



Enrique Belda Esplugues

Subdirector General de Sistemas de Información y Comunicaciones para la Seguridad
Ministerio del Interior. Dr. Ingeniero de Caminos Canales y Puertos por la
Universitat Politècnica de Valencia (UPV).

Eduardo Bernabeu Piñana

Consultor Senior. Ingeniería de Sistemas para la Defensa de España
(ISDEFE)
Ingeniero de Telecomunicación
por la Universitat Politècnica de Catalunya (UPC).

ANÁLISIS DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA EL DESPLIEGUE E IMPLANTACIÓN DEL FUTURO SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES DIGITALES DE EMERGENCIA DEL ESTADO (SIRDEE)

ANÁLISIS DEL MÉTODO DE EVALUACIÓN MULTICRITERIO PARA EL DESPLIEGUE E IMPLANTACIÓN DEL FUTURO SISTEMA DE RADIOCOMUNICACIONES DIGITALES DE EMERGENCIA DEL ESTADO (SIRDEE)

Sumario: 1.- INTRODUCCIÓN. 2.- ANTECEDENTES. 3.- ESTADO DEL ARTE. 3.1.- Wimax. 3.2.- LTE (4G). 3.3.- 5G. 3.4.- Las redes de seguridad pública en otros países. 4.- ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS. 5.- OBJETIVO DEL TRABAJO. 6.- MÉTODO. 6.1.- Hipótesis de propuesta de solución. 6.2.- Parameter evaluation methodology. 6.3.- Solución propuesta. 7.- CONCLUSIONES. 8.- REFERENCIAS.

Resumen: Las comunicaciones de seguridad pública, que hasta la fecha estaban basadas en tecnologías de banda estrecha siendo la voz el servicio principal a prestar, están experimentando una transformación hacia tecnologías de banda ancha gracias a la estandarización de servicios orientados a este sector como las comunicaciones de grupo y que permitirán adoptar nuevos servicios que sólo estaban disponibles en las redes comerciales como comunicaciones multimedia o intercambio de datos. En la actualidad, las redes de seguridad pública disponen de diversas modalidades de despliegue basadas en redes comerciales, híbridas o dedicadas. Aparentemente, si no se realiza un análisis de las diferentes opciones la conclusión podría ser que cualquiera de ellas es válida para implantar una red de comunicaciones de seguridad pública. Este artículo plantea un método de evaluación multicriterio a la vez que un análisis de las opciones anteriores para concluir cuál es la modalidad más adecuada para desplegar una red de este tipo.

Abstract: Public safety communications, which to date have been based on narrowband technologies with voice as the main service to be provided, are undergoing a transformation towards broadband technologies thanks to the standardization of services oriented to this sector, such as group communications, which will make it possible to adopt new services that were only available in commercial networks such as multimedia communications or data exchange. At present, public safety networks have various deployment modes based on commercial, hybrid or dedicated networks. Apparently, if an analysis of the different options is not carried out, the conclusion could be that any of them is valid for implementing a public safety communications network. This article proposes a multi-criteria evaluation method as well as an analysis of the above options to conclude which is the most suitable modality to deploy a network of this type.

Palabras clave: Estándares 3GPP, comunicaciones de seguridad pública, contratación, sistemas de comunicaciones, toma de decisiones.

Keywords: 3GPP Standards, communication systems, contracts, decision making, public safety communications.

1.- INTRODUCCIÓN

El análisis trata de evaluar el método adecuado (multicriterio) para el despliegue e implantación del futuro Sistema de Radiocomunicaciones Digitales de Emergencias del Estado (SIRDEE).

Partiendo de unos antecedentes, totalmente reales, que aparece publicados como introducción en todos los Pliegos de Prescripciones Técnicas del Sistema actualmente vigente en nuestro país y continuación con el estado del arte de la tecnología a día de hoy, se establece una hipótesis de partida, se define una metodología de trabajo y se llega a una solución a la hipótesis propuesta.

Para finalizar, se reflexiona en el apartado Conclusiones sobre la idoneidad del método establecido presentando soluciones alternativas valoradas con el mismo criterio, determinándose que la solución vigente sigue siendo la alternativa más ventajosa y vislumbrando, también, que en un futuro próximo, con la aparición de nuevas soluciones comerciales, este mismo método llevará a resultados diferentes.

2.- ANTECEDENTES.

En el año 2000 la Secretaría de Estado de Seguridad, formalizó un contrato que tenía como objeto la implantación y despliegue de un Sistema Integral de Radiocomunicaciones Digitales de Emergencia del Estado (SIRDEE), que sirviera de soporte para la prestación de un servicio integral y seguro de comunicaciones de voz y datos a los efectivos de las Fuerzas y Cuerpos de seguridad del Estado en todo el territorio nacional.

La red SIRDEE está sustentada en la tecnología digital TETRAPOL, propiedad de la empresa AIRBUS Defence & Space, tiene alcance nacional y está estructurada de tal forma que posibilita, a todos los usuarios del Sistema, acceder, con las máximas medidas de seguridad, a las comunicaciones que proporciona el servicio.

El despliegue completo del SIRDEE finalizó en el año 2005 y desde entonces, los diferentes contratos, que daban continuidad al Sistema, han venido a paliar las carencias detectadas en materia de comunicaciones policiales (diferentes bandas de trabajo, coberturas aisladas de carácter discontinuo, notoria falta de capacidad, tecnología analógica, comunicaciones no cifradas, imposibilidad de transmitir datos, etc.) y han posibilitado, en gran medida, la necesaria coordinación entre los Cuerpos que integran las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad del Estado así como la colaboración con otras Unidades, ya estén integradas en el propio Ministerio del Interior (Dirección General de Tráfico, Dirección General de Protección Civil) o en alguna otra Área de Administración Pública (Consejo de Seguridad Nuclear, Ministerio de Defensa - en particular la Unidad Militar de Emergencias -, Unidades de Seguridad de la Casa de S.M. el Rey y Presidencia del Gobierno).

El SIRDEE, en la actualidad, está configurado como un servicio de carácter esencial ya que debe proporcionar a los diferentes Servicios y Unidades de seguridad y emergencias usuarias comunicaciones seguras y fiables, tanto en situaciones ordinarias como en situaciones de crisis o emergencia, para ello se dispone un parque de 71.810 radio terminales, totalmente funcionales dentro del espectro de frecuencias comprendido

en los segmentos de banda UNE 29, concretamente en los segmentos 380-385 MHz y 390-395 MHz.

Todos estos factores, junto a las más altas cotas de seguridad y disponibilidad que toda actuación policial requiere en cualquier punto de la geografía nacional, tanto en situaciones ordinarias como de emergencia, crisis o situaciones especiales, han convertido al SIRDEE en una herramienta adecuada y con un alto nivel de aceptación entre los usuarios.

En la actualidad se están llevando a cabo estudios teóricos y experimentales para determinar su evolución hacia una tecnología de banda ancha que permita a los usuarios de la red prestaciones similares a las que cualquier usuario de una red comercial de comunicaciones móviles dispone, a la vez que se requiere buscar una tecnología alternativa a las actuales, puesto que los principales fabricantes de redes de banda estrecha ponen el año 2035 como fecha de no continuidad de éstas.

Como se verá la mayoría de países han optado por la tecnología LTE para llevar a cabo esta evolución, pero son varios los retos a los que se enfrentan las redes de emergencias (Public Protection and Disaster Relief, PPDR):

- La disponibilidad de espectro

A pesar de la Decisión de Ejecución (UE) 2016/687 de la Comisión, de 28 de abril de 2016 relativa a la armonización de la banda de frecuencias de 694-790 MHz [1], que establece dos bloques de frecuencias para redes PPDR, ésta daba libertad a los Estados Miembros para su utilización en esta aplicación, y han sido pocos los países que han optado por esta reserva. Entre otros, España.

En España se dispone de espectro en la banda de 450 MHz (B31) y en la banda de 700 MHz (B68 y B28) de acuerdo al Cuadro Nacional de atribución de Frecuencias (CNAF) [2].

- La disponibilidad de soluciones comerciales orientadas a este sector

En la actualidad existen pocas soluciones comerciales de misión crítica que cumplan completamente las especificaciones 3GPP. El ecosistema de equipos aún es reducido y los fabricantes de chipset de terminales aún no ven atractivo este sector al no existir gran demanda.

- La necesidad de mantener las prestaciones actuales

La red SIRDEE cuenta con un 95,8% de cobertura geográfica y una disponibilidad del 99,88%. Actualmente no existe ninguna red comercial que sea capaz de garantizar estas cifras.

La situación es tan incierta que resulta complejo tomar una decisión en relación al tipo de despliegue más conveniente, por lo que contar con algún mecanismo que apoye la toma de decisiones es de gran utilidad.

3.- ESTADO DEL ARTE.

Durante los años 90 se desencadenó una revolución tecnológica con la llegada de la 2ª generación de telefonía móvil (GSM) que arrastró a un cambio de mentalidad en la forma de trabajar de las redes de comunicaciones profesionales, denominadas PMR (Private Mobile Radio) o redes de comunicaciones móviles de uso profesional, evolucionando éstas hacia las redes de trunking digital.

Como consecuencia, a finales de la misma década estaban disponibles tres estándares para este tipo de redes: P25, TETRA y TETRAPOL.

- P25:

Este estándar definido por la TIA (Telecommunications Industry Association) fue empleado mayoritariamente en EEUU y Canadá, también conocido como APCO-25, por el apoyo recibido durante el proceso de estandarización por parte de la APCO (Association of Public-Safety Communications Officials-International). Su capacidad de transmisión de datos es de 3,6Kbps.

- TETRA

El sistema TETRA (TERrestrial Trunked Radio) ¹es el estándar de las redes trunking digital para Europa, fue definido por el European Telecommunications Standards Institute (ETSI), y el adoptado mayormente en las redes trunking, no sólo a nivel europeo sino también mundial. Ejemplos de redes que han adoptado este estándar son la red de comunicaciones de Metro de Madrid o la red RESCAT de emergencias de la Generalitat de Catalunya. Su capacidad para la transmisión de datos está limitada a 7,2Kbps, aunque con la versión TEDS es capaz de alcanzar hasta 80Kbps².

- TETRAPOL:

A pesar de ser un estándar de comunicaciones trunking, es una solución propietaria originaria de Matra Communications, que por cuestiones empresariales acabó formando parte del consorcio industrial EADS, que posteriormente se convirtió en AIRBUS. TETRAPOL es la solución escogida por el Ministerio del Interior para el despliegue de la red SIRDEE desde sus inicios en el año 2000. Su capacidad de transmisión de datos es de 2,4Kbps.

Todos los estándares de trunking digital cuentan con un canal de datos que, aunque dispone de una baja velocidad de transmisión, permitió el desarrollo e incorporación de algunas aplicaciones prácticas como la localización de flotas o las consultas a bases de datos.

No obstante, mientras las tecnologías de la información y comunicaciones evolucionaron en la parte comercial, desarrollándose estándares con mejores prestaciones para la transmisión de datos, como los servicios móviles de 3ª generación (EDGE, CDMA2000, UMTS o HSPA), las redes orientadas a flotas como el trunking se han

¹ Las primeras especificaciones técnicas datan de 1994 (ESTI ETR 086-1, -2 y -3)

² https://www.motorolasolutions.com/en_xu/products/tetra/teds.html

quedado atrás y sus usuarios ya demandan el acceso a tecnologías de banda ancha que permitan capacidades similares a las disponibles en las redes comerciales. De hecho, han existido soluciones propietarias para servicios de emergencias de reducido tamaño basadas en tecnologías 3G sobre redes comerciales, como es el caso de la Policía Local de Alcobendas [3].

Las principales tecnologías que pueden ofrecer prestaciones válidas para comunicaciones móviles de banda ancha en redes PPDR en la actualidad son: WIMAX, LTE (4G) y 5G, que se describen brevemente en los siguientes apartados.

3.1.- Wimax

Acronimo de Worldwide Interoperability for Microwaves Access (Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas), está definido en el estándar IEEE 802.16, inicialmente como mecanismo para el acercamiento a la banda ancha en instalaciones fijas donde no es posible el acceso por cable.

