



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA



Máster Universitario
en Tecnologías, Sistemas y
Redes de Comunicaciones

Coexistencia entre servicios TDT y 4G en la banda de 700 MHz

Autor: Manuel Fuentes Muela

Director 1: David Gómez Barquero

Director 2: Narcís Cardona Marcet

Fecha de comienzo: 04/02/2013

Lugar de trabajo: Grupo de Comunicaciones Móviles (MCG) – iTEAM



Objetivos — La principal propuesta de esta tesina es obtener soluciones y resultados intermedios para el contrato de consultoría N° 000069 de 2013 entre la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia e Ingenia Telecom, S.L., con el fin de mitigar el problema de la interferencia de los servicios móviles LTE (4G) sobre la tecnología TDT en la banda de 700 MHz en Colombia. Se realizarán estudios divididos en dos líneas de investigación: medidas de márgenes de protección y análisis de balance de enlace. Las posibles soluciones serán utilizar un filtro paso-bajo doméstico a la entrada del receptor TDT, utilizar un filtro profesional entre la antena TDT y el amplificador de mástil o desestimar el uso del último canal TDT (canal 51), aumentando la banda de guarda de 5 a 11 MHz.

Metodología — Para estudiar el caso completo, es necesario dividir la metodología en tres etapas. La primera de ellas consiste en realizar medidas de márgenes de protección entre tecnologías, utilizando DVB-T2 como estándar de televisión digital útil. Esta etapa se realizará siguiendo como ejemplo la Recomendación ITU-R BT.1368-9, de diciembre de 2012. La segunda etapa consiste en realizar un análisis del balance de enlace completo para los escenarios planteados en el proyecto relacionado y descritos en este documento con el fin de observar si dichos márgenes son suficientes o es necesario poner en marcha una de las soluciones anteriormente planteadas. Para ello se sigue el método descrito en el Informe número 30 de la CEPT, de octubre de 2009. La última y tercera etapa consiste en realizar estudios de planificación mediante SEAMCAT e ICS Telecom. Esta etapa no ha sido incluida en la tesina.

Desarrollos teóricos realizados — En primer lugar, fue necesario estudiar los dos estándares involucrados en el problema existente, es decir, el estándar de televisión digital terrestre DVB-T2 a 6 MHz y el estándar de servicios móviles de cuarta generación LTE. Se ha desarrollado un punto diferenciando las principales características de la capa física de ambos, pues es la única que afecta a las interferencias en un escenario real. También se ha desarrollado el estado del arte, que incluye los estudios y acciones que se han llevado a cabo por parte de otros países, especialmente europeos. También se ha desarrollado el análisis de los balances de enlace realizado, detallando las ecuaciones utilizadas para la obtención del resultado final.

Desarrollo de prototipos y trabajo de laboratorio — El principal trabajo de laboratorio se ha desarrollado en la primera etapa de la metodología, es decir, en la medida de márgenes de protección entre tecnologías. En esta etapa, se han generado señales reales tanto de DVB-T2 como de LTE. Para obtener señales DVB-T2 se utilizó el transmisor DekTec T2Xpress DVB-T2 *Signal Generator* y el generador R&S SMU 200A, mientras que las señales de LTE (Downlink y Uplink) se generaron gracias a la versión trial del simulador proporcionado por IS-Wireless y al generador de señales Aeroflex SGD. También se han realizado programas y funciones en Matlab para la obtención directa de resultados en los balances de enlace, para diferentes escenarios.

Resultados — Los resultados, por tanto, se dividirán en dos principales puntos: medidas de márgenes de protección para los tres receptores DVB-T2 con canalización colombiana (ancho de banda de 6 MHz) y análisis de balance de enlace. Los primeros resultados se obtendrán para los canales 48, 49, 50 y 51 de TDT (banda superior) frente a interferencias de los canales 1, 2 y 3 de LTE. Además, se estudiará el efecto de

determinadas características de las señales, como el ancho de banda y la carga de tráfico actual de la señal LTE, o la modulación empleada DVB-T2. También se estudiará el hecho de dejar una banda de guarda menor o mayor a la asignada. En cuanto a los resultados de balance de enlace, se obtendrán parámetros concretos, como el mayor nivel de emisión fuera de banda de los terminales móviles en el enlace ascendente o Uplink, o la distancia mínima que debe existir entre estos y el receptor TDT para evitar interferencias en un caso de recepción TDT *indoor*. En función de estos parámetros, se evaluará utilizar alguna de las posibles soluciones planteadas.

Líneas futuras — Como se mencionó, esta tesina forma parte del proyecto de investigación realizado en el iTEAM correspondiente al contrato de consultoría N° 000069 de 2013 entre la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia e Ingenia Telecom, S.L., por lo que sólo incluye una parte de todo el trabajo a realizar. Cumpliendo con lo que se exige en dicho contrato, será necesario estudiar el problema en la banda inferior de la TDT, es decir, en la banda de 450 MHz, donde el problema es la interferencia que dicha tecnología genera sobre los sistemas de radio de policía APCO25, y la que genera LTE en esa banda sobre la TDT. También se desarrollará la tercera etapa del proyecto, donde se realizarán estudios de planificación con SEAMCAT e ICS Telecom para la obtención de recomendaciones finales tanto para la banda superior de 700 MHz como para la banda inferior de 450 MHz.

Publicaciones — En línea con el proyecto nombrado se tiene pensado, cuando éste llegué a su finalización, escribir dos publicaciones. La primera será un estudio sobre márgenes de protección en función de la banda de guarda, tanto para 700 como para 800 MHz, incluyendo el escenario latinoamericano descrito (modos de transmisión utilizados en Colombia) y un nuevo escenario europeo (modos empleados en España). La segunda publicación tratará sobre las implicaciones del uso del enlace Uplink en la parte baja de la banda asignada a LTE, analizando las distintas ventajas e inconvenientes de su uso en lugar de Downlink.

Abstract — The main proposal of this master thesis is to achieve solutions and intermediate results for the consultancy contract No. 000069, 2013 between the *Agencia Nacional del Espectro* (ANE) of Colombia and Ingenia Telecom, SL, in order to mitigate the problem of the mobile LTE (4G) technology interference on DTT in the 700 MHz band. Results are presented in two mainly lines: measures of protection ratios between technologies and link budget analysis. From these results, two possible solutions can be recommended: using a low-pass filter at the DTT receiver input or rejecting the use of the latest available DTT channel (channel 51). In this document, the state of the art, theoretical developments, methodology and instrumentation are also included.

