la red.

### 6.2.2 MEC – Distributed S/PGW

En la segunda propuesta de implementación de despliegue del EPC en el borde de red, sólo las entidades SGW y PGW se implementan en el extremo de la red,

mientras que las funciones del plano de control como MME y HSS se ubican en el EPC central del operador. Los hosts MEC se conectan a la PGW a través de las interfaces SGi para que los medios de datos no crucen la red central del sitio del operador. La selección local de SGW es realizada por el MME central de acuerdo con los procedimientos DNS estándar de 3GPP y en base al Código de área de seguimiento (TAC) de la radio a la que se conecta el UE.

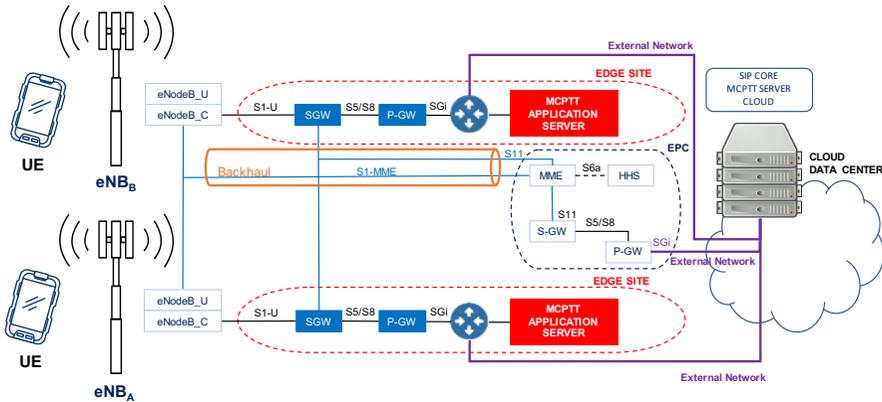


Figura 65: Arquitectura MEC – Distributed S-GW and PGW MEC Deployment

El despliegue con el SGW y el PGW ubicados en el extremo de la red requiere que el operador extienda la interfaz S5 al sitio MEC.

Tabla 43: Número de veces que la Señalización y el Data Plane atraviesa cada componente del escenario MEC (Distributed S/PGW)

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	T <sub>SUE1</sub>	T <sub>BH<sub>net</sub></sub>	T <sub>EPC</sub>	T <sub>IN<sub>net</sub></sub>	T <sub>S<sub>IMS</sub></sub>	T <sub>EX<sub>net</sub></sub>	T <sub>S<sub>AS</sub></sub>	TRAN <sub>DL</sub>	T <sub>SUE2</sub>
KPI 1 (MEC S/PGW)	1x	2x	N/A	2x	2x	2x	N/A	2x	1x	N/A
KPI 2 (MEC S/PGW)	2x	2x	N/A	4x	4x	4x	N/A	2x	2x	1x
MEDIA	TRAN <sub>UL</sub>	T <sub>MUE1</sub>	T <sub>BH<sub>net</sub></sub>	T <sub>EPC</sub>	T <sub>IN<sub>net</sub></sub>	T <sub>S<sub>IMS</sub></sub>	T <sub>EX<sub>net</sub></sub>	T <sub>M<sub>AS</sub></sub>	TRAN <sub>DL</sub>	T <sub>MUE2</sub>
KPI 3 (MEC S/PGW)	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x

Este tipo de implementación hace posible que el operador conserve el control total sobre el MME. En este despliegue, la señalización no cruza la red troncal IP del operador, de manera que **KPI 1 y KPI 2 mejoran** en comparación con el escenario de referencia. De igual manera, la latencia de Mouth to EAR (**KPI 3**) se reduce, ya que el plano de datos se ha movido hacia el borde.

No se despliega del todo el EPC en el extremo de la red, solo se despliega SGW y PGW. La señalización no tiene que atravesar, T<sub>BH<sub>net</sub></sub>, T<sub>EPC<sub>net</sub></sub>, T<sub>IN<sub>net</sub></sub> y T<sub>EX<sub>net</sub></sub> hasta

los servidores MCS desplegados en el Data Center del Operador ya que éstos se encuentran redundados en el Edge Site. De la misma forma, para el KPI 3, los paquetes **MCPTT** procedentes del **UE 1**, se encaminan al **S-GW** del eNB, al que se encuentra registrado y éste dirige el tráfico al **P-GW** que conoce la localización del servidor MCPTT desplegado en el extremo de la red. Finalmente, el flujo de medios se envía a través del router del “**Edge site**” al eNB en el que se encuentra registrado **UE 2**, suponiendo que este no este registrado en el mismo eNB que **UE 1**.

De esta manera, no se atraviesa el núcleo de red del operador y por eso  $T_{BH_{net}} = 0$  y  $T_{EX_{net}} = 0$ .

### 6.2.3 MEC – Distributed EPC

El EPC distribuido se ubica junto con el host MEC, el PGW proporciona la dirección IP y la información de DNS local para resolver la dirección IP de las aplicaciones MEC. En este caso, el Home Subscriber Server (HSS) también se ubica junto con el EPC, y no es necesario un backhaul que funcione para mantener el servicio local en funcionamiento [86]. En cualquier caso, permitiría que las aplicaciones MEC (Servicios MCPTT) se ubiquen junto con las funciones de núcleo red (EPC) en el mismo host MEC.

La figura que se muestra a continuación corresponde a un servicio EPC completamente distribuido en extremo de la red. En este despliegue, la señalización no atraviesa el núcleo de red hasta el MCPTT AS que está en el Data Center del operador. La gestión de las llamadas MCPTT de la red de misión crítica, se realizará desde los servidores MC distribuidos en el host MEC.

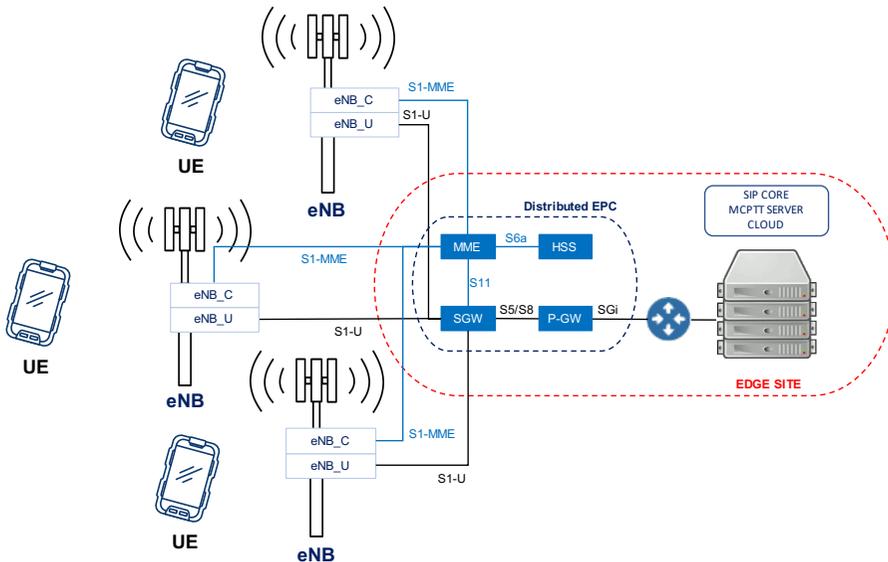


Figura 66: Arquitectura MEC – Distributed EPC basada en [82] [86]

Como consecuencia del despliegue de los servidores en el extremo de la red, se obtienen las siguientes ventajas:



- 2) **Alerta:** Se produce un incidente y se despliega a los recursos más cercanos a la zona de intervención. La provisión del servicio continúa siendo centralizado. El resto de las unidades están en alerta pendientes de la evolución de la alerta. Como consecuencia de la emergencia, se produce una concentración de recursos en un área concreta que es atendido por un grupo operativo concreto. Se decide ceder el mando al puesto de mando avanzado que se encuentra en el lugar de la incidencia, aunque manteniendo la comunicación con el puesto de mando central. Esta concentración de recursos en ese extremo de la red, junto con los datos de monitorización de la red, recomiendan desplegar en el extremo el servicio MCPTT completo (IMS + MCPTT AS).
- 3) **Emergencia:** En este escenario, se propone que, el orquestador del operador podría desplegar un EPC en el extremo de la red y sincronizar el HSS con los registros de todos los recursos desplegados en ese extremo de la red y actualiza la dirección del MME al que se tienen que reconectar los usuarios. Para garantizar la continuidad del servicio y de las comunicaciones van desconectando escalonadamente los recursos del EPC central y los va reconectando al EPC local. La gran mayoría de las llamadas de emergencia se están ya gestionando desde el AS Controlling distribuido que ahora será el encargado de ir duplicando llamadas para incluir a los usuarios reconectados, evitando la discontinuidad del servicio. Esta idea de desplegar un EPC en el eNB no es nueva, los usuarios de una red de emergencia TETRA tienen una BTS asignada que es la que se encarga de gestionar las claves, registrar e identificar a cada usuario en la red. En una situación de emergencia, si el backhaul se interrumpe (eNB <-> EPC), solo se pierde la comunicación con el puesto de mando central y con otras unidades a las que se alcance a través del MCPTT central de la red. La conectividad hacia el Data Center podrá ser resuelto típicamente mediante un enlace por satélite reservado a aquellas comunicaciones prioritarias de coordinación global. Adicionalmente el orquestador habrá ampliado el ancho de banda del eNB de la zona de intervención posibilitando un mayor throughput y garantizando el cumplimiento los KPIs de todas las comunicaciones que se establezcan.

### 6.3 Despliegue CUPS

En el camino de evolución hacia arquitecturas 5G el 3GPP ha abordado una iniciativa llamada CUPS (Control and User Plane Separation of EPC Nodes) [87] para la separación del plano de usuario y de control en las entidades SGW y PGW del EPC.

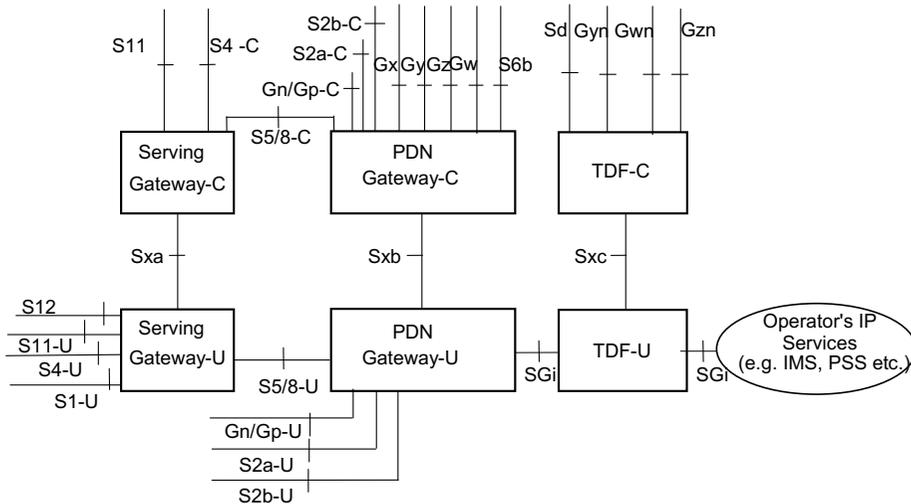


Figura 68: Arquitectura del modelo de referencia con separación del plano de control del plano de usuario  
 3GPP TS 23.214 V15.1.0 (2017-12)

Las opciones de implementación descritas en los apartados anteriores que distribuyen las puertas de enlace EPC en el borde, ya sea ubicadas conjuntamente o dentro del host MEC, también se pueden construir utilizando el paradigma CUPS estandarizado en la versión 14 de 3GPP y tener el nuevo plano de usuario integrado en el host MEC. La distribución del plano de usuario local (UP) permite el uso de la arquitectura CUPS para dirigir localmente el tráfico.

El 3GPP definió este paradigma en junio de 2017 con el objetivo de estudiar las posibilidades de una separación de la funcionalidad S / PGW en funciones del plano de usuario y funciones del plano de control. Este paradigma posibilita que:

- Las funciones del plano de usuario puedan ser colocado de manera flexible más cerca de la RAN y escalado de forma independiente
- Las funciones del plano de control aún pueden permanecer centralizadas.

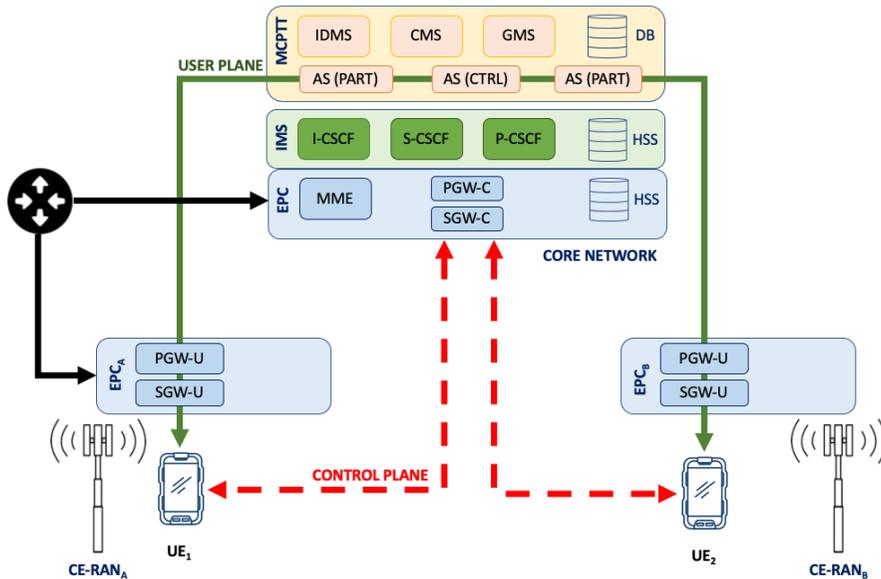


Figura 69: MCPTT en el Data Center. El control del servicio está centralizado, pero existe separación entre plano de control y usuario. Los datos de usuario no atraviesan el núcleo de red (EPC) aunque ascienden hasta el MCPTT que puede estar en el Data Center del Operador o en el CPD (Centro de Procesado de Datos) del proveedor del servicio. [88]

De cara al análisis de los KPIs en la iniciativa CUPS [82], se debe decidir dónde desplegar el servicio MCPTT. Surgen dos preguntas:

- ¿CUPS mejora los KPIs del servicio MCPTT?
- ¿Cuál es la mejor estrategia de despliegue del servicio MCPTT en CUPS?

En la Figura 69, el servicio MCPTT se encuentra centralizado. La señalización de UE 1 y UE 2 atraviesan el núcleo de red para llegar a los servidores MCPTT a través del SIP CORE que se encuentra representando en verde en la figura, por tanto, se consideran los tiempos de RAN, backhaul, EPC, internal network, SIP CORE, external network y MCPTT igual que en el escenario base LTE definido en capítulo 5.

Sin embargo, los datos no atraviesan el núcleo de red del operador. El UE 1 envía el paquete de datos MCPTT al SGW-U desplegado en el eNB en el que se encuentra registrado y este a través del PGW-U lo dirige al servidor **MCPTT Participating** que lo envía al MCPTT Controlling que es el que conoce el servidor **MCPTT Participating** que está gestionando al usuario UE 2. Este a su vez, lo envía al PGW-U del eNB donde está registrado UE 2 y a través de su PGW-U recibe el UE 2 el paquete de datos MCPTT.

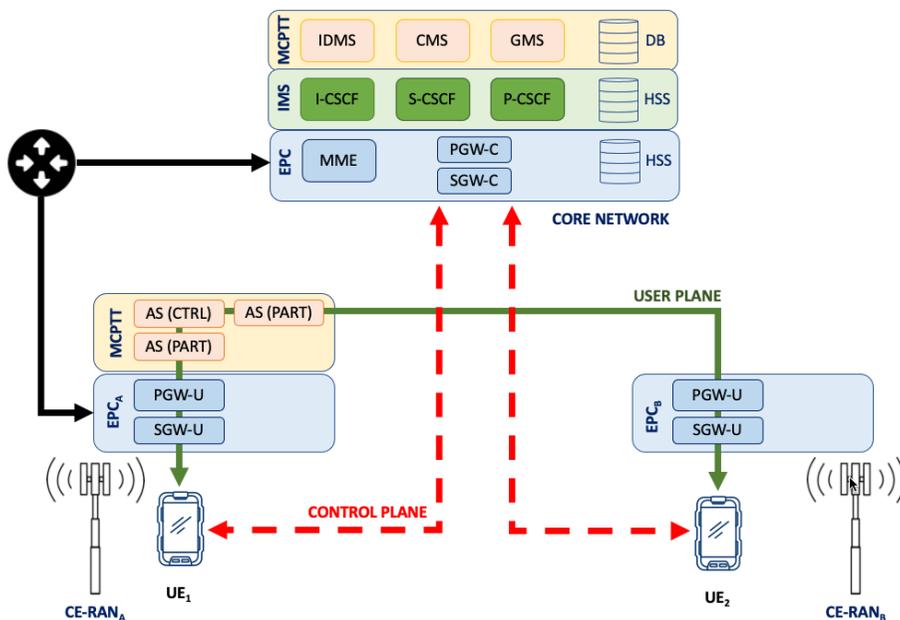


Figura 70: MCPTT Distribuido. El control del servicio está distribuido pero los datos de usuario no atraviesan el núcleo de red (EPC) ni sobrecargar el troncal IP del operador [88]

En la Figura 70, los **servidores MCPTT** se encuentran desplegados en el extremo de la red (CE-RAN<sub>A</sub>) aunque se mantienen desplegados en el Cloud del operador **servidores MCPTT redundantes** que a priori se encuentran deshabilitados. En este supuesto, el UE 1 está conectado al eNB (CE-RAN<sub>A</sub>) y el UE 2 está conectado al eNB (CE-RAN<sub>B</sub>). Se ha distribuido el SWG y el PGW del EPC en ambos eNB (EPC<sub>A</sub> y EPC<sub>B</sub>).

Para explicar la Figura 70 se va a considerar como caso de uso, una **llamada privada MCPTT entre UE<sub>1</sub> y UE<sub>2</sub>**. El UE 1 y el UE 2 se registra en la red del operador través del MME que se encuentra el núcleo de red del operador. Esta solicitud de registro se realiza por parte de ambos UEs. A través de este registro cada uno de los UEs recibe información de la ubicación en la red IP del SGW-C al que tienen que enviar su señalización. Después de registrarse en la red del operador, ambos UEs se registran en IMS y en el servicio MCPTT. Ya están preparados para realizar una llamada privada MCPTT.

UE 1 envía el comando SIP INVITE al SGW-C y de este al PGW-C que lo envía al proxy de IMS (P-CSCF) que lo envía al S-CSCF. Éste es el responsable de asociar al UE 1, el **MCPTT-AS Participating** que se va a encargar de gestionar a UE 1 dentro de la llamada. De esta forma, el S-CSCF envía el INVITE al **MCPTT-AS Participating** para que éste se lo envíe al **MCPTT-AS Controlling** que gestionará la llamada. Ambos MCPTT-AS está desplegados en el extremo. Una vez conocida la ubicación del UE 2, el **MCPTT AS Controlling**, enviará el INVITE al **MCPTT-AS Participating** que gestiona al UE 2 en esta llamada privada MCPTT. Esto lo tendrá que realizar a través del EPC del núcleo de red del operador que a través de SGW-C se lo enviará al UE 2.

Si el UE 2, está preparado para atender la llamada, lo notificará con un **200 OK** que recorrerá el sentido inverso al del INVITE, hasta llegar al UE 1. Cuando este UE reciba este mensaje de confirmación, podrá comenzar a enviar paquetes de datos MCPTT al UE<sub>2</sub>. Esto lo hará a través del EPC<sub>A</sub> virtualizado desplegado en CE-RAN<sub>A</sub> que enviarán los paquetes a los servidores MCPTT-AS desplegados en el extremo para que estos lo envíen directamente al EPC virtualizado (EPC<sub>B</sub>) desplegado en CE-RAN<sub>B</sub>, donde se encuentra UE<sub>2</sub>. **Los paquetes de datos MCPTT no atraviesan el núcleo de la red.**

En las Figura 69 y Figura 70, se presentan dos alternativas de despliegues CUPs, atendiendo al despliegue del servicio MCPTT:

- A. **MCPTT Centralizado:** El servidor MCPTT se despliega en el Data Center del proveedor de la red o el CPD del proveedor del servicio MCPTT. Tal y como se puede apreciar en Figura 69 el EPC (vEPC) está desplegado en el host MEC y el servicio MCPTT en el Data Center del proveedor de los servicios MC. Tanto KPI 1 como KPI 2 no mejoran ya que se atraviesa el núcleo de red del operador y la red troncal del operador. Sin embargo, el KPI 3 mejora porque no atraviesa el EPC del operador de red. El servicio MCPTT no se despliega en el host ME y si lo hace el vEPC.
- B. **MCPTT Distribuido:** El servidor MCPTT se despliega en el extremo de la red. Tal y como se puede apreciar en Figura 70, el EPC el servicio MCPTT están distribuidos. Tanto KPI 1 como KPI 2 no mejoran ya que se atraviesa el núcleo de red del operador y la red troncal del operador. Sin embargo, el KPI 3 mejora porque no atraviesa el EPC del operador de red. Puede ser válida para aquellos eNB que dispongan de una capacidad de cómputo suficiente para soportar un vEPC y un MCPTT AS.

Sin embargo, existe otra alternativa de CUPS que es la que se va a describir en el despliegue de 5G NSA. En esta alternativa con el MCPTT AS desplegado en el edge site, se emplea un IMS centralizado, lo que implica que la señalización tenga que atravesar core site y la internal network hasta el IMS, suponiendo que se emplea el IMS del operador de red o tendrá que atravesar la external network, si se emplea el IMS del Data Center del proveedor del servicio. A pesar de que los tráficos de control y de datos están separadas, en esta alternativa solo mejorará el KPI 3.

En la medida que los nodos de computo distribuidos tengan mayor capacidad de computo y especialmente en situaciones de emergencia se podrán desplegar en el edge site, el SIP CORE (IMS) y los servidores MCPTT AS completos.

## 6.4 Despliegue 5G NSA

El 3GPP ha venido desarrollando una nueva arquitectura 5G (5GS) [49] que involucra una nueva red de acceso de radio - 5G New Radio (NR), disponible desde la versión 15 en adelante, y una nueva red central 5G (5GC) definida a partir de la versión 16 (Rel-16 Stage 3 prevista junio 2020 -atrasada 3 meses).



## 6.5 Conclusiones

En este capítulo, se han presentado diferentes alternativas de despliegue para el servicio MCPTT, tanto para LTE como para 5G.

Se ha seguido la misma metodología de tablas empleada para describir el escenario base, indicando en cada alternativa cuales son los componentes que no participan o que lo hacen en un número de veces diferente respecto del escenario base.

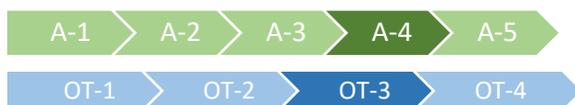
La manera de garantizar, los tiempos de respuesta, que requerirán los nuevos futuros servicios, serán desplegando éstos cerca de donde se encuentran los clientes que los vaya a consumir.

Tanto MEC como CUPS se pueden considerar como tecnologías, paradigmas o estrategias que están en la propia definición del estándar 5G. Sin embargo, también puede emplearse en LTE y aportan las mismas ventajas aun cuando en 5G se pueden considerar nativas y en LTE se tienen que implementar.

## 7 Análisis de Indicadores por despliegue

<b>7.1</b>	<b><u>METODOLOGÍA DE CÁLCULO EMPLEADA</u></b> .....	<b>157</b>
7.1.1	<u>FORMULACIÓN DE LOS INDICADORES DE SERVICIO</u> .....	159
7.1.2	<u>VALIDACIÓN DE LA FORMULACIÓN</u> .....	160
7.1.3	<u>ANÁLISIS COMPORTAMIENTO MCPTT AS Y SIP CORE EN ESCENARIO DE CARGA CONTROLADA</u> .....	162
7.1.4	<u>CONDICIONES DE CARGA DE LA RADIO ACCESS NETWORK (RAN)</u> .....	165
<b>7.2</b>	<b><u>ROUND TRIP TIME</u></b> .....	<b>166</b>
<b>7.3</b>	<b><u>FORMULACIÓN POR ESTRATEGIA DE DESPLIEGUE</u></b> .....	<b>170</b>
<b>7.4</b>	<b><u>KPI 1 (ACCESS TIME)</u></b> .....	<b>174</b>
7.4.1	<u>ESCENARIO BASE</u> .....	174
7.4.2	<u>MEC (DISTRIBUTED S/PGW LBO)</u> .....	175
7.4.3	<u>MEC (DISTRIBUTED EPC)</u> .....	177
7.4.4	<u>5G NSA (NON-STANDALONE)</u> .....	179
<b>7.5</b>	<b><u>KPI 2 (ACCESS TIME END TO END)</u></b> .....	<b>181</b>
7.5.1	<u>ESCENARIO BASE</u> .....	181
7.5.2	<u>MEC (DISTRIBUTED S/PGW LBO)</u> .....	182
7.5.3	<u>MEC (DISTRIBUTED EPC)</u> .....	183
7.5.4	<u>5G - NSA (NON-STANDALONE)</u> .....	184
<b>7.6</b>	<b><u>KPI 3 (MOUTH TO EAR)</u></b> .....	<b>186</b>
7.6.1	<u>ESCENARIO BASE</u> .....	186
7.6.2	<u>MEC (DISTRIBUTED S/PGW LBO)</u> .....	187
7.6.3	<u>MEC (DISTRIBUTED EPC)</u> .....	189
7.6.4	<u>5G - NSA (NON-STANDALONE)</u> .....	190
<b>7.7</b>	<b><u>RESULTADOS DEL ANÁLISIS</u></b> .....	<b>192</b>

### 7.1 Metodología de cálculo empleada



**E**n la sección 5.2 “Arquitectura de referencia” se ha definido el escenario base de cálculo sobre el cual se van a analizar los indicadores de servicio y es el punto de partida para plantear alternativas de despliegue. Como ya se ha indicado, está basado en una arquitectura de referencia LTE  $\geq$  12, representada en la figura y que ha sido replicada en la plataforma de pruebas de nuestro laboratorio:



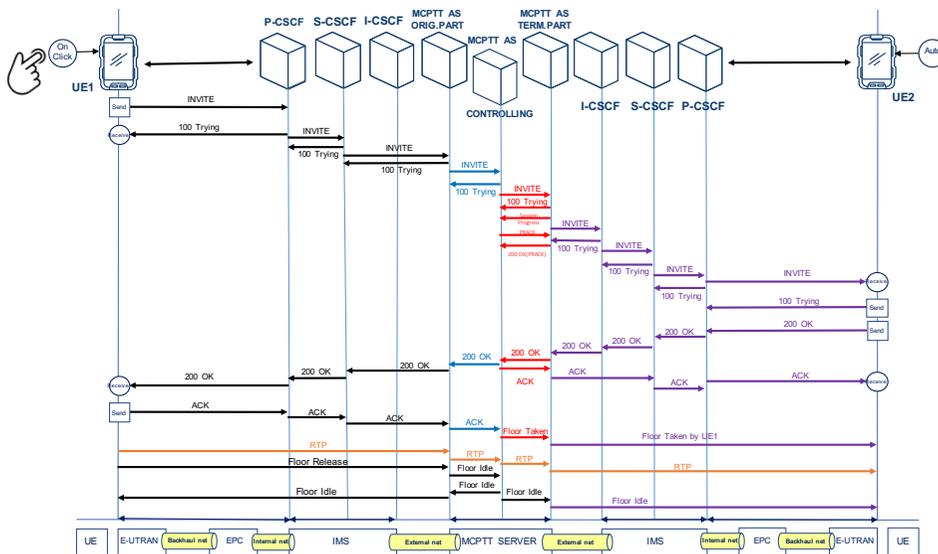


Figura 73: MCPTT Private Call (On-demand with automatic commencement and prearranged) [28]

### 7.1.1 Formulación de los Indicadores de Servicio

La primera parte del análisis, tal y como se detalla en la sección 5.3, ha consistido en la formulación de los indicadores de servicio. Para lo cual, se ha partido de: la definición de los KPIs realizada por el 3GPP en el documento TS 22.179 [61] y los flujos de datos / control que participan en una llamada privada MCPTT tal y como lo indica el 3GPP en la sección 10.7.2.2.1 del documento TS 23.379 [30], la sección 11.1.1 del TS 24.379 [32] y que se detalla en la Figura 73. De su análisis y estudio se ha obtenido la siguiente tabla.

Tabla 47: Tabla resumen de cálculo

KPI	Descripción	Cálculo
KPI 1	Access Time	$TRAN_{UL} + 2(T_{S_{UE1}} + TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TS_{IMS} + TEX_{net} + TS_{AS}) + TRAN_{DL}$
KPI 2	Access Time E2E	$2(TRAN_{UL} + TS_{UE1} + TS_{AS}) + 4(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TS_{IMS} + TEX_{net}) + TS_{UE2} + 2 TRAN_{UL}$
KPI 3	Mouth to Ear	$TRAN_{UL} + TM_{UE1} + 2(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net}) + TM_{AS} + TM_{UE2} + TRAN_{DL}$

Cada uno de estos acrónimos que representan tiempos de retardo y de procesamiento, se encuentran detallados en la Tabla 24: Tiempos de procesamiento y retardo. A continuación, se presenta la misma formulación, identificando los tiempos de procesamiento y retardo de cada KPI.

Tabla 48: Tiempo de procesado y retardo por KPI

KPI	Tiempo de Procesado	Retardo
KPI 1	$2(T_{S_{UE1}} + T_{S_{IMS}} + T_{S_{AS}})$	$TRAN_{UL} + 2(T_{BH_{net}} + T_{EPC} + T_{IN_{net}} + T_{EX_{net}}) + TRAN_{DL}$
KPI 2	$2(T_{S_{UE1}} + T_{S_{AS}}) + 4T_{S_{IMS}} + T_{S_{UE2}}$	$2TRAN_{UL} + 4(T_{BH_{net}} + T_{EPC} + T_{IN_{net}} + T_{EX_{net}}) + 2TRAN_{UL}$
KPI 3	$T_{M_{UE1}} + T_{M_{AS}} + T_{M_{UE2}}$	$TRAN_{UL} + 2(T_{BH_{net}} + T_{EPC} + T_{IN_{net}} + T_{EX_{net}}) + TRAN_{DL}$

### 7.1.2 Validación de la formulación

La validación de la formulación ha consistido en la realización de 10 llamadas MCPTT en la plataforma de pruebas indicada anteriormente y en la medición de los indicadores de servicio. Para la realización de estas pruebas, tanto el SIP CORE (IMS) como los servicios MCS se han desplegado en local. Las latencias de red medidas para  $T_{IN_{net}}$  y  $T_{EX_{net}}$  han sido entorno a 0,1 ~ 0,5 ms. Así mismo, los tiempos de EPC (TEPC) medidos en la plataforma de prueba han sido inferiores a 1 ms.