No obstante, hay una versión para movilidad, la 802.16e con alta tasa de transmisión de datos y largo alcance, empleando espectro licenciado y no licenciado. Posteriormente, apareció la versión 802.16m, como serio candidato para el despliegue del 4G y competidor de LTE. De hecho, ambos estándares son bastante similares, ya que se definieron sobre la base de los requisitos planteados para el IMT-Advanced (International Mobile Telecommunications - Advanced).

Lamentablemente, esta tecnología ha ido cayendo en el olvido al ser LTE la tecnología elegida mundialmente para implantar la solución de la 4ª generación de comunicaciones móviles, ocasionando una escasa variedad de equipos, de alto coste y de baja probabilidad de supervivencia respecto a LTE, lo que considerar WIMAX como alternativa tecnológica para evolucionar la red SIRDEE sería altamente arriesgado.

3.2.- LTE (4G)

En el año 1998 se creó el proyecto 3GPP (3rd Generation Partnership Project) para la elaboración de las especificaciones técnicas del sistema móvil de 3ª generación como evolución del GSM, dando lugar a la Release 99 (publicada en diciembre de 1999) con la definición del sistema UMTS[4].

El proyecto 3GPP proporciona una completa descripción de los sistemas de comunicaciones móviles mediante tres grupos de elaboración de especificaciones técnicas (TSG): Red de Acceso Radio (RAN), Núcleo de Red y Terminales (CT) y Aspectos de Servicios (SA).

Dentro de cada grupo de especificación técnica existen grupos de trabajo dedicados a debatir y aprobar las especificaciones que son publicadas, una vez congeladas, en una particular Release. Concretamente, en el TSG SA se encuentra el grupo de trabajo WG6 dedicado a las aplicaciones de comunicaciones críticas.

La primera versión de lo que se considera LTE (Long Term Evolution) corresponde con la Release 8, publicada en 2008. Si bien, la 4ª generación de comunicaciones móviles (4G) se implementa a partir de la Release 10, con el LTE-Advanced, que puede alcanzar

velocidades de pico de 1 Gbps en el enlace de bajada y 500 Mbps en el enlace de subida [5].

Otro avance importante en la especificación del 3GPP es la incorporación de las primeras especificaciones relacionadas con el sector de las comunicaciones de emergencias o seguridad pública (Public Safety – PS). Fue en el año 2015 cuando se publicó la Release 12, incluyendo las comunicaciones de grupo, la mejora del servicio MBMS (eMBMS – evolved Multimedia Broadcast Multicast Service) o los servicios de proximidad (ProSe) para las comunicaciones en modo directo y comienza a plantearse LTE como una alternativa para comunicaciones de seguridad pública. En la especificación técnica del 3GPP TS 23.280 se puede encontrar información sobre la arquitectura funcional para el soporte de servicios de misión crítica, entre ellos MCPTT y MBMS [6].

A continuación, se resume las principales facilidades de *Mission Critical* (MC) que el 3GPP ha incluido en las siguientes releases [7]:

- Release 13:
 - MCPTT (Mission Critical Push-To Talk),
 - Gestión de Comunicaciones de Grupo
 - eMBMS (evolved MBMS)
 - ProSe, con terminales de alta potencia (1,25W)

- Release 14:
 - MCPTT para vídeo y datos
 - Mejoras en el eMBMS
 - Seguridad extremo a extremo
 - IOPS (Isolated Operating Public Safety) – Modo de operación degradado para la celda.
 - Mejora en el protocolo y arquitectura de la solución MCPTT

- Release 15:
 - Calidad de Servicio en redes públicas
 - IWF (Interworking Functionality) – Interoperabilidad entre MC-LTE y redes no LTE.
 - Integración de IoT

- Release 16
 - Interoperabilidad MC-LTE – roaming entre redes de misión crítica.

Toda la información sobre las especificaciones del proyecto 3GPP se pueden encontrar en la página web <https://www.3gpp.org/>

En el capítulo 5 de libro “*LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*” de la Fundación Vodafone España [8] se describe la arquitectura de una red LTE. (Ver Figura 1)

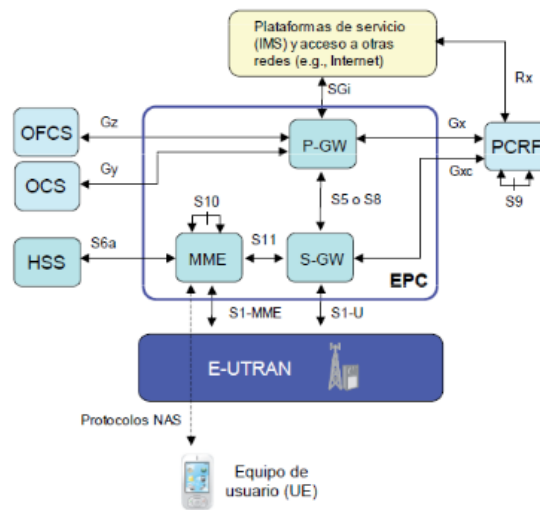


Figura 1 Arquitectura básica de la red LTE (Fuente: [8])

Como se puede observar, la arquitectura de una red LTE queda definida por 4 bloques o capas:

- Equipo de usuario o *terminal*: que permite a los usuarios el acceso a los servicios provistos por la red LTE.
- Red de acceso *radio* o (E-UTRAN): es la red de estaciones base (denominadas eNodeB) que proporcionan conectividad entre los terminales y la red troncal EPC.
- *Core* o núcleo de red (EPC): es la red troncal que realiza las funciones necesarias para proveer la conectividad IP entre los terminales (a través de E-UTRAN) y las plataformas o redes externas que ofrecen los servicios.
- *Servicios* ofrecidos por plataformas como el subsistema IMS (IP Multimedia Subsystem) o través de la conexión con otras redes externas.

No es objeto de este documento describir el funcionamiento de una red LTE, pero es importante conocer conceptualmente estas cuatro capas para comprender los diferentes modelos de despliegue que se presentarán más adelante.

3.3.- 5G

La 5ª generación de comunicaciones móviles (5G) está basada en la evolución de LTE y se define a partir de la Release 15 del 3GPP [9]. Su objetivo principal es el aumento de la velocidad de transmisión de bit (hasta 10 Gbps) y reducir la latencia (hasta 1 ms), lo que va a impulsar el denominado Internet de las Cosas (IoT – Internet of Things) y las comunicaciones máquina a máquina (M2M).

Los principales sectores objetivo de esta nueva tecnología es el de la automoción (coches autónomos) y la medicina, aunque otros sectores se verán beneficiados como los hogares o el deporte.

Como se ha visto en el apartado anterior, en las Release 15 y 16, que forman parte de la definición de 5G, se evolucionan las facilidades destinadas a Misión Crítica.

Actualmente, ya hay países que incluyen el uso de 5G en sus planes de futuro para el despliegue de las redes de seguridad pública, si bien por las particularidades de esta tecnología debería estar orientado al desarrollo de aplicaciones específicas o la interconexión de dispositivos.

Se trata de una tecnología muy incipiente que todavía no está lo suficientemente desplegada y probada para considerarla una alternativa válida para una red de comunicaciones críticas y menos para un despliegue nacional como sucede con SIRDEE.

3.4.- Las redes de seguridad pública en otros países

Con el propósito de conocer el uso que están dando otros casos de redes de comunicaciones críticas que van a evolucionar a la banda ancha, a continuación se realiza una recopilación de las soluciones por la que han optado algunos países representativos:

- *USA – FirstNet [10]:*

FirstNet fue creado en 2012 con el objetivo de crear una gran red de comunicaciones de banda ancha con destino a las fuerzas de seguridad pública y emergencias. Utiliza tecnología LTE y dispone de una asignación espectral de 2x10 MHz en la banda de 700 MHz (B14) con un acuerdo de colaboración público–privado con el operador AT&T. Este acuerdo consiste en lo siguiente:

- FirstNet cede el espectro (20 MHz) a AT&T y financia inicialmente con 6.500M\$, y éste debe desplegar y operar una red nacional de banda ancha para seguridad y emergencias durante más de 25 años.
- AT&T invertirá unos 40.000M\$ a lo largo de la vida del acuerdo para desplegar, operar y mantener la red, a la vez que se garantiza incluir las necesidades de seguridad pública.
- AT&T puede emplear el espectro cedido por FirstNet para propósito comercial cuando no esté siendo usado por cuerpos de seguridad y emergencias. El operador priorizará el servicio a dichos cuerpos frente al uso comercial.
- La priorización del servicio consistirá tanto en la priorización de las comunicaciones como el rechazo al servicio de los usuarios comerciales para evitar la saturación de las estaciones durante las emergencias.

De acuerdo a <https://www.firstnet.com/coverage.html> cuando la red alcance el objetivo de despliegue cubrirá una superficie 2,27 M millas² (3.65 M Km²), equivalente al 76.2% de la superficie continental de EEUU.

- *UK- ESN [12]:*

ESN (Emergency Services Network) es la red de emergencias del Reino Unido que va a sustituir a la red de banda estrecha Airwave y está basada en red comercial 4G con priorización sobre usuarios comerciales.

Aunque inicialmente estaba previsto que entraría en operación en 2017 para reemplazar a Airwave en su totalidad en diciembre de 2019, en 2018 el Home Office renegó los contratos ante la indisponibilidad tecnológica y los sobrecostes requeridos (3.100 M£ adicionales a las ya presupuestadas, siendo el total 9.300 M£).

La disponibilidad se pospuso a Diciembre 2022, y las nuevas previsiones indican que no estará hasta finales de 2024.

- *Francia – PCSTORM Project [13]:*

El objetivo del proyecto PCSTORM es disponer de una red nacional basada en tecnología LTE (RRF – Red Radio del Futuro) junto a células tácticas como capacidad adicional donde sea requerido.

En una primera fase se realizaron pruebas sobre red pública LTE para servicios de emergencias (Red INPT) y sobre red privada en 700MHz (2x5MHz B28) para la Gendarmería (Red RUBIS), con backup de red comercial.

En fase II, se prevé el uso de espectro dedicado (700MHz) concedido a un operador para que ofrezca un servicio integral, con respaldo de red pública donde no se llegue. En ese caso deben coexistir.

Se plantea como una red híbrida, en la que un operador comercial proporcionará la capa de acceso radio, y se dispondrá de un Core de red dedicado que operará el Ministerio del Interior francés. El operador debe facilitar la priorización sobre usuarios comerciales, así como la posibilidad de roaming para la interconexión con redes de otros operadores, pero para ello se requiere un cambio en la Ley de Telecomunicaciones.

Debería estar completamente disponible antes de 2024, año de los JJOO de París.

Actualmente, se plantea también el uso de la banda de 450MHz por el alto coste de despliegue en 700MHz.

- *Alemania - BDBOS:*

El planteamiento inicial fue mantener la red TETRA para el servicio de voz, mientras que los datos empleen una solución híbrida, empleando infraestructura de operadores comerciales en la banda de 700 MHz y una red dedicada en 450 MHz.

Actualmente, el servicio sobre red pública no es considerado como opción de remplazo de la red TETRA por la falta de garantía del servicio. Se plantea una solución final basada en red LTE privada con calidad garantizada.

En cuanto al espectro, hubo una dura pugna entre BDBOS y los operadores de infraestructuras críticas en la industria de la energía y el agua por la adjudicación de la banda de 450 MHz. Finalmente ha sido adjudicada a estos últimos³, por lo que todo apunta a que se optará por una solución híbrida.

³ <https://www.behoerden-spiegel.de/2021/03/09/zuschlag-fuer-frequenzen-erteilt/>

- *Chequia – PEGAS [14]:*

La operadora Nordic Telecom dispone en la República Checa para uso en PPDR de 2x4,25 MHz en la banda 410-430 MHz en todo el territorio nacional.

Junto con Nokia se plantea el despliegue de una red LTE dedicada para servicios de seguridad y emergencias e IoT industrial en exclusiva. Al estar basada en productos de Nokia es una solución que trabaja en Unicast, ya que, esta compañía aún no dispone de una solución que implemente eMBMS.