Autor: Manuel Fuentes Muela, email: mafuemue@iteam.upv.es

Director 1: David Gómez Barquero, email: dagobar@iteam.upv.es

Director 2: Narcís Cardona Marcet, email: ncardona@iteam.upv.es

Fecha de entrega: 05-09-13

ÍNDICE

I. Enfoque y Objetivos	4
I.1. Enfoque.....	4
I.2. Objetivos	4
II. Conceptos Teóricos.....	5
II.1. Capa física del estándar DVB-T2: televisión digital terrestre.....	5
II.2. Capa física del estándar LTE: sistema IMT de cuarta generación (4G)	6
III. Estado del Arte	10
III.1. Estudios de interferencia en la banda de 800 MHz.....	10
III.2. Estudios de interferencia en la banda de 700 MHz.....	14
IV. Escenarios de Convivencia Escogidos	15
V. Metodología	17
V.1. Instrumentación empleada.....	17
V.2. Señales utilizadas DVB-T2 y LTE	19
V.3. Medida de márgenes de protección.....	20
V.4. Balance de enlace	23
VI. Resultados.....	26
VI.1. Márgenes de protección obtenidos.....	26
VI.2. Balance de enlace	31
VII. Conclusiones	36
Anexo A: Definiciones de Términos Empleados en Laboratorio.....	37
Anexo B: Especificaciones de Filtros Empleados en Laboratorio	38
AGRADECIMIENTOS	39
BIBLIOGRAFÍA	39

I. ENFOQUE Y OBJETIVOS

I.1. Enfoque

El presente documento corresponde a la Tesina Final de Máster de Manuel Fuentes Muela, correspondiente al Máster Oficial en Tecnologías, Sistemas y Redes de Comunicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (UPV). Este trabajo ha sido realizado en el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) por medio de una Beca de Especialización, y forma parte de del contrato de consultoría N° 000069 de 2013 entre la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia e Ingenia Telecom, S.L., para la elaboración de los estudios técnicos de convivencia y compatibilidad entre los servicios de televisión digital terrestre con estándar DVB-T2 con otros servicios de comunicaciones que operan en bandas adyacentes: *Long Term Evolution* (LTE), sistemas de radio convencional y *trunking*.

La banda de TDT en Colombia (único país latinoamericano que utilizará DVB-T2) abarca desde los 470 a los 698 MHz con canalización 6 MHz. La parte superior de la TDT se ha asignado a las comunicaciones móviles de cuarta generación LTE, cuya canalización corresponde a la canalización Asia Pacífico que rige la *Asia-Pacific Telecommunity* (APT). En esta tesina se realiza un estudio técnico de convivencia entre la red de TDT DVB-T2 en el borde superior de 698 MHz y la red de telefonía celular 4G LTE en la banda de 703 a 748 MHz para el canal ascendente.

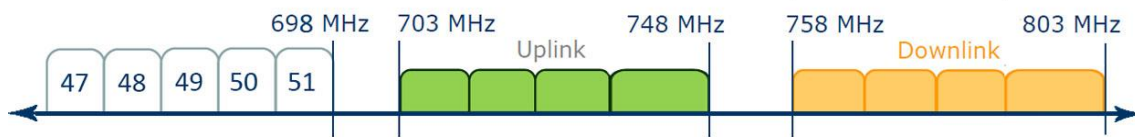


Fig. 1. Canalización colombiana. El último canal TDT es el 51, con frecuencia de corte 698 MHz. LTE formado por dos bloques de 45 MHz, comenzando en 703 MHz. Banda de guarda 5 MHz entre tecnologías.

Se considerará como objeto de estudio los dos últimos canales de TDT: Canal 50 (686-692 MHz) y 51 ($f_c = 692-698$ MHz), aunque también se realizarán medidas sobre los canales 48 y 49.

I.2. Objetivos

- Descripción del estado del arte actual en relación con la convivencia entre servicios de TDT y sistemas de comunicaciones LTE situados en la banda superior a estos. Este estado del arte incluye los estudios y acciones que se han llevado a cabo por parte de otros países, especialmente europeos.
- Definición y descripción de los posibles escenarios donde se puede dar interferencia entre las diferentes tecnologías que operan en Colombia.
- Descripción de la metodología a seguir en este proyecto para el análisis de interferencias entre DVB-T2 y los sistemas de comunicaciones móviles LTE en el escenario Colombiano basado en medidas de laboratorio y análisis de balance de enlace.

- Validación de la metodología anterior mediante el contraste y comparación con estudios ya existentes.
- Realización de estudios consistentes en la obtención de márgenes de protección entre tecnologías y cálculo del balance de enlace para un correcto funcionamiento en los escenarios planteados.
- Propuesta de posibles soluciones para la mitigación de interferencias, en línea con lo establecido por otros países. Estas soluciones principalmente son:
 - Utilizar un filtro paso-bajo a la entrada del receptor de TDT (filtro doméstico).
 - Utilizar un filtro paso-bajo entre la antena y el amplificador (filtro profesional).
 - Desestimar el uso del último canal de TDT (Canal 51), aumentando la banda de guarda de 5 a 11 MHz.

II. CONCEPTOS TEÓRICOS

Antes de nada, es necesario definir brevemente aquellas características de capa física de los estándares bajo estudio que pueden afectar tanto a los resultados teóricos como a los de laboratorio.

II.1. Capa física del estándar DVB-T2: televisión digital terrestre

DVB-T2 es la extensión del estándar de televisión DVB-T, expedido por el consorcio DVB, e ideado para la transmisión de difusión de televisión digital terrestre. Este sistema transmite audio digital comprimido, vídeo y otros datos en *Physical Layer Pipes* (PLP), utilizando la modulación OFDM. La mayor tasa de bits que ofrece, con respecto a su predecesor DVB-T, hace que sea un sistema más adecuado para transmitir señales de televisión de alta definición HD (aunque muchos organismos de radiodifusión siguen utilizando DVB-T).

Con el nuevo estándar, la mejora supone un 30% más de capacidad de la que era posible con DVB-T. Por ejemplo, suponiendo una capacidad de cerca de 40 Mbps, es posible en un multiplexado DVB-T2 dado, proporcionar entre 4 y 6 servicios de alta definición, o entre 15 y 20 servicios de definición estándar. En cualquiera de los casos, el resultado será un menor coste en la transmisión de cada servicio.

DVB-T2 no ha sido diseñado para reemplazar DVB-T a corto o medio plazo; más bien los dos estándares coexistirán en el mercado algún tiempo. En Colombia, ambos estándares convivirán durante el plazo de 3 años.

II.1.1. Características técnicas frente a interferencias

Las principales características de DVB-T2 [1] que afectan a la robustez frente a interferencias son:

- Codificación FEC: configurable de acuerdo a dos parámetros:
 - Tamaño de LDPC: puede ser de 16200 o 64800 bits. Influye en la capacidad y la latencia del sistema DVB-T2.

- *Code Rate*: 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6.

- Esquema de modulación: QPSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM. Se corresponden, respectivamente, con 2, 4, 6 y 8 bits por símbolo.
- Constelaciones rotadas: consiste en rotar todos los puntos de la constelación en un ángulo determinado. Se utiliza para poder reconstruir los símbolos a partir de un único eje de la constelación. La componente I y Q son enviadas en diferentes celdas, lo que en caso de desvanecimientos aumenta la probabilidad de que solo una componente I o Q de un símbolo se vea afectada.
- Patrón de portadoras piloto: Las portadoras piloto son símbolos con amplitud y fase conocida por los receptores que son usadas para estimar/ecualizar las características del canal en tiempo y frecuencia. En DVB-T2 existen 8 patrones de portadoras pilotos adaptados a distintos escenarios (espaciados en tiempo y frecuencia).
- Tamaño de la FFT: incluye nuevos tamaños de FFT que permiten por un lado mejorar el rendimiento de las redes SFN (tamaños más grandes, 16K o 32K) y por otro mejorar el rendimiento en movilidad (1K o 4K). Existen 6 valores distintos de tamaño de FFT: 1K, 2K, 4K, 8K, 16K y 32K.
- Modo extendido FFT: define el número de portadoras activas en un símbolo OFDM. Al incrementar el número de portadoras OFDM se influye en el rendimiento frente a interferencias cocanal y de canal adyacente. Su utilización está recomendada para tamaños de FFT mayores de 8k.
- Mecanismos PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*): mecanismos consistentes en reducir los picos de potencia del amplificador hasta un 25%, y al mismo tiempo reducir el nivel de emisiones fuera de banda de la señal. Existen dos mecanismos: Reserva de Tonos (TR) y Extensión Activa de la Constelación (ACE).
- Ancho de banda: El ancho de banda en T2 influirá en la ICI o interferencia entre portadoras, pues a mayor ancho de banda, y por tanto, mayor espaciado entre portadoras menor será el problema de ICI en el mismo escenario de propagación, por lo que la utilización de mayores anchos de banda nos proporcionan mayor robustez en términos de ICI para un mismo tamaño de FFT.