533 65.783844	192.168.3.1	192.168.3.1	ICMP	130 UEId=1	[UL] [AM] DRB:1 [DATA] (P) sn=110 [86-bytes]
534 65.783859			RLC-LTE	47 UEId=1	[DL] [AM] DRB:1 [CONTROL] ACK_SN=111
535 65.785492	192.168.3.2	192.168.3.2	ICMP	222 UEId=1	[DL] [AM] DRB:1 [DATA] (P) sn=117 [86-bytes]
536 65.823818			RLC-LTE	158 UEId=1	[UL] [AM] DRB:1 [CONTROL] ACK_SN=118

Figura 74: Captura realizada en la LTE Network EPC

Durante las llamadas MCPTT se ha realizado la captura de las tramas SIP y RTP, mediante el empleo de la herramienta Open Source: Wireshark, en la parte servidora y Logcat en el UE.

Las capturas se han procesado empleando la herramienta MATLAB, por su gran flexibilidad para el análisis y clasificación de cada una de las tramas, así como, su facilidad para el posterior análisis de los datos obtenidos, en forma de tablas, gráficos o exportación a sistemas externos.

La latencia de los indicadores de servicio KPI 1 y KPI 2 se han obtenido directamente, en MATLAB. Para el KPI 3, se ha adoptado el método específico desarrollado por la división de Investigación de Comunicaciones de Seguridad Pública (PSCR) del NIST [26] para medir y cuantificar el KPI 3, de cualquier sistema de comunicaciones que transmite audio, con énfasis específico en dispositivos PTT (Push-to-Talk) [26] Este método de medición es el primer paso para establecer indicadores clave de rendimiento de QoE para la voz de misión crítica (MCV) y un sistema de medición para cuantificar estos KPI.

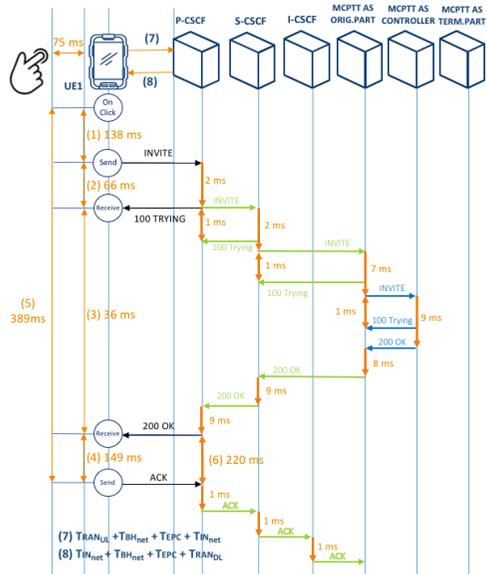


Figura 75: Detalle de los tiempos medidos para el KPI 1 durante la validación de la formulación

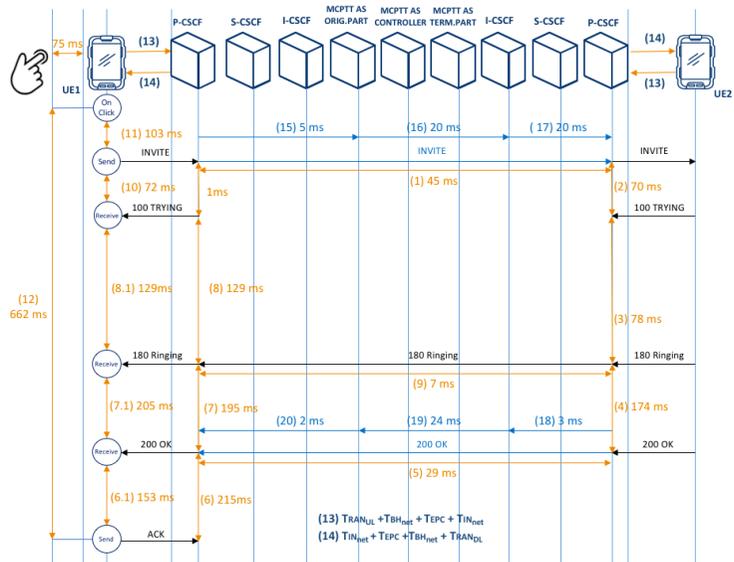


Figura 76: Detalle de los tiempos medidos para el KPI 2 durante la validación de la formulación

Las figuras anteriores, representan la señalización de una llamada MCPTT durante el KPI 1 (Access Time) y KPI 2 (Access Time End to End) y contienen los tiempos de procesamiento medidos durante la realización de 10 llamadas MCPTT. Con objeto de simplificar las conclusiones, se han tomado los tiempos por componente medidos en el KPI 2, durante la realización de las 10 llamadas MCPTT y se han aplicado estos valores, obtenidos automáticamente, a la formulación definida para el KPI 1. Los resultados obtenidos con la formulación deberían coincidir con el valor medido para el KPI 1 mediante la herramienta Matlab.

Lo primero que se ha analizado ha sido el tiempo de procesamiento de la señalización en UE. Para calcular (11)  $T_{SUE}$  se ha medido, la diferencia de tiempo existente entre que el usuario pulsa el evento ON CLICK en el terminal Android y el mensaje SIP INVITE es enviado por el terminal. El tiempo medido es  $\approx 100$  ms. También se puede medir el tiempo de procesado del mensaje SIP 200 OK (6.1)  $T_{SUE1}$  (RECEIVE 200 OK  $\rightarrow$  SEND ACK)  $\approx 153$  ms, o el del mensaje SIP, INVITE (4)  $T_{SUE2}$  (RECEIVE INVITE  $\rightarrow$  SEND 200 OK)  $\approx 174$  ms. El valor promedio que se considera para el  $T_{SUE}$  es de 143 ms.

Tal y como se ha indicado con anterioridad, en el modelo de referencia Figura 42 y en la traza del KPI 2 representado en la

Figura 46, entre el UE y el PGW debemos considerar en uplink (13)  $TRAN_{UL} + TBH_{UL} + TEPC_{UL} + TIN_{net}$  y en downlink (14)  $TIN_{net} + TEPC_{DL} + TBH_{DL} + TRAN_{DL}$ . La suma de ambos, se denomina Round Trip Time (RTT) y se define como el tiempo de ida y vuelta entre cada UE y el proxy del SIP-CORE (P-CSCF). Se calcula en (2), como la diferencia de tiempo que transcurre entre que el comando SIP INVITE, es enviado por el P-CSCF y este recibe el comando SIP 100 TRYING, en contestación a su INVITE. En (10) es el UE el que envía el INVITE y espera a recibir el 100 TRYING. El tiempo de procesamiento de este comando por parte del UE, se considera cercano a cero. El retardo medido en (2) y (10) es  $\approx 70$  ms.

El siguiente paso ha sido, calcular el tiempo de procesamiento que añade a la llamada los servidores MCS ( $T_{SAS}$ ) y el debido al procesamiento de la señalización en el SIP CORE ( $T_{SIMS}$ ). La forma de proceder es muy similar a la empleada hasta este momento. El comando SIP, INVITE atraviesa el SIP CORE en dos ocasiones (15) (17) y una vez el MCPTT AS (16). La respuesta a este comando, en el supuesto que el UE 2 esté listo para comenzar a establecer la llamada, es el comando SIP, 200 OK. Este atraviesa en dos ocasiones al SIP CORE (18) (20) y en una en servidor MCPTT. Por tanto, se puede deducir que el tiempo promedio de procesado del AS y del IMS son:  $T_{SAS} = 22$  ms y  $T_{SIMS} = 7,5$  ms

Si aplicamos los valores obtenidos, a la formulación del KPI 1 =  $TRAN_{UL} + 2(T_{SUE1} + TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + T_{SIMS} + TEX_{net} + T_{SAS}) + TRAN_{DL}$ , o lo que es lo mismo,  $TRAN_{UL} + 2(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net}) + TRAN_{DL} + 2T_{SUE1} + 2T_{SIMS} + T_{SAS} = 70 + 2 \cdot 143 + 2 \cdot 7,5 + 22 = 70 + 286 + 15 + 22$ , obtendremos  $393$  ms  $\approx 389$  ms (5). De la misma manera, se procedería para el KPI 2. El análisis de estas llamadas ha permitido obtener los tiempos de procesamiento de cada uno de los componentes de la plataforma de pruebas empleada y validar la formulación definida para los KPIs.

### 7.1.3 Análisis comportamiento MCPTT AS y SIP CORE en escenario de carga controlada

Sin embargo, de cara al posterior análisis de los indicadores tanto en el escenario base, como en cada una de las alternativas de despliegue, es necesario analizar el comportamiento de los tiempos de procesamiento de los servidores MCS y del SIP CORE en un escenario de carga controlado. Este escenario ha consistido en el

establecimiento de 200 llamadas privadas MCPTT simultáneas, con un intervalo de 20 ms.

Para la modelización de este escenario, se ha empleado la misma plataforma de pruebas descrita en la sección anterior sustituyendo los terminales Android por un cliente Linux con la capacidad para poder generar de forma programada llamadas simultáneas MCPTT, privadas y de grupo con el intervalo que se configure.

Este cliente Linux, está conectado vía Ethernet al proxy del SIP CORE (P-CSCF). Esto quiere decir que  $T_{\text{TRAN}}$ ,  $T_{\text{BH}_{\text{net}}}$ ,  $T_{\text{EPC}}$ ,  $T_{\text{IN}_{\text{net}}}$ , serán cero. Los servidores de aplicaciones MCS, se conectan al SIP CORE mediante Ethernet local, lo que supone:  $T_{\text{EX}_{\text{net}}} \approx 0$ .

El objetivo que se persigue es analizar los tiempos de procesamiento de los servidores MCS y del SIP CORE en un escenario de carga de llamadas MCPTT controlado. No se pretende determinar el número máximo de llamadas que puedan procesar ambos componentes, sino cuantificar su comportamiento con 200 llamadas MCPTT establecidas cada 20 segundos, durante la señalización y posterior procesamiento del tráfico de datos RTP.

Para el posterior análisis de indicadores, tanto en el escenario base, como en cada una de las estrategias de despliegue, se van a emplear los tiempos de procesamiento:  $T_{\text{SIMS}}$  y  $T_{\text{SAS}}$  que se han obtenido en esta sección. En una de las alternativas planteadas, desplegaremos tanto el SIP CORE y los MCS en el extremo de la red. En estas ubicaciones los operadores MNO no podrán ofrecer las mismas capacidades de cómputo que las existentes en los Data Center, por ello es importante conocer los rendimientos de ambos y como son afectados por el aumento de capacidad de la red.

Al igual que cuando se han analizado 10 llamadas, para este análisis se ha capturado todo el tráfico de señalización y de datos media empleando la aplicación Wireshark instalada en un portátil conectado al mismo segmento de red en la que están operando el cliente Linux, el SIP CORE y los MCS. La captura de este tráfico se ha exportado en formato Comma Separated Value (CSV) para ser procesada posteriormente en Matlab.

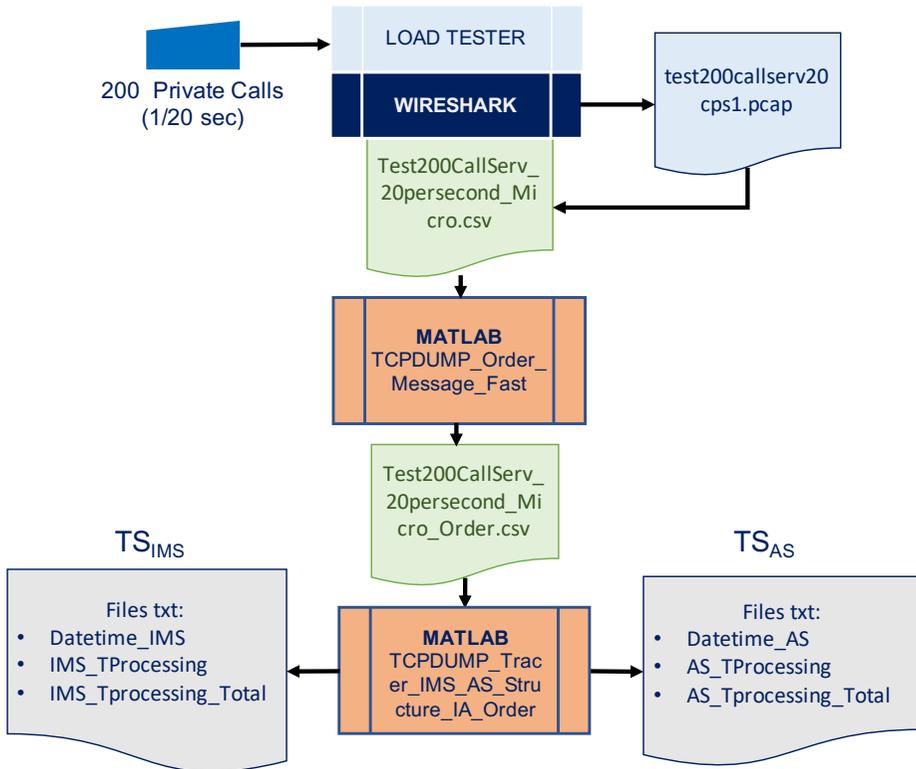


Figura 77: Detalle diagrama de cálculo de los tiempos de procesamiento de IMS y AS

La salida de este módulo de Matlab son los resultados de los tiempos de proceso de los servidores AS y del CORE SIP. Se obtienen tres ficheros para cada uno de ellos: desde el más detallado "DateTime\_AS y DateTime\_IMS" donde se incluye información del mensaje SIP: INVITE y 200 OK para AS y IMS; hasta el más genérico "AS\_TProcessing\_Total y IMS\_TProcessing\_Total" que solo incluye el tiempo total. A continuación, se presenta un ejemplo de cada uno de estos ficheros:

**Fichero: DateTime\_AS**

- 6; **INVITE** (MCPTT-AS-PARTICIPATING->I-CSCF);**5.15**;200 **OK** (MCPTT-AS-PARTICIPATING->S-CSCF);**2.93**
- 7; **INVITE** (MCPTT-AS-PARTICIPATING->I-CSCF);**4.63**;200 **OK** (MCPTT-AS-PARTICIPATING->S-CSCF);**2.90**

**Fichero: AS\_TProcessing**

- KPI2; **5.15**; ms; AS; **INVITE**
- KPI2; **2.93**; ms; AS; **200 OK**
- KPI2; **4.63**; ms; AS; **INVITE**
- KPI2; **2.90**; ms; AS;**200 OK**

**Fichero: AS\_TProcessing\_Total**

- KPI2; **8.09**; ms; AS\_Total
- KPI2; **7.54**; ms; AS\_Total

En la siguiente gráfica ECDF se representan los tiempos de procesamiento medidos para el IMS y AS. El valor representado en azul (IMS) y en rojo (AS) es el tiempo de procesamiento del 95% de las llamadas establecidas.

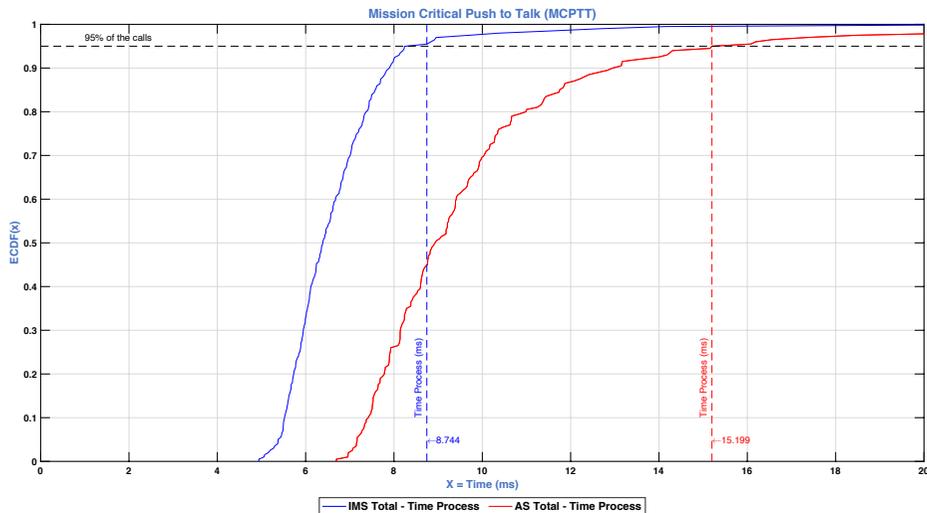


Figura 78: Tiempos de procesamiento de IMS y AS

Tal y como se puede apreciar en la gráfica en la medida que el número de llamadas MCPTT aumentan, el SIP CORE y el AS tienen que procesar más llamadas simultáneas y, por tanto, los tiempos de procesamiento aumentan especialmente en el AS. Con anterioridad, los tiempos medidos para 10 llamadas era de  $T_{SAS} = 22$  ms y  $T_{SIMS} = 7,5$  ms.

El objetivo de esta prueba era comprobar la estabilidad del SIP CORE y del AS para 200 llamadas. De los datos obtenidos, se puede determinar que la estabilidad se mantiene y que estos tiempos de procesamiento se pueden emplear para el cálculo de los indicadores de servicio para el escenario base, así como para cada una de las estrategias de despliegue definidas en la presente tesis.

#### 7.1.4 Condiciones de carga de la Radio Access Network (RAN)

Tanto en la sección 5.2 y 7.1, se ha definido la arquitectura funcional que se ha empleado en el análisis de los indicadores de servicio. De la misma forma se ha validado la formulación que se va a emplear para calcular los indicadores de forma directa para cada una de las estrategias de despliegue.

Para poder obtener valores de los indicadores en la plataforma de pruebas, muy similar a las de un entorno real de emergencias, se ha definido un escenario de pruebas que así lo represente. **Se ha simulado carga a nivel de servicio**, mediante el establecido secuencial de 1.000 llamadas MCPTT con una cadencia de 20 llamadas por segundo y **carga a nivel de red de acceso radio**, simulando una red congestionada.

El **peor escenario de carga de red** se produce cuando el operador se encuentra al límite de su capacidad para garantizar la QoS asociada al tráfico de la portadora dedicada a MC (Mission Critica). De acuerdo con las clases de QoS indicadas en la tabla 6.1.7 "Standardized QCI characteristics" [62] por el 3GPP para LTE 3GPP estándar, el operador asignará un **QCI = 69 para el plano de señalización** y un **QCI = 65 para el plano de usuario** de una llamada MCPTT. Estos QCIs **garantizarían en este caso de congestión un retardo máximo de 60 ms para el plano de control y 75 ms para el plano de usuario**. De igual manera el **3GPP para 5G** define [48] un 5QI = 69 para el plano de señalización y un 5QI = 65 para el plano de usuario en la tabla 5.7.4-1: "Standardized 5QI to QoS characteristics mapping". **Estos 5QIs garantizarían en este caso de congestión un retardo máximo de 60 ms para el plano de control y 75 ms para el plano de usuario**.

Se va a mostrar gráficamente la variación de los KPIs del servicio MCPTT dependiendo de la estrategia de despliegue que se decida aplicar en cada momento. Para cada una de las implantaciones se va a analizar el impacto que supone para cada uno de los KPIs que la red de acceso radio, esté más o menos congestionada.

Para que sea más comprensible la comparativa, se va a presentar cada una de las gráficas con una explicación al pie de cada una de ellas donde se detalle los puntos importantes a destacar. El análisis de cada indicador concluirá con una tabla resumen con los valores numéricos obtenidos en cada supuesto.

## 7.2 Round trip time

El objeto de esta prueba es la medición del tiempo de ida y vuelta entre el UE y el Packet Data Gateway del EPC. La medición del RTT de LTE se ha realizado en la plataforma de pruebas indicada en la sección 7.1. Se ha empleado la herramienta Android Debug Bridge (ADB) para poder automatizar la prueba desde la consola de comandos del portátil. Los resultados se han almacenado en un fichero de texto plano que posteriormente ha sido analizado para poder generar los resultados que se presentan a continuación.

Cada prueba ha consistido en el envío de 1000 mensajes PING con una frecuencia de 5 por segundo. Cada prueba se ha repetido 10 veces, con el objetivo de poder detectar posibles desviaciones en las medidas.

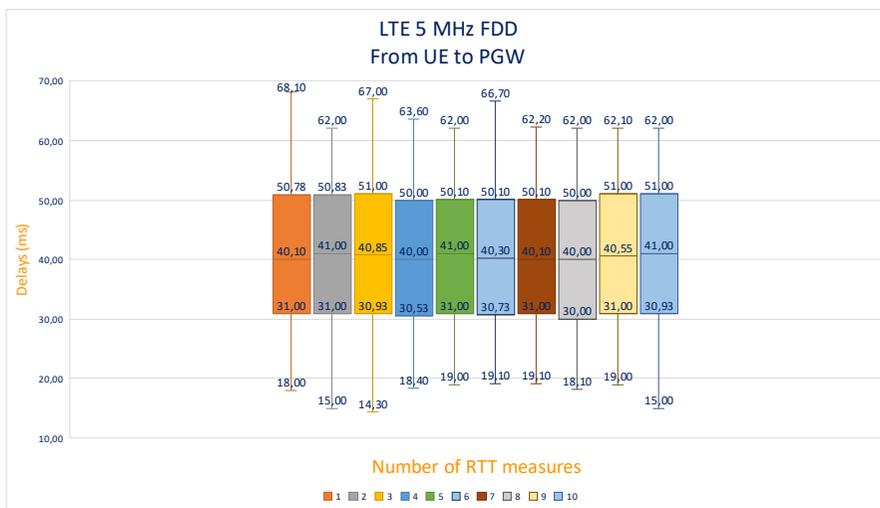


Figura 79: LTE MIMO 2x2 5 MHz FDD RTT

Los pings han sido iniciados en el UE. El resultado de las medidas realizadas en la plataforma de pruebas descrita en la Tabla 46, se han representado en la Figura 79. Las medidas RTT obtenidas entre el UE y el PGW es alrededor de 40 ms.

Si se traslada este valor a la formulación que se ha definido en esta tesis, se obtiene:  $TRAN_{UL} + TBH_{net} + TEPC + TRAN_{DL} = 40$  ms.

Tal y como se representado en las Figura 1 y 2 de esta sección, el PGW está conectado con el SIP CORE a través de  $TIN_{net}$  y este con los servidores MC a través de  $TEX_{net}$ . Para determinar, un valor aproximado de estos tramos de red. Se han planteado dos escenarios, el primero con los servidores MC desplegados en el Data Center del proveedor de los MCS con el que obtendremos una aproximación al retardo de  $RTTEX_{net}$  y el segundo desplegando los servidores MC junto al PGW, que obtendremos una aproximación al tramo  $RTTIN_{net}$

En el primero de los escenarios, tanto el CORE SIP como los servidores MC están desplegados en un Data Center externo a la red troncal del laboratorio de investigación, donde están conectados a través de una red ethernet local, con un  $TIN_{net}$  aproximado de 0 ms. Para calcular  $RTTEX_{server}$  se ha medido el RTT entre el UE y los servidores MC. Se ha empleado la misma metodología empleada para el calculo del RTT entre el UE y el PGW. La prueba ha consistido, igualmente, en el envío de 1000 mensajes PING con una frecuencia de 5 cada segundo, repitiendo la prueba 10 veces.

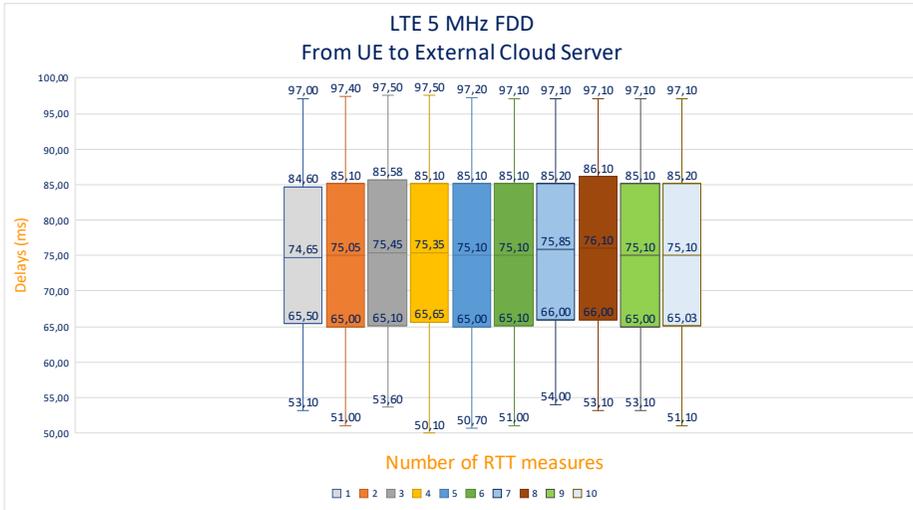


Figura 80: LTE MIMO 2x2 5 MHz FDD UE (-) EXTERNAL CLOUD RTT

Los resultados de las medidas realizadas se han representado en la Figura 80. Las medidas RTT obtenidas entre el UE y el external Data Center es alrededor de  $RTT_{EX_{server}} = 75$  ms. Por tanto,  $RTT_{EX_{net}}$  es la diferencia de RTT (UE (-) External Cloud) y RTT (UE (-) PGW), alrededor de 35 ms.

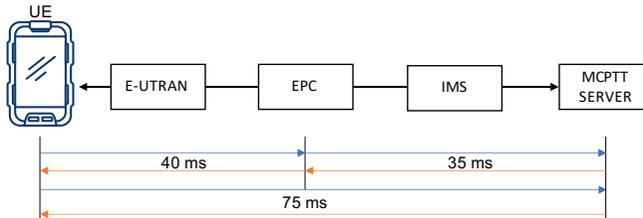


Figura 81: RTT (Servidores MC desplegados en el Data Center del proveedor)

En el segundo de los escenarios, los servidores MCS se encuentran desplegados localmente respecto del PGW y  $TEX_{net}$  es cero. En este experimento, tiene por objeto, determinar un valor aproximado para el  $RTT_{IN_{server}}$  representado como el tramo de red que conecta el UE con los servidores MCS desplegados localmente. En este supuesto, en lugar de conectar ambos al mismo concentrador de red, se ha desplegado los servidores MCS en el CPD del departamento con el objeto de poder medir esta latencia. Para calcular  $RTT_{IN_{server}}$  se ha medido el RTT entre el UE y los servidores MC. La prueba ha consistido, igualmente, en el envío de 1000 mensajes PING con una frecuencia de 5 cada segundo, repitiendo la prueba 10 veces.

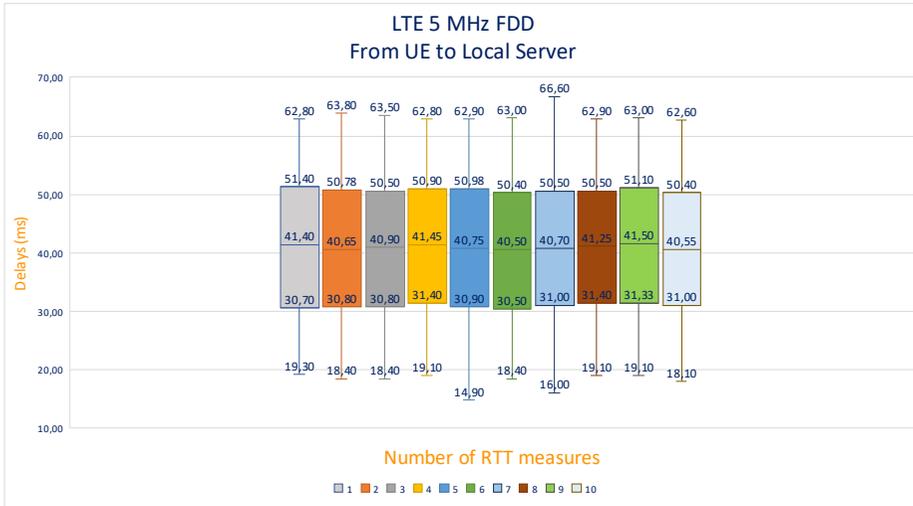


Figura 82: LTE MIMO 2x2 5 MHz FDD UE - LOCAL SERVER RTT

El resultado de las medidas realizadas, se han representado en la Figura 82. Las medidas RTT obtenidas entre el UE y los servidores desplegados localmente es alrededor de  $RTT_{INserver} = 41$  ms. Por tanto,  $RTT_{INet}$  es la diferencia de RTT (UE  $\leftrightarrow$  local AS) y RTT (UE  $\leftrightarrow$  PGW), es inferior a 1 ms.

En esta tesis doctoral, se plantea 5G NSA como una de las alternativas de despliegue, por lo tanto, es necesario analizar el RTT entre el UE y el PGW. En la plataforma de pruebas que se ha empleado, no ha sido posible disponer de nodos gNB 5G NR. Tomando como referencia, lo indicado en el proyecto 5Genesis [90], se considera un RTT de 12 ms. La siguiente figura correspondiente a este proyecto y representa el RTT medido en el escenario 5G descrito en el proyecto.

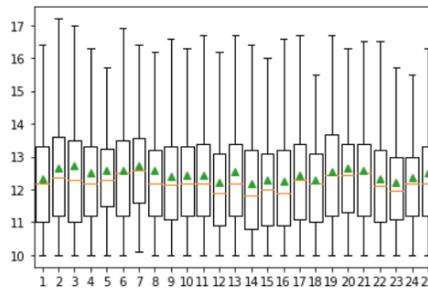


Figure 3-3 5G NSA 3x MIMO 2x2 TDD 40 MHz 256 QAM RTT

Figura 83: 5G UE - PGW RTT [90]

A la hora de comparar el RTT de LTE y de 5G NSA, se debe recordar que en esta última también se emplea EPC como Core Network, pero a diferencia del escenario base de LTE, 5G NSA tiene implementado CUPS, por lo que a la hora de estar las futuras comparativas se deberá compararlo no con el escenario base LTE sino con el que implementa la estrategia de despliegue MEC-CUPS.

### 7.3 Formulación por Estrategia de Despliegue

Antes de presentar los valores de los indicadores de servicio, se justifica a continuación cuales son los criterios que se han seguido, tomando como guía de referencia la base teórica indicada en el capítulo 5, Análisis del escenario base de cálculo y el capítulo 6, Alternativas de Despliegue.