Para conexiones a internet o para situaciones excepcionales en las que no se disponga de la red dedicada se empleará la red comercial.

El gran inconveniente de esta solución es que Nordic Telecom aún no ha encontrado terminales que trabajen en esa banda.

- *Finlandia – VIRVE [15]:*

La red VIRVE, basada en tecnología TETRA, tenía previsto que su ciclo de vida terminara a finales de 2020 para ser sustituido por VIRVE 2.0, basada en tecnología LTE.

Esta red es operada por Erillisverkot, compañía participada al 100% por el gobierno finés. Su evolución hacia LTE consistirá en disponer de una solución híbrida, donde el Core de red es dedicado, provisto por Ericsson, y la red de acceso radio se comparte con la red comercial de un operador seleccionado. Es un modelo similar al empleado en UK para su red ESN.

Para garantizar la disponibilidad del servicio a los cuerpos de seguridad y emergencias se realizó un cambio legislativo, de modo que la ley permite determinados privilegios de uso a los usuarios gubernamentales al priorizar el servicio de red en situaciones de congestión, así como la posibilidad de realizar roaming nacional cuando la red del operador contratado no está disponible.

La migración de TETRA a LTE se llevará a cabo entre los años 2022 a 2025, tiempo en el convivirán ambas tecnologías.

- *Korea – SafeNet [16]:*

Red LTE sobre espectro dedicado en 700MHz (banda 28) con 10+10 MHz disponibles. Ya han logrado una aplicación MCPTT empleando eMBMS bajo estándar 3GPP⁴.

La red de acceso radio es compartida con tres núcleos (Core) de red dedicados (seguridad pública, servicio ferroviario y servicio marítimo). También comparte red de acceso radio con la red comercial.

⁴ <https://www.computerweekly.com/news/252499799/First-3GPP-compliant-public-safety-network-with-MCPTT-launches-in-South-Korea>

Realmente, desde un punto vista tecnológico no se plantea ninguna alternativa a LTE, como se ha visto el consenso es generalizado para todos los países que están desplegando servicios de banda ancha para comunicaciones de misión crítica.

Las alternativas o diferencias entre unas soluciones y otras planteadas por las principales redes nacionales de seguridad pública en el Mundo se centran en la estrategia de despliegue, es decir, si se emplean redes públicas, privadas o soluciones híbridas.

En el siguiente apartado se van a describir las diferentes alternativas de despliegue que se barajan en la actualidad.

4.- ALTERNATIVAS TECNOLÓGICAS.

Desde el año 2015, año en el que se plantea la necesidad de un cambio de rumbo tecnológico en la red SIRDEE a raíz de las demandas de los usuarios de la red, la única tecnología que se ha barajado como posible camino hacia la banda ancha es LTE (4G).

Como se ha visto en el apartado anterior, la mayoría de países que están evolucionando sus redes de seguridad pública hacia la banda ancha han decidido utilizar la tecnología LTE, al no existir, en realidad, ninguna otra opción válida. A nivel mundial, no existe ninguna red que plantee soluciones que no estén basadas en 4G o 5G, ésta última de momento sólo sobre el papel.

También se ha visto que la estrategia empleada por los diferentes países considerados es variada, yendo desde las soluciones basadas en redes comerciales públicas hasta las redes privadas o dedicadas, pasando también por soluciones híbridas.

Es precisamente el tipo de solución o estrategia adoptado en donde este análisis se va a enfocar.

a) Redes comerciales

Se trata de usar las redes de uso comercial desplegadas por los operadores de telefonía móvil para fines de seguridad y emergencias, compartiendo los recursos de red con el resto de usuarios.

La capa Core, Radio y Servicios la aporta la operadora, y la capa de Terminales en función del acuerdo con ésta, pueden ser del usuario o estar incluidos en el contrato de servicios.

La principal ventaja que presenta una red de uso comercial es que normalmente se encuentra completamente desplegada y operativa en la mayor parte del territorio necesario y cuenta con un amplio ancho de banda disponible.

Además, al ser redes de propósito general en el que existe un amplio número de usuarios, el ecosistema de equipamiento es amplio y la economía de escala tiene un impacto importante en los precios de estos equipos.

Sin embargo, como redes comerciales, están planteadas para optimizar los ingresos económicos de la operadora propietaria de la red o del servicio, en caso de operadores

virtuales. Esto significa que la cobertura geográfica está enfocada a la demanda de la población, la capacidad de absorción del tráfico se dimensiona para optimizar la relación entre la amortización del equipamiento y la calidad del servicio al usuario, y normalmente los emplazamientos no están protegidos convenientemente ante contingencias.

Además, no están pensadas para comunicaciones de seguridad pública y emergencias que emplean habitualmente las comunicaciones de grupo en el que transmite un usuario y reciben muchos. Como las redes comerciales no implementan el servicio MBMS las comunicaciones son Unicast, es decir, emplean una portadora por usuario que recibe la comunicación lo que aumenta innecesariamente el uso espectral.

Por otro lado, en situaciones de catástrofe, los usuarios comerciales aumentan drásticamente la demanda de comunicaciones, haciendo imposible el acceso al servicio para el resto de usuarios, ya sea por falta de capacidad del servicio o por saturación radioeléctrica del espectro en recepción de la estación base.

Todos estos inconvenientes tienen un impacto sobre la disponibilidad del servicio, que es uno de los parámetros esenciales que se debe ajustar correctamente en una red de comunicaciones de seguridad pública.

Finalmente, en cuanto a la implementación de la aplicación MCPTT ésta se realiza mediante una aplicación OTT (Over-The-Top) normalmente propietaria de algún fabricante y que no va a cumplir con la especificación del 3GPP, por lo que la interoperabilidad entre organizaciones es cuanto menos cuestionable [17].

b) Redes Dedicadas

Como su nombre indica son redes para uso dedicado, en este caso en exclusividad para servicios de emergencias y seguridad pública, y no se comparten recursos con otro tipo de usuarios.

Estas redes se confeccionan a medida de las necesidades del usuario, siendo éste el que define requisitos técnicos como cobertura, seguridad y disponibilidad entre otros, así como los requisitos funcionales como comunicaciones de grupo, llamadas de emergencia, etc. En este caso, las cuatro capas esenciales que definen la red (Core, Radio, Terminales y Servicios) quedan controladas por el propietario de la red o servicio.

Como estas redes emplean espectro reservado específicamente para usuarios de seguridad pública y emergencias, su banda de trabajo no coincide con las empleadas por los operadores comerciales, lo que implica una menor variedad de equipamiento que, además, no se beneficia de la economía de escala; sin embargo, con la armonización de la banda de 700 MHz muy probablemente en esta banda no haya problema de equipos.

En cuanto a las capacidades, dada la escasez espectral de que disponen normalmente [2] es casi imprescindible emplear técnicas que permitan optimizar su uso, como es MBMS [18] y sería deseable poder aplicar la agregación de portadoras [19] para mejorar el ancho banda.

Por otro lado, las redes dedicadas como SIRDEE han demostrado su robustez y disponibilidad en momentos críticos y delicados, como desastres naturales, atentados

terroristas o eventos de alta concentración de personas en las que las redes comerciales no han sido capaces proveer el servicio porque se ha generado una alta demanda de comunicaciones o por cuestiones de indisponibilidad del sistema.

c) Soluciones Híbridas

El uso de soluciones híbridas es la estrategia que está empleando la mayoría de los países que no han optado por una red dedicada, y consiste en compartir parte de la infraestructura de la red con un operador comercial.

- Caso FirstNet (EEUU): Los usuarios de PS y comerciales comparten la RAN comercial de AT&T tanto con espectro comercial como de FirstNet, pero los usuarios de PS tienen prioridad frente al resto.
- Caso ESN (UK): ESN se establece como operador virtual (S-MVNO) compartiendo la RAN y parte del Core. De manera que hay una parte de Core dedicada y la capa de servicios es controlada por ESN.
- Caso VIRVE (Países Escandinavos): Es una configuración de tipo MOCN (MultiOperator Core Network). De modo que el espectro y la RAN pertenecen a un operador comercial y el Core de red es dedicado a PS.

Otro caso podría ser el empleo de una red dedicada que se complementa con una red comercial con la que comparte su RAN para acceder en zonas donde la red dedicada no dispone de cobertura.

5.- OBJETIVO DEL TRABAJO

Este trabajo tiene por objeto realizar un análisis desde el punto de vista técnico, económico y político de las diferentes alternativas existentes ante la necesaria evolución de la red de comunicaciones de emergencias del Estado hacia una tecnología de banda ancha que mejore las capacidades actuales de comunicación para los servicios de Seguridad Pública.

Para este análisis se va a presentar una metodología de evaluación multicriterio, tratando de obtener una valoración lo más objetiva posible sobre algunos de los parámetros que influyen en la especificación de un servicio de comunicaciones de seguridad pública y que será aplicado a las diversas alternativas que han sido identificadas en los apartados anteriores y con datos obtenidos para entornos similares.

Con este trabajo se pretende comprobar cómo influyen las decisiones técnicas, económicas y políticas a la hora de seleccionar una determinada estrategia de implantación y, en base a eso, determinar cuál podría ser la más apropiada al caso concreto de España (red SIRDEE).

6.- MÉTODO

6.1.- Hipótesis de propuesta de solución.

Cualquiera de las alternativas identificadas en el apartado 4 serviría para proporcionar un servicio de comunicaciones móviles de banda ancha, aunque sería anticiparse demasiado

concluir que cualquiera de ellas valdría para proporcionar un servicio adecuado a cuerpos de seguridad pública y emergencias.

Para realizar esa valoración es necesario realizar un análisis de algunos parámetros, de los que ya se han hablado, y que permiten caracterizar de alguna manera el servicio proporcionado por una red de comunicaciones. Existen otros muchos parámetros, y se podría realizar un análisis pormenorizado de cada uno, pero este estudio se va a centrar en aquellos que se han considerado más inmediatos y que contribuyen a un mayor peso en la decisión.

Estos parámetros son los siguientes:

- *Cobertura geográfica*: es el área geográfica que dispone del servicio ofrecido por la red de comunicaciones en el momento de su contratación o su evolución a lo largo del tiempo, considerando aspectos como superficie o población afectada.
- *Tráfico ofertado o tráfico cursado*: se refiere a la capacidad que tiene la red de cursar el tráfico demandado por los usuarios, ya sean comerciales o de seguridad pública, y que puede estar limitado por los recursos disponibles o por contrato.
- *Disponibilidad del servicio*: este es uno de los parámetros clave de cualquier sistema, y va a proporcionar información sobre cuánto tiempo está operativo el servicio, aspecto a tener en cuenta sobre todo en situaciones de crisis.
- *Seguridad*: se refiere a las medidas adoptadas para garantizar que la información que transita por la red no resulta comprometida, ya sea por accesos no autorizados a los elementos de extremo a extremo, cifrado inapropiado, mala gestión de claves, etc.
- *Coste*: es el precio del servicio y requerirá adaptar la información para poder comparar el coste de cada una de las alternativas de despliegue identificadas.
- *Decisiones políticas*: esta es una de las cuestiones que no pueden pasar por alto cuando se trata de servicios críticos para un país como puede ser una red nacional de comunicaciones para la seguridad pública. Estas decisiones pueden estar relacionadas tanto con las políticas de interior del país como de exterior.

Se parte de la hipótesis de que una metodología de evaluación multicriterio, evaluando de una forma lo más objetiva posible los parámetros anteriores utilizados como criterios, pueda servir de indicador hacia qué estrategia es la más recomendada en cada situación para abordar una evolución tecnológica en la red de comunicaciones de seguridad y emergencias del Estado. Dicha metodología se desarrolla en el siguiente apartado.

6.2.- Parameter evaluation methodology.