II.2. *Capa física del estándar LTE: sistema IMT de cuarta generación (4G)*

LTE es un estándar de comunicación inalámbrico de alta velocidad para telefonía móvil y terminales de datos de cuarta generación 4G. Está basado en las tecnologías de red 2G GSM/EDGE y 3G UMTS/HSPA, incrementando la capacidad y velocidad utilizando diferentes interfaces radio y mejorando la red.

LTE tiene las siguientes características:

- Alta eficiencia espectral con utilización de sistemas MIMO.
- Ancho de banda adaptativo: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- Modulaciones utilizadas en UL/DL: QPSK, 16-QAM y 64-QAM.
- Permite trabajar en diferentes bandas frecuenciales.
- Interfuncionamiento con otros sistemas como EV-DO.
- Red OFDM de frecuencia única.
- Velocidades de pico:
 - Bajada: 326,5 Mbps para MIMO 4x4 y 172,8 Mbps para MIMO 2x2 (Release 8).
 - Subida: 86,5 Mbps (Release 8).
- Óptimo para desplazamientos *Doppler* de hasta 15 km/h. Permite hasta 500 km/h.
- Más de 200 usuarios por celda para 5 MHz.
- Tamaño óptimo de las celdas 5 km.
- El *handover* entre tecnologías 2G (GSM - GPRS - EDGE), 3G (UMTS - W-CDMA - HSPA) y LTE es transparente.
- La 2G y 3G están basadas en técnicas de Conmutación de Circuito (CS) para la voz mientras que LTE propone la técnica de Conmutación por paquetes IP (PS).
- Mejora y flexibilidad del uso del espectro (FDD y TDD) haciendo una gestión más eficiente del mismo, lo que incluiría servicios *unicast* y *broadcast*.

II.2.1. *LTE en Downlink*

a) *Estructura*

La multiplexación utilizada en el enlace Downlink es OFDMA, debido a su gran eficiencia espectral y a su reducción del tiempo de latencia. En OFDMA, los usuarios tienen asignados un número específico de subportadoras durante una cantidad de tiempo predeterminada. Esto es lo que se conoce en las especificaciones de LTE como *Resource Blocks* (RB) [2].

b) *Canales físicos*

Una característica común de los canales físicos es que todos ellos transmiten la información de las capas superiores en la pila de LTE. Se pueden clasificar en:

Canales de transporte:

- *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH): canal de datos.
- *Physical Broadcast Channel* (PBCH): utilizado para acceso inicial a la celda.
- *Physical Multicast Channel* (PMCH): utilizado para transmitir servicios y archivos multimedia broadcast y/o multicast (MBMS).

Canales de control:

- *Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)*: transmite el Indicador de Formato de Control (CFI), que incluye el número de símbolos OFDM usados para canal de control.
- *Physical Downlink Control Channel (PDCCH)*: asignación de recursos entre usuarios.
- *Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)*: transmite el HARQ ACK/NAK.

c) *Diagrama de bloques de un canal físico DL*

Para transmitir los canales físicos hacia el terminal de usuario, se sigue la siguiente cadena:

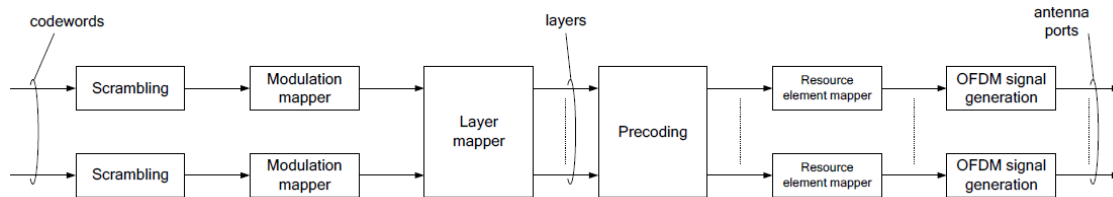


Fig. 2. Diagrama de bloques del proceso de generación del canal físico *Downlink* [2].

La Fig.2 muestra los pasos a seguir para generar una señal en banda base de un canal físico. En primer lugar se realiza una aleatorización de los bits codificados, seguido de la modulación de estos, generando los símbolos de valor complejo conjugados. Después se realiza un mapeo de los símbolos en una o más capas, se realiza una precodificación de estos y se mapean sobre los distintos *Resource Elements* correspondientes. Finalmente, se genera la señal OFDM en el dominio del tiempo para cada puerto de antena. La salida de este bloque se transmite directamente hacia el terminal de usuario.

II.2.2. *LTE en Uplink*

a) *Estructura*

LTE *Uplink* utiliza una multiplexación diferente a OFDMA. En este caso se utiliza SC-FDMA, que no es más que una OFDMA con una transformada de Fourier previa para conseguir una mayor variabilidad y flexibilidad para el acceso de los usuarios. Utilizar SC-FDMA reduce el *Peak Average Power Rate (PAPR)*, es decir, la potencia de pico necesaria, lo cual se traduce en que el terminal móvil necesite una menor potencia de transmisión para ofrecer la misma cobertura que con OFDMA. La señal en tiempo y frecuencia tiene un comportamiento totalmente diferente, como se observa en la Fig. 3.

Como en *Downlink*, la señal LTE en *Uplink* se divide en diferentes RB (en tiempo y frecuencia), de forma que cada usuario pueda utilizar un número determinado de ellos para enviar datos a la estación base.

- En cada *slot*, la señal transmitida se describe por lo siguiente:
 - $N_{RB}^{UL} \times N_{SC}^{RB}$: número de RB por enlace, que depende del ancho de banda utilizado por número de subportadoras por RB, siempre 12.
 - N_{symb}^{UL} : símbolos SC-FDMA, que depende de la modulación.
- Cada RB tiene $N_{symb}^{UL} \times N_{SC}^{RB}$ Resource Elements (RE), y se corresponde con un slot y 180 KHz del ancho de banda total (15 kHz es siempre la separación entre subportadoras).