#### Escenario base de cálculo

El punto de partida es la formulación valida al inicio del presente capítulo y que además está definida para el escenario base:

- **KPI 1:**  $TRAN_{UL} + TRAN_{DL} + 2(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net}) + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 TRAN_{UL} + 4(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net}) + 2 TRAN_{DL} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $TRAN_{UL} + 2(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net}) + TRAN_{DL} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

De lo indicado en la sección anterior, se considera que el RTT de los servidores AS desplegados en el Data Center del proveedor del servicio es:  $RTT_{EX\ server} = TRAN_{UL} + 2(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net}) + TRAN_{DL}$  que sustituida en la formulación anterior:

- **KPI 1:**  $RTT_{EX\ server} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{EX\ server} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{EX\ server} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Esta formulación es la aplicable para el calculo de los indicadores de servicio con una carga media en la red de acceso radio. En el supuesto de una red congestionada, tal y como se ha explicado en secciones anteriores, el operador tiene que asegurar una latencia en el caso de la señalización de 60 ms y 75 ms. Por tanto, habrá un RTT hasta el PGW de 120 ms para la señalización y 150 ms para los datos media. Pero todavía nos queda por considerar el tramo de la red externa que conecta el PGW con el proxy del CORE SIP, desplegado en el Data Center del operador.

Tal y como ya se ha descrito anteriormente  $RTT_{EX\ net}$  es la diferencia entre  $RTT_{EX\ server}$  y  $RTT_{IN\ server}$ . Por tanto, en el caso, de una red congestionada para el escenario base tendremos:  $RTT_{CONG\ SIG} = 120 + RTT_{EX\ net}$  y  $RTT_{CONG\ MED} = 150 + RTT_{EX\ net}$ , sustituyendo en la formulación anterior tendremos:

- **KPI 1:**  $RTT_{CONG\ SIG} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{CONG\ SIG} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{CONG\ MED} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Con objeto de poder analizar de forma más eficaz, el impacto en tiempo de distribuir al extremo, el EPC y el S/PGW (LBO) se va a suponer un tiempo de backhaul en uplink y downlink de 15 ms. Por lo indicado anteriormente, en el KPI 1 y KPI 2 se aplicará una vez y en el KPI 3 ya que la señalización realiza dos subidas y dos bajadas, se aplica dos veces.

Una vez, definida la formulación del escenario base, el siguiente paso consiste en abordar las diferentes estrategias de despliegue, comenzando por el despliegue MEC: Distributed S/PGW LBO y Distributed EPC.

### **Distributed S/PGW – Local Break Out**

En esta estrategia de despliegue se distribuye al eNB, el SGW y el PGW, pero se mantiene el EPC principal del operador de red [Figura 64]. En el Data Center del proveedor del servicio está desplegado el SIP CORE y los servidores MC y también en el MEC del eNB, en el extremo de la red. La señalización atraviesa, el núcleo de red hasta el SIP CORE y a los servidores MC que se encuentran en el Data Center del proveedor de los servicios MCS.

Los servidores MCPTT de forma centralizada para el conjunto de los eNB se encarga de gestionar la señalización de todas las llamadas que se produzcan en la red. Sin embargo, todo el tráfico de datos media se queda en el eNB en el que está registrado el UE y gracias a SGW y PGW llega al SIP CORE local que lo encamina hasta los servidores MCPTT locales que envía al tráfico media al eNB en el que se encuentre registrado el resto de UEs que participen en la comunicación. El tráfico de datos media no tiene que atravesar la red externa hasta los servidores MCPTT centralizados.

La formulación para una carga media en la red de acceso radio, es la siguiente:

- **KPI 1:**  $RTT_{EX_{server}} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{EX_{server}} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{IN_{server}} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Red de acceso radio congestionada

- **KPI 1:**  $RTT_{CONG_{SIG}} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{CONG_{SIG}} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{CONG_{MED}} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Donde,  $RTT_{CONG_{SIG}} = 120 + RTT_{EXT_{net}}$  y  $RTT_{CONG_{MED}} = 150 + RTT_{IN_{net}}$ . En ambos casos, el backhaul para KPI 1 y 2 es de 15 ms y de cero para KPI 3.

En esta alternativa, se separa el tráfico de señalización del tráfico media. En esta arquitectura, el proveedor del servicio tiene un control centralizado de toda la señalización de las llamadas que se encuentran en curso y además distribuye el tráfico de datos media a través de sus servidores MC locales, consiguiendo

procesar y distribuir el tráfico de datos media cerca de donde están los UE, mejorando el retardo en la comunicación de los datos media.

### **Distributed EPC** [Figura 66]

Cuando bajamos el EPC al eNB, el backhaul y el  $RTT_{EXnet}$  se hace cero, por lo tanto, el RTT que se aplica en esta alternativa es  $RTT_{INserver}$  y el tiempo de procesamiento del backhaul es cero. Tanto el SIP CORE, como los servidores AS están desplegados en el MC del eNB. Tanto la señalización como los datos media no suben hasta el Data Center del proveedor del servicio MCS ya que los eNB encaminan todo el tráfico al PGW del EPC que esta desplegado en su MEC. La formulación para una carga media en la red de acceso radio, es la siguiente:

- **KPI 1:**  $RTT_{INserver} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{INserver} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{INserver} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Si la red está congestionada.

- **KPI 1:**  $RTT_{CONGSIG} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{CONGSIG} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{CONGMED} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Donde,  $RTT_{CONGSIG} = 120 + RTT_{INnet}$  y  $RTT_{CONGMED} = 150 + RTT_{INnet}$ . Tal y como se ha indicado el backhaul en esta estrategia de despliegue, se puede considerar cero.

### **Despliegue 5G NSA** [Figura 71]

Como ya se ha indicado en la sección 3.4.3, Alternativas de Despliegue 5G, y posteriormente en la sección 6.4, Despliegue 5G NSA, esta arquitectura utiliza como núcleo de red, el EPC de LTE y como red de acceso radio gNB 5G New Radio (NR). En esta arquitectura, se implementa CUPS, separando los flujos de señalización de los de datos.

Los gateways SGW y PGW se encuentran distribuidos en el edge site. Los servicios MCS se encuentran redundados en el Data Center del edge site. La señalización y los datos media no atraviesan el core site del operador y no atraviesan la external network hasta el Data Center del proveedor de los MCS. Por tanto, en esta arquitectura  $RTT_{EXTnet} = 0$  y el backhaul = 0, aplicando en la formulación  $RTT_{INserver}$ .

La formulación para una carga media en la red de acceso radio, es la siguiente:

- **KPI 1:**  $RTT_{INserver} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{INserver} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{INserver} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Red de acceso radio congestionada, el 3GPP para 5G define [48] un 5QI = 69 para el plano de señalización y un 5QI = 65 para el plano de usuario en la tabla 5.7.4-1: "Standardized 5QI to QoS characteristics mapping". Estos 5QIs garantizarían en este caso de congestión un retardo máximo de 60 ms para el plano de control y 75 ms para el plano de usuario.

- **KPI 1:**  $RTT_{CONG_{SIG}} + 2(TS_{UE1} + TS_{IMS} + TS_{AS})$
- **KPI 2:**  $2 RTT_{CONG_{SIG}} + 2 TS_{UE1} + TS_{UE2} + 2 TS_{AS} + 4 TS_{IMS}$
- **KPI 3:**  $RTT_{CONG_{MED}} + TM_{UE1} + TM_{AS} + TM_{UE2}$

Considerando:  $RTT_{IN_{server}} = RTT_{5GNSA} + RTT_{IN_{net}}$ ,  $RTT_{CONG_{SIG}} = 120 + RTT_{5GNSA}$  y  $RTT_{CONG_{MED}} = 150 + RTT_{5GNSA}$ . En esta alternativa, el backhaul para KPI 1, KPI 2 y KPI 3 es 0 ms. Tal y como se ha indicado previamente,  $RTT_{IN_{net}} = 1$ ;

## 7.4 KPI 1 (Access Time)

Recordamos brevemente como el **MCPTT Access Time**, se define como el tiempo entre el instante en que un usuario MCPTT solicita hablar (**normalmente presionando la pastilla o el pulsador PTT en el UE MCPTT**) y cuando este usuario recibe la autorización para comenzar a hablar. Este tiempo no incluye confirmaciones de los usuarios receptores. [61]

### 7.4.1 Escenario base

Se presenta y se analiza a continuación los valores obtenidos del indicador de servicio KPI 1 (Access Time) para el escenario de prueba citado en la sección 7.1. La **curva ECDF en azul representa los valores obtenidos bajo unas condiciones de carga media de la red LTE y en rojo, suponiendo que la red está saturada considerando el escenario base de esta tesis.**

La gráfica que se muestra a continuación representa los valores del KPI 1 correspondientes a las llamadas establecidas durante el proceso de medición en condiciones de carga media de la red LTE (representada en azul) con los datos obtenidos cuando se satura la red LTE (en rojo)

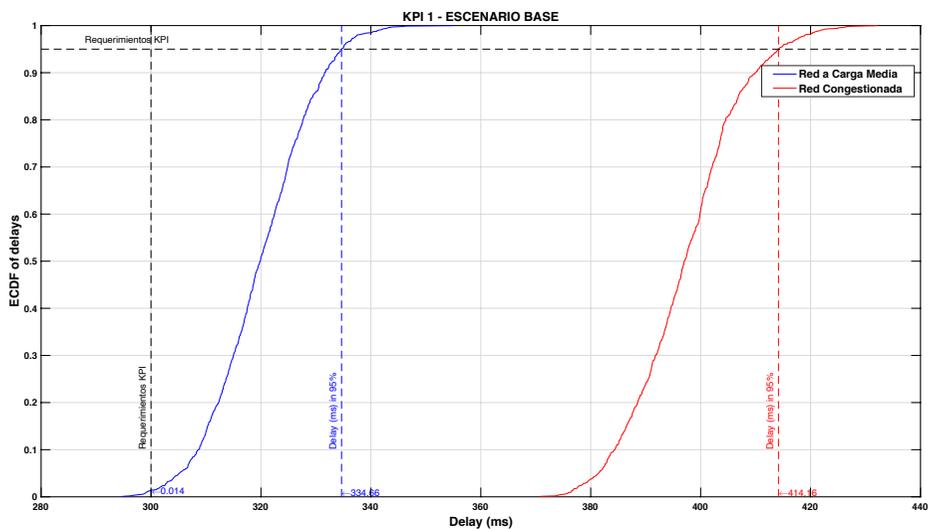


Figura 84: KPI1 – Arquitectura LTE estándar

Para analizar esta gráfica es necesario fijarse en la línea vertical que define el “KPI Requirements” para el KPI1, que está situada a 300 ms y en la línea horizontal que define el “porcentaje de llamadas que deben cumplir con el KPI, que tal y como ha definido el 3GPP, es del 95%. Esto se aplica para todas las gráficas de igual forma:

- **Red a carga media:** El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas es de **334,66 ms**. Tan solo el 0,014 % de las llamadas tendrían un KPI 1  $\leq$  300 ms.
- **Red Congestionada:** Todas las llamadas tendrían un tiempo de acceso mayor que el KPI (300 ms). En este nuevo escenario, el 95% de las llamadas tienen un tiempo de acceso inferior a **414,16 ms**.

En el escenario base, el servidor MCPTT se encuentra desplegado en el Data Center del operador, esto implica que la llamada MCPTT tenga que atravesar el núcleo de la red y la red cableada del operador hasta llegar al proxy de la arquitectura IMS (P-CSCF) que a través del S-CSCF alcanzará al Application Server donde está desplegado los servidores MCPTT.

Tabla 49: Número de veces que a atraviesa la señalización, cada componente en el escenario base para KPI 1

SIGNAL.	$T_{\text{TRAN}_{\text{UL}}}$	$T_{\text{S}_{\text{UE1}}}$	$T_{\text{BH}_{\text{net}}}$	$T_{\text{EPC}}$	$T_{\text{IN}_{\text{net}}}$	$T_{\text{S}_{\text{IMS}}}$	$T_{\text{EX}_{\text{net}}}$	$T_{\text{S}_{\text{AS}}}$	$T_{\text{TRAN}_{\text{DL}}}$	$T_{\text{S}_{\text{UE2}}}$
KPI 1	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A

En el caso del KPI 1, la señalización atraviesa en 2 ocasiones: la red de acceso radio ( $T_{\text{TRAN}_{\text{UL}}}$  y  $T_{\text{TRAN}_{\text{DL}}}$ ), el núcleo de red ( $T_{\text{BH}_{\text{net}}}$ ,  $T_{\text{EPC}}$  y  $T_{\text{IN}_{\text{net}}}$ ), IMS ( $T_{\text{S}_{\text{IMS}}}$ ), la red externa ( $T_{\text{EX}_{\text{net}}}$ ) y los servidores MCPTT ( $T_{\text{S}_{\text{AS}}}$ ). Por tanto, el aumento de la latencia en la red de acceso radio penaliza directamente en el KPI 1, tal y como se puede comprobar en la gráfica anterior. Mientras que el resto de los tiempos, se mantienen similares tanto en situación de carga media como el caso de red congestionada, los tiempos  $T_{\text{TRAN}_{\text{UL}}}$  y  $T_{\text{TRAN}_{\text{DL}}}$  experimentan incrementos muy importantes. Hasta el punto de llegar a una situación donde el 95% de las llamadas no se puede considerar de misión crítica porque no cumplen con lo indicado por el 3GPP.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 1 cuando se despliegan los servicios MCS sobre una arquitectura LTE estándar son los siguientes:

- En condiciones de **carga media** en una red LTE como la definida en el **escenario base**, solo un **0,014 %** de las 1000 llamadas establecidas, cumpliría con los requerimientos del 3GPP de 300 ms.
- Con la implementación evaluada, una red congestionada LTE cumpliendo únicamente el retardo asociado al QCI penaliza mucho el KPI 1 y provoca que para el 95% de las llamadas se obtenga un indicador fuera de lo indicado por el 3GPP.
- En este escenario y para este KPI, un aumento de la capacidad de la red podría impedir que ésta se congestionara, pero **no garantizaría que el 95 % de las llamadas podrían considerarse MC**. Sería necesario mejorar el RTT entre los UE y el PGW o traer los servidores MC más cerca de los UE, disminuyendo  $T_{\text{EX}_{\text{net}}}$

#### 7.4.2 MEC (Distributed S/PGW LBO)

Tal y como se ha descrito previamente en la sección 6.2.1 es la segunda propuesta de implementación de despliegue del EPC en el borde de red, sólo las entidades SGW y PGW se implementan en el extremo de la red, mientras que las funciones del plano de control como MME y HSS se ubican en el EPC central del operador. Tanto el SIP CORE, como los servidores MC, están desplegados en el Data Center

del proveedor del servicio y el host MEC del eNB. A diferencia de cuando el EPC están completamente desplegado en el eNB, en esta estrategia la señalización sube a los servidores MC del proveedor del servicio, mientras que los datos media, se procesan localmente en el eNB. El proveedor del servicio gestiona de forma centralizada la señalización de todas las llamadas de la red MC, mientras que los datos media se procesan y distribuyen desde los servidores MC desplegados en el host MEC del eNB.

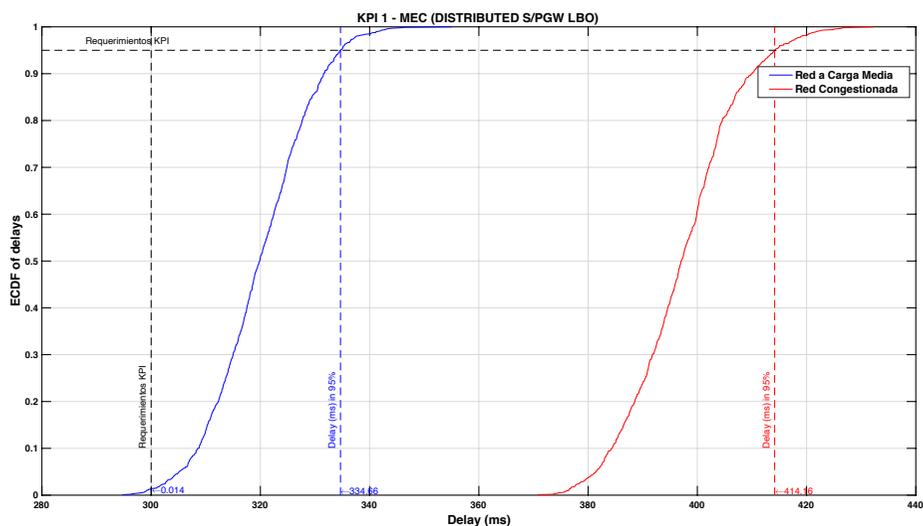


Figura 85: KPI1 – MEC (Distributed S/PGW)

La selección local de SGW es realizada por el MME central de acuerdo con los procedimientos DNS estándar de 3GPP y en base al Código de área de seguimiento (TAC) de la radio a la que se conecta el UE.

A continuación, se compara el número de veces que atraviesa la señalización cada componente para el caso del despliegue MEC (Distributed S/PGW) para determinar si se mejora o se empeora el KPI<sub>1</sub>

Tabla 50: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed S/PGW) para KPI 1

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	TB <sub>Hnet</sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI 1 (BASE)	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A
KPI 1 (S/PGW LBO)	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A

En este despliegue la señalización atraviesa el núcleo de la red hasta el servidor MCPTT AS que se encuentra en el Data Center del operador, igual que ocurre cuando se despliega el servicio sobre el escenario base de referencia. Desde el punto de vista, del KPI 1, el despliegue de los servidores MCPTT en el MEC con el S/PGW desplegado, no supone una mejora, ya que la señalización tiene que atravesar igualmente el EPC del operador hasta el Data Center del proveedor de servicios.

A continuación, se presentan los datos obtenidos extrapolados a partir del escenario de referencia:

- **Red a carga media:** El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas es de **334,66 ms**. Tan solo el 0,014 % de las llamadas tendrían un  $KPI\ 1 \leq 300$  ms.
- **Red Congestionada:** Todas las llamadas tendrían un tiempo de acceso mayor que el KPI (300 ms). En este nuevo escenario, el 95% de las llamadas tienen un tiempo de acceso inferior a **414,16 ms**.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 1 cuando se despliegan los servicios MCS sobre una arquitectura Distributed S/PGW LBO son:

- Para el KPI 1, los tiempos que se han calculado coinciden con los obtenidos en el despliegue del escenario base LTE.
- Se observa cómo las dos filas de la tabla tienen los mismos valores.
- Se debe esperar a analizar el resto de los indicadores para determinar si el despliegue MEC (Distributed S/PGW LBO) es una alternativa que mejora el rendimiento del servicio.

### 7.4.3 MEC (Distributed EPC)

Tal y como se ha descrito previamente en la sección 6.2.3, El EPC distribuido se ubica junto con el host MEC desplegado en el eNB,  $T_{BH_{net}} = 0$ . Los UE se registran en el MME del EPC distribuidos, obteniendo el APN del PGW distribuido. Tanto el SIP CORE, como los servidores MC, se encuentran desplegados en el host MEC,  $T_{EX_{net}} = 0$ . El PGW esta conectado con el proxy del SIP CORE (P-CSCF) a través de una red interna  $T_{IN_{net}}$ , al igual que está conectado los servidores MC con el S-CSCF del SIP CORE.

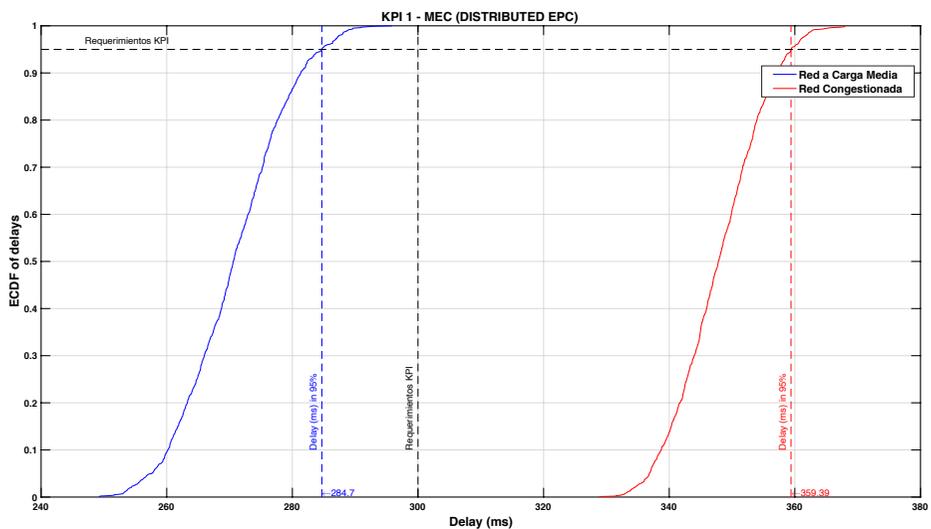


Figura 86: KPI1 – MEC (Distributed EPC)

El servidor MCPTT se encuentra desplegado en el extremo de la red, cerca de los usuarios finales, lo cual supone disminución de tiempos de latencia y una supuesta

mejora en las comunicaciones. Se analiza a continuación como afecta esta alternativa de despliegue al KPI 1.

Tabla 51: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed EPC) para KPI 1

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	T <sub>BH<sub>net</sub></sub>	TEPC	T <sub>IN<sub>net</sub></sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI 1	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A
KPI 1 (MEC EPC)	1x	2x	N/A	2x	2x	2x	N/A	2x	1x	N/A

Lo primero que se observa en la tabla anterior, es que para el KPI 1, la señalización y los datos media no suben hasta el Data Center del proveedor del servicio, lo que implica que TEX<sub>net</sub> no añade retardo al KPI 1. De forma similar, ocurre con TBH<sub>net</sub> ya que el EPC está desplegado en el eNB. El resto de los tiempos, incluidos los de procesamiento de la señalización en IMS (TS<sub>IMS</sub>) y en los servidores MCPTT (TS<sub>AS</sub>), se consideran iguales que para el escenario base.

Los tiempos que se obtienen al realizar este despliegue son los siguientes:

- **Red a carga media:** El 95% de las llamadas analizadas tendrían un tiempo de acceso menor o igual a **284,70 ms**, lo que garantizaría un establecimiento inmediato de las llamadas.
- **Red Congestionada:** El 95% de las llamadas analizadas tendrían un tiempo de acceso menor o igual a **359,39 ms**, lo que impide que se puedan considerar llamadas MCPTT de MC al superar los 300 ms establecidos para este indicador de servicio.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 1 cuando se despliegan los servicios MCS sobre una arquitectura Distributed S/PGW LBO son:

- Con la implementación de referencia considerada, no tener que atravesar el núcleo de red del operador supone que el **100% de las llamadas** cumplirían con los requisitos del 3GPP, con carga media de red y en caso de congestión el 100% de las llamadas tienen un KPI 1 superior a 300 ms.
- El resto de los tiempos se mantienen igual que en el despliegue sobre una arquitectura LTE estándar. Los nodos de cálculos desplegados en el host MEC tienen que estar correctamente dimensionados para que un aumento de la capacidad de carga no incremente los tiempos de procesados TS<sub>IMS</sub> y TS<sub>AS</sub>.
- Con esta estrategia de despliegue, eliminados los tiempos de backhaul entre eNB y PGW, pero especialmente evitamos los tiempos de la red externa, desplegando los servicios cerca de donde los usuarios se conectan a la red de acceso.

#### 7.4.4 5G NSA (Non-Standalone)

Tal y como se ha descrito previamente en la sección 6.4, esta alternativa de despliegue involucra 5G NR en la parte de la red de acceso radio y se mantiene como núcleo de red, el EPC de LTE. En esta alternativa de despliegue, se ha implementado CUPS. Esto implica que los flujos de datos de señalización y media están separados. La señalización y los datos media, no atraviesan el core site del operador. Los servicios MCS se han desplegado en el Data Center del edge site. El aumento de ancho de banda y la disminución de los tiempos de latencia debidos a 5G NR deberían impedir que se congestionara la red, en cualquier caso, ha sido calculada y los valores medidos se representan sobre la siguiente gráfica.

En el despliegue **5G NSA** debido a un importante aumento de capacidad en la parte radio, es más complejo que la red se congestione, pero si es compartida podría producirse y en ese supuesto el 3GPP ha definido para 5G define [48] un 5QI = 69 para el plano de señalización y un 5QI = 65 para el plano de usuario en la tabla 5.7.4-1: "Standardized 5QI to QoS characteristics mapping". Estos 5QIs garantizarían en este caso de congestión un retardo máximo de 60 ms para el plano de control y 75 ms para el plano de usuario.

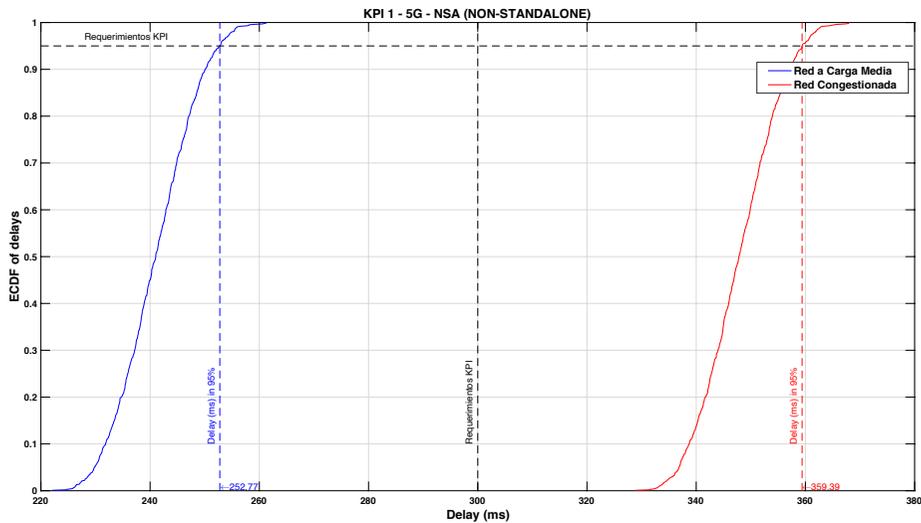


Figura 87: KPI 1 – 5G NSA (Non-Standalone)

En la siguiente tabla, se compara el número de veces que atraviesa la señalización cada componente para el caso del despliegue 5G NSA, con el escenario base de cálculo sobre LTE.

Tabla 52: Comparativa LTE estándar – 5G NSA para KPI 1

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	T <sub>SUE1</sub>	T <sub>BH<sub>net</sub></sub>	T <sub>EPC</sub>	T <sub>IN<sub>net</sub></sub>	T <sub>SIMS</sub>	T <sub>EX<sub>net</sub></sub>	T <sub>SAS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	T <sub>SUE2</sub>
KPI 1	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A
KPI 1 (5G NSA)	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A

Al comparar las dos filas de esta tabla, se comprueba que ambas son iguales. Igual que en el despliegue anterior. La diferencia está en el RTT hasta los servidores MC del proveedor del servicio medido en la sección 7.2:

- Red con carga media:  $RTT_{EX_{server}} = RTT_{5GNSA} + RTT_{EXT_{net}}$
- Red Congestionada:  $RTT_{EX_{server}} = RTT_{CONG_{SIG}} + RTT_{EXT_{net}}$

Por tanto, los resultados que se han obtenido difieren de un despliegue a otro:

- **Red a carga media:** El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas es de **252,77 ms**. El 100% de las llamadas presentan un indicador de servicio, KPI 1  $\leq$  300 ms.
- **Red Congestionada:** Todas las llamadas tendrían un tiempo de acceso mayor que el KPI (300 ms). En este nuevo escenario, el 95% de las llamadas tienen un tiempo de acceso inferior a **359,39 ms**.

La reducción de la latencia unido a un aumento del throughput que ofrece los gNB a los usuarios conectados, permitirá más usuarios conectados por estación y por tanto mayor aumento en el número de llamadas simultaneas que se van a producir. Este aumento de capacidad deberá ser gestionada por los proveedores del servicio para evitar que se produzcan elevados tiempos de procesamiento en los servidores AS y la arquitectura IMS.

El empleo de gNB 5G NR, unido a elegir una estrategia de despliegue donde se aplica CUPS, separando el plano de usuario y de control en las entidades SGW y PGW del EPC, ha permitido que el 100% de las llamadas puedan ser consideradas MC.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 1 cuando se despliegan los servicios MCS sobre una arquitectura 5G NSA son:

- Desplegando los servicios MCS sobre la arquitectura 5G NSA se obtiene el mejor indicador de rendimiento **KPI 1**.
- La mejora en la latencia media  $RTT_{IN_{server}} (5G) = RTT_{5GNSA} + RTT_{IN_{net}} = 13$  ms frente a  $RTT_{IN_{server}} (4G) = 40$  ms afecta directamente a la mejora del indicador **KPI 1**.
- El despliegue de los MCS en el edge site, tanto en esta implementación cuando distribuimos completamente el EPC al extremo de red, no requiere atravesar el backhaul a diferencia que ocurre en las dos restantes.
- El **KPI 1**, influye notablemente en la percepción por parte de los participantes de una comunicación de instantaneidad y eso es precisamente lo que se requiere en unas comunicaciones de emergencia. Es precisamente uno de los principales valores añadidos de una comunicación PTT (pulso y si el canal está libre, hablo) frente a una comunicación tradicional de telefonía (marco y espero para poder hablar).

## 7.5 KPI 2 (ACCESS TIME END TO END)

Recordemos brevemente, como el KPI 2 es indicador de rendimiento de los servicios que mide el tiempo de acceso de extremo a extremo. Se define como el tiempo entre el momento en que un usuario MCPTT solicita hablar y el momento en que este usuario recibe una señal para comenzar a hablar, incluido el establecimiento de la llamada MCPTT (si corresponde) y el reconocimiento del primer receptor/usuario antes de que se pueda transmitir la voz.

### 7.5.1 Escenario base

El tiempo de establecimiento de una llamada para las agencias PPDR es crítico, por esa razón, el grupo de trabajo SA6 del 3GPP ha definido un indicador para supervisar su rendimiento. A la hora de medir el KPI 2 siempre se emplean llamadas MCPTT con respuesta automática.

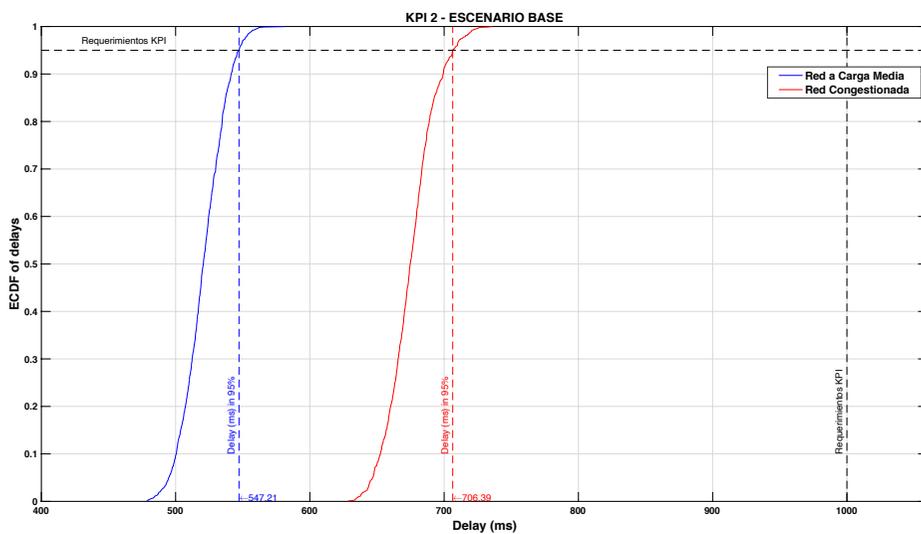


Figura 88: KPI 2 – Escenario base

Esto quiere decir, que cuando al UE2 le llega el mensaje SIP 'INVITE' no es el usuario el que acepta la llamada (sino se estaría incluyendo en el cálculo el tiempo que tarda el usuario en aceptar) sino que automáticamente se responde con un mensaje SIP '200 OK' que permite continuar con la señalización de la llamada.