Como se mencionó en el apartado anterior, la metodología a seguir es la evaluación multicriterio, que se puede representar mediante la siguiente expresión algebraica:

$$Score = \sum_{i=1}^N \alpha_i P_i \quad (1)$$

Donde α_i son los pesos asignados a cada criterio en porcentaje, asignado de manera que deben cumplir que deben cumplir $\sum_{i=1}^N \alpha_i = 100\%$.

Y P_i son las puntuaciones obtenidas de cada criterio o parámetro que interviene en la evaluación normalizados a 10.

Por tanto, el siguiente paso debe ser determinar el peso que se debe asociar a cada criterio y el mecanismo para determinar la puntuación de cada uno de estos criterios, buscando en lo posible formas que sean objetivas.

a) *Determinación del método de puntuación*

- *Cobertura geográfica (P₁):*

La cobertura de una red de comunicaciones se puede definir como la superficie de terreno que dispone del servicio provisto por dicha red. Este es un parámetro básico en la definición de una red y tiene dos objetivos: maximizar el área de influencia y el número de usuarios al que ofrece servicio.

Respecto al primer objetivo, se ha realizado un análisis de la evolución territorial de la red SIRDEE durante su implantación. En la Tabla 1 se detalla el porcentaje de territorio cubierto y el número de estaciones desplegadas por año del servicio. En la Figura 2 se puede observar gráficamente estos datos.

| Año | Nº Provincias | % territorio | Nº Estaciones | Δestaciones |
|------|---------------|--------------|---------------|-------------|
| 2000 | 4 | 4,5 | 138 | 138 |
| 2001 | 12 | 23,4 | 461 | 323 |
| 2002 | 9 | 36,3 | 691 | 230 |
| 2003 | 12 | 60,4 | 968 | 276 |
| 2004 | 10 | 74,5 | 1.183 | 215 |
| 2005 | 5 | 87,2 | 1.398 | 215 |
| 2020 | -- | 95,8 | 1.536 | 138 |

Tabla 1 Evolución del despliegue de la red SIRDEE (Fuente: Elaboración propia)

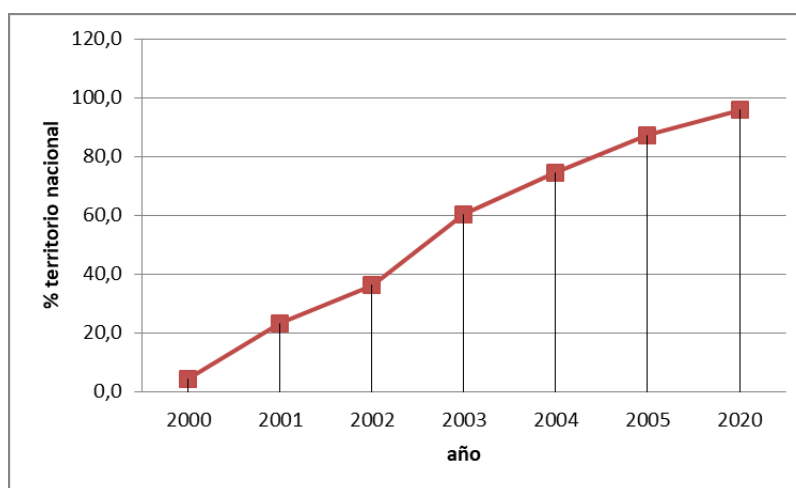


Figura 2 Evolución del porcentaje de cobertura geográfica de la red SIRDEE en función de los años de despliegue (Fuente: Elaboración Propia)

Actualmente hay desplegadas 1.536 estaciones para una cobertura del 95,8% del territorio.

Como se puede apreciar, en los primeros 5 años de despliegue se consigue el objetivo inicial de cobertura (cerca del 90% del territorio), y a partir de ese momento el despliegue de nuevas celdas persigue la optimización de la red para reforzar determinados lugares o dotar de cobertura a espacios pequeños.

La primera estación se colocó el 5 de octubre de 2000 y a finales de 2005 ya se había completado el despliegue en todas las provincias con un total de 1.398 estaciones para un 90% de cobertura territorial. Haciendo una media de los primeros 6 años se tiene que se estuvo desplegando a una velocidad aproximada de despliegue de 260 estaciones por año, aunque como se puede observar en la Tabla 1 en el segundo año se llegó a desplegar más de 300 estaciones.

Con esta información se puede tratar de predecir el tiempo necesario para realizar un despliegue LTE. No obstante, hay que tener en cuenta que el despliegue analizado de la red SIRDEE, fue realizado con tecnología TETRAPOL y no LTE, y que la banda de frecuencias utilizada es 380-400 MHz y para la red LTE dedicada se prevé la banda de 450 MHz, de 700 MHz o ambas, lo que podría multiplicar considerablemente el número de estaciones.

Tras las primeras experiencias realizadas con la tecnología LTE, aunque todavía no son concluyentes los datos, las mejores predicciones estiman en 1,5 veces el número de estaciones necesarias para completar un despliegue equivalente a la red de banda estrecha y las menos halagüeñas hasta 4 veces, por lo que se requerirían entre 2.295 y 6.129 estaciones LTE en cada caso.

Haciendo la suposición de que los recursos humanos puestos a disposición del despliegue LTE son los mismos que para el despliegue de banda estrecha, la velocidad de despliegue de estaciones seguirá la media de 260 estación / año, y por tanto serían necesarios entre 8 y 23 años para disponer de la red completamente desplegada.

El otro análisis que se puede realizar es considerando el otro objetivo de cobertura: maximizar el número de usuarios al que la red provee el servicio, o también dar cobertura prioritariamente a las zonas donde se concentra la población.

De acuerdo al artículo sobre la distribución de la población española publicado en el periódico La Razón [20], únicamente el 12,7% del territorio nacional se encuentra ocupado.

En otro artículo, esta vez de El País [21], indica que el 90% de la población española se concentra en el 30% del territorio. Información que será útil para la realización de este análisis.

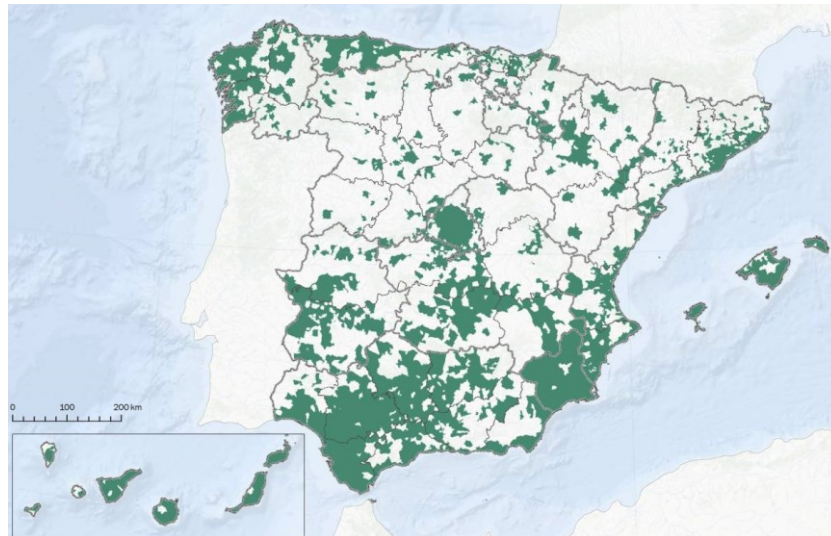


Figura 3 Municipios que concentran el 90% de la población española (Fuente: El País [21])

A partir de los datos de la Tabla 1 se puede obtener una recta de regresión que proporcione información sobre el número de estaciones o tiempo necesario para cubrir un determinado porcentaje de territorio. Concretamente, se han obtenido las dos expresiones necesarias:

$$t(\text{años}) = 0.059P_{cob} - 0.0263 \tag{2}$$

$$N_{estaciones} = 14.814P_{cob} + 99.897 \tag{3}$$

A través de estas dos expresiones se puede estimar el número de estaciones y el tiempo necesario para cubrir un determinado porcentaje de territorio. En Tabla 2 se incluye el resultado obtenido para cuatro casos (30%, 50%, 90% y 95%) de despliegue territorial para la tecnología TETRAPOL y su equivalente en LTE.

| % Territorio | Nº de años para desplegar | | | | | |
|--------------|---------------------------|------|----------------------|------|--------------------|------|
| | TETRAPOL | | LTE 450MHz (x1.5) | | LTE 700MHz (x4) | |
| | Nº Est. | Años | Nº Est. | Años | Nº Est. | Años |
| 30% | 544 | 1,7 | 816 | 3,1 | 2.177 | 8,4 |
| 50% | 841 | 2,9 | 1.261 | 4,8 | 3.362 | 12,9 |
| 90% | 1.433 | 5,3 | 2.150 | 8,3 | 5.733 | 22,0 |
| 95% | 1.507 | 5,6 | 2.261 | 8,7 | 6.029 | 23,2 |

Tabla 2 Número de estaciones y años necesarios (Fuente: Elaboración Propia)

Con esta información se puede desprender que bastaría aproximadamente 1,7 años para dotar de cobertura al territorio donde se concentra el 90% de la población con tecnología TETRAPOL y unos 3 años empleando estaciones LTE de 450 MHz.

Sin embargo, la seguridad pública es un servicio común para toda la población y no debe focalizarse a los puntos de mayor concentración de ésta. En la actualidad la red SIRDEE cubre más de un 95% del territorio español. Completar una cobertura LTE

equivalente a la actual de la red SIRDEE llevaría, según estos cálculos, entre 2.300 y 6.000 estaciones, en un plazo entre 8 y 23 años.

No obstante, estos tiempos se puede reducir considerablemente. Un operador puede desplegar más de 4.000 estaciones por año⁵, lo que podría reducir el tiempo de despliegue de 1 a 3 años suponiendo que hubiera presupuesto suficiente en cada anualidad.

En cuanto a la forma de evaluar este criterio, se plantea una expresión que mida lo próxima que está la cobertura disponible (ofrecida por la red) sobre el objetivo deseado, esto es:

$$P_1 = 10x \frac{\%Cobertura\ disponible(t)}{\%Cobertura\ objetivo} \quad (4)$$

Siendo el %Cobertura disponible la cobertura ofertada para una red comercial o híbrida o la disponible en función del tiempo para una red dedicada que debe ser desplegada.

- *Tráfico ofertado o tráfico cursado (P₂):*

Para determinar la capacidad de tráfico de una red LTE es necesario tener en cuenta varios aspectos, como:

- ancho de banda espectral disponible,
- eficiencia espectral
- tipo de servicio demandado por el usuario (voz, vídeo, datos, etc.)
- algoritmos de compresión,
- control de errores
- distancia de terminal de usuario a la estación
- etc.

Aunque cuando se trata sobre redes de banda ancha la tendencia es pensar en las aplicaciones de datos, puesto que es precisamente esa la carencia de las redes de banda estrecha vistas en el apartado 3, la realidad es que prioritariamente deberían ser capaces de soportar las necesidades de tráfico de voz, ya que, es el servicio básico de una red de comunicaciones de seguridad pública.

En el informe técnico de ETSI TR 136.912 [22] se publican datos de eficiencia espectral que proporcionan información valiosa para conocer las capacidades reales de una celda LTE.