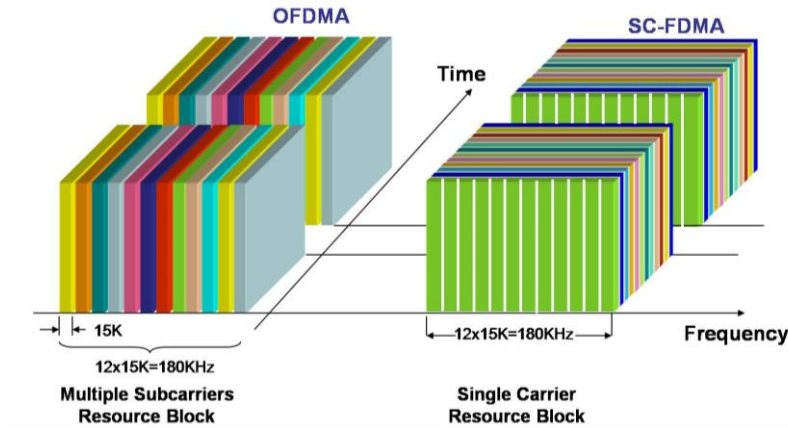


Fig. 3. Diferencia en la asignación de recursos con OFDMA y SC-FDMA en tiempo y frecuencia.

b) Canales Físicos

- *Physical Uplink Shared Channel (PUSCH)*: para envío de datos (con o sin *frequency hopping*).
- *Physical Uplink Control Channel (PUCCH)*: se utiliza principalmente para:
 - Transmisión de ACK/NACK, CQI/PMI, SR.
 - Transmisión de datos de control mediante los RB de ambos extremos en frecuencia, o mediante *frequency hopping* en el último slot.
- *Uplink Control Information (UCI)* con PUSCH.
- *Physical Random Access Channel (PRACH)*: utilizado por el móvil para acceso al medio.

c) Diagrama de bloques de un canal físico UL

Para transmitir los diferentes canales de usuario, LTE UL implementa una cadena de bloques muy similar a la utilizada en DL:

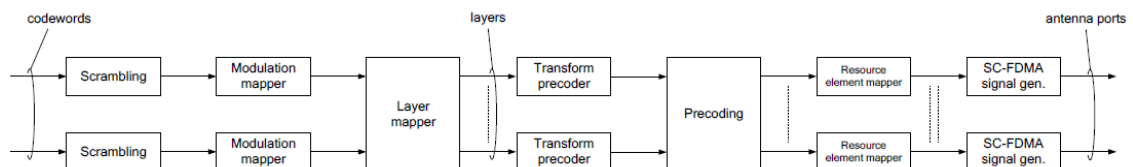


Fig. 4. Diagrama de bloques del proceso de generación del canal físico *Uplink* [2].

En este caso, se siguen los mismos pasos que en Downlink, cambiando únicamente el último bloque. El bloque SC-FDMA sitúa los símbolos correspondientes a cada terminal en tiempo y frecuencia para transmitir directamente a la estación base (BS).

III. ESTADO DEL ARTE

El estudio de convivencia de servicios de TDT y la tecnología celular 4G en la banda del Dividendo Digital (DD) ya ha sido analizado en varios países, siendo pionero el Reino Unido. Se observó que las redes celulares 4G podrían interferir las señales de TDT de los dos canales más altos adyacentes a la banda del DD.

La Conferencia Regional de Radiocomunicaciones (*Regional Radiocommunication Conference, RRC*) de la Región 1 (Europa y África) de la ITU (*International Telecommunications Union*) de 2006 acordó utilizar la banda UHF (470-862 MHz con canalización 8 MHz, canales radioeléctricos 21 a 69) para servicios de radiodifusión. Sin embargo, en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007 (*World Radiocommunication Conference, WRC-07*), la ITU decidió asignar a LTE la parte superior de la banda UHF desde 790 hasta 862 MHz [3].

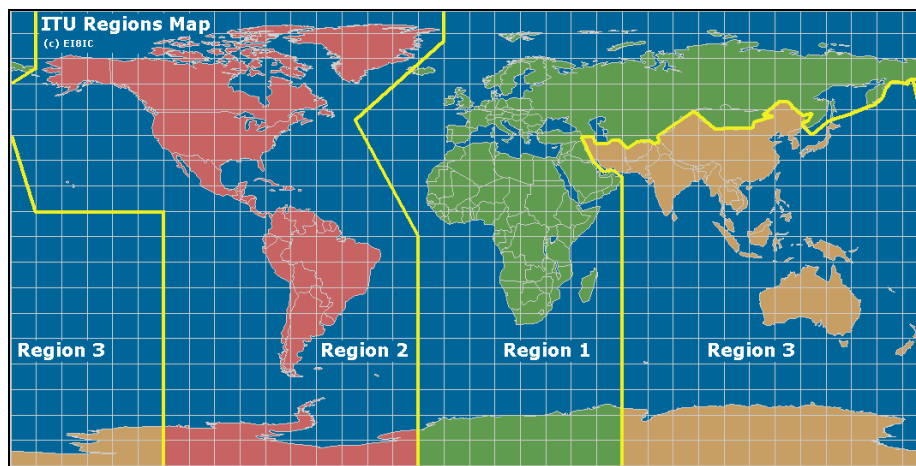


Fig. 5. Mapa de Regiones determinadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).

III.1. Estudios de interferencia en la banda de 800 MHz

La problemática entre la TDT y la 4G en la banda del DD europeo ha sido objetivo de numerosos estudios por parte de distintas organizaciones a nivel mundial.

III.1.1. Estudios realizados por Organismos Internacionales

a) CEPT

En su documento “*The identification of common and minimal (least restrictive) technical conditions for 790 - 862 MHz for the digital dividend in the European Union*” [4], publicado en octubre de 2009, propone unas condiciones técnicas mínimas, definiendo la máscara de bloque de un canal LTE para que no interfiriera a TDT. En este estudio, se llegó a las siguientes conclusiones:

- Compatibilidad entre BS LTE y receptores TDT: se debe especificar un límite de PIRE en la estación base LTE. Se recomienda un rango de entre 56dBm/5MHz y 64dBm/5MHz.

- Compatibilidad entre terminales LTE y receptores TDT: se necesita una emisión en el terminal LTE de -50dBm/8MHz fuera de bloque (OOB) para asegurar la protección en sistemas de TV con recepción fija. En el caso de protección para TV con recepción portable, se requiere una potencia fuera de bloque OOB de -65 dBm/8MHz. El límite de PIRE para el terminal móvil LTE es de 23 dBm.
- Banda de guarda necesaria entre LTE Uplink y TDT: para recepción fija, la banda de guarda debe ser de al menos 7 MHz (con filtro) o 12 MHz (sin filtro). Estas medidas indican que posiblemente sea necesario la utilización de un filtro para el caso a evaluar en Colombia ya que se ha adoptado una banda de guarda de tan sólo 5 MHz y la recepción portátil es la más extendida en el país.

b) *DIGITALEUROPE*

En su documento “*Recommendations on DTT interference avoidance from LTE transmissions*” [5] dividió los tipos de interferencia y sus posibles soluciones en tres categorías:

- Interferencia debido a saturación en los amplificadores y/o sistemas de distribución.
- Interferencia debido a emisión OOB de LTE cayendo en la banda de recepción TDT.
- Interferencia específica del receptor TDT.

A partir de estos estudios, se recomendó:

- Gestionar la introducción de LTE de una manera proactiva (información adecuada a consumidores, asistencia técnica, etc.) y dar soluciones como proporcionar filtros a aquellos que los necesiten.
- Creación de una alianza entre todos los operadores con licencia en la banda de 800 MHz, como realizó UK con la aparición de at800 (ver III.1.2).