El valor requerimiento del 3GPP para el KPI 2 es de 1000 ms tanto en una situación de congestión de la red, como en una situación de carga estándar.

Tabla 53: LTE estándar para KPI 2

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	TB <sub>H<sub>net</sub></sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI <sub>2</sub>	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x

A continuación, se analiza en detalle los tiempos medidos.

- **Red a carga media:** el 100% de las llamadas cumplirían con el KPI 2. El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas sería de **547,21 ms**.

- **Red Congestionada:** el 100% de las llamadas cumplirían con el KPI 2. El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas sería de **706,39 ms**.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 2 cuando se despliegan los servicios MCS sobre el escenario base es la siguiente:

- A pesar de que los tiempos son muy buenos, se va a analizar este indicador con las diferentes estrategias de despliegue y se va a comprobar cuánto se mejora (o no) en cada caso.
- Incluso en situaciones de red congestionada, el indicador cumple con los requerimientos definidos por el 3GPP.

### 7.5.2 MEC (Distributed S/PGW LBO)

En la tabla adjunta se puede ver de una forma muy visual cómo la estrategia de despliegue MEC (Distributed S/PGW para el indicador KPI<sub>2</sub>, se comporta igual que si se hubiera desplegado el servicio sobre una arquitectura LTE estándar.

Tabla 54: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed S/PGW) para KPI<sub>2</sub>

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	TB <sub>H<sub>net</sub></sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI 2	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x
KPI 2 (S/PGW LBO)	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x

Los tiempos que se han medido durante las llamadas que se han realizado, coinciden con las del despliegue sobre la arquitectura LTE estándar.

- **Red a carga media:** el 100% de las llamadas cumplirían con el KPI 2. El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas sería de **547,21 ms**.
- **Red Congestionada:** el 100% de las llamadas cumplirían con el KPI 2. El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas sería de **706,39 ms**.

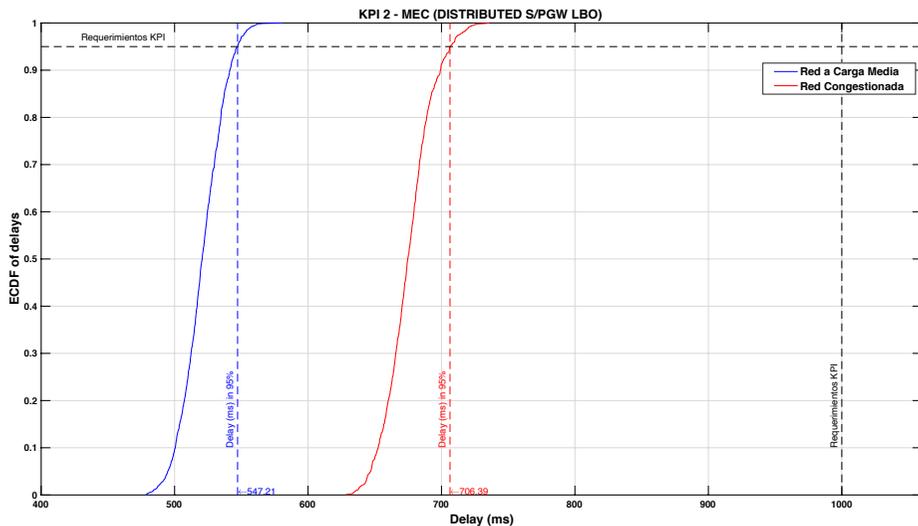


Figura 89: KPI 2 – MEC – Distributed S/PGW

Las conclusiones obtenidas para el KPI 2 cuando se despliegan los servicios MCS en la arquitectura Distributed S/PGW LBO.

- Como ya se ha indicado para el caso, del indicador KPI 1, este tipo de despliegue no mejora los tiempos de señalización de la llamada. En breve, se podrá analizar que ocurre para el caso de los datos media.
- Los valores obtenidos para la red de acceso a carga media como con red congestionada coinciden con los valores obtenidos por el KPI 2 cuando lo desplegamos sobre el escenario base.
- La señalización debe atravesar el core site del operador y la external network hasta los MCS desplegados en el Data Center del Proveedor de los servicios de misión crítica.

### 7.5.3 MEC (Distributed EPC)

En este despliegue con el EPC distribuido en el extremo de la red, muy cerca del UE, la señalización no atraviesa el backhaul, el EPC, la red interna del operador, ni la red externa ya que el SIP CORE y los servidores MC están desplegados en el host MEC.

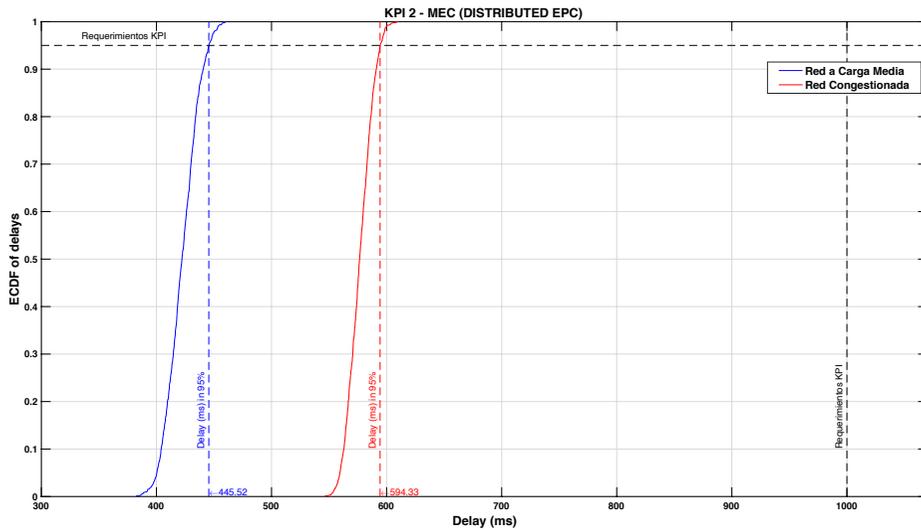


Figura 90: KPI 2 – MEC – Distributed EPC

Si lo comparamos con el despliegue sobre una arquitectura LTE estándar, tendría que atravesarlo hasta en 4 ocasiones:  $4 * (TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net})$ . Por lo tanto la reducción del tiempo de establecimiento es significativo.

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	TB <sub>H<sub>net</sub></sub>	TE <sub>PC</sub>	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI 2	2x	2x	N/A	4x	4x	4x	N/A	2x	2x	1x
KPI 2 <sub>(MEC EPC)</sub>	2x	2x	N/A	4x	4x	4x	N/A	2x	2x	1x

Tabla 55: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed EPC) para KPI2

En este despliegue, con el EPC distribuido en el MEC, el 100% de las llamadas cumplen con el retardo definido por el 3GPP para el tiempo de establecimiento de la llamada extremo UE 1 a extremo UE 2.

- **Red a carga media:** El 95 % de las llamadas analizadas tendrían un tiempo de establecimiento extremo a extremo menor o igual a **445,52 ms**, lo que garantizaría un establecimiento inmediato de la llamada.
- **Red congestionada:** La sobrecarga de la red afecta al establecimiento de la llamada extremo a extremo. Se consigue que el 95% de las llamadas de la plataforma de pruebas empleada, consigan un tiempo de establecimiento inferior a **594,33 ms**.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 2 cuando se despliegan los servicios MCS en la arquitectura Distributed EPC:

- Todo el EPC está distribuido en el edge site.
- La señalización no atraviesa el core site del operador. Lo que supone un backhaul de 0 ms.
- Los servicios MCS están desplegados en el edge site por lo tanto  $T_{EX_{net}}$  es igual a 0 ms.
- De las tres estrategias planteadas sobre la red de acceso 4G, distribuir el EPC al edge site es la que mejor valor se obtiene para el KPI 2.

#### 7.5.4 5G - NSA (Non-Standalone)

Simplemente, observando el espacio que queda vacío en la parte derecha de la gráfica, podemos hacernos una idea del comportamiento del KPI 2 para esta estrategia de despliegue. En la parte derecha se observa la línea vertical que indica cuales son los requerimientos definidos por el 3GPP para este KPI y casi a la izquierda de la gráfica la curva ECDF que representa los valores del indicador.

A través de la siguiente tabla se analizar el comportamiento del indicador KPI 2 del servicio MCPTT cuando se despliega sobre una arquitectura 5G NSA

Tabla 56: Comparativa LTE estándar – 5G NSA para KPI 2

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	T <sub>SUE1</sub>	T <sub>BH<sub>net</sub></sub>	T <sub>EPC</sub>	T <sub>IN<sub>net</sub></sub>	T <sub>SIMS</sub>	T <sub>EX<sub>net</sub></sub>	T <sub>SAS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	T <sub>SUE2</sub>
KPI 2	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x
KPI 2 (5G NSA)	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x

Al igual que ocurre en el despliegue anterior (MEC - Distributed EPC) la señalización para el KPI 2 no atraviesa el core site del operador. Sin embargo, el retardo medido es significativamente menor.

- Desplegando los servicios MCS sobre la arquitectura 5G NSA se obtiene el mejor indicador de rendimiento **KPI 2**.
- El 95% de las llamadas tendrían un tiempo de acceso de extremo a extremo menor o igual a **380,98 ms**. Este tiempo de latencia es mejor que el obtenido

para la estrategia de despliegue MEC – Distributed EPC, que ha sido de **445,52 ms**.

- Considerando, una red congestionada, El 95% de las llamadas tendrían un tiempo de acceso de extremo a extremo menor o igual a **594,33 ms**.

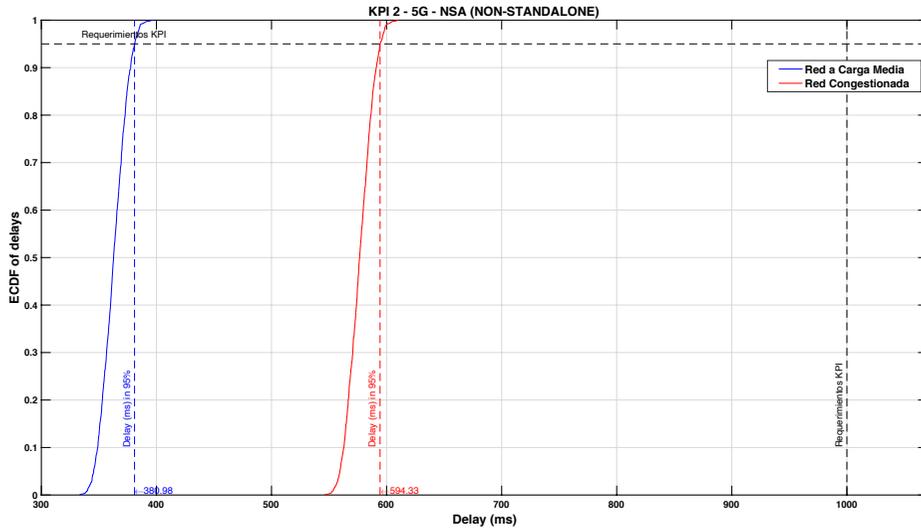


Figura 91: KPI 2: 5G – NSA (Non – Standalone)

Las conclusiones obtenidas para el KPI 2 cuando se despliegan los servicios MCS en la arquitectura 5G NSA:

- El KPI 2 obtenido, es mejor que el obtenido en la alternativa LTE (MEC – EPC Distributed), en ambas alternativas los MCS están desplegado en el edge site. Por lo tanto, en ambos casos, el  $TEXT_{net}$  y el backhaul es de 0 ms.
- La mejora en la latencia media  $RTT_{server} (5G) = RTT_{5GNSA} + RTT_{innet} = 13$  ms frente a  $RTT_{inserver} (4G) = 40$  ms afecta directamente a la mejora del indicador **KPI 2**.
- Al analizar la tabla, la señalización atraviesa la parte RAN (Radio Access Network) en 4 ocasiones: 2  $TRAN_{UL}$  y 2  $TRAN_{DL}$ . El impacto de la red de acceso radio en este indicador del servicio es muy significativa, respecto al valor global obtenido.

## 7.6 KPI 3 (MOUTH TO EAR)

La latencia del audio va a depender en gran medida del rendimiento del subsistema audio de los terminales (ver Anexo 0). Por esta razón, para cada una de las gráficas se va a incluir el KPI 3 asumiendo el comportamiento tipo en cuanto a retardos en el procesamiento del audio de terminales Android con versión 9 (discontinua), 8 (continua gruesa) y 7 (continua fina), tanto con red congestionada (rojo) como para red con carga media.

### 7.6.1 Escenario base

En este apartado, se va a analizar de forma numérica como afecta al indicador KPI 3 y por tanto al 'mouth to ear' el instalar el cliente MCPTT sobre una versión de Android o sobre otra.

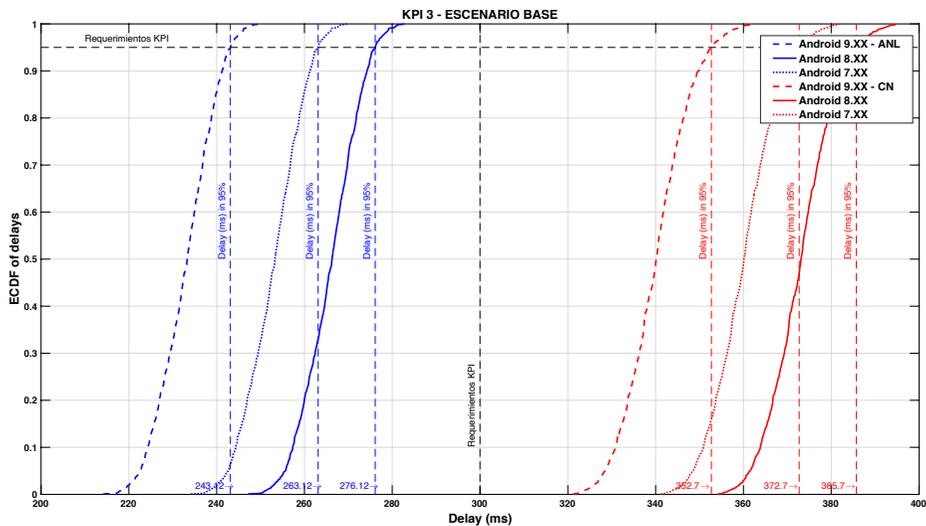


Figura 92: KPI<sub>3</sub> – Arquitectura LTE

El KPI 3 tendrá mucho que ver con la interactividad. La comunicación entre personas se conoce como interacción, no interactividad. Para que se considere interactividad, la comunicación entre personas debe existir en el medio un sistema de comunicaciones, en nuestro caso, una red de emergencia de banda ancha.

Tabla 57: KPI 3 en el escenario base

MEDIA	TRAN <sub>UL</sub>	TM <sub>UE1</sub>	T <sub>BH<sub>net</sub></sub>	TEPC	T <sub>IN<sub>net</sub></sub>	TS <sub>IMS</sub>	T <sub>EX<sub>net</sub></sub>	TM <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TM <sub>UE2</sub>
KPI3	1x	1x	2x	2x	2x	N/A	2x	1x	1x	1x

Si se toman solo, los valores medidos, con una carga media de red, la latencia obtenida, incluso utilizando una versión 7 de Android se encuentra por debajo de los 300 ms marcados por el 3GPP.

A continuación, se resume los valores obtenidos:

- **Red a carga media:** El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas (v9) sería de **243,12 ms**, (v8) es **276,12 ms** y de (v7) es **263,12 ms**
- **Red Congestionada:** El tiempo retraso del 95% de las llamadas (v9) sería de **352,7 ms** y cumplirían con el KPI 3. Mientras que para el 95% de las llamadas (v8) es **385,7 ms** y (v7) es **372,7 ms** no cumpliendo con el KPI 3.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 3 cuando se despliegan los servicios MCS en escenario base son las siguientes:

- En la implementación considerada como referencia, el despliegue del servicio MCPTT en el escenario base LTE se cumple con los tiempos definidos por el 3GPP en la versión de Android (v9), Android (v8) y Android (v7) con una red a carga media.
- Los tiempos del KPI 3, se ven muy comprometidos por la congestión de la red para las versiones 7 y 8. Especialmente en la primera, cuyos tiempos quedan alejados de los **300 ms** requeridos. Es cierto, que esta latencia no va a generar retardos en las comunicaciones y por tanto va a ser fluida entre los interlocutores, pero no se podrá hablar de unas comunicaciones de misión crítica y por tanto no serán validas para las agencias **PPDR (Public Protection Disaster Recovery Broadband)**

## 7.6.2 MEC (Distributed S/PGW LBO)

Al analizar la gráfica que se muestra a continuación, vemos como los valores que obtenemos para el KPI 3 en las dos propuestas de alternativas de despliegue MEC son iguales. Esta circunstancia, no se ha dado para los indicadores de servicio KPI 1 y KPI 2. ¿Cuál es la razón?

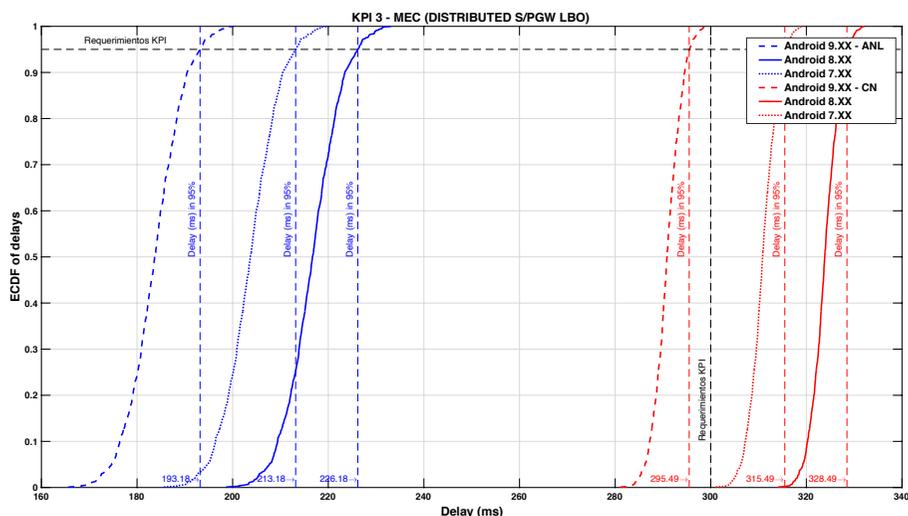


Figura 93: KPI3 – MEC (Distributed S/PGW)

Tanto KPI 1 como KPI 2, tienen que ver como la señalización de la llamada. En la alternativa de despliegue MEC (Distributed S/PGW), la señalización tiene que atravesar el núcleo de red, porque el EPC no está totalmente distribuido como ocurre en la alternativa MEC (Distributed EPC). Por eso son diferentes.

Sin embargo, el KPI 3, hace referencia a la transferencia de los datos media, en este caso, paquetes de datos MCPTT una vez que la llamada a quedado establecida entre los UE a través de la señalización. En este caso, en las dos alternativas MEC, los servidores MCPTT están en el extremo de la red, concretamente en el host MEC. En ambas alternativas, no se atraviesa el núcleo de red.

En el caso del MCPTT, todo el tráfico de datos RTP entre los usuarios conectados al mismo eNB puede quedarse en el MEC o podría subir hasta el servicio MCPTT AS centralizado si fuera necesario. El proceso de selección de SGW realizado por el MME está de acuerdo con el estándar 3GPP y se basa en la ubicación geográfica de los UE

Tabla 58: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed S/PGW) para KPI<sub>3</sub>

MEDIA	TRAN <sub>UL</sub>	TM <sub>UE1</sub>	TBH <sub>net</sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TM <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TM <sub>UE2</sub>
KPI3	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x
KPI 3 (S/PGW LBO)	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x

A continuación, se muestran los valores del indicador de servicio KPI 3 y que como se ha mencionado al inicio de esta sección coinciden con la alternativa MEC (Distributed EPC), presentada en la sección 7.5.3

- **Red a carga media:** El 100% de las llamadas han cumplido el KPI 3. El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas (v9) ha sido de **193,18 ms**, (v8) ha sido de **226,18 ms** y de (v7) **213,18 ms**. Los indicadores de servicio obtenidos con el S/PGW distribuido, son mejores que los obtenidos para el escenario base.
- **Red Congestionada:** El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas (v9) ha sido de **295,49 ms**, (v8) ha sido de **328,49 ms** y en (v7) ha sido **315,49 ms**. Por tanto, con versión 9, el 95% de las llamadas tienen un indicador de servicio inferior a 300 ms, a pesar de que la red esté congestionada.

Las conclusiones obtenidas para el KPI 3 cuando se despliegan los servicios MCS en la alternativa Distributed S/PGW LBO:

- Tanto si se distribuye el EPC en el extremo de la red, como si solo se distribuye SGW y se hace Local Break Out al tráfico media, se obtiene unos valores de KPI3 con independencia de la versión de Android, inferiores a los 300 ms definidos por el 3GPP, para una red de acceso radio a media carga

### 7.6.3 MEC (Distributed EPC)

Tal y como se ha indicado anteriormente para el KPI 1, sección 7.4.3 como para el KPI 2, en la sección 7.5.3 y en la propia definición de la propuesta del despliegue MEC, sección 6.2. El servicio MCPTT está desplegado en el extremo de la red, muy cerca del usuario final. Pero como se puede observar en la gráfica que se muestra a continuación, dependiendo de la versión de Android sobre la que se despliegue el cliente MCPTT, el KPI 3 en una condición de sobrecarga de red no cumplirá con lo establecido por el 3GPP.

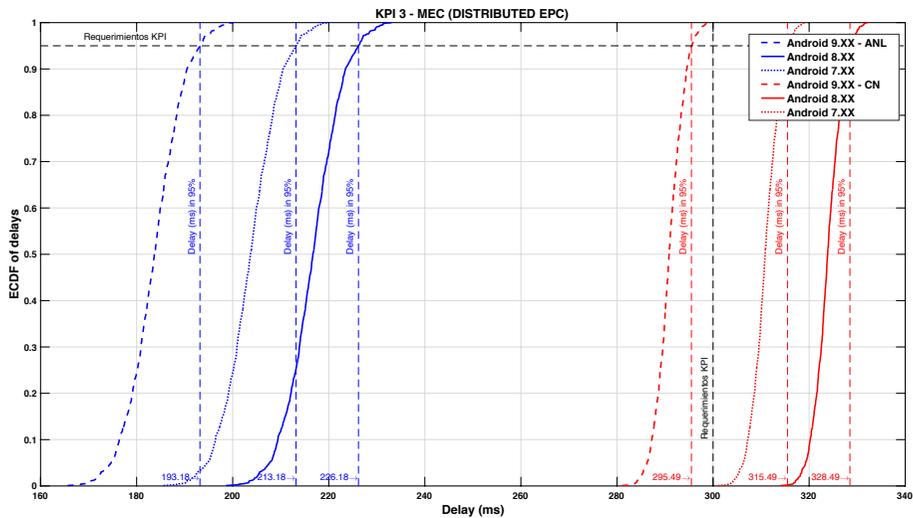


Figura 94: KPI3 – MEC (Distributed EPC)

Antes de entrar a valorar los tiempos que se han medido, la tabla comparativa nos indica que los datos de *media* no atraviesan el backhaul, ni la red externa, ya que los servidores MC, junto con el SIP CORE están desplegados en el host MEC. Los tiempos de procesamiento de los datos de *media*, tanto en el servidor  $TM_{AS}$  como en los clientes  $TM_{UE1}$  y  $TM_{UE2}$  pueden llegar a ser más críticos que la latencia de la propia red de acceso radio (RAN).

Tabla 59: Comparativa LTE estándar - MEC (Distributed EPC) para KPI 3

MEDIA	$T_{RAN_{UL}}$	$T_{M_{UE1}}$	$T_{BH_{net}}$	$T_{EPC}$	$T_{IN_{net}}$	$T_{S_{IMS}}$	$T_{EX_{net}}$	$T_{M_{AS}}$	$T_{RAN_{DL}}$	$T_{M_{UE2}}$
KPI3	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x
KPI 3 (MECEPC)	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x

A diferencia con el despliegue anterior el 95% de las llamadas medidas en un terminal Android con la versión 7 cumplen con lo indicado por el 3GPP. Pero si la red está congestionada, solo para la versión 9, el 95% cumplen con el indicador de rendimiento marcado, mientras que las llamadas realizadas con la versión 7 y 8 superan los 300 ms requeridos por el 3GPP, lo que pone de manifiesto, la importancia que sigue teniendo la latencia de la red de acceso de radio en la comunicación.



Por esta razón, aparece la gráfica mucho más limpia. Si no fuera porque en la parte izquierda de la misma, aparecen en azul 3 gráficas ECDF, podría parecer que es la gráfica del KPI2 para un despliegue 5G-NSA.

Pero mirando con detalle, se observa como la línea vertical, se encuentra a la altura de los 300 ms. A simple vista y sin entrar en el detalle de los valores, simplemente por la distribución el KPI 3 para el 100% de las llamadas es menor a 190 ms, lo cual representa un escenario ideal.

El despliegue del servicio MCPTT en una arquitectura 5G NSA se debe comparar con la alternativa de despliegue MEC con el S/PGW distribuido en el eNB. En ambas, el tráfico de señalización está separado del de datos. La señalización atraviesa la red del operador hasta los servidores MC que se encuentran desplegados en el Data Center del proveedor del servicio permitiendo un control centralizado de todas las llamadas de la red de comunicaciones MC. Distribuir el SGW y el PGW en el gNB y la ruptura del túnel GTP mediante la implementación de LBO permite que el tráfico de datos se gestione en a nivel de gNB.

Tabla 60: Comparativa LTE estándar – 5G NSA KPI<sub>3</sub>

MEDIA	TRAN <sub>UL</sub>	TM <sub>UE1</sub>	TB <sub>H<sub>net</sub></sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TM <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TM <sub>UE2</sub>
KPI3	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x
KPI 3 (5G NSA)	1x	1x	N/A	2x	2x	N/A	N/A	1x	1x	1x

- **Red a carga media:** El 100% de las llamadas han cumplido el KPI 3. El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas (v9) ha sido de **157,89 ms**, (v8) ha sido de **190,89 ms** y de (v7) **177,89 ms**. Los indicadores de servicio obtenidos en 5G NSA, son mejores que los obtenidos para el escenario base.
- **Red Congestionada:** El tiempo de retraso para el 95% de las llamadas (v9) ha sido de **295,49 ms**, (v8) ha sido de **328,49 ms** y en (v7) ha sido **315,49 ms**. Por tanto, con versión 9, el 95% de las llamadas tienen un indicador de servicio inferior a 300 ms, a pesar de que la red esté congestionada.

En el supuesto, que la red de acceso radio esté congestionada, para el KPI3 en las alternativas: Distributed S/PGW LBO, Distributed EPC y 5G NSA obtenemos los mismos valores. La razón es que tanto en 4G [62], como en 5G [48], la latencia de red garantizada por el operador de red es de 75 ms. Por tanto, la mejora de la latencia que deberíamos obtener por utilizar como red de acceso radio gNB 5G NR, frente al uso de eNB LTE desaparece cuando la red está congestionada.

A pesar de haber movido el plano de usuario al extremo, los usuarios de la red de comunicaciones críticas requieren la RAN para comunicarse en el caso del KPI 3 en **2 ocasiones** (uplink y downlink). Como ya se ha indicado anteriormente la reducción de latencia de 5G NSA respecto de LTE es importante, aunque sin llegar a 1 ms especificados por el 3GPP para los casos de uso, de Ultra-Reliable Low latency Communications (URLLC)

## 7.7 Resultados del análisis

La tabla adjunta resume de una forma sencilla los valores de los KPIs obtenidos por cada uno de los despliegues que he estudiado.

KPIs	eUTRAN						5G NSA	
	CENTRALIZED EPC		DISTRIB SGW LBO		DISTRIBUTED EPC		CUPS	
	AVG	CONG	AVG	CONG	AVG	CONG	AVG	CONG
Access Time	334,66	414,16	334,66	414,16	284,70	359,39	252,77	359,39
Access Time E2E	547,21	706,39	547,21	706,39	445,52	594,33	380,98	594,33
Mouth to Ear	243,12	352,70	193,18	295,49	193,18	295,49	157,89	295,49

Tabla 61: Impacto en MCPPT la evolución de eUTRAN hacia arquitecturas 5G (AVG: Average / CONG = Congested)

Los colores identifican de una forma sencilla los grados de cumplimiento de cada uno de los KPIs del servicio MCPTT en cada uno de los despliegues que se han planteado en esta tesis. En verde son aquellos que cumplen con las especificaciones del 3GPP, en amarillo las que están muy cerca de cumplirlas (<15% respecto KPI) y en naranja aquellas que están un poco alejadas (<40%).

En primer lugar, hay que indicar que se ha supuesto que tanto en eUTRAN [62] como en 5G NSA [48] el operador en caso de congestión de red debe garantizar al menos una latencia media de 60 ms para la señalización y de 75 ms para el envío de los datos media que contienen los paquetes de voz codificada. De tabla anterior, se puede sacar la siguiente conclusión: **el peor escenario para implementar servicios MCPTT es aquel en el que la red de está congestionada.**

En el KPI 1 y KPI 3 la red de acceso radio se atraviesa en dos ocasiones, una en uplink y la otra en downlink. En el caso, del KPI 2 se atraviesa en 4 ocasiones, 2 uplink y 2 downlink. Esto quiere decir, que en el caso que la red esté congestionada el KPI 1 ya tiene un retardo mínimo de 120 ms y solo dispone de 180 ms para poder cumplir con los requerimientos del 3GPP. Para el KPI 3, todavía es peor, solo tendrá 150 ms para cumplir con los requerimientos del 3GPP con el hándicap adicional que la codificación y decodificación de los datos media en los terminales Android del UE ( $TM_{UE}$ ) requiere de tiempos de procesamiento superior a los de señalización.

El KPI 2, a pesar de atravesar la red de acceso radio en cuatro ocasiones, **dispone de 760 ms para cumplir los 1000 ms definidos por el 3GPP** para el 95% de las llamadas. Existe, un mayor margen para cumplir con el requerimiento y como se puede ver en la tabla de resumen, el KPI 2 se cumple con independencia de la estrategia de despliegue que se emplee y de la red de acceso radio disponible.