De la página 39 de dicho informe se extrae la Tabla 3 con información de la capacidad de usuarios de VoIP soportados en función del tipo de celda para LTE Rel-8 para valores medios de eficiencia espectral, siendo la configuración de antena (A) un MIMO de 4 antenas copolarizadas incorreladas separadas 4λ y la configuración (B) un MIMO de antenas copolarizadas correladas separadas 0.5λ . Esta información se ha

⁵ Datos de Telefónica Móviles: en el año 2020 desplegaron 4.615 estaciones 4G sólo del fabricante Ericsson.

obtenido mediante simulaciones llevadas a cabo por las principales compañías fabricantes de LTE, tal y como indica la página 49 de [22].

| Antenna configuration | Environment | ITU requirement | Number of samples | Capacity [User/MHz/Cell] |
|---------------------------|-------------|-----------------|-------------------|--------------------------|
| Antenna configuration (A) | Indoor | 50 | 3 | 140 |
| | Urban Micro | 40 | 3 | 80 |
| | Urban Macro | 40 | 3 | 68 |
| | High Speed | 30 | 3 | 91 |
| Antenna configuration (C) | Indoor | 50 | 3 | 131 |
| | Urban Micro | 40 | 3 | 75 |
| | Urban Macro | 40 | 3 | 69 |
| | High Speed | 30 | 3 | 84 |

Tabla 3 Capacidad VoIP de LTE FDD Rel.8 (Fuente: ETSI TR136.912 [22])

A partir de estos datos se puede conocer el número de conversaciones simultáneas que se pueden llevar a cabo en una celda, en base al ancho de banda disponible. En la Tabla 4 se muestran los resultados obtenidos para una configuración de antena (A).

| Tipo de celda | Capacidad | Servicio Voz-Comunicaciones simultáneas | | | | |
|---------------|---------------------|---|-------|-------|--------|--------|
| | Usuario/MHz/Celldal | 1,4MHz | 3 MHz | 5 MHz | 10 MHz | 20 MHz |
| Indoor | 140 | 196 | 420 | 700 | 1400 | 2800 |
| Urban Micro | 80 | 112 | 240 | 400 | 800 | 1600 |
| Urban Macro | 68 | 95 | 204 | 340 | 680 | 1360 |
| High Speed | 91 | 127 | 273 | 455 | 910 | 1820 |

Tabla 4 Comunicaciones simultáneas de voz en modo Unicast (Fuente: Elaboración propia)

A partir de estos datos se puede deducir que un canal de voz para una celda de tipo Micro consume un equivalente a 12,5 KHz de ancho de banda, exactamente lo mismo que ocupa un canal de voz de TETRAPOL de la red SIRDEE.

Estos datos se refieren a comunicaciones de voz en modo unicast, es decir, cuando se realizan comunicaciones de grupo cada uno de los usuarios de dicho grupo que se encuentren en la misma celda contabilizará como una comunicación. Ejemplo: para un grupo de 200 usuarios en la misma celda con un ancho de banda de 5 MHz, una sola comunicación consumiría la mitad del espectro disponible.

En una red de seguridad pública la mayor parte de comunicaciones son de grupo. En núcleos urbanos la mayor parte de los terminales tiene programados grupos comunes y por tanto habrá un consumo espectral en proporción al número de usuarios pertenecientes al grupo, por lo que una comunicación grupal, que en una celda TETRAPOL ocuparía 12,5 KHz de espectro, empleando LTE ocuparía $N \times 12,5$ KHz, siendo N el número de usuarios en dicho grupo y celda.

Por ello, es importante contabilizar el número de terminales inscritos en una misma celda y grupo para dimensionar las necesidades de ancho de banda. En la Tabla 5 se recogen datos estadísticos del número de inscritos en una misma celda en hora punta para tres tipologías urbanas obtenidos de la red SIRDEE que pueden valer de manera aproximada para hacer este cálculo.

| Ciudad | Nº inscritos / celda |
|-------------|----------------------|
| Madrid | 400 |
| Sevilla | 100 |
| >50.000 hab | 120 |

Tabla 5 Número de terminales inscritos por celda según el tipo de ciudad
(Fuente: Elaboración propia)

Teniendo en cuenta que las asignaciones espectrales para redes dedicadas PPDR es de 5+5MHz en 450 MHz y 3+3 MHz en 700 MHz, y los datos de la Tabla 5 se puede concluir que el espectro disponible puede no ser suficiente ni siquiera para comunicaciones de voz. Hay que tener en cuenta que las celdas LTE serán previsiblemente más pequeñas y contendrán un menor número de usuarios inscritos. No obstante, estos datos son para comunicaciones de voz por lo que empeorará drásticamente en cuanto se utilicen otro tipo de servicio que requiera un mayor ancho de banda, como llamadas del vídeo, o tráfico masivo de datos, como envío de ficheros, consultas a bases de datos o envío de posiciones para los sistemas AVL.

Por otro lado, se puede analizar el comportamiento de las redes comerciales, que disponen de una mayor asignación espectral, y sorprendentemente se llega a la conclusión de que tampoco pueden garantizar capacidad suficiente. Con un ancho de banda de 20 MHz bastarían 1.600 usuarios que generaran o recibieran indistintamente de forma simultánea una llamada de voz para saturar la celda. Cualquier evento que concentre personas, como una manifestación o un partido de fútbol, podrían provocar, y de hecho así sucede, un bloqueo del servicio.

Por ejemplo, un partido de fútbol en el estadio Santiago Bernabéu con aforo completo (81.044 espectadores según [23]), suponiendo un reparto uniforme de los asistentes entre los 4 operadores mayoritarios que dan servicio en España (Orange, Telefónica, Vodafone y Grupo MásMóvil) [24] se tendría más de 20.000 usuarios/operador. Planteando como hipótesis de que cada operador cuenta con una estación con 20 MHz de ancho de banda, bastaría que el 10% de los espectadores quisieran hacer algún tipo de uso de la red para que se sature la celda, quedando inutilizada para los servicios de seguridad pública.

Evidentemente, esto no es así para un caso conocido como este, en el que los operadores aplican medidas para garantizar un servicio mínimo, como la sectorización de antenas, uso de micro celdas o la optimización de los algoritmos de regeneración de señal, y siempre que el evento discurra con normalidad. Pero este ejemplo proporciona suficiente información para deducir que en eventos no previstos; como una manifestación, un accidente o una catástrofe natural; una red comercial no va a ser capaz de proveer el servicio ni a los usuarios comerciales ni a los de seguridad pública.

De los párrafos anteriores parece desprenderse que, en condiciones normales, ni una red dedicada de uso exclusivo para servicios de seguridad pública con escasez de espectro como es el caso de España, ni una red comercial de uso compartido con el resto de abonados, ofrecen la suficiente capacidad para absorber el tráfico generado por sus usuarios. Sin embargo, existen mecanismos que permiten mejorar estas prestaciones tanto en las redes dedicadas como en las redes comerciales.

En el caso de las redes dedicadas se puede implantar el servicio eMBMS definido a partir de Release 9 de 3GPP. Implantando este servicio, las llamadas de tipo individual (uno a uno) seguirían estableciéndose en modo Unicast consumiendo los recursos espectrales ya expuestos, pero introduce gran mejoría en el caso de llamadas grupales (uno a varios), ya sea de voz o vídeo, cuyo consumo espectral es equivalente a una llamada individual de esa tipología con independencia del número de usuarios pertenecientes al grupo.

Sobre la implementación del servicio eMBMS en redes comerciales no se ha encontrado información más allá de experiencias piloto, sin embargo pueden existir otros mecanismos para mejorar la capacidad de tráfico para los servicios de seguridad pública, como la priorización de las comunicaciones de los servicios de seguridad pública frente a los usuarios comerciales o el rechazo de éstos por parte de la red en aquellas situaciones que estén previstas, como la ocurrencia de catástrofes o eventos de alta concentración de personas; pero esta posibilidad únicamente podría llevarse a cabo mediante una reglamentación adecuada.

Una vez conocida de una manera simplificada la forma de medir la capacidad de tráfico de una red LTE, se va a determinar un método para puntuar las prestaciones de la red en este aspecto.

En base a lo expuesto, una manera sencilla y rápida que podría emplearse para valorar la capacidad de tráfico de la red es el número de comunicaciones simultáneas que es capaz de gestionar. Como se ha visto en los párrafos anteriores, tiene una relación directa con el ancho de banda disponible y el número de usuarios inscritos en la celda pertenecientes al mismo grupo.

Por tanto, la valoración de este criterio debe estar basada en el aprovechamiento de la capacidad disponible en la red. Para simplificar, únicamente se va a considerar el servicio de VoIP (de acuerdo a la Tabla 4) en comunicaciones grupales, que son las habituales en los servicios de seguridad pública, bajo la hipótesis de que todos los usuarios del grupo están inscritos en la misma celda.

La puntuación en este caso se expresaría del siguiente modo:

$$P_2 = 10x \frac{num_{com}}{num_{com_max}} \quad (5)$$

Donde num_{com} es el número de comunicaciones simultáneas que se pueden realizar una celda y num_{com_max} es el valor de la alternativa con mayor número de comunicaciones simultáneas.

Para comunicaciones en modo unicast, el número máximo de comunicaciones simultáneas posibles en una celda quedará determinado por el número de usuarios de cada grupo inscritos en esa celda. Considerando, por simplificar, grupos homogéneos en número de usuarios, el número de comunicaciones simultáneas sería:

$$num_{comunicaciones} = Cap_{max}/N \quad (6)$$

Donde Cap_{max} es la capacidad máxima según el ancho de banda disponible de acuerdo a los datos de la Tabla 4, siendo N el número de usuarios en cada grupo.

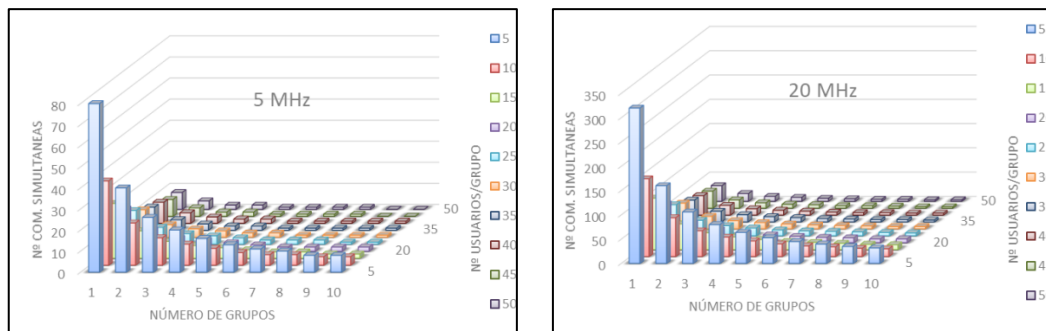


Figura 4 Evolución del número de comunicaciones simultáneas según el número y tamaño de los grupos en una misma celda Unicast (Fuente: Elaboración Propia)

Para comunicaciones empleando el servicio eMBMS , una comunicación de grupo tendría un consumo equivalente a una comunicación individual, independientemente del número de usuarios en el grupo, por lo que el número de comunicaciones simultáneas sería Cap_{max} .

- *Disponibilidad del servicio (P_3):*

Este es uno de los parámetros de calidad de una red de comunicaciones y mide el tiempo en que el servicio ofrecido está operativo respecto al tiempo total. Este parámetro es clave y hay que tenerlo presente siempre.

Para mejorar la disponibilidad del servicio se puede recurrir a determinadas prácticas en función del valor que se desee alcanzar. Para ello, es posible actuar sobre:

- **Energía:** disponer de un sistema de alimentación de emergencia puede mantener el sistema en servicio cuando existen cortes de energía el tiempo que se establezca.
- **Hardware:** además de exigir una determinada fiabilidad a los equipos hardware, algunos elementos se pueden redundar, como la banda base de una estación, equipos de enrutado, etc.
- **Software:** para evitar fallos de software se pueden implementar máquinas virtuales que corren sobre la misma máquina trabajando en modo Hot Stand-By de modo que si existe algún problema, de manera inmediata, entra en servicio otra máquina.
- **Georredundancia:** hay salas de equipos que por su importancia neurálgica en la red, como un centro de conmutación, una cierta redundancia del hardware no es suficiente y requiere un nivel de protección mayor que prevenga las consecuencias ante posibles catástrofes naturales o sabotajes. En este caso, se plantea la opción de disponer de varios centros equivalentes en localidades diferentes.

La disponibilidad de un sistema se define como el porcentaje de tiempo disponible respecto al total en un periodo de observación genérico [25].

$$D(\%) = \frac{T_{disponible}}{T_{observación}} \times 100 \quad (7)$$

Luego existen otras variantes de disponibilidad, que pueden ser función de la cobertura territorial, o la capacidad de tráfico ofrecida por la red. Estos dos parámetros pueden introducir indisponibilidad del servicio de cara al usuario, pero no se va a contabilizar puesto que de algún modo estos dos parámetros ya se cuantifican en los puntos anteriores.