Para este estudio, se tomó como referencia las respuestas en frecuencia de los filtros recomendada por Ofcom en el documento “*Technical analysis of interference from mobile network base stations in the 800 MHz band to digital terrestrial television*” [6].

c) *Digital Video Broadcasting (DVB)*

En su informe “*Study on specification and use of in-line filters to reduce interference in broadcast bands from mobile base stations*” [3], los estudios se centraron en la utilización o no del filtro externo antes del receptor de televisión, pues se considera la forma más efectiva de mitigación de la interferencia LTE.

En este informe, llegaron principalmente a dos conclusiones:

- Se determinó que el filtro externo debe situarse después del cable de antena de TV.
- Para el sistema de distribución de la antena de la comunidad, lo más probable es que se necesite un filtro de mayor selectividad, aunque se puede adoptar la decisión de dividir el coste total entre todos los vecinos de la comunidad.

d) *International Telecommunication Union (ITU)*

Algunos de estos estudios y recomendaciones fueron recolectados en la Recomendación ITU-R BT.2033: “*Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands*” de enero de 2013 [8]. Esta recomendación servirán como referencia para comparar con las medidas realizadas en el laboratorio y poder validar así los resultados obtenidos.

III.1.2. *Estudios realizados en el Reino Unido*

En Reino Unido, se analizó el rendimiento tanto de DVB-T como de DVB-T2, con recepción fija sobre tejado. Los modos de referencia de TDT utilizados fueron:

Estándar	Modulación	CR	FFT	GI	Data Rate (Mbit/s)	BW (MHz)
DVB-T	64-QAM	2/3	8k	1/32	24,1	8
DVB-T2	256-QAM	2/3	32k	1/128	40,2	8

Tabla 1. Parámetros DVB-T y DVB-T2 de la señal deseada [9].

a) *Ofcom*

Regulador oficial del espectro radioeléctrico en el Reino Unido. En el estudio: “*Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interference into DTT Receivers*” [9] se realizaron estudios de interferencias junto a ejercicios de planificación. Se evaluaron Filtros Paso-bajo domésticos diseñados específicamente para Ofcom en los canales 56, 57, 58, 59 y 60 por las empresas Technetix y Braun.

Se llegó a las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- La carga de tráfico del enlace tiene una influencia importante en los resultados obtenidos.
- Los resultados para DVB-T y DVB-T2 son similares, pues se ha utilizado un modo de DVB-T2 con la misma robustez, y por tanto cobertura, que el modo de DVB-T.
- Los receptores son más susceptibles conforme aumenta el nivel de señal útil.
- Se observó que sería necesaria la utilización de un filtro paso bajo a la entrada del receptor de TDT en aquellas hogares cercanos estaciones base 4G y que pertenezca a regiones donde utilicen los canales 59 y/o 60.

b) *at800*

at800 se fundó para representar a los operadores móviles del Reino Unido que lanzarán servicios de 4G en la banda de 800 MHz (EE, Telefónica UK (O2), Three y Vodafone). at800 es responsable de prever qué hogares pueden estar afectados durante el despliegue de la red 4G, e informar antes de que ocurra la interferencia y solucionarlo en el caso de que se vean afectados.

Tras pruebas en varias ciudades (a día 6 de junio de 2013 habían finalizado estudios de campo en Londres, Brighton, York y West Midlands) at800 ha estimado la magnitud del impacto. Si el lanzamiento a nivel nacional refleja los resultados observados durante estas pruebas, at800 no

espera que haya más de 90,000 hogares, con TDT como su servicio de televisión principal, afectados por el despliegue de redes 4G [10].

Para los casos en los que se detecten interferencias, un único filtro doméstico de manera gratuita. En caso de que la vivienda utilice un amplificador a la salida de la antena en el tejado, un instalador acreditado acudirá al domicilio y será el encargado de situar un filtro de mayor calidad antes del amplificador. Estos filtros suponen un coste de entre 15 y 30 euros en el caso de filtros domésticos, y entre 70 y 100 euros en el de filtros más selectivos comunitarios o profesionales.

III.1.3. Otros países de Europa

a) Irlanda

La *Commission for Communications Regulation (ComReg)* llevó a cabo el estudio “*Analysis of the Effectiveness of Currently Available LTE Filters at Reducing and Eliminating RF Overload in Masthead Amplifiers in the Presence of LTE Signals*” [11]. Hicieron tanto medidas de laboratorio como de campo.

En Irlanda, se ha optado por no utilizar el canal 60, con lo que la banda de guarda entre ambas tecnologías asciende a 9 MHz. Se llegó a las siguientes conclusiones:

- Existe un número razonable de sistemas de recepción TDT en los hogares con alto riesgo de ser susceptibles a la sobrecarga RF en futuras presencias de señales LTE.
- En la gran mayoría de hogares no se requiere la utilización del amplificador de mástil, pero en las situaciones donde sí se requiera, se recomienda su utilización junto con un filtrado apropiado.

b) Francia

La Agencia Nacional de Frecuencias de Francia (ANFR) realizó medidas de campo en la localidad de Laval para analizar el rendimiento de receptores DVB-T en presencia de señales interferentes LTE en la banda de 800 MHz. Se evaluaron los canales 57, 58 y 60 de DVB-T como señal útil.

Inicialmente, se consideró que en media, 2,3 por cada 1000 hogares se verían afectados por este tipo de interferencia, aunque debido a las condiciones de este estudio (uso de transmisiones discontinuas LTE) esta tasa puede ser mayor [13].

Se aconsejó la introducción de un filtro selectivo (profesional) entre la antena y el amplificador para la reducción de interferencias, como en Irlanda.

c) Alemania

En Alemania no se han realizado estudios de interferencias, a pesar de que en la actualidad la red LTE trabajando en la banda de 800 MHz ya está operativa, con más de 4600 estaciones base [14]. Según el Informe de digitalización presentado en 2012 “*Bundesnetzagentur 2012 Annual Report Magazine*”, aproximadamente 4,8 millones de los 38 millones de hogares alemanes estaban

utilizando DVB-T en ese año, alcanzando tan sólo el 12,5% de penetración, ya que allí está más extendido el uso de televisión por cable.

d) España

En España, al igual que sucedió en Reino Unido, el coste del mantenimiento y el suministro de filtros a los hogares con interferencia debe ser asumido por la compañía concesionaria del servicio (RD 458/2011), pues se prevé que dicha situación afectará al 8% de los hogares españoles [15].

En armonía con las decisiones adoptadas en Europa, la banda del DD será asignada a servicios de comunicaciones móviles. Dicha asignación de la banda entrará en vigor a partir del 17 de junio de 2015. En Noviembre de 2012 se realizaron pruebas de operación de la tecnología 4G en Zamora así como pruebas de coexistencia con el servicio de televisión. A día de hoy no hay resultados oficiales, pero se anunció que existe la posibilidad de que se den interferencias entre ambas tecnologías que se han de tener en cuenta a la hora de realizar el despliegue de la red.

III.2. Estudios de interferencia en la banda de 700 MHz

III.2.1. Estudios realizados en Europa

En Europa está sujeta a evaluación la asignación de servicios LTE en la banda inferior de 694 - 790 MHz, en la WRC-15, para la asignación del Segundo Dividendo Digital (DD2), coincidiendo con la banda de 700 MHz que se ha asignado en Colombia.