**A la hora de elegir, una estrategia de despliegue de MCPTT, el EPC distribuido en el extremo de la red y 5G NSA son las alternativas de despliegue en la que los tres indicadores de servicio analizados cumplirían con los requerimientos del 3GPP en condiciones de carga media de red y por tanto obtendrían la**

denominación de red de misión crítica de banda ancha, Protection Disaster Recovery Broadband (PPDR BB). A pesar de todo, con la red congestionada, el KPI 1 no cumpliría, aunque mejorarían los valores respecto el resto de las estrategias de despliegue.

La estrategia de despliegue 5G NSA, la tenemos que comparar con el EPC distribuido en el edge site. En ambas, tenemos separados el tráfico de datos de señalización, del de datos media. La diferencia entre ambas está en que 5G NSA se emplean gNB 5G NR con los que se obtiene una disminución de la latencia radio que provoca una mejora de los tres indicadores de servicio en condiciones de carga media de la red de acceso radio.

En condiciones de red congestionada, esta ventaja que aporta el empleo de gNB 5G NR desaparece ya que ambas ocasiones el operador de red, les garantizará teóricamente, los mismos retardos, 60 ms para la señalización y 75 para los datos media.

Tabla 62: Tabla comparativa LTE – New Radio [91]

	LTE	NR
<b>Maximum Bandwidth (per CC)</b>	20 MHz	50 MHz (@ 15 kHz), 100 MHz (@ 30 kHz), 200 MHz (@ 60 kHz), 400 MHz (@120 kHz)
<b>Maximum CCs</b>	5 (currently)	16 (allowed BW and CCs combinations TBD)
<b>Subcarrier Spacing</b>	15 kHz	2n · 15 kHz TDM and FDM multiplexing
<b>Waveform</b>	CP-OFDM for DL; SC-FDMA for UL	CP-OFDM for DL; CP-OFDM and DFT-s-OFDM for UL
<b>Maximum Number of Subcarriers</b>	1200	3300
<b>Subframe Length</b>	1 ms (moving to 0.5 ms)	1 ms
<b>Latency (Air Interface)</b>	10 ms (moving to 5 ms)	1 ms
<b>Slot Length</b>	7 symbols in 500 μs	14 symbols (duration depends on subcarrier spacing) 2, 4 and 7 symbols for mini slots
<b>Channel Coding</b>	Turbo Code (data); TBCC (control)	Polar Codes (control); LDPC (data)
<b>Initial Access</b>	No beamforming	Beamforming
<b>MIMO</b>	8x8	8x8
<b>Reference signals</b>	UE Specific DMRS and Cell Specific RS	Front-loaded DMRS (UE-specific)
<b>Duplexing</b>	FDD, Static TDD	FDD, Static TDD, Dynamic TDD

En sección 4.3, se han analizado para LTE el número de llamadas MCPTT que se pueden establecer en un eNB. Los cálculos se han realizado para el ancho de banda de 20 MHz. Tal y como se puede ver en la tabla anterior, en 5G NR los anchos de banda son superiores a LTE. En NR están definidas dos gamas de frecuencia FR1 (por debajo de 6 GHz: 450 MHz – 6000 MHz y FR2 (por encima de 6MHz): 24.250 MHz – 52.600 MHz. El número de Physical Resource Blocks (NRB) asignable a cada anchura de banda, depende de la separación entre subportadoras.

Para FR1:

Tabla 63: N° de NRB para la gama de frecuencias FR1.

SCS (kHz)	MHz										
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	80	100
	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB	NRB
15	25	52	79	106	133	[TBD]	216	270	N/A	N/A	N/A
30	11	24	38	51	65	[TBD]	106	133	162	217	273
60	N/A	11	18	24	31	[TBD]	51	65	79	107	135

Fuente: www.sharetechnote.com

TBD: To be Decided

Para FR2:

Tabla 64: N° de NRB para la gama de frecuencias FR2.

SCS (kHz)	MHz			
	50	100	200	400
	NRB	NRB	NRB	NRB
60	66	132	264	N/A
120	32	66	132	264

Fuente: www.sharetechnote.com

Al disponer de más recursos radio, el número de llamadas MCPTT máximo podrá ser mayor en las celdas donde estén desplegados gNB, respecto a los eNB. Por tanto, más importante que la mejora de los indicadores de servicio KPI 1 y KPI3 en 5G NSA respecto de Distributed SGW en LTE, es la posibilidad de poder establecer más llamadas MCPTT simultáneas.

Conforme a los objetivos de latencia especificados por el 3GPP para 5G, la latencia del plano de control debería ser de 10 ms. El plano de usuario debería ser de 0,5 ms para uplink y de 0,5 ms para downlink para los casos de uso de Ultra-Reliable Low latency Communications (URLLC) [92]. Para el caso de uso, de enhanced Mobile

Broadband (eMBB) [92], el objetivo para el plano de usuario debería ser de 4 ms para uplink y 4ms para downlink [93]

El NGMN, en su documento de especificaciones para 5G, especifica una latencia objetivo para comunicaciones E2E de 10 ms y 1ms para casos de uso, en los que se requiera baja latencia [89]. Estas latencias objetivo coinciden con las especificadas por el 3GPP.

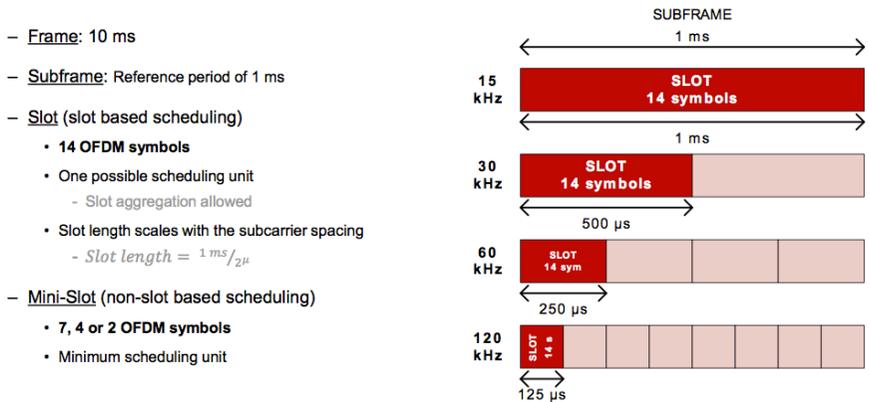


Figura 96: 5G Frame and Subframe [91]

Una última consideración por realizar tiene que ver, con el tipo de terminal de UE que empleemos para las pruebas. Todas las medidas, que se ilustran en la tabla resumen anterior han sido realizadas con terminales Android versión 9. Como ya se ha indicado en la sección 5.3.3 KPI 3 (Mouth to Ear), el hardware del terminal UE, así como la versión de su sistema operativo, afectará a los tiempos de procesamiento del audio, tanto en el emisor (codificación) y en el receptor (decodificación). En la Figura 97, se presenta la diferencia, para el KPI 3 en un despliegue 5G NSA.

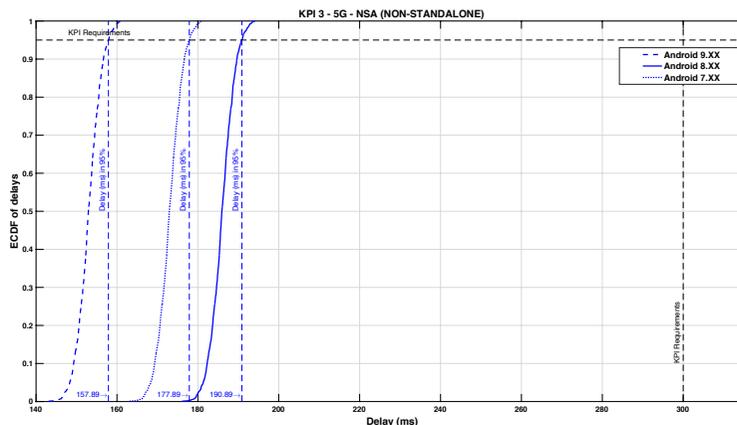


Figura 97: 5G NSA - KPI 3 (Red de acceso radio a media carga)

Teóricamente según las pruebas realizadas, se podría obtener un indicador de servicio KPI 3 de **157,89 ms** para un despliegue 5G NSA, lo que supone una gran mejora respecto los **190,89 ms** obtenidos en un terminal de UE con Android 8. Aunque si se hubiera empleado un UE con Android 7, la latencia habría sido de **177,89 ms**.

Las conclusiones que se pueden obtener a partir de los datos presentados son las siguientes:

- El objetivo de este capítulo ha sido analizar numéricamente el impacto de las diferentes alternativas de despliegue en los indicadores de servicio KPI 1, KPI 2 y KPI 3 para MCPTT. En la Tabla 61, ha quedado reflejado numéricamente ese impacto, pero sobre todo se ha podido cuantificar el impacto de la mejora de latencia ofrecida por los gNB 5G NR sobre los indicadores de servicio, que a tenor de los valores obtenidos no marca mucha diferencia respecto a LTE.
- De las diferentes estrategias de despliegue presentadas distribuir el EPC en el eNB en LTE o implementar CUPS en la arquitectura 5G NSA, desde un punto de vista teórico son las que mejores indicadores de servicio ofrecen.
- En los cálculos de los indicadores de servicio destaca el impacto que tiene sobre ellos la congestión de la red. Tanto en eUTRAN [62] como en 5G NSA [48] el operador en caso de congestión de red debe garantizar al menos una latencia media de 60 ms para la señalización y de 75 ms para el envío de los datos media que contienen los paquetes de voz codificada. Eso provoca, que los valores de KPI 1, KPI 2 y KPI 3 para la estrategia Distributed EPC (eUTRAN) y 5G NSA (5G NR) sean iguales. Y lo mismo ocurre si comparamos los valores obtenidos en el escenario base con la estrategia Distributed SGW LBO.
- La ubicación de los eNB o gNB a los que los usuarios pertenecientes a una llamada a grupo, estén conectados, puede ser determinante de cara a elegir una estrategia de despliegue de los servidores MC.
- Los valores obtenidos en este estudio para cada uno de los indicadores KPI 1, KPI 2 y KPI 3, están muy cerca de los requerimientos definidos por el 3GPP con independencia de si la red se encuentra congestionada o no.
- En términos de investigación es preciso analizar todas las posibilidades y esta es la razón por lo que en esta investigación se ha considerado la congestión de las redes 5G NSA, como una posibilidad.
- Las redes 5G NSA ofrecen unas latencias más bajas que las redes LTE, lo que sin duda mejora los resultados obtenidos para cada uno de los indicadores de servicio, para redes de acceso radio a media carga.
- La Tabla 63 y Tabla 64 indican un mayor número de recursos radio (NRB), en redes 5G NR respecto a LTE, lo que permitirá un número mayor de llamadas MCPTT simultáneas por gNB, punto especialmente crítico en situaciones de emergencia que es la situación en donde mayor concentración de llamadas se van a producir por celda
- El aumento de la capacidad que ofrecen las actuales redes 5G NSA y sobre todo las redes 5G SA unida al empleo de técnicas de **network slicing** and **network customization** permitirán una gestión más optimizada de la red y

por tanto la congestión de la red para servicios prioritarios será más difícil de producirse.

- Desde el punto de vista del servicio MCPTT, en 5G NR se ha evolucionado la capa física de LTE a un modelo mucho más flexible y escalable. Se han modificado parámetros como: tamaño del espacio de subportadoras (SCS), el prefijo cíclico (CP) y el intervalo de tiempo de transmisión (TTI). Permitiendo el ajuste dinámico de los símbolos UL y DL, que forman parte de un slot para ajustarse mejor a una carga de trabajo que podrá cambiar dependiendo de la aplicación. [94]. Gracias al aumento de recursos radio disponibles con cada TTI y al empleo de algoritmos optimizados para evitar las interferencias provocadas por gNB y eNB cercanos permitirán dotar a la red del operador de una mayor cobertura y un aumento de la capacidad de esta. Esto se traducirá, en el caso del servicio MCPTT en un aumento de llamadas simultáneas que se podrán establecer por cada gNB y un mayor número de usuarios en llamadas a grupo.
- El hardware del terminal portátil del UE y la versión del sistema operativo Android instalado, afecta a la latencia del KPI 3. Sin embargo, en la versión 8 de Android vemos que no se cumple esta regla, ya que los tiempos medidos para el KPI 3 son peores que los obtenidos con terminales con la versión 7 de Android. [95]



## 8 Conclusiones y Líneas Futuras

<b>8.1</b>	<b><u>APORTACIONES DE LA TESIS</u></b> .....	<b>200</b>
<b>8.2</b>	<b><u>CONCLUSIONES</u></b> .....	<b>202</b>
<b>8.3</b>	<b><u>CONTRIBUCIONES</u></b> .....	<b>202</b>
8.3.1	<u>PUBLICACIONES</u> .....	202
8.3.1.1	<u>Publicaciones en revista</u> .....	202
8.3.1.2	<u>Presentaciones en congresos</u> .....	204
8.3.1.3	<u>Capítulos de libro</u> .....	205
8.3.2	<u>PROYECTOS DE INVESTIGACIÓN</u> .....	207
<b>8.4</b>	<b><u>LÍNEAS FUTURAS</u></b> .....	<b>208</b>
8.4.1	<u>PROPUESTA DE ESCALABILIDAD DE MCPTT</u> .....	210
8.4.2	<u>DISPONIBILIDAD Y CONTINUIDAD DEL SERVICIO MCPTT</u> .....	211

Los objetivos marcados en esta tesis eran:

- **OT-1:** Enumerar los requerimientos funcionales, técnicos y socioeconómicos necesarios para el despliegue de los servicios de misión crítica.
- **OT-2:** Proponer técnicas y paradigmas que puedan minimizar el impacto.
- **OT-3:** Estudio del impacto de la red soporte en los servicios de misión crítica. Se ha decidido dividirlo en dos objetivos más simples para poder alcanzar el objetivo principal.
  - **OT-3.1:** Identificar el porcentaje de tiempo de retardo que añade cada componente que participa en un servicio de misión crítica.
  - **OT-3.2:** Identificar la estrategia de despliegue que añada menor latencia a los servicios de misión crítica.
- **OT-4:** Propuesta de escalabilidad del servicio de misión crítica MCPTT.

La manera de abordar estos objetivos elegida en esta tesis doctoral ha sido la definición de acciones orientadas a su consecución.

El objetivo **OT-1** se ha completado a través de la acción **A-1**. Para identificar los requerimientos necesarios para desplegar redes de misión crítica de banda ancha, se ha realizado un 'estudio del arte' de las redes de radio privadas digitales y de los requerimientos de las agencias PPDR que las emplean. No es la primera vez, que se realiza este análisis de requerimientos, antes el TCCA, el NPSTC, el ETSI TETRA, el OMA y el 3GPP lo han tenido que realizar para lograr a finales de 2016 estandarizar el servicio de PTT (Push-to-Talk) como MCPTT (Mission Critical Push Push-to-Talk) en la Release 13. La **A-1** se desarrolla a través de los capítulos de Introducción, Hoja de ruta de estandarización redes PPDR BB y Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB. Entre estos capítulos el lector tendrá una completa visión de los requerimientos funcionales técnicos y socioeconómicos necesarios para el despliegue de los servicios de visión crítica, cumpliendo con el objetivo **OT-1**.

El objetivo **OT-2**, ha sido especialmente exigente, ya que, para poder proponer técnicas y paradigmas que puedan minimizar el impacto del despliegue de los servicios sobre las arquitecturas soporte, es necesario realizar un análisis previo de las redes radio. El capítulo de Análisis de la evolución de las Redes Radio, no sólo pretende ser una enumeración de las redes, sino que pretende remarcar la evolución en el tiempo ya que eso permite entender mejor los requerimientos de las agencias PPDR y la dificultad para asegurar la continuidad / disponibilidad de la arquitectura que provee del servicio de comunicaciones bien sea de banda estrecha o ancha. El empleo de tecnologías como las indicadas en la sección 3.5 Tecnologías habilitantes actuales: NFV, SDN y MBMS son fundamentales para dar respuesta al **OT-2**. Para poder proponer técnicas primero hay que conocer el funcionamiento de las arquitecturas soporte y cómo el uso de estas tecnologías habilitantes puede mejorar el rendimiento del servicio MCPTT.

La acción **A-3** es fundamental en esta tesis. Gracias a las acciones previas **A-1 y A-2** se tiene la capacitación técnica para poder plantear en el **capítulo 5** un escenario base de cálculo para medir el rendimiento del servicio desplegado sobre la arquitectura estándar LTE. Y posteriormente, en el **capítulo 6** poder presentar un método de cálculo para cada una de las alternativas de despliegue que se presentan en esta tesis.

La mejor manera, de demostrar la validez de un modelo de cálculo es emplearlo y eso es lo que se ha hecho en el **capítulo 7**, en el que se ha dado respuesta a la **A-4**, estudiando el comportamiento de los indicadores de rendimiento de los servicios de misión crítica sobre las arquitecturas soporte propuestas.

Gracias a las acciones **A-4 y A-5** se ha alcanzado el objetivo **OT-3** que se materializa en un estudio detallado de la red de soporte en el servicio de misión crítica MCPTT. Esta tesis aporta a la comunidad investigadora un estudio de impacto que identifica los componentes críticos y aporta estrategias de mejora:

- **OT-3.1:** Identificar el porcentaje de tiempo de retardo que añade cada componente que participa en un servicio de misión crítica.
- **OT-3.2:** Identificar la estrategia de despliegue que añade menor latencia a los servicios de misión crítica

Se termina esta tesis doctoral con el capítulo 8, donde a partir de las conclusiones obtenidas se definen líneas futuras de trabajo **A-5**. Dentro de esta última acción, se aporta una propuesta de escalabilidad del servicio MCPTT que permitirá gestionar la demanda de aumento de capacidad que va a experimentar el servicio como consecuencia del aumento de ancho de banda que va a proporcionar en la parte de red de acceso radio de la arquitectura soporte el despliegue de 5G, dando respuesta al último objetivo marcado en esta tesis **OT-4**

## 8.1 Aportaciones de la tesis

Se han definido los objetivos de tal forma que cada uno de ellos pueda ser un hilo del que tirar por todos aquellos investigadores que estén trabajando en esta área de conocimiento. Las aportaciones (AP) de esta tesis son las siguientes:

- **AP-1: Guía de referencia para el despliegue de los servicios MCPTT en redes de banda ancha.** Esta orientada no solo al mundo científico o de la investigación sino también a las agencias PPDR que se planteen el despliegue de servicio de misión crítica en un escenario rutinario o ante una situación excepcional de emergencia que conlleva importantes aumentos de capacidades de servicios y dificultades a la hora de garantizar la continuidad y disponibilidad del servicio. También puede ser de gran interés a operadores comerciales con clientes LTE / 5G o operadores que comienzan a ofrecer servicios de alta disponibilidad sobre redes 5G y están validando la posibilidad de ofrecer servicios de misión crítica a las agencias PPDR y así amortizar la infraestructura desplegada
- **AP-2: Propuesta de arquitectura que garantice la continuidad y la disponibilidad de los servicios de misión crítica MCPTT desplegados en ella.** Actualmente iniciativas como 5G PPP se han marcado como objetivo aportar arquitecturas, tecnologías y estándares para la próxima generación de redes de despliegue. Como parte de esta iniciativa, las arquitecturas planteadas en esta tesis se han validado dentro de los proyectos europeos con los que se ha colaborado: 5GSESAME y 5GSESENCE desplegando el servicio MCPTT sobre arquitecturas basadas en las tecnologías habilitadoras: NFV y SDN.
- **AP-3: Estudio de impacto de la arquitectura de soporte sobre los servicios desplegados sobre ella** A la fecha de redacción de esta tesis doctoral no existe publicado un estudio del impacto de la arquitectura de soporte sobre los servicios desplegados sobre ella y mucho menos con el detalle que se presenta en esta publicación. Lo realmente importante de este estudio es que por primera vez se ha sido capaz de identificar el tiempo de retardo que añade cada componente que participa en un servicio de misión crítica y gracias a lo cual se han podido identificar la estrategia de despliegue que añade menor latencia a los servicios de misión crítica.
- **AP-4: Propuesta de escalabilidad del servicio de misión crítica MCPTT.** La virtualización del servicio MCPTT permite su despliegue sobre diferentes propuestas de arquitecturas que han surgido como resultado de proyectos europeos de investigación pertenecientes a la iniciativa 5G PPP. Fruto de este trabajo han surgido nuevos requerimientos relacionados con la manera o forma de desplegar el servicio MCPTT. Dentro de la arquitectura NFV, la figura del orquestador (NFVO) ha tomado gran relevancia dentro de las nuevas propuestas de arquitecturas. Este administrador será el encargado de gestionar el aumento de capacidad gestionando las capacidades de cómputo del Data Center o de los Data Center distribuidos en el extremo. Los servicios que se ofrezcan a los futuros clientes deberán poderse desplegar de forma dinámica en los nodos de cómputo (distribuidos o centralizados) atendiendo a las capacidades que se demande en cada momento. Dentro de la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia. ¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.,** se presenta una propuesta de escalabilidad del servicio de misión crítica MCPTT, dando respuesta al objetivo **OT-4** que se había marcado al inicio de esta tesis.

## 8.2 Conclusiones

A lo largo de esta tesis doctoral se han abordado una serie de acciones que habían sido definidas al inicio de éstas, como resultado de estas tareas se ha logrado alcanzar los objetivos fijados pudiendo realizar un detallado análisis del impacto del despliegue de los servicios de misión crítica sobre las arquitecturas soporte LTE y 5G.

La cobertura es sin duda el primer aspecto a considerar. Si el recurso está en cobertura se puede garantizar por parte de las redes de banda actuales los recursos radio que requiere el servicio MCPTT. La saturación de la red del operador es un aspecto crítico, pero incluso en el peor de los escenarios las comunicaciones MCPTT serían hábiles. De acuerdo, con el análisis de la arquitectura de referencia, a pesar de superar en algunos casos los 300 ms del KPI 3, la latencia no sería apreciable en la comunicación de voz como queda demostrado en las tablas que se han adjuntado durante el estudio.

Durante la elaboración de esta tesis se han publicado resultados parciales en revistas de relevancia: IEEE – Access y IEEE Xplore entre otras. Se ha asistido a congresos relacionados con el tema de la tesis y se han presentado ponencias donde se han podido contrastar los resultados que se han ido obteniendo con la comunidad investigadora.

Como se ha indicado anteriormente la participación en proyectos europeos pertenecientes a la iniciativa 5GPPP ha permitido al investigador aportar los conocimientos adquiridos durante el trabajo en el laboratorio de investigación de NQaS en la UPV/EHU.

A continuación, se detallan las contribuciones que se han generado a partir de esta tesis doctoral.

## 8.3 Contribuciones

Este trabajo de tesis se engloba en el área de comunicaciones de misión crítica sobre las redes de nueva generación, campo en el que el investigador ha desarrollado su labor investigadora. A continuación, se presentan las contribuciones más relevantes.

### 8.3.1 Publicaciones

#### 8.3.1.1 Publicaciones en revista

<b><i>Autores</i></b>	<b>SANCHOYERTO MARTINEZ, AITOR; SOLOZABAL RUBEN; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; LIBERAL MALAINA, FIDEL</b>
<b><i>Título</i></b>	<b>Analysis of the Impact of the Evolution Toward 5G Architectures on Mission Critical Push-to-Talk Services</b>
<b><i>Nombre Revista (Q1)</i></b>	<b>IEEE – Access</b>

<b>Volumen</b>	7
<b>ISSN</b>	2169-3536 DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2930936
<b>Páginas</b>	115052-115061
<b>Año Publicación</b>	24 July 2019

<b>Autores</b>	SOLOZABAL RUBEN; <b>SANCHOERTO MARTINEZ, AITOR</b> ; ATXUTEGI, ENEKO; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA
<b>Título</b>	Exploitation of Mobile Edge Computing in 5G Distributed Mission-Critical Push-To-Talk service deployment
<b>Nombre Revista (Q1)</b>	IEEE – Access
<b>Volumen</b>	6
<b>ISSN</b>	2169-3536 DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2849200
<b>Páginas</b>	37665-37675
<b>Año Publicación</b>	20 June 2018

<b>Autores</b>	SOLOZABAL, RUBEN; CEBERIO, JOSU; <b>SANCHOERTO MARTINEZ, AITOR</b> ; ZABALA, LUIS; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; LIBERAL MALAINA, FIDEL
<b>Título</b>	Virtual Network Function Placement Optimization with Deep Reinforcement Learning
<b>Nombre Revista (Q1)</b>	IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)
<b>Volumen</b>	38
<b>Issue</b>	2 DOI: 10.1109/JSAC.2019.2959183
<b>Páginas</b>	292-303
<b>Año Publicación</b>	December 2019

<b>Autores</b>	MICHAIL-ALEXANDROS KOURTIS; BEGOÑA BLANCO JAUREGUI; JORDI PÉREZ-ROMERO; DIMITRIS MAKRIS; MICHAEL J. MCGRATH; GEORGE XILOURIS; DANIELE MUNARETTO; RUBÉN SOLOZABAL; <b>AITOR SANCHOERTO MARTINEZ</b> ; IOANNIS GIANNOULAKIS; EMMANOUIL KAFETZARIS; VINCENZO RICCOBENE; ELISA JIMENO; ANASTASIOS KOURTIS; RAMON FERRÚS; FIDEL LIBERAL; HARILAOS KOUMARAS; ALEXANDROS KOSTOPOULOS; IOANNIS CHOCHLIOUROS
<b>Título</b>	A Cloud-Enabled Small Cell Architecture in 5G Networks for Broadcast/Multicast Services
<b>Nombre Revista (Q1)</b>	IEEE Transactions on Broadcasting
<b>Volumen</b>	65
<b>Número</b>	2
<b>Páginas</b>	414 – 424 DOI: 10.1109/TBC.2019.2901394
<b>Año Publicación</b>	June 2019

<b>Autores</b>	LIBERAL MALAINA, FIDEL; <b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR</b>
<b>Título</b>	Communications – Critical to the effective coordination of services
<b>Nombre Revista</b>	International Airport Review
<b>Volumen</b>	1
<b>Número</b>	TNSM-2018-01882
<b>Páginas</b>	2
<b>Año Publicación</b>	February 2018

### 8.3.1.2 Presentaciones en congresos

<b>Autores</b>	<b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR;</b> LIBERAL MALAINA, FIDEL
<b>Título</b>	Oportunidades para la transmisión de información médica en las nuevas redes de misión crítica
<b>Tipo Participación</b>	Presentación Oral
<b>Congreso</b>	CASEIB 2017
<b>Publicación</b>	Proceedings
<b>Lugar Celebración</b>	Bilbao
<b>País</b>	España
<b>Fecha Inicio</b>	29/11/2017
<b>Fecha Fin</b>	01/12/2018

<b>Autores</b>	<b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR;</b> SOLOZABAL, RUBEN; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; JIMENO, ELISA; BASURTO, ESTRELLA; LIBERAL MALAINA, FIDEL
<b>Título</b>	Orchestration of Mission-Critical Services over an NFV Architecture
<b>Tipo Participación</b>	Presentación Oral
<b>Congreso</b>	AIAI 2019 – Artificial Intelligence Applications and Innovations
<b>Publicación</b>	Proceedings
<b>Lugar Celebración</b>	Creta
<b>País</b>	Grecia
<b>Fecha Inicio</b>	23 May 2019
<b>Fecha Fin</b>	27 May 2019

<b>Autores</b>	<b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR;</b> SOLOZABAL, RUBEN; SPADA, M.R.; PEREZ ROMERO, JORDI; KOURTIS, M.A.
<b>Título</b>	Management of Mission Critical Public Safety Applications: the 5G ESSENCE Project
<b>Tipo Participación</b>	Presentación Oral
<b>Congreso</b>	EUCNC 2019

<b>Publicación</b>	Proceedings
<b>Lugar Celebración</b>	Valencia
<b>País</b>	España
<b>Fecha Inicio</b>	18 Jun 2019
<b>Fecha Fin</b>	21 Jun 2019

<b>Autores</b>	<b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR; SOLOZABAL, RUBEN; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; JIMENO, ELISA; LÓPEZ CUADRADO, JAVIER; CATALÁN CID MIGUEL</b>
<b>Título</b>	Intelligent Orchestration of End-to-End Network Slices for the Allocation of Mission Critical Services over NFV Architectures
<b>Tipo Participación</b>	Presentación Oral
<b>Congreso</b>	AIAI 2020 – Artificial Intelligence Applications and Innovations
<b>Publicación</b>	Proceedings
<b>Lugar Celebración</b>	Creta
<b>País</b>	Grecia
<b>Fecha Inicio</b>	05 Jun 2020
<b>Fecha Fin</b>	07 Jun 2020

### 8.3.1.3 Capítulos de libro

<b>Autores</b>	<b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR; LIBERAL MALAINA, FIDEL</b>
<b>Título</b>	Oportunidades para la transmisión de información médica en las nuevas redes de misión crítica
<b>Tipo Publicación</b>	CASEIB 2017 – Conference Paper
<b>Título Completo</b>	CASEIB 2017: XXXV Congreso anual de la Sociedad Española de Ingeniería Biomédica
<b>Editorial</b>	ISBN: 978-84-9082-797-0
<b>Páginas</b>	107- 110
<b>Año Publicación</b>	2018

<b>Autores</b>	<b>SOLOZABAL RUBEN; SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; HICHAM KHALIFE MATHIEU BOUET; DAMIEN LAVAUX; EMMANOUIL KAFETZARIS</b>
<b>Título</b>	Providing Mission-Critical services over 5G Radio Access Network
<b>Tipo Publicación</b>	AIAI 2018 - Conference Paper
<b>Título Completo</b>	Artificial Intelligence Applications and Innovations
<b>Editorial</b>	SPINGER ISBN 978-3-319-92006-1
<b>Páginas</b>	550-530
<b>Año Publicación</b>	22 May 2018

<b><i>Autores</i></b>	JIMENO, ELISA; PEREZ ROMERO, JORDI; VILA MUÑOZ IRENE; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; <b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR</b> ; FERNANDEZ HIDALGO, JAVIER
<b><i>Título</i></b>	5G Framework for automated network adaptation in Mission Critical Services
<b><i>Tipo Publicación</i></b>	Conference Paper
<b><i>Título Completo</i></b>	2018 IEEE Conference on NFV-SDN
<b><i>Editorial</i></b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
<b><i>Páginas</i></b>	DOI: 10.1109/NFV-SDN.2018.8725679
<b><i>Año Publicación</i></b>	IEEE Xplore: 30 May 2019
<b><i>Año Conferencia</i></b>	27-29 Nov. 2018

<b><i>Autores</i></b>	<b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR</b> ; SOLOZABAL, RUBEN; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; JIMENO, ELISA; BASURTO, ESTRELLA; LIBERAL MALAINA, FIDEL
<b><i>Título</i></b>	Orchestration of Mission-Critical Services over an NFV Architecture
<b><i>Tipo Publicación</i></b>	Conference Paper
<b><i>Título Completo</i></b>	Artificial Intelligence Applications and Innovations
<b><i>Editorial</i></b>	IFIP International Federation for Information Processing SPINGER, CHAM
<b><i>Páginas</i></b>	70-77 DOI: 10.1007/978-3-030-19909-8_6
<b><i>Año Publicación</i></b>	15 May 2019
<b><i>Año Conferencia</i></b>	2019

<b><i>Autores</i></b>	<b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR</b> ; SOLOZABAL, RUBEN; SPADA, M.R.; PEREZ ROMERO, JORDI; KOURTIS, M.A.
<b><i>Título</i></b>	Management of Mission Critical Public Safety Applications: the 5G ESSENCE Project
<b><i>Tipo Publicación</i></b>	Conference Paper
<b><i>Título Completo</i></b>	2019 European Conference on Networks and Communications (EuCNC)
<b><i>Editorial</i></b>	IEEE
<b><i>Páginas</i></b>	DOI: 10.1109/EuCNC.2019.8802026
<b><i>Año Publicación</i></b>	IEEE Xplore: 15 August 2019
<b><i>Año Conferencia</i></b>	18-21 June 2019

<b><i>Autores</i></b>	PEREZ ROMERO, JORDI; VILA MUÑOZ, IRENE; SALLEN, ORIOL; BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; <b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR</b> ; SOLOZABAL, RUBEN; LIBERAL MALAINA, FIDEL
<b><i>Título</i></b>	Supporting Mission Critical Services through Radio Access Network Slicing
<b><i>Tipo Publicación</i></b>	Conference Paper
<b><i>Título Completo</i></b>	2019 International Conference on Information and Communication Technologies for Disaster Management (ICT-DM)
<b><i>Editorial</i></b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

<b>Páginas</b>	DOI: 10.1109/ICT-DM47966.2019.9032966
<b>Año Publicación</b>	IEEE Xplore: 12 March 2020
<b>Año Conferencia</b>	18-20 December 2019

<b>Autores</b>	BLANCO JAUREGUI, BEGOÑA; SOLOZABAL, RUBEN; <b>SANCHOVERTO MARTINEZ, AITOR</b> ; JIMENO, ELISA; LÓPEZ CUADRADO, JAVIER; CATALÁN CID, MIGUEL
<b>Título</b>	Intelligent Orchestration of End-to-End Network Slices for the Allocation of Mission Critical Services over NFV Architectures
<b>Tipo Publicación</b>	Conference Paper
<b>Título Completo</b>	Artificial Intelligence Applications and Innovations
<b>Editorial</b>	IFIP International Federation for Information Processing SPINGER, CHAM
<b>Páginas</b>	74-83 DOI:10.1007/978-3-030-49190-1_7
<b>Año Publicación</b>	29 May 2020
<b>Año Conferencia</b>	2020

### 8.3.2 Proyectos de investigación

Como se ha comentado en el prologo, la vida profesional del doctorando previa a su entrada en la investigación le ha permitido atesorar un bagaje en el despliegue y uso de comunicaciones de misión crítica que se considera relevante para el trabajo realizado durante la tesis doctoral.