Para realizar la valoración de la disponibilidad se tomará la disponibilidad de la red respecto a la disponibilidad objetivo, y esto se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$P_3 = 10x \frac{D(\%)}{D_{objetivo}(\%)} \quad (8)$$

Siendo la disponibilidad objetivo el valor que actualmente se requiere a una red de seguridad pública.

- *Seguridad (P₄):*

Como se indicó en el apartado anterior, forma parte de la seguridad aquellas medidas adoptadas para garantizar que la información que transita por la red no resulte comprometida

Para un servicio de seguridad pública, la red de comunicaciones debe desplegarse en emplazamientos y salas de conmutación y gestión que cuenten con:

- Medidas de seguridad para evitar las intrusiones no autorizadas que puedan ocasionar sabotajes.
- Sensorización frente a cortes de luz, humos, temperatura, etc.
- Sistema de respaldo de energía, ya sea mediante bancada de baterías o por grupo electrógeno.
- Redundancia en los elementos del equipo radio.
- Redundancia en el resto de elementos que componen la red.

Además, todos los elementos que permiten entrar al sistema deben contar con control de acceso y sistemas de autenticación y auditoría que permitan conocer quién ha accedido y las acciones realizadas.

Por otro lado, ha de existir un sistema de cifrado y de gestión de claves suficientemente robusto para proteger la información que circula por la red. Así como utilizar equipos que cuenten con garantías de seguridad emitidas por un centro de referencia como el CCN (Centro Criptográfico Nacional).

Al contrario que una red de comunicaciones diseñada para servicios de seguridad pública, una red comercial carece de determinados elementos de seguridad que garanticen dicha protección de la información.

Dada la repercusión que tienen estos elementos en la disponibilidad de la red, la presencia de algunos de estos elementos estará reflejada en la puntuación obtenida en dicho criterio. Por tanto, para simplificar y contabilizar de algún modo si el tipo de red ofrece estas prestaciones se definen 3 puntuaciones.

$$P_4 = \begin{cases} 10, & \text{si cuenta con estos medios} \\ 5, & \text{si cuenta parcialmente o los comparte} \\ 0, & \text{si no cuenta con estos medios} \end{cases} \quad (9)$$

- *Coste (P₅):*

Este criterio se mide por el precio del servicio y requerirá adaptar la información para poder comparar el coste de cada una de las alternativas de despliegue identificadas.

Se tomará como referencia el coste actual del servicio SIRDEE, aunque será complicado buscar un punto de comparación puesto que los servicios generalmente no son comparables.

En el caso de SIRDEE el servicio incluye, además del servicio de acceso a la red, los siguientes elementos:

- Terminales de diferente tipología
- Salas de control
- Supervisión de red
- Centro Nacional de Seguridad
- Mantenimiento
- Formación

El coste actual del servicio de banda estrecha es de 70,2M€ anuales sin IVA.

Considerando que la red está dando servicio a 72.000 terminales, el importe por terminal al año ascendería a aproximadamente 976 €. Este precio servirá de referencia para saber si el cambio de tecnología podría traer una ventaja económica.

Para realizar la evaluación del precio se van a tomar los precios máximo y mínimo en las alternativas seleccionadas

$$P_5 = 10x \frac{\text{Precio}_{\text{máximo}} - \text{Precio}_{\text{evaluado}}}{\text{Precio}_{\text{máximo}} - \text{Precio}_{\text{mínimo}}} \quad (10)$$

- *Decisiones políticas:*

Esta es una de las cuestiones que no pueden pasar por alto cuando se trata de servicios críticos para un país como puede ser una red nacional de comunicaciones para la seguridad pública. Estas decisiones pueden estar relacionadas tanto con las políticas de interior del país como de exterior.

Este criterio no puede ser empleado como elemento de evaluación, pero sí tiene una influencia sobre el resto de criterios que pueden hacer decantar el resultado de la evaluación hacia una estrategia de despliegue u otra.

A continuación se identifican, a modo de ejemplo, algunas de las políticas que podrían tener una afectación importante en la estrategia de despliegue y de qué manera puede afectar al valor de algunos criterios.

Dentro de las decisiones de política interior pueden estar:

- Decisión de regular la priorización de las comunicaciones de emergencias en las redes comerciales: esta decisión mejoraría la disponibilidad y la capacidad de tráfico que una red comercial puede ofrecer a los servicios de seguridad pública, tanto en zonas de alta concentración de personas como por situaciones de crisis.
- Decisión de regular el roaming nacional: aunque el servicio estuviera contratado con un único operador de red comercial, la existencia de roaming garantizaría una ampliación de la cobertura disponible al complementarse con el resto de redes existentes en España.
- Decisión de obligar a las operadoras a robustecer la protección de aquellos emplazamientos que dan servicio a zonas con infraestructuras críticas.
- Decisión de priorizar la disponibilidad del servicio en determinadas zonas en base a factores como la concentración de población o de delincuencia.

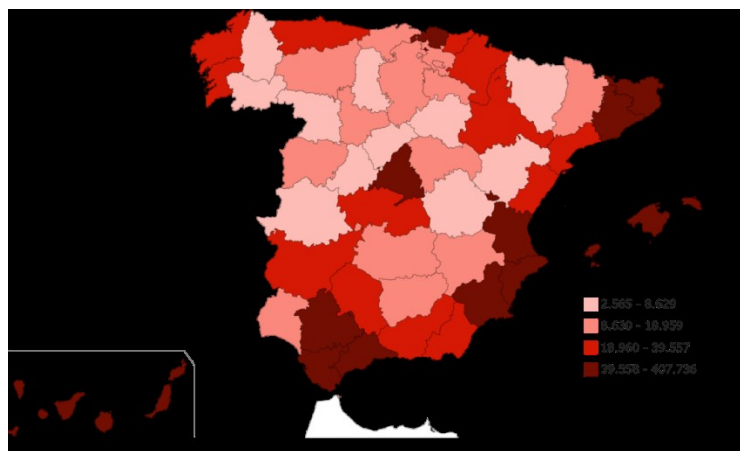


Figura 5 Infracciones penales por provincia en el año 2019 (Fuente: INE)

Entre las decisiones de política exterior podría estar el rechazo a tecnologías que procedan de China por acuerdos internacionales con otros países que veten a este país por cuestiones comerciales o por falta de confianza en temas de seguridad.

La mayor parte de operadores comerciales están empleando tecnología de Huawei⁶ por lo que una decisión en este sentido, una vez migrado el servicio a la banda ancha, provocaría un caos en la red de comunicaciones.

b) Determinación de los pesos

Después de analizar someramente los parámetros en los que están basados los criterios de valoración inicialmente planteados se ha concluido que serán los criterios de cobertura, capacidad de tráfico, disponibilidad, seguridad y coste aquellos que serán evaluados y puntuados, dejando el criterio de decisiones políticas como un elemento que puede condicionar en un momento dado la puntuación de los anteriores.

En cuanto a la distribución de pesos, tratando de contaminar lo menos posible con la opinión de la autoría de este análisis, se ha realizado una encuesta entre diferentes

⁶ https://www.eldiario.es/tecnologia/conectividad-alas-auge-huawei-europa_1_1675218.html

actores del sector de las comunicaciones de seguridad pública. Para ello, se ha pedido opinión sobre la importancia de cada uno de los criterios de evaluación a cinco perfiles de opinión relacionado con el mundo de las redes de comunicaciones: un operador de red, un fabricante de tecnología, un responsable de red, un consultor tecnológico y un gestor de la Administración Pública.

Para ello, se ha pedido a los participantes que otorguen una puntuación de importancia a cada criterio, siendo 1 el valor para “poco importante” y 5 para “muy importante”.

El resultado de la encuesta ha sido el siguiente:

| | Cobertura | Tráfico | Disponibilidad | Seguridad | Coste |
|-------------|-----------|---------|----------------|-----------|-------|
| Op_red | 4 | 4 | 5 | 5 | 3 |
| Fabricante | 5 | 5 | 5 | 4 | 3 |
| Responsable | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 |
| Consultor | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 |
| Gestor | 3 | 4 | 5 | 4 | 3 |
| Punt. Media | 3,52 | 4,18 | 5,00 | 4,18 | 3,00 |
| Pesos | 18% | 21% | 25% | 21% | 15% |

Tabla 6 Obtención de pesos asociado a cada criterio (Fuente: Elaboración propia)

Finalmente, a modo resumen se incluye una tabla con el método empleado para valorar cada criterio y su peso.

| Criterio de evaluación | Descripción | Ponderación |
|------------------------|--|-------------|
| Grado de cobertura | $P_1 = 10x \frac{\%Cobertura\ disponible(t)}{\%Cobertura\ objetivo}$ | 18% |
| Capacidad de tráfico | $P_2 = 10x \frac{num_{com}}{num_{com\ max}}$ | 21% |
| Disponibilidad | $P_3 = 10x \frac{D(\%)}{D_{objetivo}(\%)}$ | 25% |
| Seguridad | $P_4 = \begin{cases} 10, si\ cuenta\ con\ estos\ medios \\ 5, si\ cuenta\ parcialmente\ o\ los\ comparte \\ 0, si\ no\ cuenta\ con\ estos\ medios \end{cases}$ | 21% |
| Coste del servicio | $P_5 = 10x \frac{Precio_{máximo} - Precio_{evaluado}}{Precio_{máximo} - Precio_{mínimo}}$ | 15% |

Tabla 7 Resumen de la metodología de evaluación de alternativas (Fuente: Elaboración propia)

6.3.- Solución propuesta.

Una vez expuesta la metodología que se aplicará para evaluar cuál es la estrategia más conveniente, se va a proceder a aplicar la misma a las diferentes casuísticas que se pueden plantear en un futuro.

- *Cobertura (P_1):*

Para una red de comunicaciones de seguridad pública el objetivo de cobertura debe dirigirse a alcanzar el máximo del territorio, puesto que las emergencias pueden suceder en cualquier parte. Por tanto, para definir un objetivo de cobertura inicialmente deseable puede utilizarse como referencia la actual de la red SIRDEE (95,8%).

- Red Comercial:

En las siguientes figuras se muestran los mapas de cobertura 4G para los 3 mayores operadores que actúan en España. Como puede observarse la cobertura se centra en las concentraciones de población. (Ver Figura 3)

De los tres mapas de cobertura presentados el que mayor cobertura geográfica tiene es el correspondiente a Movistar, que se estima sobre el 70% del territorio.

$$P_1 = 10x \frac{70}{95.8} = 7.3 \text{ puntos}$$

Sin embargo, si el gobierno reglamentara la posibilidad de realizar roaming nacional entre las redes de los operadores disponibles esta puntuación aumentaría, aunque a simple vista de los mapas de cobertura no aumentaría drásticamente. En dicho caso se podría concluir que $P_1 > 7.3 \text{ puntos}$.