Actualmente, la CEPT ha realizado el estudio “WRC-15 agenda item 1.2: lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility” [17], donde se indica el nivel de emisiones no deseadas en la banda inferior a 694 MHz para proporcionar la protección adecuada a la TDT en los canales 48 e inferiores. Para el DD2, la posible configuración del espectro sería:

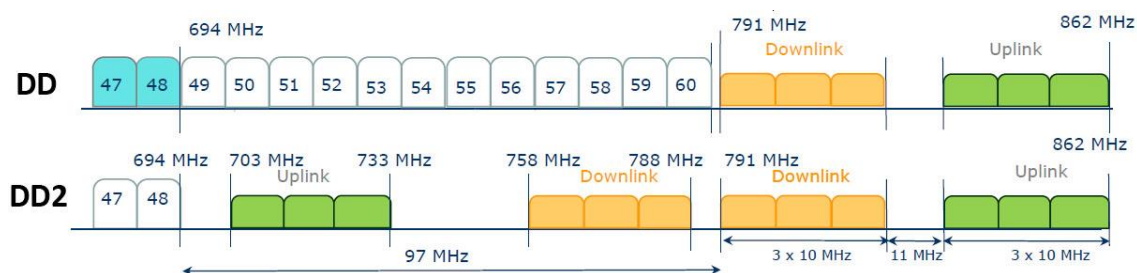


Fig. 6. Canalización europea con el DD y posible canalización con el nuevo DD2.

La banda de guarda con el nuevo Dividendo Digital es de 9 MHz. El enlace LTE situado en la parte inferior de la banda de 700 MHz es el Uplink, el mismo que se utiliza en la canalización colombiana (por economía de escala).

Las conclusiones a las que se llega en este documento, utilizando el modo de referencia DVB-T inglés empleado tanto por Ofcom como por otras organizaciones (ver Tabla 1) son:

- Recepción fija *outdoor*: la distancia horizontal entre la antena TDT y terminal LTE para el peor caso es de 22 metros. Además, se puede dar un nivel máximo OOB en el terminal móvil de entre -58,6 y -52,6 dBm/8MHz.
- Recepción portable indoor: Asumiendo los mismos niveles de OOB para recepción outdoor, y asumiendo un ACS = 80dB, se necesitan distancias mínimas entre antena TDT y terminal LTE de entre 11 y 1 dB, dependiendo de las pérdidas por penetración existentes.

III.2.2. Estudios realizados en Australia

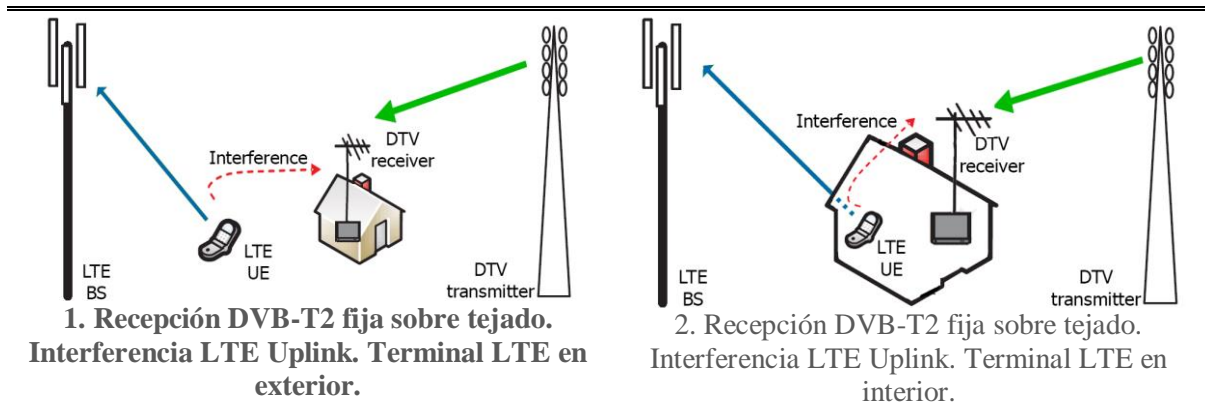
En Australia, en el 9º *meeting* del *APT Wireless Group* (AWG-09), en septiembre de 2010, se acordó que es necesaria una banda de guarda inferior de 5 MHz en las frecuencias de 698 a 703 MHz (como en el caso colombiano).

En el 10º *meeting* de *APT Wireless Group* (AWG-10), resumido en el documento “*Required LTE UE out of band emission limits to ensure coexistence of mobile services and adjacent broadcasting services below 698 MHz*” [18], se indicó que los niveles OOB de LTE Uplink para una correcta coexistencia serían como máximo de entre -59dBm/MHz y -61dBm/MHz.

En el 11º *meeting* de *APT Wireless Group* (AWG-11), descrito en el documento “*Required LTE UE out-of-band emission limits to ensure coexistence of mobile services and adjacent broadcasting services below 698 MHz*” [19], Australia llevó a cabo un estudio probabilístico y empírico de coexistencia entre ambas tecnologías. Los resultados probabilísticos mostraron que con un MP de entre -35 y -50 dB, considerado para canales LTE UL de 5 MHz, la probabilidad de interferencia se reduce a un 1%. En el estudio empírico, los márgenes medidos (con una banda de guarda de 9 MHz) se situaron en -45 y -22 dB para 5 y 20 MHz de ancho de banda LTE, respectivamente.

IV. ESCENARIOS DE CONVIVENCIA ESCOGIDOS

Los posibles escenarios que se pueden dar cuando la señal de TDT DVB-T2 es interferida por señales 4G LTE son los siguientes:



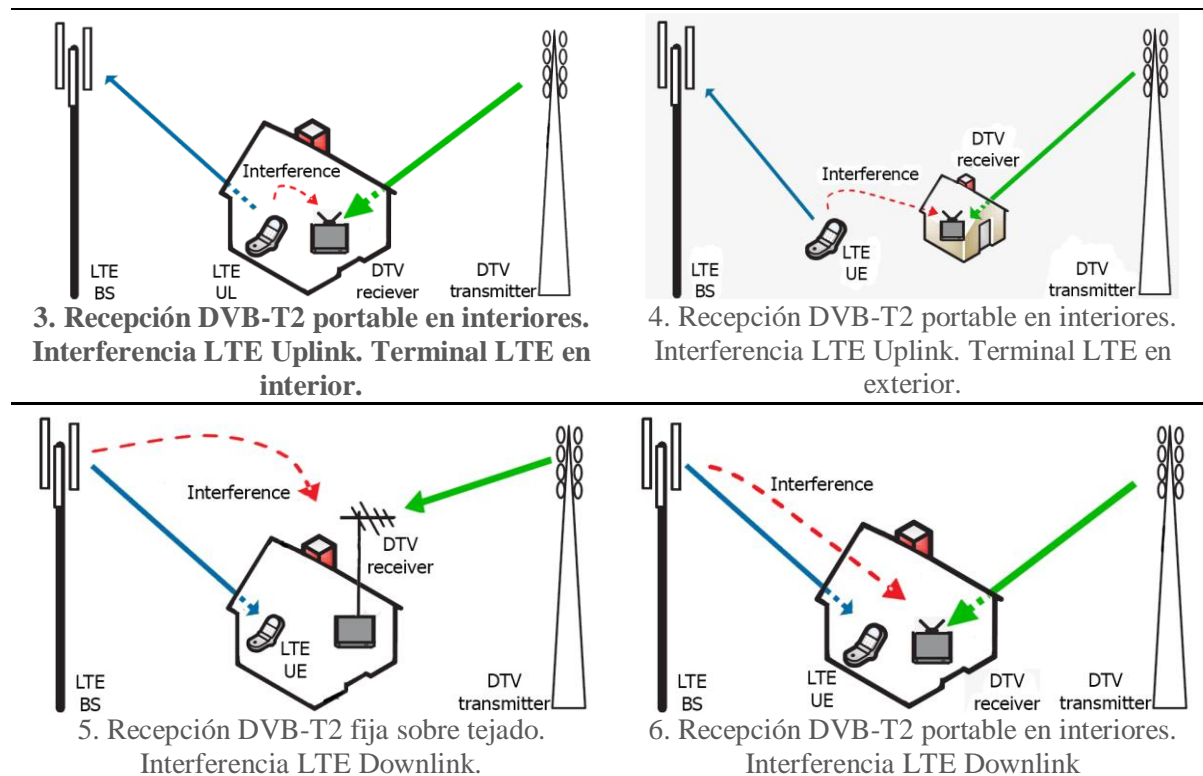


Fig. 7. Escenarios a estudiar entre la red de TDT DVB-T2 en el borde superior de 698 MHz y la red de telefonía celular 4G LTE en la banda de 703 a 748 MHz.

En el **escenario 1**, se estudiará el peor caso posible, es decir, aquel en el cual el terminal móvil se encuentra a la distancia exacta para provocar la mayor interferencia posible y la antena fija TDT se encuentra justo en el borde de la celda, y por tanto, recibe la potencia mínima necesaria para su correcto funcionamiento.

En el escenario 2 el terminal se encuentra en el interior del hogar, y por tanto existirán pérdidas por penetración en los muros adicionales. Entonces, cualquier posible interferencia será menos crítica de lo que lo puede ser con el terminal fuera del hogar, donde hay visión directa con la antena. Por este motivo, el escenario 2 se ha desestimado como objeto de estudio.

En el **escenario 3**, con recepción portable en interiores, se evaluará también el peor caso, es decir, se asume que el terminal móvil transmite con la máxima potencia posible (23 dBm), y el receptor TDT se encuentra en el borde de su celda, obteniendo la mínima potencia necesaria. Este caso se extenderá al escenario 4, donde las posibles soluciones serán las mismas que para el escenario 3, aunque menos restrictivas.

En los escenarios 5 y 6 se evalúa el caso LTE en Downlink, interfiriendo sobre antena fija con recepción en tejado y sobre antena portable, respectivamente. Estos dos escenarios también se han desestimado, pues se ha considerado que al haber una banda de guarda de 60 MHz entre el canal 51 de TDT y el enlace Downlink, no existirá interferencia.

V. METODOLOGÍA

V.1. Instrumentación empleada

a) Transmisión DVB-T2

- R&S SMU 200A Vector Signal Generator: encargado de la transmisión de señales digitales mediante la carga de archivos IQ/RF de cualquier estándar (en este caso DVB-T2). Dispone de dos generadores de señal independientes en un único instrumento. Permite modificar la potencia de pico y frecuencia central RF de los canales de transmisión, entre otras.



Fig. 8. R&S SMU 200A Vector Signal Generator.

- Transmisor DekTec T2Xpress DVB-T2 Signal Generator: software utilizado como transmisor de señales DVB-T2. Permite transmitir en tiempo real o guardar las señales DVB-T2 generadas en ficheros IQ para ser cargados en otros dispositivos, como por ejemplo en el R&S SMU 200A.

b) Recepción y Análisis de Señal DVB-T2

- Televisión SONY BRAVIA: receptor empleado para medir las márgenes de protección de señales DVB-T2 a 6 MHz, interferidas por cualquier otro tipo de señal (en este caso LTE).
- Set-Top Box Multitech DT2-M007: segundo receptor TDT utilizado para obtener más resultados sobre los márgenes de protección de señales DVB-T2 a 6 y 8 MHz.
- Set-Top Box Transmundialtv.com CTM-900HD: tercer receptor empleado para obtener más resultados sobre los márgenes de protección de señales DVB-T2 a 6 y 8 MHz.



Fig. 9. Televisión DVB-T2: SONY BRAVIA (arriba), Set-Top Box Multitech (abajo, izq.) y Set-Top Box Transmundialtv (abajo, der.).

V.1.2. LTE

a) Transmisión LTE

- Aeroflex SGD: generador de señales (LTE, EV-DO, Wi-Fi, Bluetooth, etc.) con interfaz de usuario y pantalla táctil, que permite modular la señal deseada en IQ.
- Simulador Tx LTE en UL-DL IS-Wireless: empleado para generar pares IQ en transmisión, tanto en Uplink como en Downlink, de forma que se puedan utilizar como señal útil o interferente contra DVB-T2.

b) Recepción y Análisis de Señal LTE

- Aeroflex SVA: analizador vectorial diseñado para medir determinados parámetros LTE que garanticen una cierta calidad de comunicación, tales como: potencia de canal útil y adyacente (RMS), ancho de banda útil, EVM, error de fase, etc. Permite visualizar también el espectro resultante, la modulación y el nivel de ruido.

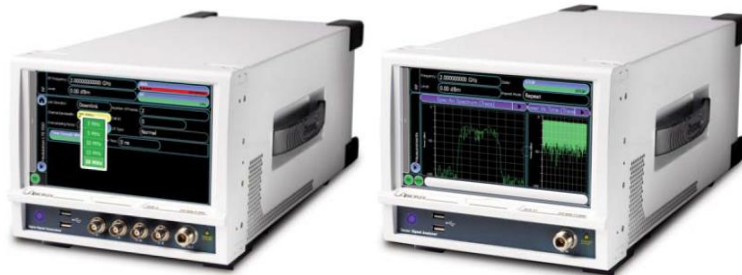


Fig. 10. Aeroflex SGD, utilizado para generar señales LTE (izquierda), y Aeroflex SVA, utilizado para recibir y medir señales LTE (derecha).

V.1.3. Filtros Paso Bajo Utilizados

Para poder evaluar el impacto real que puede tener la utilización de filtros en la banda de 700 MHz (hasta ahora todos los existentes son para 800 MHz), se ha contactado con Televés y Fagor, los cuales se han encargado de **fabricar filtros específicos para este proyecto**. Dichos filtros pueden verse en la Fig.11:



Fig. 11. Filtros de cavidades diseñados exclusivamente para este proyecto (canalización colombiana) y empleados en las medidas de laboratorio para la obtención de ACS_{filtro} y márgenes de protección. Filtros Televés 1 y 2 (izquierda y centro) y Fagor 698 LBF C.

Tanto la respuesta en frecuencia de los filtros como la caracterización realizada en laboratorio para la obtención de parámetros como ACS_{filtro} o atenuación de canal 59 y 60 TDT están descritas en el Anexo B de este documento.

V.1.4. Otros

- Analizador vectorial R&S ZVRE.
- Aislador MTC C189.
- Filtro Paso Banda K&L.
- Cables y conectores.