<b>Título Proyecto</b>	<b>FRONTERA – Front End de Comunicaciones TETRA</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	Gobierno Vasco
<b>Fecha Inicio</b>	01/06/2009
<b>Fecha Fin</b>	30/05/2011

<b>Título Proyecto</b>	<b>4GIZAR – Revolución 4G para la futura Euskadi Conectada</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	Gobierno Vasco
<b>Fecha Inicio</b>	01/06/2012
<b>Fecha Fin</b>	30/05/2013

<b>Título Proyecto</b>	<b>GERYON - Next generation technology independent interoperability of emergency services</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	Comunidad Europea
<b>Fecha Inicio</b>	01/12/2011
<b>Fecha Fin</b>	30/05/2014

<b>Título Proyecto</b>	<b>ELCHE – Estación de Enlace con Redes Externas</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	Ministerio de Defensa – Ejercito Tierra
<b>Fecha Inicio</b>	28/07/2014
<b>Fecha Fin</b>	30/05/2016

<b>Título Proyecto</b>	<b>INTERATE - INTEROPERABILITY ATEA (Gateway TETRA ↔ LTE)</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	Diputación Foral de Bizkaia
<b>Fecha Inicio</b>	01/07/2014
<b>Fecha Fin</b>	30/06/2015

<b>Título Proyecto</b>	<b>5GESSENCE - Embedded Network Services for 5G Experiences</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	European Union's Horizon 2020 / 5G-PPP
<b>Fecha Inicio</b>	01/06/2017
<b>Fecha Fin</b>	30/05/2020

<b>Título Proyecto</b>	<b>5G RANVIR</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	MINECO
<b>Fecha Inicio</b>	10/05/2018
<b>Fecha Fin</b>	31/12/2019

<b>Título Proyecto</b>	<b>EVOLB5G - Evolución de prestación de servicios inteligente sobre redes 5G y superiores</b>
<b>Entidad Financiadora</b>	
<b>Fecha Inicio</b>	08/07/2020
<b>Fecha Fin</b>	30/06/2021

## 8.4 Líneas futuras

La entrega de esta tesis es un hito muy importante en el desarrollo profesional del investigador y por otra parte una gran responsabilidad poder presentar hasta la comunidad investigadora todo el trabajo realizado hasta este punto.

En esta tesis doctoral se ha medido el impacto de la red soporte sobre el servicio de misión crítica MCPTT, pero todavía queda mucho por hacer. La red soporte LTE todavía tiene recorrido en el mundo comercial, pero como investigadores se debe ir un paso por delante y orientar nuestros esfuerzos en las nuevas arquitecturas 5G.

Atendiendo a la acción **A-5** 'Definición de línea futuras a partir de las conclusiones obtenidas' se presentan las siguientes líneas de trabajo:

- **Análisis del impacto en el rendimiento del servicio MCPTT del servicio eMBMS** en aquellos eNB que dispongan de esta funcionalidad.
- **Estudio del dimensionamiento eficiente de las llamadas a grupo:** El aumento de ancho de banda y el menor consumo de recursos de radio debido al uso del servicio eMBMS permitirá aumentar el número de participantes por

grupo o el incremento del número de grupos pequeños, aunque eso provoque mayor número de llamadas a gestionar.

- **Modelo de relación de los servicios de misión crítica MCPTT, MCDATA y MCVIDEO con el orquestador de la arquitectura soporte:** despliegue del servicio según la distribución de los participantes en llamadas a grupo.
- **Diseño de un método de cálculo para el rendimiento de los servicios de misión crítica con el objetivo de que pueda ser estandarizado e incluido como parte de las funcionalidades de cada servicio.**
- **Diseño de herramientas que permitan de una manera sencilla, clara y estándar determinar el rendimiento de los servicios en tiempo real.**

En esta tesis se ha definido un método de cálculo que ha permitido medir el rendimiento tras realizar todo el conjunto de llamadas que en cada momento se han fijado para cada prueba. Para una red LTE es válido el presentado, ya que el retraso entre las llamadas y la medición no es un inconveniente para que el administrador de la arquitectura actúe sobre la red de acceso radio (aumentando capacidad), sobre los nodos de cálculo (aumentando potencia de cómputo) o sobre los servicios (desplegando más instancias). Sin embargo, para las nuevas redes 5G, la disminución de la latencia y el aumento de capacidad van a obligar a los administradores a tomar decisiones en tiempo real, porque sino será tarde, pudiendo provocar efectos en cascada que terminen en una discontinuidad del servicio.

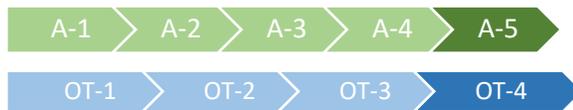
Toda esta información de monitorización y control de los servicios en el modelo actual no son generadas por los propios servicios sino por herramientas externas que obtienen la información de forma autónoma. Con el nuevo escenario que se plantea deberán ser los propios servicios los que generen toda esa información afectando a los rendimientos de estos. En este punto se abre una nueva línea de investigación:

- **Análisis de los métodos o estrategias de escritura y almacenamiento de la información de monitorización sin afectar al rendimiento de los servicios.**

Mucho es el trabajo que se ha realizado hasta la fecha de redacción de esta tesis y mucho es el trabajo que queda por realizar para garantizar en cualquier situación (diaria o de emergencia) los requerimientos técnicos, funcionales o socioeconómicos con los que se iniciaba esta tesis.

A buen seguro surgirán nuevas tecnologías o paradigmas, que se irán investigando y probando. Las telecomunicaciones y las tecnologías que dan soporte avanzan muy rápidamente por ello la forma más eficiente de compartir con la comunidad investigadora lo descubierto seguirá siendo a través de revistas o congresos especializados

#### 8.4.1 Propuesta de Escalabilidad de MCPTT



La primera pregunta que hay que hacerse es **¿MCPTT es un servicio escalable?** Se va a repasar todos los pasos que se han seguido hasta a lo largo de esta tesis:

- 1) Se ha analizado el servicio MCPTT y se ha separado funcionalmente en bloques conforme al estándar del 3GPP.
- 2) Se ha virtualizado cada uno de los bloques funcionales en una VDU que se ejecuta en una única VNF denominada MCPTT.
- 3) Se ha creado un NS (Network Service) MCPTT donde se ha definido la forma en que las VDU se conectan entre sí y con otras VNF pertenecientes al mismo o a otros NS. A nivel de red, se han creado dos VLAN: una para mantenimiento, encargada de la supervisión y monitorización de cada VDU y otra de operación dedicada a las comunicaciones de señalización y datos, propias del servicio MCPTT.
- 4) Se ha desplegado esos servicios sobre una arquitectura NFVI conforme al estándar.
- 5) Se ha monitorizado la VDU que contiene el MCPTT AS.

Se han analizado tres formas de instanciar estas nuevas VDU MCPTT AS:

- 1) **Manual:** Se instancia manualmente más de un MCPTT AS. A la hora de registrar los usuarios en el HSS de IMS, se indica el AS que tiene que emplear. De esta manera, se realiza un reparto fijo de los usuarios entre los AS. Puede ocurrir que se pongan a hablar todos los usuarios de un mismo AS y el otro esté sin carga. Es posible establecer llamadas a grupo con usuarios de diferentes AS. El MCPTT AS CONTROLLING conocerá en que AS se encuentran.
- 2) **Dinámica:** Se instancia manualmente más de un MCPTT AS. Se incluye una VDU nueva en nuestra arquitectura. Un balanceador de carga es el encargado de distribuir las llamadas entre los MCPTT AS instanciados. Hace de enrutador SIP entre los diferentes AS que se han instanciado. Es necesaria una nueva VDU que contiene la base de datos distribuida que permiten a cada uno de los AS instanciados tener conocimiento de donde se han registrado los usuarios, la relación de llamadas en curso y los participantes de cada grupo que están en llamada.
- 3) **Automática:** Un orquestador es el responsable de instanciar MCPTT AS cuando sea necesario a partir de las métricas de servicio recibidas de cada instancia MCPTT y de los nodos de cálculo o NODE COMPUTER que dan soporte a la VNF distribuida.

En la siguiente figura, se muestra de una forma gráfica las diferentes opciones de escalabilidad que se proponen para los servicios MCPTT.

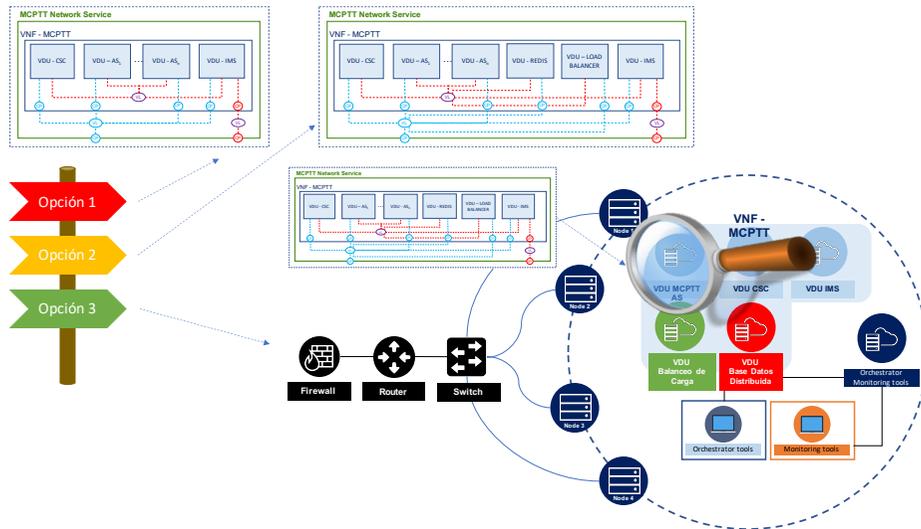


Figura 98: Opciones de escalabilidad servicios MCPTT

Durante el proyecto 5GESSENCE se ha validado la opción 3 (Automática) dentro de la prueba final de concepto (WP6 Use Case 2) [96] donde se simulaba una situación de emergencia que provocaba una concentración de recursos y que hacía necesario el despliegue de una instancia nueva de VDU MCPTT AS.

#### 8.4.2 Disponibilidad y Continuidad del servicio MCPTT

En el capítulo de Requerimientos técnicos redes PPDR sobre BB ya se indicaba como ambos son los condicionantes técnicos [11] más valorados por el TCCA. Al inicio de esta tesis se citan ambas dentro de las dificultades detectadas e identificadas durante los trabajos de investigación que han llegado a la publicación de esta tesis doctoral.

Sin lugar a duda la disponibilidad del 99,999 % es una de las dificultades a la hora de desplegar MCS en una infraestructura de banda ancha o de banda estrecha. No es un problema técnico sino económico. Esta disponibilidad requiere de una inversión muy alta por el operador de la red que solo realiza si es capaz de recuperar ese dinero a través de la contratación de servicios de dicha red por parte de las organizaciones o clientes finales que lo empleen.

La disponibilidad del 99,999% supone menos de 5,26 minutos de tiempo de inactividad por año.

Siempre se habla de un 99,999 % de disponibilidad de estas redes y sin embargo los SLA son privados y es difícil conocer si realmente se está cumpliendo con estos porcentajes o si al menos en los contratos se exige a los operadores estos niveles

de disponibilidad. Al menos, en las páginas web de los operadores esta información no está disponible para cotejarla.

En España está en vigor la **ORDEN ITC/912/2006**, de 29 de marzo por la que se regulan las condiciones relativas a la calidad de servicio en la prestación de los servicios de comunicaciones electrónicas. En el desarrollo de esta, se detalla el grado de calidad de servicio que deben ofrecer las operadoras de telefonía móvil a sus clientes, así como la forma en que esta calidad se debe medir: ETSI EG 202 057-3 V1.1.1 (2005-04) para telefonía y ETSI EG 202 057-4 V1.1.1 (2005-10) para el servicio de acceso a Internet. Todos los contratos particulares y de empresa en España en el apartado de calidad de servicio e indemnización en el supuesto de discontinuidad del servicio se refieren a esta norma de 2.006. En el caso de empresas, algunas han conseguido condiciones adicionales, pero estas son adicionales e individuales para cada empresa.

En el caso de las redes de radio privadas digitales, no se conoce la existencia en alguna comunidad autónoma de alguna normativa que regule la calidad de servicio ofrecido por el operador y por tanto no se conoce si en algún caso se está cumpliendo la disponibilidad del 99,999%. A fecha de hoy, las operadoras de telefonía móvil están lejos de poder ofrecer esta calidad de servicio debido a la fuerte inversión que les supone y a la que no están obligados desde las administraciones públicas, ni desde los ministerios competentes.

Las arquitecturas y las tecnologías que se presentan en esta tesis y que ya muchas operadoras están comenzando a desplegar supondrán importantes ahorros económicos: menor equipamiento electrónico, menor números de equipos a refrigerar, menor consumo eléctrico, menor coste del hardware de cómputo al poder ser generalista y no estar ligado a fabricantes de infraestructura de red.

La disponibilidad y continuidad van de la mano, en cuanto a infraestructura. Para garantizar la continuidad del servicio este tiene que ser capaz de recuperarse ante fallos y caídas. De nada sirve que se tenga una disponibilidad del 99,999 % en toda la red de despliegue y que el servicio caiga y no se levante o no sea capaz de recuperar el escenario previo de la caída (recuperación de llamadas, restablecimiento de las transmisiones de media: video, imágenes o chat).

La virtualización del servicio de MCPTT y el empleo de arquitecturas NFV para su despliegue son fundamentales para la continuidad del servicio.

El no cumplimiento de la calidad del servicio QoS definida dentro de un SLA puede ser debido:

- a) **Problema funcional:** Un error de programación podría provocar una parada del sistema en condiciones excepcionales que hasta la fecha del incidente no se habían producido.
- b) **Aumento de la latencia en la llamada:** Esto puede venir dado por un aumento excepcional de llamadas que generaría una sobrecarga de los

recursos de computación dispuestos provocando un tiempo de procesado en los servidores MCPTT excepcionalmente alto y cuya resolución se consigue balanceando cargas sobre nuevos servidores MCPTT desplegados dinámicamente. Una vez resuelto el incidente, estos servidores de nuevo se remueven ahorrando costes de computación. Si el problema viene en la parte radio, debido a concentraciones de recursos desplegados sobre estaciones base deberá notificarse al orquestador general para que este solicite al gestor de los recursos radio, una nueva distribución del espacio radioeléctrico con el objetivo que los recursos desplegados cuenten con el mínimo ancho de banda que requiere el servicio MCPTT para garantizar los KPI definidos por el 3GPP.



# ANEXO – ASPECTOS ADICIONALES CONSIDERADOS

## 9 ANEXO – ASPECTOS ADICIONALES CONSIDERADOS

**9.1 CUESTIONES DE IMPLEMENTACIÓN EN TERMINALES ANDROID...215**  
**9.2 SIMULADOR DE DESPLIEGUE MCPTT .....218**

### 9.1 Cuestiones de Implementación en terminales Android

En este primer anexo se describe el posible impacto que tiene en los indicadores del servicio el empleo de terminales Android para el despliegue de los clientes MCPTT. Y se va a hacer, partiendo de la tabla base de cálculo, sobre la que se ha indicado que tiempos son debidos a los terminales Android.

Tabla 65: Tiempos de proceso de señalización / media en terminales Android [28]

SIGNAL.	TRAN <sub>UL</sub>	TS <sub>UE1</sub>	TBH <sub>net</sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TS <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TS <sub>UE2</sub>
KPI 1	1x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	2x	1x	N/A
KPI 2	2x	2x	4x	4x	4x	4x	4x	2x	2x	1x
MEDIA	TRAN <sub>UL</sub>	TM <sub>UE1</sub>	TBH <sub>net</sub>	TEPC	TIN <sub>net</sub>	TS <sub>IMS</sub>	TEX <sub>net</sub>	TM <sub>AS</sub>	TRAN <sub>DL</sub>	TM <sub>UE2</sub>
KPI 3	1x	1x	2x	2x	2x	N/A	2x	1x	1x	1x

En los terminales Android se procesa la señalización (TS<sub>UE1</sub>, TS<sub>UE2</sub>) y se codifica (TM<sub>UE1</sub>) / decodifica (TM<sub>UE2</sub>), los datos media de todas las llamadas.

En el caso de la señalización para el caso del KPI 1 solo participa UE 1 y se tiene que procesar el envío del mensaje de señalización SIP 'INVITE' como la recepción del mensaje '200 OK' que viene desde el MCPTT AS Controlling. En el caso, del KPI 2 además de los mensajes del UE 1 se tiene que incluir el tiempo de envío del mensaje '200 OK' por parte de UE 2, confirmando que acepta la llamada.

Sin embargo, ahora se va a centrar en la parte media de la llamada (voz), concretamente en la codificación TM<sub>UE1</sub>, decodifica TM<sub>UE2</sub>. El indicador definido por el grupo de trabajo SA6 del 3GPP que se encarga de supervisar su rendimiento es el KPI 3, conocido como 'mouth to ear' y que precisamente representa el tiempo que transcurre desde que el UE emisor habla sobre el micrófono de su terminal, hasta que el UE receptor escucha la voz del emisor a través del altavoz de su terminal.

Simplificando mucho, se puede considerar los siguientes pasos que se dan en toda comunicación de voz entre terminales:

1. **Codificación:** UE habla sobre el micrófono. (AMR-WB)
2. **Encriptado:** cifrado de la información codificada.
3. **Transmisión:** Envío de la información por el emisor.
4. **Recepción:** Recepción de la información en el terminal del receptor.
5. **Desencriptado:** Descifrar la información recibida
6. **Decodificación:** Enviar la información al altavoz del terminal para que el receptor pueda oír la comunicación de voz enviada.

Los pasos 1 y 3 corresponden a  $TM_{UE1}$  y los pasos 4 y 6 corresponden a  $TM_{UE1}$ . En esta tesis doctoral no se han medido los tiempos correspondientes a los pasos 2 y 5.

El indicador KPI 3 (Mouth to Ear), tal y como ya se ha indicado en el capítulo 5 Análisis del escenario base de cálculo, tiene una relación directa con el terminal que empleen los usuarios para establecer la comunicación. Unas de las ventajas de las comunicaciones de banda ancha es que no requieren terminales dedicados de usuario. Ya no será necesario el empleo de terminales con tecnología propietaria de los fabricantes de las infraestructuras de radio desplegada. Ahora se puede hacer uso de un terminal móvil convencional sobre el que simplemente se debe instalar una aplicación con el cliente MCPTT.

Year	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Android	85.1%	85.1%	86.6%	86.6%	86.9%	87.0%	87.1%
iOS	14.7%	14.9%	13.4%	13.4%	13.1%	13.0%	12.9%
Others	0.2%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%
TOTAL	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%	100.0%

Figura 99: Estimación cuota de mercado de Android OS (by IDC)

Consultoras como GARTNER e IDC han ofrecido cifras que indican una tendencia al alza en el empleo de Android OS en los próximos años. Por ejemplo, para 2021, estiman que Android OS tendrá una cuota de mercado de 86,9% frente al 13,1% de IOS.

A partir de los datos ofrecidos por la compañía **Superpowered** (fabricante de librerías especializadas en disminuir los tiempos de latencia de las comunicaciones de audio) se han generado las siguientes figuras, que representan el impacto de la versión del sistema operativo en la latencia del KPI 3.

A medida que aumenta la versión del sistema operativo Android, disminuye la latencia. **Aunque esta regla no se cumple para la versión de Android 8 que ofrece una latencia peor que la versión de Android 7. Posteriormente en la versión de Android 8 resolvieron los problemas que generaban el incremento en los tiempos de latencia.** En la formulación del KPI 3, no se dispone de tiempos de señalización y son todos tiempos o de RAN o de procesamiento de media (voz), esto supone que los tiempos  $TM_{UE1}$  y  $TM_{UE1}$  tienen un gran peso dentro del tiempo de mouth to ear, ya que consumen una parte significativa del Delay Budget disponible para cumplir con el estándar del 3GPP.

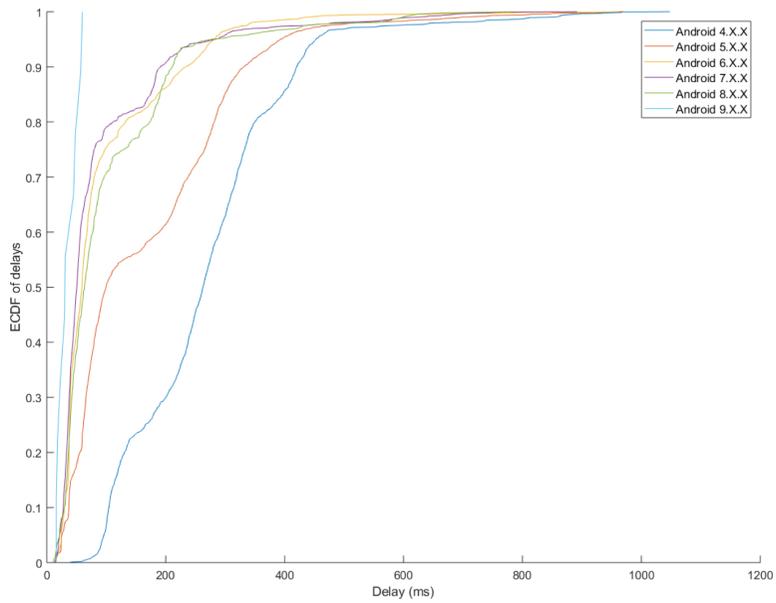


Figura 100: Mouth to Ear por versión de Android

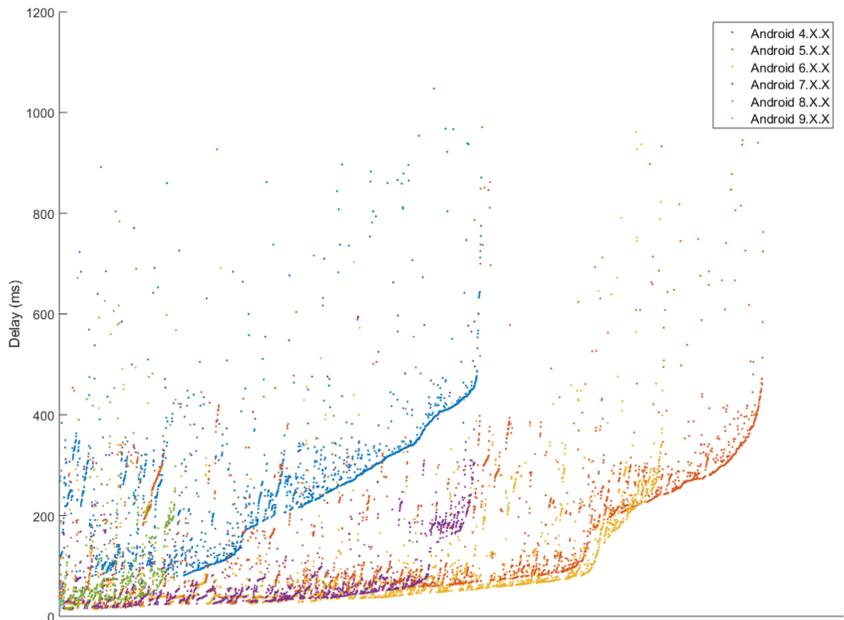


Figura 101: Latencia(ms) Mouth to Ear por versión de Android

## 9.2 Simulador de despliegue MCPTT

De cara a evaluar de forma sencilla el comportamiento del servicio en diferentes opciones de despliegue en función del destinatario final de la llamada se ha desarrollado un entorno de simulación. La forma más gráfica de presentar el simulador es a través de su pantalla principal. Esta utilidad ha sido desarrollada en Matlab y constituye una herramienta de análisis gráfico de gran potencia.

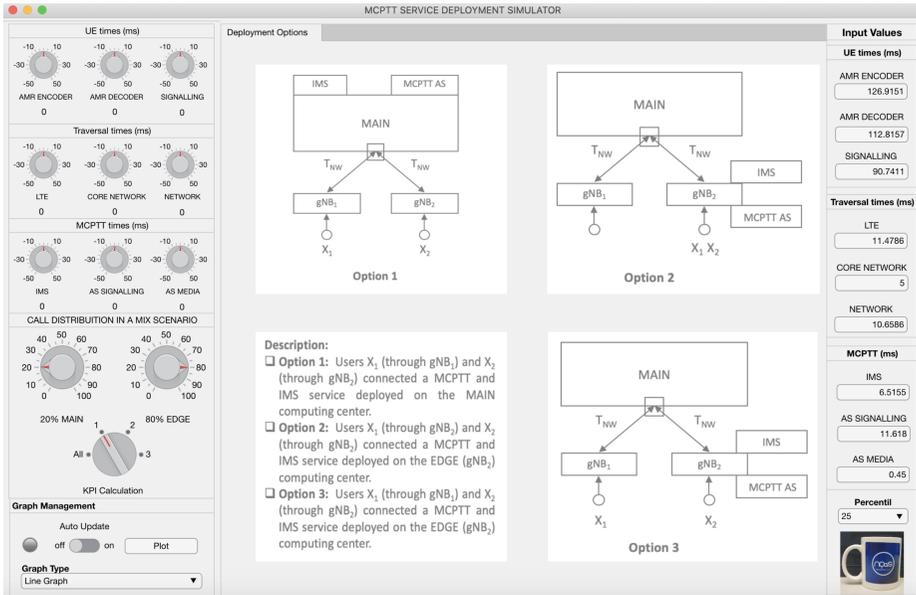


Figura 102: Pantalla principal del simulador de despliegue del servicio MCPTT

El simulador emplea los mismos ficheros que se han usado en el capítulo 7, Análisis de Indicadores por despliegue, para los valores de los KPIs y para obtener las representaciones gráficas. Estos ficheros contienen los tiempos de proceso o de red (latencia) medido en cada uno de los componentes que intervienen en la llamada:

- UE times (ms): AMR ENCODER, AMR DECODER, SIGNALLING
- Traversal times (ms): LTE, BACKHAUL, EPC, NETWORK (Internal/External)
- MCPTT times (ms): IMS, AS SIGNALLING, AS MEDIA

Como ya se ha mencionado en páginas anteriores, en cada una de las pruebas que se han realizado, se han establecido de forma secuencial 1000 llamadas MCPTT, con una cadencia de 50 llamadas por segundo. Los tiempos presentados se han medido durante estas pruebas. Las fórmulas de cálculo empleadas son las definidas en el capítulo 5, Análisis del escenario base de cálculo y que indican a continuación:

**KPI 1:**  $TRAN_{UL} + 2(T_{S_{UE1}} + TBH + TEPC + TIN_{net} + T_{S_{IMS}} + TEX_{net} + T_{S_{AS}}) + TRAN_{DL}$

**KPI 2:**  $2(TRAN_{UL} + T_{S_{UE1}} + T_{S_{AS}}) + 4(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + T_{S_{IMS}} + TEX_{net}) + T_{S_{UE2}} + 2 TRAN_{UL}$

**KPI 3:**  $TRAN_{UL} + T_{M_{UE1}} + 2(TBH_{net} + TEPC + TIN_{net} + TEX_{net}) + T_{M_{AS}} + T_{M_{UE2}} + TRAN_{DL}$

El **objetivo principal** de esta herramienta es analizar en qué momento un orquestador debería tomar la decisión de desplegar un servicio en un extremo de la red.