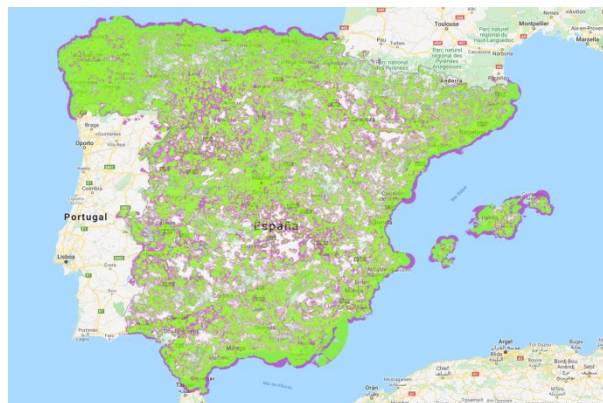


Figura 6 Cobertura geográfica de 4G de Movistar [27]

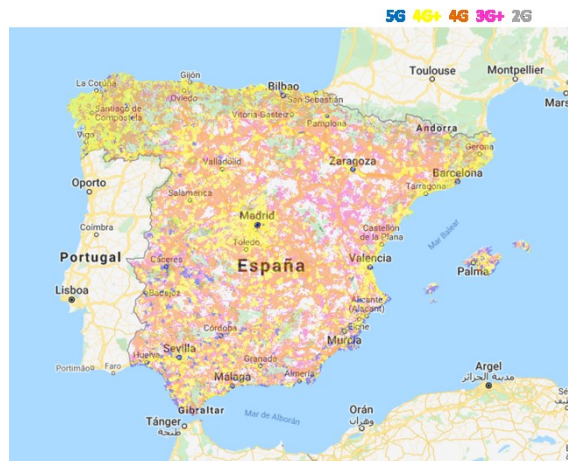


Figura 7 Cobertura geográfica de Orange [28]

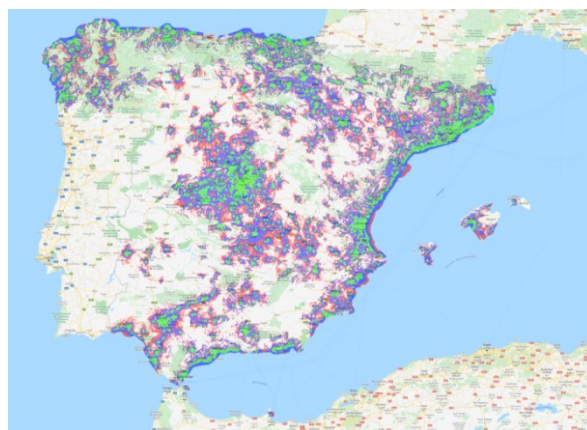


Figura 8 Cobertura geográfica de 4G de Vodafone [29]

– Red Dedicada:

La red dedicada no se encuentra desplegada, pero de acuerdo a los datos recogidos en el apartado 6.2 se puede estimar que para lograr un despliegue equivalente al 70% geográfico serían necesarias entre 1.700 y 4.500 estaciones, y para un 95% entre 2.260 y 6.000, inicialmente inviable salvo una mejora presupuestaria del Contrato que permitiría acortar los tiempos de despliegue a entre 2 y 4 años o lo que es igual a la duración de un contrato más una prórroga.

En condiciones normales y con un contrato de 3 años, sólo podría alcanzarse un 30% de cobertura.

Por tanto, la puntuación podría estar entre

$$P_1 = 10x \frac{30}{95.8} = 3.1 \text{ puntos} \text{ y } P_1 = 10x \frac{95.8}{95.8} = 10 \text{ puntos}$$

Por tanto, una decisión política orientada a la mejora presupuestaria del Contrato podría acelerar la disponibilidad de cobertura o si esta decisión se orienta a priorizar el despliegue en determinadas zonas podría influir en la velocidad de despliegue.

– Red Híbrida:

El cálculo de cobertura para red híbrida es más complejo puesto que intervienen varios factores: el tipo de hibridación y la cobertura proporcionada por la red de acceso radio que puede ser compartida o complementada con un operador comercial.

Aunque de inicio, se puede decir que al menos $P_1 > 7.3$ puntos.

• *Capacidad de tráfico (P_2):*

A día de hoy, el servicio esencial de una red de comunicaciones de seguridad pública es la voz, por lo que se ha de asegurar que la capacidad disponible de tráfico de la red cubre como mínimo este servicio.

En el apartado 6.2 se mostró la capacidad en número comunicaciones individuales de VoIP (Tabla 4) que puede servir una celda LTE en base al ancho de banda disponible, así como su variación cuando se introducen las comunicaciones de grupo.

Para realizar la valoración de este criterio se tomará una microcelda urbana en la que se encuentran usuarios inscritos que trabajan en grupos de 20 y de 50 usuarios por grupo.

– Red Comercial:

Suponiendo una red comercial con ancho de banda disponible de 20 MHz, la capacidad máxima será de 1600 comunicaciones de VoIP. Este tipo de redes trabaja únicamente en modo Unicast, por tanto, el número de comunicaciones simultáneas será:

$$\text{Num}_{\text{com}} = 1600/20 = \mathbf{80}$$

$$\text{Num}_{\text{com}} = 1600/50 = \mathbf{32}$$

En realidad, la capacidad será inferior, puesto que, el ancho de banda se comparte con los usuarios comerciales de la red.

– Red Dedicada:

Una red dedicada con 5 MHz de ancho de banda, dispone de 400 comunicaciones VoIP, pero al emplear eMBMS cada comunicación de grupo consumirá el equivalente a una comunicación Unicast. Por tanto, *el número de comunicaciones simultáneas será de 400*, a pesar de disponer de menor ancho de banda que el caso anterior.

– Red Híbrida:

En este tipo de redes, aunque una modalidad tipo MOCN permitiría trabajar en modo MBMS, como la RAN es compartida con un operador y éstos emplean dicho servicio no será posible implementarlo y aprovechar sus ventajas en el aprovechamiento espectral, por lo que, aunque dispongan de 20 MHz de ancho de banda, pasará como en las redes comerciales y tendrán una capacidad de *80 y 32 comunicaciones simultáneas*, según el tamaño del grupo.

Por tanto, aplicando la expresión definida para este criterio se obtienen los siguientes resultados:

| | Red Comercial | Red Dedicada | Red Híbrida |
|------------------------------------|---------------|--------------|-------------|
| P ₂ (20 usuarios/grupo) | 2 | 10 | 2 |
| P ₂ (50 usuarios/grupo) | 0,8 | 10 | 0,8 |

- *Disponibilidad (P₃):*

Normalmente, la disponibilidad exigida a un sistema de comunicaciones de seguridad pública o de emergencias suele ser superior al 99%. Como ejemplos reales están la red de comunicaciones móviles del Govern de les Illes Balears con una disponibilidad exigida en contrato para la red de acceso radio del 99,7% [30] o la red comunicaciones digitales de emergencia de Galicia con una disponibilidad para las estaciones base de manera individual del 99,7% y a la red de acceso radio del 99,975% [31].

Por tanto, exigir un valor de disponibilidad del 99,8% a una red de estas características estaría dentro de lo razonable. De hecho, la disponibilidad media actual de la red SIRDEE que es superior al 99,8%.

- Red Comercial:

En relación a las redes comerciales no ha sido posible encontrar información real de disponibilidad del servicio, pero se puede hacer una estimación gracias a los datos de disponibilidad de la red SIRDEE.

Todos los emplazamientos de la red SIRDEE cuentan con respaldo de energía, algo que la red comercial no. Por tanto, observando los datos de caídas de energía en un periodo concreto y para una provincia se puede deducir el tiempo inoperativo de una red comercial, ya que, ésta no dispone de respaldo energético. En este caso, tal y como se indica en la Tabla 8, la disponibilidad de una red comercial estaría sobre 97,33%, sin contar con otras factores que puedan dejar sin servicio a la red.

| Mes | Provincia | Ebs | Horas/Batt | % NO CAIDA EB | % Servicio SIRDEE | % Servicio SIN Batt |
|-------|-----------|-----|------------|---------------|-------------------|---------------------|
| Enero | Málaga | 43 | 764 | 2,47% | 99,80% | 97,33% |

Tabla 8 Estimación de indisponibilidad en caso de no disponer de baterías (Fuente propia)

$$P_3 = 10x \frac{97.33}{99.8} = 9.75 \text{ puntos}$$

- Red Dedicada:

La red dedicada se ajustará a los requisitos de disponibilidad para las redes de seguridad pública, por lo que deberá tener un valor igual o superior a 99,8%.

$$P_3 = 10 \times \frac{99.8}{99.8} = 10 \text{ puntos}$$

– Red Híbrida:

En base al tipo de hibridación elegida, la compartición de la red de acceso radio con la red comercial supondría heredar la disponibilidad vista para ésta, es decir, un 97.33%.

Otra posibilidad es que la red de acceso radio fuera normalmente dedicada, cumpliendo los requisitos de seguridad pública, pero complementada con la red comercial en aquellas zonas donde no hubiera suficiente cobertura.

En ese caso, se deduce que la disponibilidad en este tipo de redes será igual o mayor a 97.33% e inferior a 99.8%. Por tanto,

$$10 \text{ puntos} > P_3 \geq 9.75 \text{ puntos}$$

• Seguridad (P_4):

– Red Comercial:

Este tipo de redes, pertenecientes a operadores comerciales, no suele disponer de elementos de seguridad en sus emplazamientos ni tampoco cuentan con una verificación previa de seguridad sobre el personal contratado y que trabaja en las instalaciones, por tanto:

$$P_4 = 0 \text{ puntos}$$

– Red Dedicada:

Estas redes están preparadas con elementos de seguridad a todos los niveles, con una buena gestión de claves, control de accesos y contratación de personas con garantía de seguridad, por tanto:

$$P_4 = 10 \text{ puntos}$$

– Red Híbrida:

Este tipo de redes, al haber elementos compartidos, según el tipo de hibridación compartirá elementos de seguridad que protegerán algunas infraestructuras. Por tanto:

$$P_4 = 5 \text{ puntos}$$

• Coste (P_5):

– Red Comercial:

Para hallar el coste de un servicio de comunicaciones críticas basado en red comercial no se han encontrado datos, pero se puede realizar una estimación a partir de las tarifas comerciales de los principales operadores (Movistar, Orange y Vodafone) [32],

[33], [34] con tarifas planas 4G con datos ilimitados. En general, estas tarifas se encuentran sobre 20€ por línea al mes. Esto equivale a 240€ al año, pero no incluye terminal, ni mantenimiento del mismo, ni la aplicación de MCPTT ni por supuesto el servicio de las salas de control.

– Red Dedicada:

Para la estimación del coste de una red dedicada se ha empleado una estimación de costes a partir de información de explotación de la red SIRDEE, y haciendo el supuesto para una red en la banda de 450 MHz. Considerando un plazo de amortización a 10 años, el coste del servicio estaría sobre los 70 M€/año⁷.

Suponiendo que se mantiene el número de terminales (72.000), el coste del servicio sería aproximadamente de 972 €/año por terminal, ligeramente inferior al coste actual del servicio de banda estrecha.

– Red Híbrida:

Caso de Francia [35]: a primeros del presente año salió a licitación el servicio de comunicaciones críticas con una duración de 48 meses renovables 36 meses adicionales por valor total de 900M€. En principio, se desprende de la información presenten en el diario de licitaciones que la cobertura afecta únicamente a las zonas metropolitanas de Francia.

El número de usuarios previsto para la red es de 400.000. Teniendo en cuenta que la proporción usuario a terminal es 2 a 1, de acuerdo a la noticia publicada en Critical Communications Today [36] se tendría 200.000 terminales. A partir de aquí se estima que el servicio debe tener un coste aproximado por terminal de 643€/año.

También se ha encontrado la publicación de las tarifas de FirstNet [37], aunque es muy variada y depende del tipo de plan, se puede tomar como referencia la tarifa de 5GB y 50 GB mensuales con terminal incluido. Realizado el cálculo se incluye el resultado en la Tabla 9.

| Tipo de tarifa | Precio/mes (\$) | Precio/año (\$) | Precio/año (€) |
|----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| 5GB | 61\$ | 732€ | 604€ |
| 50GB | 247\$ | 2.964\$ | 2.445€ |

Tabla 9 Coste de la red FirstNet para los planes de 5GB y 50 GB al mes (Fuente: FirstNet)

A partir de los datos de precio anteriores podemos estimar la expresión definitiva en base a los precios máximos y mínimos.

$$P_5 = 10x \frac{2445 - Precio_{evaluado}}{2445 - 240}$$

En la siguiente tabla se recogen las puntuaciones obtenidas para cada caso:

⁷ Por motivos de protección de la información no se pueden incluir más detalles sobre este estudio.

| | Red Comercial | Red Dedicada | Red Híbrida | |
|----------------------|---------------|--------------|--------------------------|-----|
| P₅ | 10 | 6,7 | Francia | 8,2 |
| | | | FirstNet _{5GB} | 8,3 |
| | | | FirstNet _{50GB} | 0 |

a) *Puntuación final:*

Una vez obtenida la puntuación individual para cada criterio se aplica la ponderación que le corresponde a cada uno de manera que se obtenga la puntuación final para cada alternativa:

| | Peso | Red Comercial | Red Dedicada | Red Híbrida |
|-----------------------|-------------|---------------|--------------|-------------|
| Cobertura | 18% | 7,3 | 3,1 | 7,3 |
| Tráfico | 21% | 2 | 10 | 2 |
| Disponibilidad | 25% | 9,75 | 10 | 9,75 |
| Seguridad | 21% | 0 | 10 | 5 |
| Coste | 15% | 10 | 6,7 | 8,2 |
| TOTAL | 100% | 5,67 | 8,28 | 6,45 |

b) *Influencia de algunas decisiones políticas sobre la puntuación:*

En el apartado 6.2 se identificaron algunas políticas de interior que podría desarrollarse y afectar de algún modo a las prestaciones de las alternativas en estudio. Se procede a continuación a valorar cómo influyen realmente en la valoración final de cada una de ellas.

Algunas de las políticas de interior identificadas son:

- Decisión de regular la priorización de las comunicaciones de emergencias en las redes comerciales: Teniendo en cuenta que las redes comerciales e híbridas no implementan el servicio MBMS, la capacidad real de las mismas no va a aumentar. Lo que ocurrirá es que la capacidad total o la que se estime en dicha priorización estará destinada en exclusiva a los servicios de seguridad pública, pero no serán mejores que los calculados sin esta política.
- Decisión de regular el roaming nacional: Provocará una mejora de la cobertura para aquellos servicios que empleen las redes comerciales e híbridas, si bien observando los mapas de cobertura incluidos en el apartado 6.2 se puede observar que no se logrará un nivel de cobertura similar a la red SIRDEE. Se estima que podría alcanzarse un 80% de la totalidad del territorio. Por tanto su puntuación cambiaría a 8,3.
- Decisión de obligar a las operadoras a robustecer la protección de aquellos emplazamientos que dan servicio a zonas con infraestructuras críticas: esta decisión: Esta decisión provocaría que las operadoras protegieran parte de su infraestructura, pero no alcanzarían el nivel exigido a una red seguridad pública, por lo que la puntuación en ese caso sería de 5.
- Decisión de priorizar la disponibilidad del servicio en determinadas zonas en base a factores como la concentración de población o de delincuencia. Esta decisión cambiaría las prioridades de despliegue pero no así los valores globales de cobertura, tráfico o disponibilidad.

Por tanto, considerando el factor político, la puntuación final quedaría de la siguiente manera:

| | Peso | Red Comercial | Red Dedicada | Red Híbrida |
|-----------------------|-------------|----------------------|---------------------|--------------------|
| Cobertura | 18% | 8,3 | 3,1 | 8,3 |
| Tráfico | 21% | 2 | 10 | 2 |
| Disponibilidad | 25% | 9,75 | 10 | 9,75 |
| Seguridad | 21% | 0 | 10 | 5 |
| Coste | 15% | 10 | 6,7 | 8,2 |
| TOTAL | 100% | 5,85 | 8,28 | 6,63 |

7.- CONCLUSIONES.

Se ha planteado una metodología multicriterio para la selección de la estrategia de despliegue e implantación de una red de comunicaciones de banda ancha para seguridad pública que ha proporcionado una valoración para cada una de las alternativas identificadas

Las conclusiones deben ir encaminadas, por un lado, a la validez del método y por otro a justificar la posible estrategia que debería elegirse para la evolución de la red de seguridad pública.

El resultado obtenido en la valoración de alternativas refleja la situación actual y disponer de una red dedicada es la estrategia de despliegue más conveniente en la actualidad cuando se trata de proporcionar un servicio de comunicaciones a los cuerpos de seguridad pública.

No obstante, la evolución tecnológica y la aparición de nuevas soluciones comerciales en los próximos años, pueden modificar las prestaciones actuales de las redes comerciales e híbridas, influyendo en un posible cambio en el resultado obtenido al aplicar esta metodología bajo las nuevas circunstancias.

Por otro lado, también se podría “afinar” esta metodología aplicando mayor precisión a determinados criterios de valoración. Un ejemplo claro sería aumentar la precisión territorial en la disponibilidad de cobertura.

Como última reflexión, estos sistemas sufren el denominado “fenómeno extintor”, que es el gasto necesario en un objeto que pasa desapercibido en la mayor parte de su vida útil, y se podría llegar a la conclusión de que es completamente prescindible porque no se utiliza; sin embargo, cuando llega una situación de emergencia, si no está ahí el impacto de no tenerlo puede ser terrible, y eso mismo pasa con las redes de comunicaciones de seguridad pública y emergencias, son las únicas que funcionan en situaciones de catástrofe y deben seguir haciéndolo.

8.- REFERENCIAS.

- [1] Commission Implementing Decision (UE) 2016/687, of 28 April 2016, on the harmonization of the 694-790 MHz frequency band for terrestrial systems capable of providing wireless broadband electronic communications services and for flexible national use in the Union.

- [2] Ministerio de Asuntos Económicos y Transformación Digital. *Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. Orden ETD/1449/2021, 16 de diciembre de, 2021. Disponible en: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2021-21346&p=20211224&tn=3>
- [3] “La Policía Local de Alcobendas implanta un innovador sistema de comunicaciones móviles”, La Vanguardia, 30 de agosto de 2011. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/local/madrid/20110830/54208745054/la-policia-local-de-alcobendas-implanta-un-innovador-sistema-de-comunicaciones-moviles.html>
- [4] *Release 1999*, 3GPP Release 99, diciembre de 1999. Disponible en: <https://www.3gpp.org/specifications-technologies/releases/release-1999>
- [5] T. Nakamura, “Proposal for Candidate Radio Interface Technologies for IMT-Advanced Based on LTE Release 10 and Beyond (LTE -Advanced),” in ITU-R WP5D 3rd Workshop on IMT-Advanced, 5 de octubre de 2009.
- [6] *Common functional architecture to support mission critical services, Stage 2 (Release 17)*, 3GPP TS 23.280 V17.6.0, Abril de 2021.
- [7] Página web del 3GPP. Disponible en: <https://www.3gpp.org/>.
- [8] R. Agustí Comes, F. Bernardo; F. Casadevall, R. Ferrús, J. Pérez and O. Sallent., “LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles”. Fundación Vodafone España.. 2010, p. 55-109.
- [9] *Release 15 Description*, 3GPP TR 21.915 V15.0.0, Septiembre de. 2019. Disponible en: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.915/
- [10] First Responder Network Authority, “FirstNet Partners with AT&T to Build Wireless Broadband Network for America's First Responders”, Disponible en: <https://2014-2018.firstnet.gov/news/firstnet-partners-att-build-wireless-broadband-network-americas-first-responders>
- [11] FirstNet. *Nationwide Coverage*, Disponible en: <https://www.firstnet.com/coverage.html>
- [12] M. Warwick, *New UK Emergency Services Network delayed yet again. It will be outdated before it is operational*, TelecomTV, 15 de septiembre de 2020, Disponible en: <https://www.telecomtv.com/content/4g-lte/new-uk-emergency-services-network-delayed-yet-again-it-will-be-outdated-before-it-is-operational-39673/>
- [13] R. Mellies, *France Broadband PPDR Network: RRF Status update*, presentado en Public Safety Radiocommunications Group, Noviembre de 2022.
- [14] *Rugged LTE 410-430 MHz terminal for PPDR*. Nordic Telecom Systems a.s., 16 de marzo de 2020, p 4-8.
- [15] J Nally, “Finland strides ahead with Virve 2.0,” Critical Comms, Nov/Dec 2020, Disponible en: https://issuu.com/westwick-farrowmedia/docs/critical_comms_nov_dec_2020/s/11206246
- [16] J. O’Halloran, “First 3GPP-compliant public safety network with MCPTT launches in South Korea,” Computer Weekly, 26 de abril de 2021. Disponible en: <https://www.computerweekly.com/news/252499799/First-3GPP-compliant-public-safety-network-with-MCPTT-launches-in-South-Korea>
- [17] T. Gray, “Why MCPTT Interoperability is Vital for Public Safety,” MissionCritical Communications, 4 de febrero de 2019. Disponible en: <https://www.rmediagroup.com/Features/FeaturesDetails/FID/896>
- [18] *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS), Architecture and functional description (Release 17)*, 3GPP TS 23.246 V17.0.0, Marzo de 2022.
- [19] J. Wannstrom, “Carrier Aggregation explained”, 3GPP. Disponible en: <https://www.3gpp.org/technologies/101-carrier-aggregation-explained>

- [20] J. Alonso, “*La distribución de la población española, una anomalía en Europa*”, La Razón, Jan 10, 2021, Spain, (in Spanish) [Online]. Available: <https://www.larazon.es/economia/20210110/6jbova3gyvbcxggjmzc3vhswai.html>
- [21] J. Marcos, “*El 30% del territorio español concentra el 90% de la población*”, El País, Oct 8, 2018, Spain, (in Spanish) [Online]. Available: https://elpais.com/politica/2018/10/05/actualidad/1538767620_420819.html
- [22] *LTE; Feasibility study for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced) (3GPP TR 36.912 version 11.0.0 Release 11)*. ETSI Technical Report TR 136.912, Octubre de 2012, p 34-40.
- [23] *Estadio Santiago Bernabeu*, Real Madrid CF. Disponible en: <https://www.realmadrid.com/estadio-santiago-bernabeu>
- [24] *Récord histórico de portabilidad: más de 1 millón de cambios de operador en septiembre*, CNMC, 18 de diciembre de 2020. Disponible en: <https://www.cnmc.es/prensa/mensual-telecos-portabilidad-record>
- [25] *Availability performance parameters and objectives for end-to-end international constant bit-rate digital paths*, ITU-T G.827, Sep, 2003, pp 4-7.
- [26] T. Herrero, “*El 5G aviva la batalla tecnológica entre China y EEUU*”, El Diario. 26 de febrero de 2019. Disponible en: https://www.eldiario.es/tecnologia/conectividad-alas-auge-huawei-europa_1_1675218.html
- [27] *Cobertura geográfica 4G de Movistar*. Movistar. Disponible en: <https://www.movistar.es/particulares/coberturas/movil>
- [28] *Cobertura geográfica 4G de Orange*. Orange. Disponible en: <https://www.orange.es/4g#>
- [29] *Cobertura geográfica 4G de Vodafone*. Vodafone. Disponible en: <https://www.vodafone.es/c/conocenos/es/vodafone-espana/mapa-cobertura-movil/>
- [30] *Pliego de Prescripciones Técnicas de la Red Digital de Comunicaciones Móviles en las Islas Baleares*, Govern de Illes Balears, Octubre de 2010.
- [31] *Xunta de Galicia. Pliego de Prescripciones Técnicas de la Red Corporativa de Comunicaciones Móviles Digitales de Emergencia y Seguridad de Galicia*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. Diciembre de 2012.
- [32] *Tarifas del servicio de Movistar*. Disponible en: <https://www.movistar.es/particulares/movil/tarifas-moviles/>
- [33] *Tarifas del servicio de Orange*. Disponible en: <https://www.orange.es/tarifas/movil>
- [34] *Tarifas del servicio de Vodafone*. Disponible en: <https://www.vodafone.es/c/particulares/es/productos-y-servicios/movil/contrato/tarifas-contrato/>
- [35] *Radio Network of the Future (RRF)*, French Ministry of Interior, Tenders Electronic Daily, 4 de diciembre de 2020, Disponible en: <https://ted.europa.eu/udl?uri=TED:NOTICE:586641-2020:TEXT:FR:HTML&tabId=5&tabLang=en>
- [36] *France's push for public safety broadband*. Critical Communications Today. 19 de Agosto de 2019. Disponible en: <https://www.criticalcomms.com/features/france-ppdr-broadband-rrf-pcstorm>
- [37] *Mobile-Pooled & Mobile-Unlimited Plans for the FirstNet Evolved Packet Core*, FirstNet (AT&T), USA, 2022. Disponible en: <https://www.firstnet.com/content/dam/firstnet/white-papers/GOV-firstnet-primary.pdf>