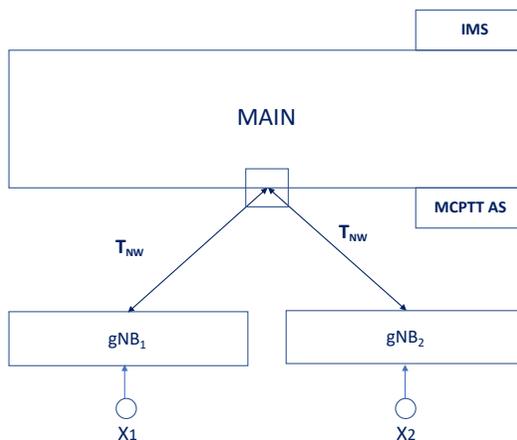


Figura 103: OPCION 1: MCPTT desplegado en el Data Center del Operador

La red de comunicaciones está formada por:

- Data Center del operador, denominado MAIN.
- El IMS es desplegado por el orquestador dentro de NS MCPTT en el Data center del Operador o en el extremo de la red.
- Estaciones Base (gNB<sub>1</sub> y gNB<sub>2</sub>) son los extremos de la red a través de las cuales se conectan los usuarios X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub>.
- X<sub>1</sub> + X<sub>2</sub> representan el conjunto de usuarios que participan en una llamada MCPTT en el instante de tiempo de simulación
- X<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> pueden acceder a la red dependiendo de su ubicación geográfica a través de las estaciones base gNB<sub>1</sub> y gNB<sub>2</sub>. Se podrá simular que los usuarios X<sub>1</sub> se conectan a gNB<sub>1</sub>, X<sub>2</sub> se conectan a gNB<sub>2</sub>, los usuarios X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> se conectan a gNB<sub>2</sub>, pero no que los usuarios X<sub>1</sub> y X<sub>2</sub> se conectan a gNB<sub>1</sub>.
- gNB<sub>1</sub> y gNB<sub>2</sub> se conectan al MAIN a través de NW.
- T<sub>NW</sub> representa el retardo que introduce la red en el KPI desde gNB<sub>1</sub> <-> MAIN, gNB<sub>2</sub> <-> MAIN y gNB<sub>1</sub> <-> MAIN <-> gNB<sub>2</sub>
- MCPTT Service se despliega en el MAIN o se despliega en el extremo de la red gNB<sub>2</sub> denominado EGDE. Solo se despliega en un nodo de cómputo o en el otro, pero en este simulador no se despliega en ambos a la vez.

A través de esta herramienta se puede simular tres escenarios de despliegue del servicio MCPTT:

- Opción 1:** El servicio MCPTT está desplegado en el MAIN. Los usuarios  $X_1$ ,  $X_2$  acceden al servicio centralizado que se encuentra en el Data Center del operador. Tanto la señalización como los datos media de las llamadas del operador, atraviesan NW en sentido  $gNB_1 \leftrightarrow MAIN \leftrightarrow gNB_2$ ,  $gNB_1 \leftrightarrow MAIN \leftrightarrow gNB_1$  o  $gNB_2 \leftrightarrow MAIN \leftrightarrow gNB_2$ . El retardo debido a TNW será el mismo en los tres casos. Representada en la Figura 103: OPCION 1: MCPTT desplegado en el Data Center del Operador

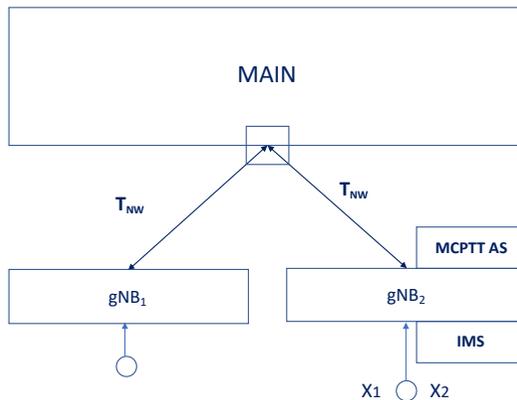


Figura 104: OPCION 2: MCPTT desplegado en el EDGE. Usuarios en el EDGE.

- Opción 2:** El servicio MCPTT está desplegado en el EDGE. Los usuarios  $X_1$  y  $X_2$  acceden al servicio desplegado en el extremo. En esta opción se considera que todos los usuarios están concentrados en la misma área geográfica y se conectan a través de  $gNB_2$ . Tanto la señalización como los datos media de las llamadas del operador, no atraviesan NW, el sentido es  $gNB_2 \leftrightarrow gNB_2$  para los clientes  $X_1$  y  $X_2$ .

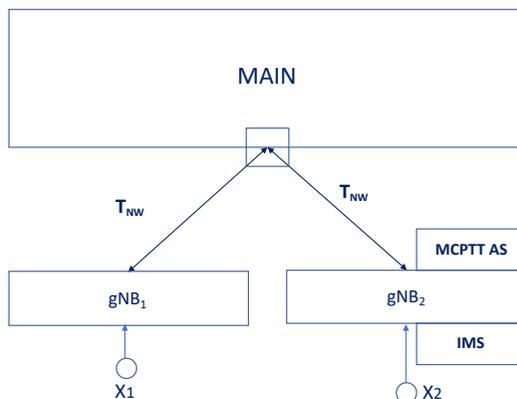


Figura 105: OPCION 3: MCPTT desplegado en el EDGE del Operador. Usuarios distribuidos

- **Opción 3 (Escenario Mixto):** El servicio MCPTT está desplegado en el EDGE. Gracias al simulador es posible simular que ocurre con los KPIs cuando no todos los usuarios en llamada están conectados al nodo externo de red gNB<sub>2</sub> (EDGE) donde se ha desplegado el servicio. Gracias al empleo de los potenciómetros de la caja de herramientas, denominada **“Call Distribution in a Mix Scenario”** se puede repartir los usuarios en llamada entre gNB<sub>1</sub> y gNB<sub>2</sub>.

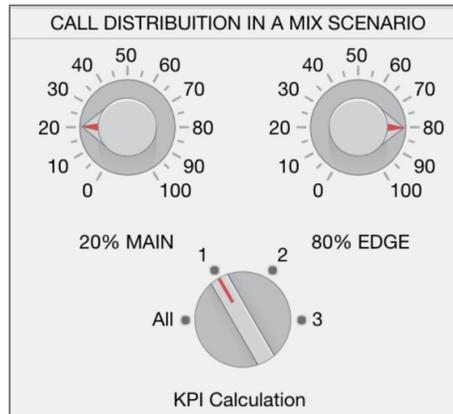


Figura 106: Panel de Distribución de llamadas en la Opción 3

Tal y como están ajustados los potenciómetros en la figura anterior el 20 % de los usuarios totales en llamada representados como X1 atraviesan el MAIN para acceder al servicio MCPTT desplegado en el EDGE y el 80 % de los usuarios en llamada están en el área geográfica del gNB<sub>2</sub> y están representados como X2. Para llamadas a grupos MCPTT donde todos los usuarios son X2, la eficiencia es muy alta. Para llamadas a grupo MCPTT formados solo por usuarios X1, sus comunicaciones quedan muy penalizadas ya que debe atravesar el MAIN camino del EDGE el doble de veces que si el servicio MCPTT estuviera desplegado en el MAIN. Para llamadas mixtas formada por usuarios X2 y X1 la mejora dependerá en función del porcentaje de cada uno de ellos en la llamada a grupo. El selector **“KPI Calculation”** permite seleccionar que KPIs se quiere calcular, pudiendo analizarlos individual o simultáneamente los tres a la vez. Una vez configurado el simulador en el modo **“Auto Update”**, cada vez que se desplaza uno de los dos potenciómetros se obtendrá directamente los KPIs de forma gráfica y alfanumérica.

Por defecto, el cálculo de los KPIs se realiza en base a los valores de los ficheros que contienen los tiempos de proceso o de red (latencia) medidos en cada uno de los componentes que intervienen en la llamada. Sin embargo, para hacer más dinámica esta simulación es posible variar en - 50 y + 50 % el valor de estos tiempos.

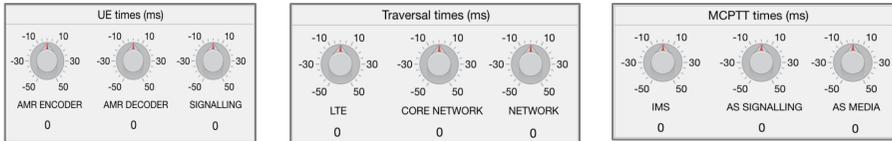


Figura 107: Panel de ajuste tiempos por componente

En la parte derecha de la pantalla se puede ver en tiempo real cual es el percentil 25, 50, 75 o 90 de los valores de entrada, pudiendo simular tantos escenarios como combinaciones de tiempos se esté interesado en analizar. Permite analizar el impacto que tiene  $T_{NW}$  en el despliegue en el EDGE del servicio MCPTT. Es posible simular, por ejemplo, si se produce una congestión en la RAN o si aumentan los tiempos de procesamiento de los servidores debidos al aumento de capacidad provocada por aumento de recursos debido a la emergencia.

Cuando el selector “Auto Update” se encuentra en posición ON y por tanto el indicador led está en VERDE, actualizará automáticamente el gráfico y el panel de datos cada vez que se ajuste el valor de uno de los potenciómetros.

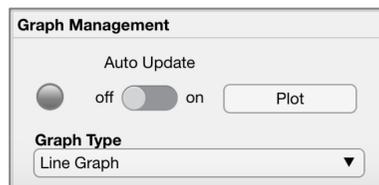


Figura 108: Panel de visualización de resultados

En el gráfico y en el panel de datos se visualizan los KPIs seleccionados a través del selector “KPI Calculation”. El formato del gráfico puede ser: “Line Graph” y “Bar Graph” y se selecciona en el desplegable “Graph Type”.

La presentación de los resultados está dividida en dos zonas:

- **Panel de datos:** Se ubica en la parte inferior y es donde se representan los valores en tiempo real de cada uno de los KPIs seleccionados.

OP	KPI 1	KPI 2	KPI 3	DESCRIPTION
1	332.3089	543.6839	276.5728	MCPTT 100% Main Cloud
2	310.8487	500.2589	254.6101	MCPTT 100% Edge Cloud
3	345.2167	528.5210	270.3711	MCPTT Mix(80% In)+(20% Out)

Figura 109: Panel de alfanumérico de resultados

- **Panel de gráficos:** Se ubica sobre el panel de datos. Si el tipo de gráfico seleccionado es “Line Graph” se abrirá una solapa por cada uno de los KPIs seleccionados. Si el gráfico seleccionado es “Bar Graph” se abrirá una solapa por cada percentil; 0.95, 0.80, 0.75, 0.50, 0.25 y 0.20 que estará relacionado con el valor instantáneo de cada KPI para cada % de llamadas. De esta forma, se puede conocer si el 95% de las llamadas no cumplen el KPI, si lo hacen al 80%...20%. Esto va a permitir relacionar la distribución de los usuarios

configurada en el escenario con el porcentaje de llamadas que cumplen cada KPI.

Tanto en la representación gráfica como alfanumérica se representan las tres opciones de despliegues que contempla este simulador:

- **La opción 1:** 100 % de los usuarios se encuentran en llamadas gestionadas por el servidor MCPTT desplegado en el MAIN. Esta opción se representa con el color azul.
- **La opción 2:** 100 % de los usuarios se encuentran en llamadas gestionadas por el servidor MCPTT desplegado en el EDGE. Esta opción se representa con el color rojo.
- **La opción 3:** Como ya se ha indicado anteriormente, es la opción mixta el servidor MCPTT desplegado en el EDGE y los usuarios con independencia de su ubicación participan en llamadas gestionadas desde el EDGE desplegado en el nodo de cómputo de gNB<sub>2</sub>. Esta opción se representa con el color fucsia.

## Análisis indicadores. Opción 3: 20% MAIN – 80% EDGE

Se van a presentar los resultados a través del simulador que anteriormente se ha presentado. Los tiempos de procesado / latencia de los componentes de la comunicación no han sido modificados por los potenciómetros disponibles, se emplean los tiempos sin ajuste.

### KPI1 – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE

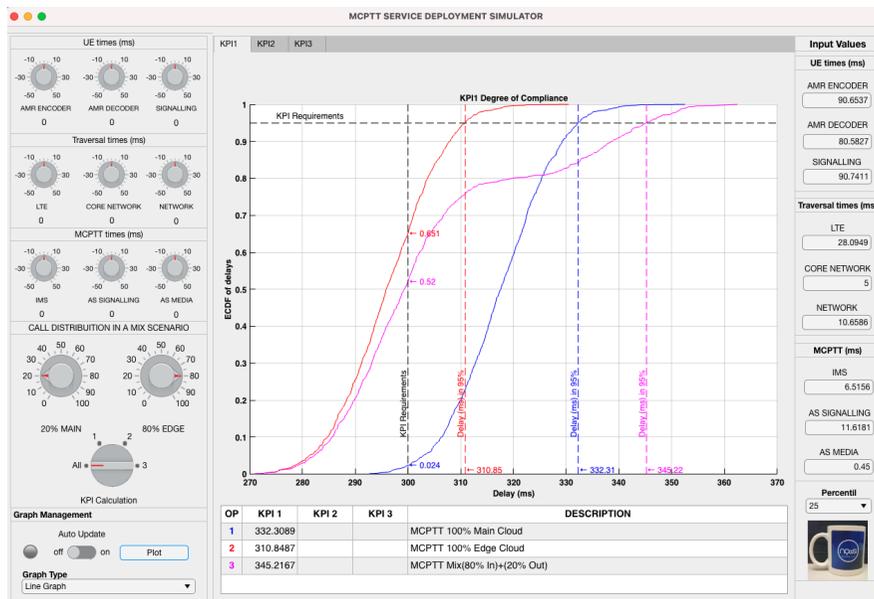


Figura 110: KPI1 – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE

## KPI2 – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE

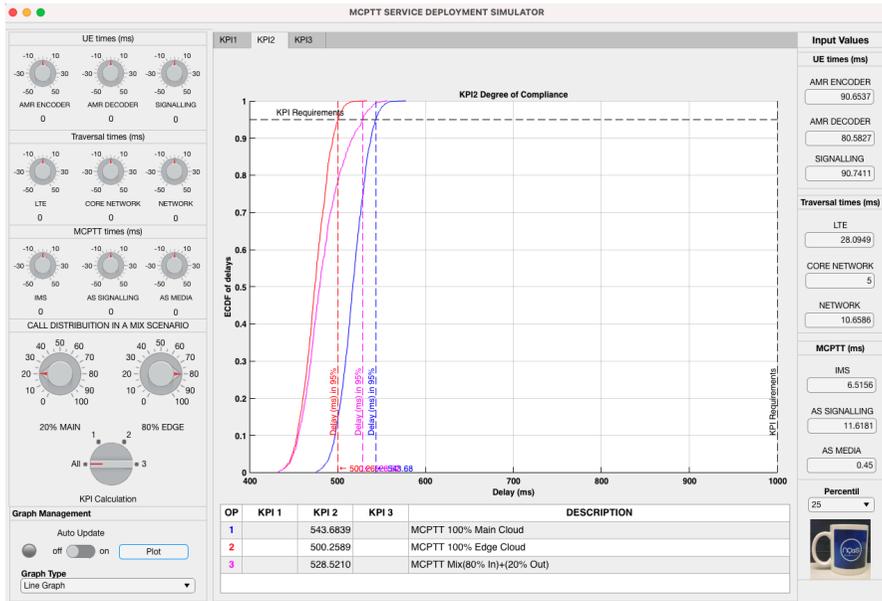


Figura 111: KPI<sub>2</sub> – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE

## KPI3 – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE

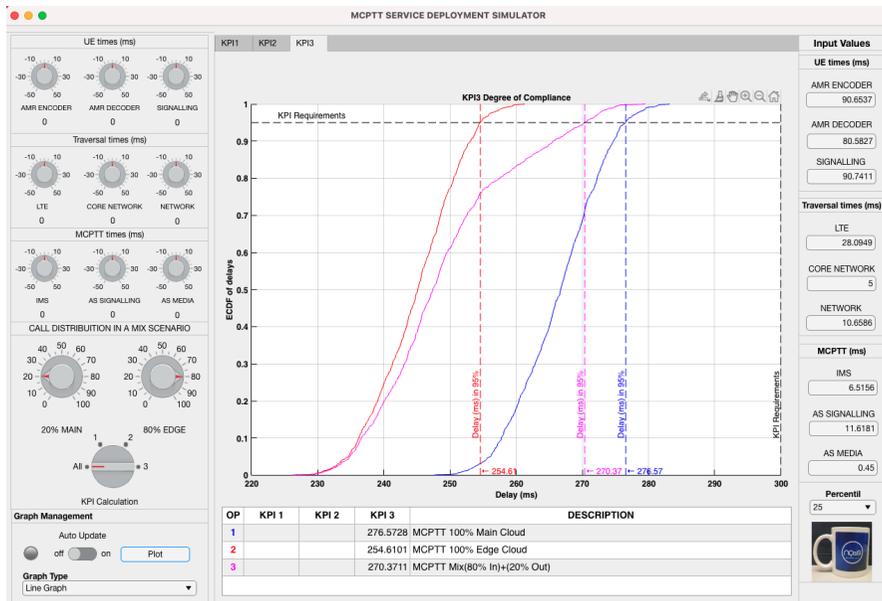


Figura 112: KPI<sub>3</sub> – Line Graph – 20% MAIN / 80% EDGE

## KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 95

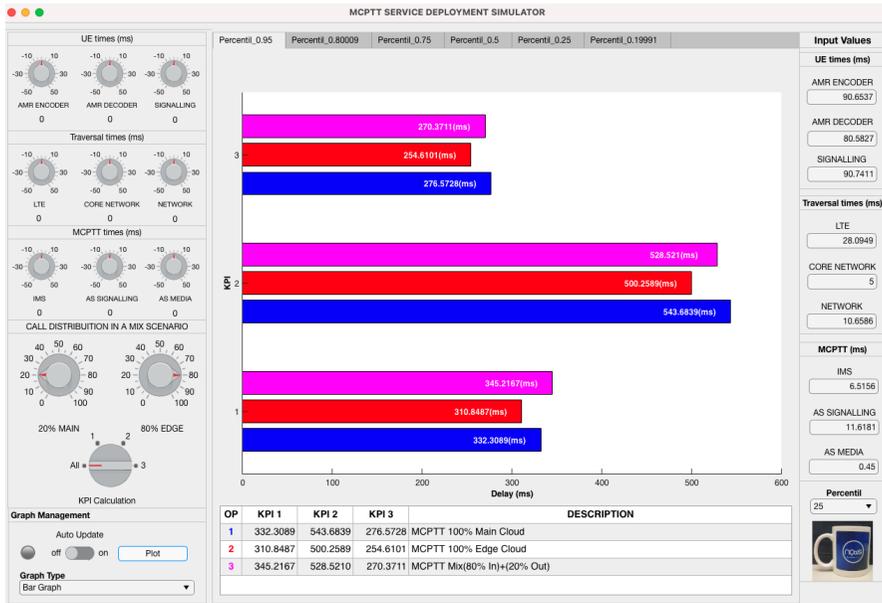


Figura 113: KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 95

## KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 80

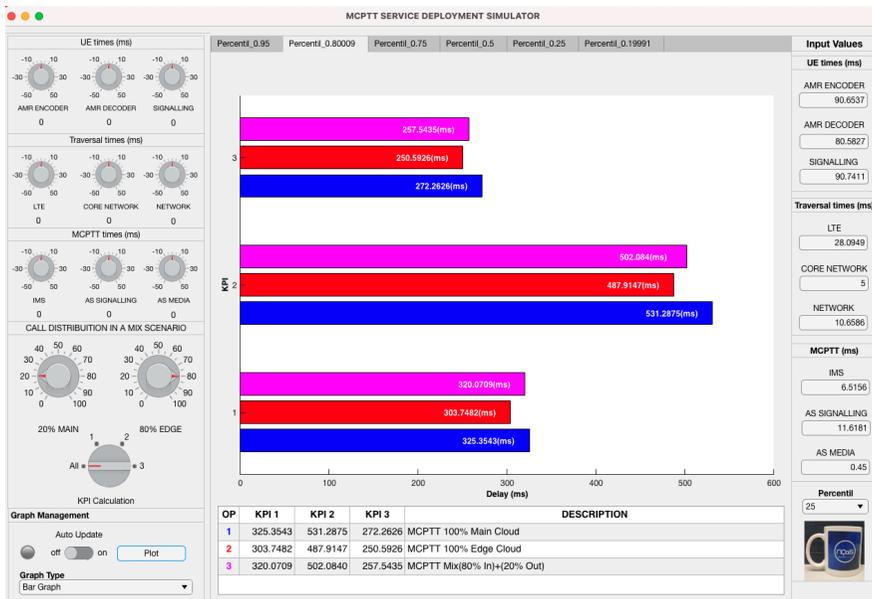


Figura 114: KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 80

## KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 75

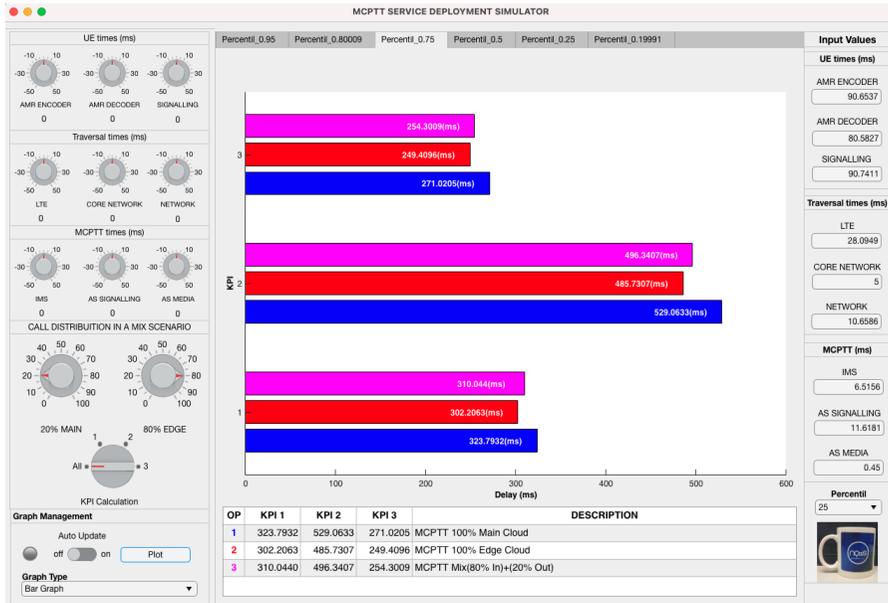


Figura 115: KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 75

## KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 50

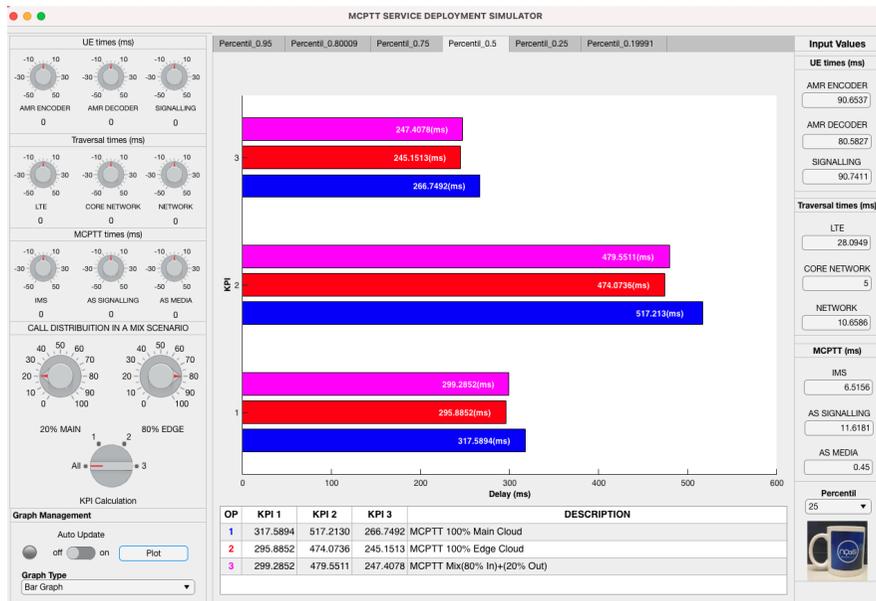


Figura 116: KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 50

## KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 25

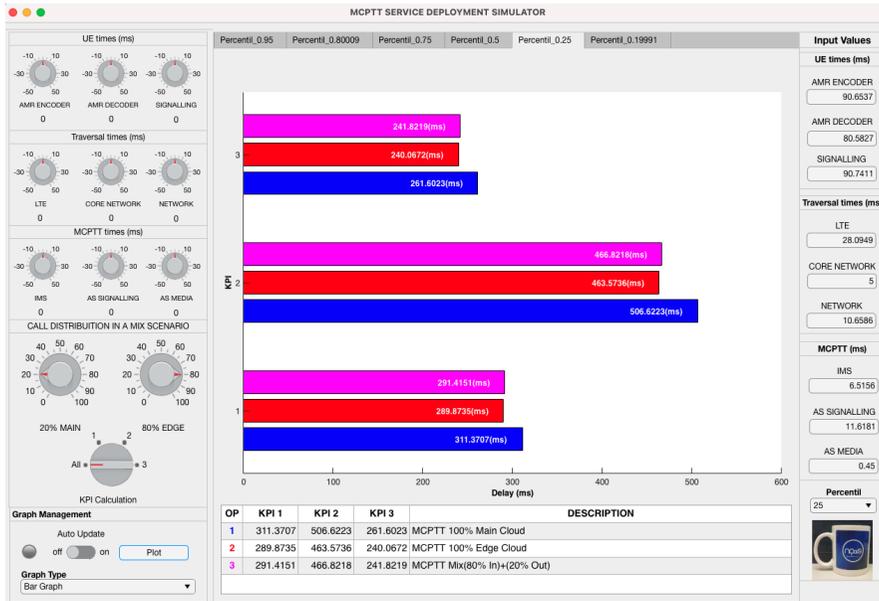


Figura 117: KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 25

## KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 20

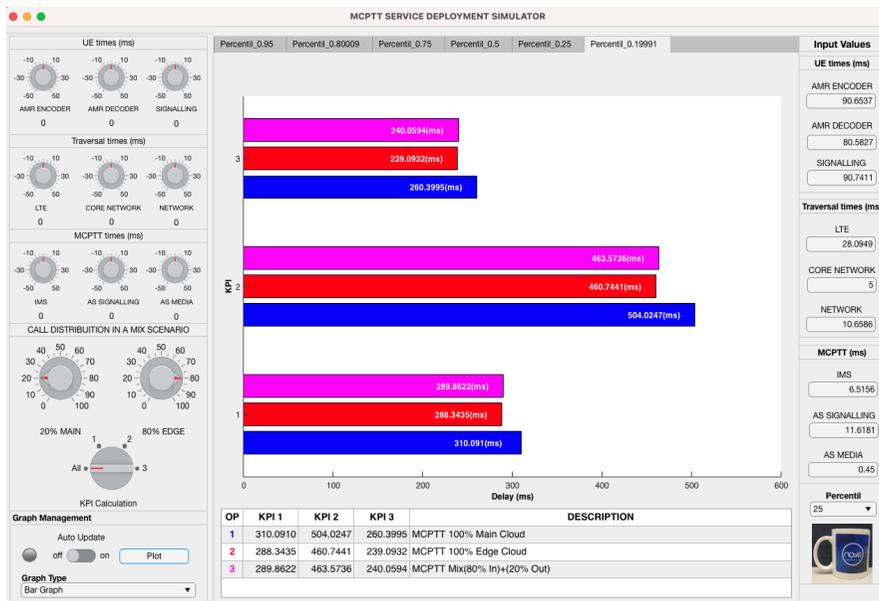


Figura 118: KPIs – Bar Graph – 20% MAIN / 80% EDGE – Percentil 20

## Valoración de resultados. Despliegue MCPTT en el EDGE

Gracias al simulador se ha podido validar a través de datos reales el impacto del despliegue del servicio MCPTT en el extremo. De forma generalizada, una emergencia se localiza en un área geográfica concreta, eso implica que los recursos técnicos y por tanto las comunicaciones de emergencia entre ellos van a estar muy concentrados en un extremo de la red. En este simulador, se presenta un modelo de red simplificado en cuanto a estaciones base, pero suficiente para poder analizar el impacto que supone la localización de los recursos de emergencia en la red. Estas son las conclusiones que se pueden sacar después de los datos presentados en las páginas anteriores:

- 1) El servicio MCPTT se adapta perfectamente a estos escenarios de aumento de capacidad. El servicio está capacitado para operar en este tipo de situaciones.
- 2) La gran diferencia entre desplegar en el extremo o el Data Center del operador dependerá de la conectividad de las estaciones base y el MAIN. Incluso si la arquitectura permite la conectividad entre estaciones base las diferencias entre desplegar en el extremo y en el MAIN prácticamente desaparecen si el 100% de los usuarios no están cerca del nodo de red donde se despliegue el servicio MCPTT.
- 3) Los grupos de llamada de los recursos que se desplieguen en la zona de emergencia no debería contener usuarios que se encuentren fuera ya que penaliza las comunicaciones globales. Desde el punto de vista de coordinación se debe desplegar un centro de mando al área de operación e incluirlo en los grupos operativos en la zona de emergencia. Este centro de mando avanzado se comunicará a través de llamadas privadas con el centro de mando principal ubicado en el Data Center del operador y será este el que mantenga las comunicaciones con los recursos que se encuentran fuera del área de emergencia a través de llamadas a grupo. Si se mantiene el supuesto planteado en el simulador, solo existirá un servidor MCPTT que estará desplegado en el EDGE, por lo tanto, penalizará las comunicaciones entre el centro de mando central y los recursos que no intervienen en la emergencia, pero garantizará la comunicación en la zona de la emergencia.
- 4) La capacidad de los nodos de cómputo de los extremos de la red será menor que la disponible que el Cloud del operador. Si se produce un aumento de capacidad en el extremo debido a la situación de emergencia, se podrá desplegar tantas VDU MCPTT AS como sean necesarios, pero si se tiene problemas de KPIs debido a problemas de capacidad de hardware no podrá ser resuelto salvo que se despliegue un nodo adicional que dé soporte y sobre el que se pueda balancear las llamadas y liberar hardware.
- 5) Es muy importante mantener las comunicaciones entre el EDGE y el MAIN. Generalmente el orquestador de red estará ubicado en el MAIN y su participación, tal y como se ha indicado a través de las páginas anteriores es fundamental para poder garantizar la continuidad y disponibilidad del servicio MCPTT.

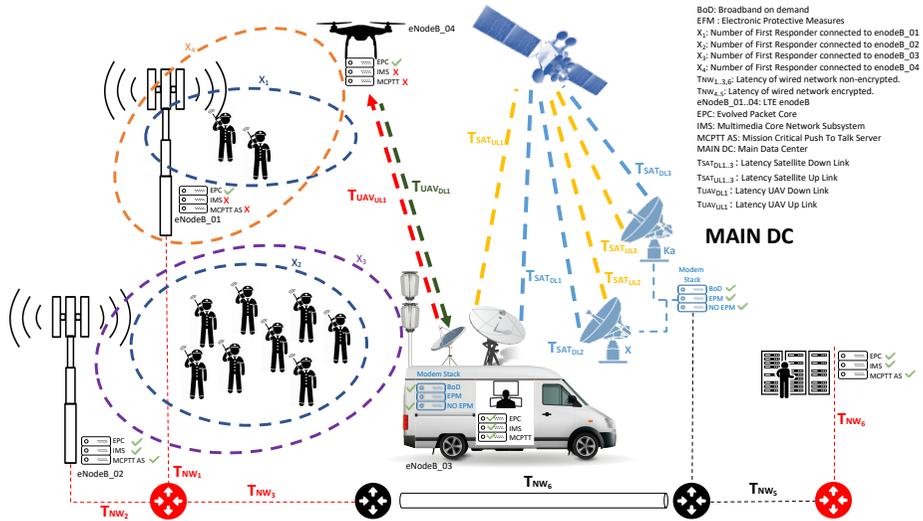


Figura 119: Enlace satélite entre EDGE – MAIN (Orquestación)

La tecnología de comunicaciones vía satélite a pesar de las latencias que introducen en las comunicaciones este tipo de enlaces puede ser perfectamente operativas para mantener la monitorización de cada uno de los nodos de red y la orquestación en base a las métricas publicadas por cada nodo desde el MAIN del operador.

El despliegue de los servicios en los extremos de la red, acercan estos a los usuarios finales y por tanto la latencia de las comunicaciones disminuyen.

El servicio MCPTT cumple con todos los requerimientos para poder ser desplegadas sobre redes LTE. Actualmente, las redes LTE, hacen uso de muchas de las tecnologías propias de 5G.



## 10 Glosario

3GPP	3rd Generation Partnership Project
4G	the fourth generation of broadband cellular network technology
5G	the fifth generation of wireless communications technologies
5G NSA	5G Non-Standalone
5G SA	5G Standalone
5GC	5G Core Network
5GS	5G Standalone
A	Acciones
ACELP	Algebraic Code Excited Linear Prediction
AES	Advanced Encryption Standard
AF	Application Function
AI	Air Interface
AKA	Authentication and Key Agreement
AMC	Adaptative Modulation and Coding
AMC	Adaptive Modulation & Coding
AMF	Access and Mobility Management Functions
AN	Access Network
AP	Aportaciones
API	Application Programming Interface
APN-AMBR	Aggregated Maximum Bit Rate per APN
ARP	Allocation and Retention Priority
AuC	Authentication Center
AUSF	Authentication Server Function
BBU	Band Base Unit

BM-SC	Broadcast Multicast Service Center
BS	Base Station
BTS	Base Transceiver Station
CAPEX	Capital Expenditures
CC	Colour Code
CCE	Control Channel Element
CCK	Common <i>Cipher</i> Key
CK	Cipher Key
CMS	Configuration Management System
CN	Carrier Number
CN	Core Network
CP	Control Plane
CQI	Calidad del canal
CS	Circuit Switch
CSC	Common Services Core
CSCF	Call Session Control Function
CSI	Channel State Information
CTNE	Compañía Telefónica Nacional de España
CU	Centralized Unit
CUPS	Control and User Plane Separation
D2D	Device to device
DCK	Derived <i>Cipher</i> Key
DL	Down Link
DMO	Direct Mode Operation
DMR	Digital Mobile Radio.
DNS	Domain Name System

DQPSK	Differential Quadrature Phase Shift Keying
DTT	Digital Terrestrial Television
DU	Distributed Unit)
DVB-T	Digital Video Broadcasting – Terrestrial
E-UTRAN	Evolved UTRAN
ECK	<i>Encryption Cipher Key</i>
EGSKO	<i>Extended GSKO</i>
EKSG	Key Stream Generator
EKSS	End-to-end Key Stream Segment
EM	Element Manages
eMBMS	Evolved Multimedia Broadcast Multicast Services
EMS	Emergency Medical Service
eNB	Evolved Node B
EPS	Evolved Packed Core
EPS BEARER	Tunnel between the UE and the PGW
<i>ESI</i>	<i>Encrypted Short Identity</i>
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FCS	Floor Control Server
FDD	Frequency Division Duplex
FFSK	Fast Frequency Shifty Keying
FM	Frecuencia Modulada
GCK	<i>Group Cipher Key</i>
GCS	Group Communication Service
GCS AS	GCS Application Server
GCSE	Group Communication System Enabler
GLMS	Group and List Management Server

GMS	Group Management System
gNB	5G Base Station NR
GPS	Global Positioning System
GRB	Guaranteed Bit Rate
GSKO	<i>Group Session Key for OTAR</i>
GUMMEI	Globally Unique MME Identifier
GUTI	Globally Unique Temporary UE Identity
HSPA	High-Speed Packet Access
HSS	Home Subscriber Server
HSS	Home Subscriber Server
I-CSCF	Interrogating-CSCF
IDEA	International Data Encryption Algorithm
IDMS	Identity Management System
IMS	Ip Multimedia Subsystem
IMSI	Mobile Subscriber Identity
IOPS	Isolated E_UTRAN operation for Public Safety
IoT	Internet of Things
IP	Internet Protocol
IPSEC	IP Security
ITSI	Individual TETRA Subscriber
KASME	Key Access Security Management Entity
KeNB	eNB Base Key
KIS	Departamento de Ingeniería de Comunicaciones
KMS	Key Management System
KPI	Key Performance Indicators
KS	Authentication Key Session

KSG	Key Stream Generator
KSO	Key Session OTAR
KSS	Key Stream Segment
LA	Location Area
LBO	Local Break Out
LDAP	Lightweight Directory Access Protocol
LMR	Land Mobile Radio
LTE	Long Term Evolution
M2M	Machine to machine
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Services
MC	Mission Critical
MCC	Mobile Country Code
MCDATA	Mission Critical Data
MCPTT	Mission Critical Push to Talk
MCPTT AS	MCPTT Application Server
MCS	Mission Critical Service
MCS	Modulation and Coding Scheme
MCVIDEO	Mission Critical Video
MDF	Media Distribution Function
MEC	Multi Access Edge Computing
MGCK	Modified GCK
MIMO	Multiple Input Multiple Output
MME	Mobility Management Entity
mMTC	Massive Machine Type Communications
MNC	Mobile Network Code
MNI	Mobile Network Identification

MRB	Aggregated Bit Rate
MS	Mobile Station
MSIN	Mobile Subscriber Identification Number
MVNO	Mobile Virtual Network Operator
NAS	Non-Access Stratum
NEF	Network Exposure Function
NFV	Network Functions Virtualization
NFVI	Network Function Virtualization Infraestructure
NFVI PoPs	NFVI Point of Presences
NFVO	NFV Orchestrator
NG-RAN	Next Generation Radio Access Network
NMI	Network Management Interface
NMSI	National Mobile Subscriber Identity
NPSTC	National Public Safety Telecommunications Council
NQaS	Network Quality and Security
NR	New Radio
NRF	NF Repository Function
NS	Network Service
NSSF	Network Slice Selection Function
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OMA	Open Mobile Alliance
OPEX	<i>Operating Expense</i>
OSS/BSS	Operations Support System / Business Support System
OT	Objetivos Técnicos
OTAK	Over the Air Key
OTAR	Over the Air Re-keying

OTT	Over the Top
P-CSCF	Proxy-CSCF
P-GW	Packet Data Network Gateway
P25	Project 25
PABX	Private Automatic Branch Exchange para PABX
PCC	Policy and Charging
PCF	Policy Control Function
PDCCH	Physical Downlink Control Channel)
PDN	Packet Data Network
PDSCH	Physical Downlink Control Channel)
PEI	Peripheral Equipment Interface
PGW	Packet Data Network Gateway
PLMN	Public Land Mobile Network
PMA	Puesto de mando avanzado
PMR	Private Mobile Radio / Professional Mobile Radio
PoC	Push to Talk over Cellular
PPDR	Public Protection and Disaster Relief
PRB	Physical Resource Block
ProSe	Proximity Services
PSG	Public Safety Grade
PSI	Public Service Identifier
PSTN	Public Switched Telephone Network
PTT	Push to Talk
QCI	QoS Class Identifier
QoS	Quality of Service
RAN	Radio Access Network

RAN	Radio Network Access
RB	Resource Blocks
RE	Resource Element
REG	Resource Element Group
ROHC	Robust Header Compression
RRU	Remote Radio Unit
RTCP	Real Time Control Protocol
RTP	Real Time Transport Protocol
RTP/AVP	RTP Audio Video Profile
RTT	Round Trip Time
S-CSCF	Serving-CSCF
SAGE	ETSI's Security Algorithm Group of Experts
SCK	Static <i>Cipher</i> Key
SDN	Software Defined Networking
SDO	Standard Development Organizations
SFPG	Security and Fraud Prevention Group
SGW	Serving Gateway
SINR	Signal to Interference and Noise Ratio
SIP	Session Initiation Protocol
SISO	Single Input Single Output
SLA	Service Level Agreement
SMF	Session Management Function
SoR	Statement of Requirements
sRTP	Secure RTP
SSI	<i>Short Subscriber Identity</i>
SSM	Source-Specific Multicast

SwMI	Switching & Management Infraestructure
TAC	Código de área de seguimiento
TACS	Total Access Communication. System
TBS	Transport Block Size
TCCA	Critical Communications Association
TCCE	Terrestrial Trunked Radio and Critical Communications Evolution
TCP	Transmission Control Protocol
TDD	Time Division Duplex
TDMA	Time Division Multiple Access
TDT	Televisión Digital Terrestre
TETRA	Terrestrial Trunked Radio
TETRAPOL	Terrestrial Trunked Radio Police
TMGI	Temporary Mobile Group Identity
TMO	Trunked Mode Operation
TMSI	Temporary Mobile Subscriber Identity
TTI	Transmission Time Interval
UAK	User Authentication Key
UDM	Unified Data Management
UDP	User Datagram Protocol
UE	User Equipment
UE-AMBR	Aggregated Maximum Bit Rate per UE
UL	Up Link
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UP	User Plane
UPF	User Plane Function
UPV/EHU	Universidad del País Vasco / Euskal Herriko Unibertsitatea

URLLC	Ultra Reliable Low Latency Communications
UTRAN	UMTS Terrestrial Radio Access Network
VDU	Virtualized Distributed Unit
VHF	Very High Frequency
VIM	Virtual Infrastructure Manager
VLAN	Virtual Local Area Network
VNF	Virtual Network Function
VNFM	VNF Manager
VoIP	Voice Over IP
VoLTE	Voice Over Long-Term Evolution
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access,
XCAP	XML Configuration Access Protocol
XDMS	Document Management Server
XML	eXtensible Mark-up Language

## 11 Bibliografía

- [1] Ramon Ferrús, Oriol Sallent,, "Future Mobile Broadband PPDR Communications Systems, in Mobile Broadband Communications for Public Safety: The Road Ahead Through LTE Technology", Wiley, pp. 81-125, August 2015.
- [2] ETSI EN 300 392-3-1 V1.3.1,, "Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 3: Interworking at the Inter-System Interface (ISI); Sub-part 1: General design", ETSI, August 2010.
- [3] P25,Project 25, <http://www.project25.org>.
- [4] D. Axiotis, D. Xenikos , "UDP Performance Measurements over TETRA IP", n proceedings of VTC: Spring, 2007.
- [5] 3GPP, 3GPP Release Calendar, "<https://www.3gpp.org/3gpp-calendar/44-specifications/releases>".
- [6] 3GPP TR 36.868, "Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Study on group communication for E-UTRA", Release 12: V12.0.0, 2014-03.
- [7] 3GPP TR 36.843, "Study on LTE Device to Device Proximity Services; Radio Aspects", Release 12: V12.0.1, 2014-03.
- [8] NPSTC,, "Push to Talk (PTT) over LTE Public Safety Requirements report", NPSTC.
- [9] NPSTC,, "Defining Public Safety Grade Systems and Facilities, Final Report", NPSTC, 22/5/2014.
- [10] C.C.B.G., "The Strategic Case for Mission Critical Mobile Broadband - A review of the future needs of of critical communications the users", Cambridgeshire, UK: TETRA and Critical Communications Association (TCCA), December 2013.
- [11] C.C.B.G., y C.C.B.G.,, "TETRA AND LTE WORKING TOGETHER", Cambridgeshire, UK: TETRA and Critical Communications Association (TCCA), June 2014.

- [12] Simon Forge, Robert Horvitz and Colin Blackman,, "Is Commercial Cellular Suitable for Mission Critical Broadband?, Final Report", European Commission by SCF Associates Ltd, Abril 2015.
- [13] Open Mobile Alliance, "OMA overview", San Antonio, TX: NPSTC Governing Board Meeting, November 2014.
- [14] Draft ECC Report 218, "Harmonised conditions and spectrum bands for the implementation of future European broadband PPDR systems", April 2014.
- [15] TCCA Critical Communications Broadband Group, "Mission Critical Mobile Broadband: practical standardisation and roadmap considerations", White Paper, February 2013.
- [16] Iain Sharp (Netovate), "Delivering public safety communications with LTE", White Paper on behalf of 3GPP, September 2013: Available online at [http://www.3gpp.org/IMG/pdf/130902\\_lte\\_for\\_public\\_safety\\_rev2\\_1.pdf](http://www.3gpp.org/IMG/pdf/130902_lte_for_public_safety_rev2_1.pdf), (accessed 28 March 2015)..
- [17] 3GPP TS 23.303, "Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Proximity-based services (ProSe); Stage 2", version 12.2.0 Release 12, September 2014.
- [18] 3GPP TS 22.346:, "Isolated Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) operation for public safety; Stage 1", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), march 2017.
- [19] Balazs Bertenyi, Chairman of 3GPP TSG-SA, "Developments in 3GPP – Release 12 and beyond", Available online at [http://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations\\_2014/2014\\_05\\_bertenyi\\_3GPP\\_Rel12\\_beyond.pdf](http://www.3gpp.org/ftp/Information/presentations/presentations_2014/2014_05_bertenyi_3GPP_Rel12_beyond.pdf) : (accessed March 2015), May 2014.
- [20] 3GPP SA6 Working Group, "Mission critical applications", Available online at <http://www.3gpp.org/specifications!groups/sa-plenary/sa6-mission-critical-applications>, March 2015.
- [21] ETSI TR 103 269-1, "TETRA and Critical Communications Evolution (TCCE); Critical Communications Architecture; Part 1: Critical Communications architecture reference model", V1.1.1, July 2014.
- [22] TS 103 269-2, "TETRA and Critical Communications Evolution (TCCE); Critical Communications Architecture; Part 2: Critical Communications application mobile to network interface architecture", V0.0.2, December 2014.

- [23] Open Mobile Alliance,, "<http://www.openmobilealliance.org>", OMA.
- [24] Comneon, Ericsson, Motorola, Nokia, Siemens,, "Push-to-talk over Cellular (PoC) Architecture", Release 2.0.: Nokia.
- [25] C. Lu, "DELAY ANALYSIS OF PUSH-TO-TALK OVER CELLULAR (POC) SERVICE SOLUTIONS FOR PUBLIC SAFETY COMMUNICATIONS OVER LTE NETWORKS", 27 August 2012.
- [26] T. T. Jesse Frey, Jaden Pieper,, "Mission Critical Voice QoE Mouth-to-Ear Latency Measurement Methods", NISTIR 8206.
- [27] Y. Lair and G. Mayer, , "Mission Critical Services in 3GPP".
- [28] Aitor Sanchoyerto, R. Solozabal, B. Blanco and F. , "Analysis of the Impact of the Evolution Toward 5G Architectures on Mission Critical Push-to-Talk Services", in IEEE Access: vol. 7, pp. 115052-115061, 2019.
- [29] 3GPP TS 23.280, "Common functional architecture to support mission critical services; Stage 2 (Release 14)", version 14.4.0. : 3GPP, April 2018.
- [30] 3GPP TS 23.379, "Functional architecture and information flows to support Mission Critical Push To Talk (MCPTT); Stage 2 (Release 14)", version 14.5.0: 3GPP, April 2018.
- [31] Deliverable D6.1,, "Planning of demonstration and network services for Use Case 2", Pág. 22-24: Embedded Network Services for 5G Experiences (5G ESSENCE), February 2019..
- [32] RTS/TSGC-0124379vf30, «"3GPP TS 24.379; LTE; Mission Critical Push To Talk (MCPTT) call control; Protocol specification",» Release 15, Figure 5.3.2-1, 5.3.3-1, October 2018.
- [33] Fidel Liberal, José Oscar Fajardo,, "MCPTT Architecture and principles", EHU(NQaS), Nemergent, March 2018.
- [34] TETRAPOL, "TETRAPOL References", <https://www.tetrapol.com/community/references/>.
- [35] PowerTrunk, "Public Safety", Jersey City (U.S.A.): 2013-2020 PowerTrunk.com, 2020.
- [36] TCCA-CCBG,, "Tetra and LTE working Together, v1.1", June 2014.

- [37] TETRA + Critical Communications Association,, "TETRA standard description from the official website: <http://www.tetramou.com/about/page/12030>", TCCA.
- [38] ETSI EN 300 392-2 V3.4.1,, "Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 2: Air Interface (AI)", August 2010.
- [39] ETSI EN 300 392-4-1,, "Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 4: Gateways basic operation; Sub-part 1: Public Switched Telephone Network (PSTN)", January 1999.
- [40] ETS 300 392-4-2,, "Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Part 4: Gateways basic operation; Sub-part 2: Integrated Services Digital Network (ISDN) gateway", May 2000.
- [41] 3GPP TS 36.213,, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (eUTRA); Physical layer procedures", version 12.3.0 Release 12: Table 7.1.7.1-1.
- [42] José Oscar Fajardo,, "Analysis of channel quality reporting mechanisms and their impact into 4G and beyond technologies", page 10-21: UPV/EHU, December 2015.
- [43] Manuel Alvarez Campana,, "Arquitectura funcional y protocolos LTE", Madrid: ETSIT UPM, Marzo 2015.
- [44] Agustí R.,, "LTE: Nuevas Tendencias en Comunicaciones Móviles", Madrid: Fundación Vodafone España, 2010.
- [45] Taha A.,, "LTE, LTE-Advanced and WiMAX. Towards IMT-Advanced Networks", 2012.
- [46] 3GPP TS 36.213, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (eUTRA); Physical layer procedures", version 12.3.0 Release 12: Table 7.1.7.2.1-1.
- [47] 5G PPP Architecture Working Group,, "View on 5G Architecture", v3.0: 5G PPP, June 2019.
- [48] ETSI TS 123 501,, "5G - System Architecture for the 5G System", version 15.2.0 Release 15, June 2018.
- [49] 3GPP TR 23.501, "Technical Specification Group Services and System Aspects: 1. System Architecture for the 5G System - Stage 2", version 15.0.0 Release 15: The 3rd Generation Partnership Project (3GPP), Internet-Draft, January 2018.

- [50] 3GPP TS 29.522, "5G System; Network Exposure Function Northbound APIs; Stage 3", version 15.3.0 Release 15: ETSI, April 2019.
- [51] Gabriel Brown,, "Service Based Architecture for 5G Core Networks", Huawei Technologies CO. LTd., November 2017.
- [52] 3GPP TS 38.401 , "5G. NG-RAN. Architecture description", version 15.5.0 Release 15.
- [53] ETSI TS 138 300,, "5G; NR; Overall Description; Stage-2", version 15.3.1 Release 15.
- [54] Armando Santos,, "¿Qué es NFV?", January 2018.
- [55] ETSI GS NFV-SWA 001,, "Network Functions Virtualisation (NFV); Virtual Network Functions Architecture", V1.1.1, December 2014.
- [56] Software-Defined Networking (SDN) , "Definition <https://www.opennetworking.org/sdn-resources/sdn-definition>".
- [57] SDN Central, , "What's Software-Defined Networking (SDN)?", <https://www.sdncentral.com/resources/sdn/what-the-definition-of-software-defined-networking-sdn/>.
- [58] Marie Paule Odi, Rapporteur, HP,, "NFV TUTORIAL SESSION - SDN Usage in an NFV Architectural Framework", October 2012.
- [59] 3GPP TS 23.468, "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Services and System Aspects; Group Communication System Enablers for LTE (GCSE\_LTE); Stage 2 (Release 13)", V13.3.0: 3GPP, December 2015.
- [60] 3GPP TS 23.246 v13.3.0, "Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Architecture and functional description", December 2015.
- [61] 3GPP TS 22.179, , "Technical Specification Group Services and System Aspects; Mission Critical Push to Talk (MCPTT) over LTE; Stage 1", V14.3.0 (2016-12): 3rd Generation Partnership Project (3GPP), December 2016.
- [62] ETSI TS 123 203, , "Digital cellular Telecommunications system (Phase 2+); universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture ", (3GPP TS 23.203 version 12.6.0 release 12): Table 6.1.7: Standardized QCI characteristics (Page 44), September 2014.

- [63] A. Taha, "H. Hassanein and N. Abu-Ali, LTE, LTE-ADVANCED and WiMAX", New York: Wiley, 2012.
- [64] B. Technologies,, "Quality of service (QoS) in LTE [Online]. Available: [http://www.bectechnologies.net/main/newsletter\\_images/QoS.pdf](http://www.bectechnologies.net/main/newsletter_images/QoS.pdf)", [www.bectechnologies.net](http://www.bectechnologies.net), March 2018.
- [65] Techplayon, "VoLTE Cell Capacity - Calculating Packet Size, PRBs and No. of Users", <http://www.techplayon.com/2286-2/>: Techplayon, July 30, 2017.
- [66] Xincheng Zhang, LTE Optimization Engineering Handbook Xincheng Zhang, Ltd. Beijing, China: China Mobile Group Design Institute Co., 2018.
- [67] C. B. V. K. Stavroula Bochrini, "Efficient MCS Selection Mechanisms for Multicasting over LTE Networks", Conference: Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC): 2013 6th Joint IFIP, April 2013.
- [68] L. Rong, O. Haddada, and S. Elayoubi, "Analytical analysis of the coverage of a MBSFN OFDMA network", New Orleans, USA: IEEE Global Communication Conference 2008 (Globecom 2008), 2008.
- [69] 3GPP TS 23.401, , "General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access", 3rd Generation Partnership Project (3GPP).
- [70] 3GPP TR 23.778: , "Technical Specification Group Services and System Aspects; Study on MC services access aspects (Release 16)", V1.1.0: 3rd Generation Partnership Project, January 2019.
- [71] TS 23.280 , "Common functional architecture to support mission critical services", "Sección 9.2.2 - Deployment scenarios": V16.5.0 , (2019-12) .
- [72] M. Nohrborg, 3GPP [Online], "<http://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>", "3gpp.org".
- [73] 3GPP TR 36.881,, "Study on latency reduction techniques for LTE", 3GPP, 2016.
- [74] Brian, Lavallée, Las redes 4G/5G backhaul en primer plano, "[https://www.ciena.com.mx/insights/articles/spotlight-on-4g-5g-backhaul-networks\\_es\\_LA.html](https://www.ciena.com.mx/insights/articles/spotlight-on-4g-5g-backhaul-networks_es_LA.html)", 13th August 2020.
- [75] Android Source, "Introduction - Android", Google LLC, March 2013.
- [76] Android Source Develop, "Audio Latency", Google LLC, January 2020.

- [77] 3GPP TS 22.179, "LTE; Mission Critical Push to Talk (MCPTT) over LTE; Stage 1", version 15.2.0 (Release 15): Annex C, Page 81.
- [78] A. Khalid, VoLTE Optimization, VoLTE Packet Loss, VoLTE Quality, Our Technology Planet, July 5, 2020.
- [79] Holma H, Toskala A., "HSDPA/HSUPA for UMTS: High Speed Radio Access for Mobile Communications", John Wiley and Sons, England, 2006.
- [80] Z. Ghadialy, VoLTE: Semi-Persistent Scheduling (SPS) and TTI Bundling, The 3G4G Blog, 8 February 2018.
- [81] 3GPP TS 36.321, "LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification", versión 13.0.0 : Release 13, February 2016.
- [82] ETSI GS MEC 003, "Mobile Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture.", V1.1.1 Release, March 2016.
- [83] ETSI GS MEC 003-2020, «"Multi-access Edge Computing (MEC); Framework and Reference Architecture",» V2.2.1, December 2020.
- [84] Nurit Sprecher,, "Multi-access Edge Computing (MEC) Tutorial", Paris, France: ETSI Tutorial, MPLS+SDN+NFV World, 2017.
- [85] Kasey Panetta, , "Gartner Top 10 Strategic Technology Trends for 2020", October 21, 2019.
- [86] ETSI White Paper, "MEC Deployments in 4G and Evolution Towards 5G.", No.24..
- [87] 3GPP TR 23.214, "Architecture enhancements for control and user plane separations of EPC nodes", 3rd Generation Partnership Project (3GPP), June 2017.
- [88] A. S. E. A. R. Solozabal y B. Blanco, J. O. Fajardo and F. Liberal, , "Exploitation of Mobile Edge Computing in 5G Distributed Mission-Critical Push-to-Talk Service Deployment," , IEEE Access, vol. 6, pp. 37665-37675, 2018..
- [89] R. E. Hattachi, "NGMN 5G White Paper, [https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/2015/NGMN\\_5G\\_White\\_Paper\\_V1\\_0.pdf](https://www.ngmn.org/fileadmin/ngmn/content/downloads/Technical/2015/NGMN_5G_White_Paper_V1_0.pdf)", NGMN, [Online].

- [90] G. Xilouris, M. Christopoulou (NCSR), "Deliverable D6.2 - Trials and experimentation (cycle 2)", sección 3.2.1.2, página 12: H2020 - 5Genesis Project, June 30, 2020.
- [91] Javier Campos, "Understanding the 5G NR Physical Layer", Keysight Technologies, 2017.
- [92] M.2083, "Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond", ITU-R, 2015.
- [93] T. 38.913, "Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies", 3GPP, 2017.
- [94] S. P. Mantilla, «"El sistema de comunicaciones móviles de próxima generación 5G y su caso de uso IoT",» Master Universitario de Ingeniería de Telecomunicación, Universitat Oberta de Catalunya, 2019.
- [95] Gabor Szanto, «"Android Audio Latency Problem Just Got Worse",» Superpowered, <https://superpowered.com/android-audio-latency-problem-just-got-worse>, 2019.
- [96] Deliverable D6.3 ("Planning of demonstration and network services for Use Case 2"), "Capítulo 3; (Prototype Integration for Use-Case 2)", "Capítulo 5; (Demostración & Validación Strategy)": Embedded Network Services for 5G Experiences (5G ESSENCE), February 2019..
- [97] N. Abu-Ali, A. M. Taha, M. Salah and H. Hassanein,, "Uplink Scheduling in LTE and LTE- Advanced: Tutorial, Survey and Evaluation Framework", vol. 16, no. 3, pp. 1239-1265: IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS & TUTORIALS, 2014.
- [98] TechplayOn, "Lte Frame Structure, <http://www.techplayon.com/explain-lte-frame-structure-both-for-fdd-and-tdd/>", April, 2018.
- [99] Firas Sami Alsharbaty, Safwan H. Fasola, "The Effect of HARQ Procedure on the Performance of LTE", July 2013.
- [100] Techplayon, "VoLTE Cell Capacity- Calculating Packet Size, PRBs and No. of Users", July, 2017.
- [101] Ayman Elnashar, Mohamed El-saidny, "Practical Guide to LTE-A, VoLTE and IoT", John Wiley & Sons Ltd., 2018.
- [102] Ali Khalid, "LTE Throughput Optimization - PDCCH Capacity Enhancement", Our Technology Planet, October 2017.

- [103] M. M. M. A. M. A. Safari Khatouni, S. Alfredsson, J. Karlsson, A. Brunstrom, O. Alay, y Lutu, C. Midoglu, and V. Mancuso, "Speed test like measurements in 3g/4g networks: the Monroe experience", September 2017.
- [104] A. K. Brunstrom, A. S. Khatouni, M. Mellia, O. Alay, A. Lutu, M. P. Quiro's, V. Mancuso, T. Hirsch, K. Evensen, A. F. Hansen y S. Alfredsson, J. Karlsson, , and M. A. Marsan, "Experience: An open platform".
- [105] 3GPP TS 24.237, "IP Multimedia (IM) Core Network (CN) subsystem IP Multimedia Subsystem (IMS) service continuity," , 3rd Generation Partnership Project (3GPP), 07 2017.
- [106] A. R. I. G. A. I. S. a. H. D. I. Parvez, "A survey on low latency towards 5g: RAN, core network and caching solutions," , IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 20, pp. 3098– 3130, Fourthquarter 2018.
- [107] ETSI TR 101, 053-1,, "Rules for management of the TETRA standard encryption algorithms; Part 1: TEA1, V1.1.2," , Security Algorithms Group of Experts (SAGE): ETSI, January 2006.
- [108] 3GPP TS 33.401,, "3GPP Technical Specification Group Services and System Aspects; 3GPP System Architecture Evolution (SAE); Security architecture", Technical Specification.
- [109] Aitor Sanchoyerto Martínez,, "Coexistence or Convergence", El futuro de las redes de Emergencia", Geryon, June 2.004.
- [110] ETSI TR 101, 053-2 V2.2.3,, "Rules for management of the TETRA standard encryption algorithms; Part 2: TEA2", Security Algorithms Group of Experts (SAGE): ETSI, June 2010.
- [111] ETSI TR 101, 053-3 V1.1.3,, "Rules for management of the TETRA standard encryption algorithms; Part 3: TEA3", Security Algorithms Group of Experts (SAGE);: ETSI, August 2007.
- [112] ETSI TR 101, 053-4 V1.1.2,, "Rules for management of the TETRA standard encryption algorithms; Part 4: TEA4", Security Algorithms Group of Experts (SAGE): ETSI, January 2006.
- [113] ETSI TS 123 401,, "LTE, General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial, Radio Access Network (E-UTRAN) access, (3GPP TS 23.401 version 12.6.0. Release 12, v12.6.0)", September 2014.
- [114] Fidel Liberal, N. Goitia, J.O. Fajardo,, "GERYON, Emergency Communications: Current State and Users Requirements", , Bibao: Geryon, 31 May 2012.

- [115] Nguyen, Manh Cuong,, "Voice Capacity over LTE in PMR context", 24 Aug 2015.
  
- [116] A. Kurian, "Latency Analysis and reduction in a 4G Network, Master's thesis, Delft University of Technology, <http://resolver.tudelft.nl/uuid:e1badd8d-a384-49a1-b958-a0c1e499c539>", 2018.
  
- [117] Deliverable D6.2,, "Prototypes of Network Services and Integration Planning for Use Case 2", Pág. 34-37: Embedded Network Services for 5G Experiences (5G ESSENCE), March 2019.
  
- [118] ETSI GS NFV-SWA 001,, "Network Functions Virtualisation (NFV); Virtual Network Functions Architecture", V1.1.1, December 2014.
  
- [119] ETSI GS NFV-MAN 001,, "Network Functions Virtualisation (NFV); Management and Orchestration", V1.1.1, December 2014.