V.2. Señales utilizadas DVB-T2 y LTE

V.2.1. Generación y aspecto de señales DVB-T2

La señal útil DVB-T2 que se ha utilizado en las medidas de laboratorio es la utilizada por la Radio Televisión Nacional de Colombia (RTVC). Sus principales características son:

Modulación	CR	FFT	Modo	GI	Patrón Portadoras	BW (MHz)
64-QAM	3/5	32k	Extendido	1/8	PP3	6

Tabla 2. Parámetros de la señal útil DVB-T2 utilizada en las medidas de márgenes de protección.

Para su obtención, se ha empleado el transmisor DekTec T2Xpress DVB-T2. Tras la configuración de todos los parámetros de la señal, se generaron 10 segundos de vídeo en IQ. Tras cargar esta señal en el R&S SMU 200A *Vector Signal Generator* (realizando un cambio de formato de la señal para su posible lectura), y observarla en un analizador vectorial, su aspecto es:

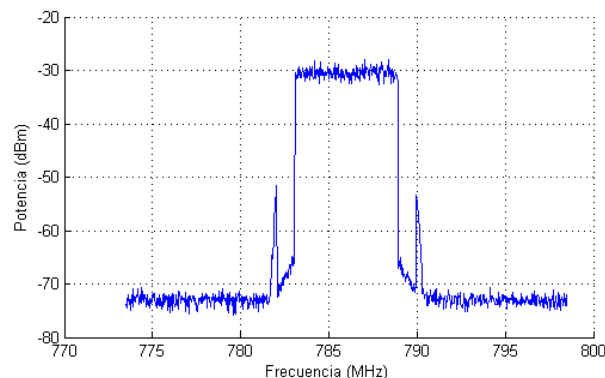


Fig. 12. Espectro de la señal DVB-T2 para un ancho de banda de 6 MHz.

También se han generado otras señales con modulaciones (QPSK y 16-QAM) y *Code Rates* diferentes, para evaluar cómo afecta su uso a los márgenes de protección. También se han generado señales con un ancho de banda de 8 MHz para la validación del proceso de medida.

V.2.1. Generación y aspecto de señales LTE FDD

Los principales parámetros de las señales LTE empleadas son los utilizados por el CEPT, Ofcom y otras organizaciones en sus estudios:

Modulación	CR	Modelo de canal	FFT	GI	BW (MHz)	RB
QPSK	1/3	CQI4	1024	Normal	10	50

Tabla 3. Parámetros de la señal interferente LTE UL utilizada en ITU-R BT.2033 [8].

Como se ha indicado en puntos anteriores, los márgenes de protección cambiar principalmente en función del ancho de banda de la señal y del estado de la carga de tráfico existente. Por ello, se han generado tanto para Uplink como para Downlink señales de 10 MHz en tres estados diferentes: IDLE, 50% de carga y 100% de carga o *fully loaded*. Su aspecto también depende del tipo de enlace (Downlink utiliza OFDMA mientras que Uplink emplea SC-FDMA), y es el siguiente:

- Downlink:

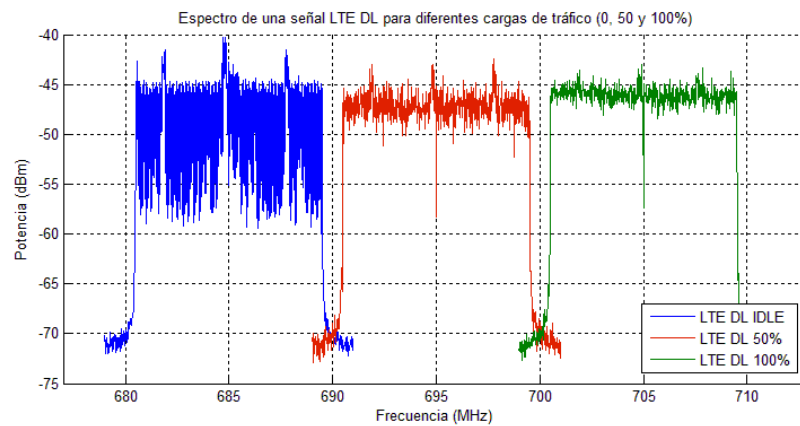


Fig. 13. Espectro de la señal LTE DL de 10 MHz, con diferentes cargas de tráfico (0, 50 y 100%).

- Uplink:

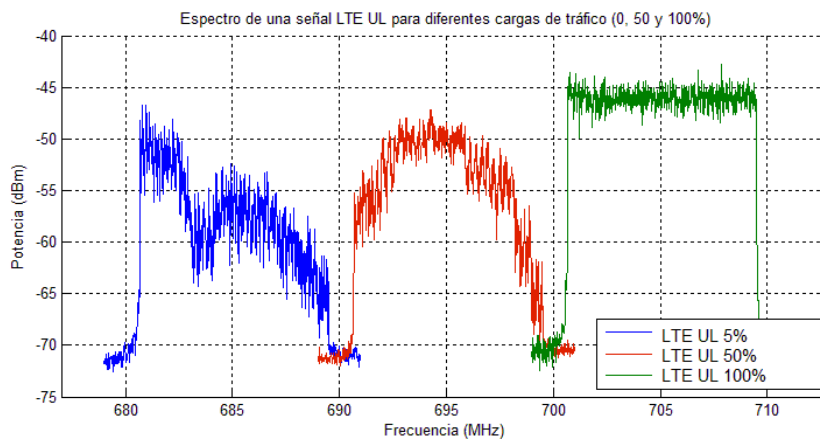


Fig. 14. Espectro de la señal LTE UL para diferentes cargas de tráfico (5, 50 y 100%).

V.3. Medida de márgenes de protección

Principalmente existen dos procedimientos:

- En el caso de sistemas de TDT (como DVB-T o DVB-T2), los márgenes de protección se miden entre los códigos interno y externo, antes de la decodificación Reed Solomon, para un $BER = 2 \times 10^{-4}$, lo que corresponde a un $BER < 1 \times 10^{-11}$ a la entrada del demultiplexor

MPEG-2. Este procedimiento viene especificado en la Recomendación ITU-R BT.1368-9 [21].

- En receptores domésticos es posible que no se pueda medir el BER y, por tanto, se propuso un nuevo método denominado método de punto de fallo subjetivo. Este método viene especificado en las recomendaciones ITU-R BT.1368-9 [21] e ITU-R BT.2215 [22]. Además, en el estándar DVB-T2, obtener el BER no es tan trivial como en otros estándares, como indica DIGITALEROPE en el punto 3 de su White Paper “*Standardized DVB-T2 RF specifications*” [23]. Por ello, será el utilizado en las medidas de este documento, y está detallado a continuación.

Método de punto de fallo subjetivo:

Para el cálculo de los factores de protección, se ha empleado una señal útil DVB-T2 cuya potencia es de -60 dBm. Fijada la potencia útil, se realiza un barrido de potencias para la señal interferente, y se observa en el receptor (televisión) el resultado en un video real de 20 segundos. Si durante los 20 segundos no se observa ningún error, se aumenta la potencia interferente en 0.1dB, y se vuelve a observar. Cuando se observe un error, la potencia interferente anterior a esa medida será la máxima, y el margen de protección resultante se redondea al primer número entero superior.

El esquema seguido en las medidas es el siguiente:

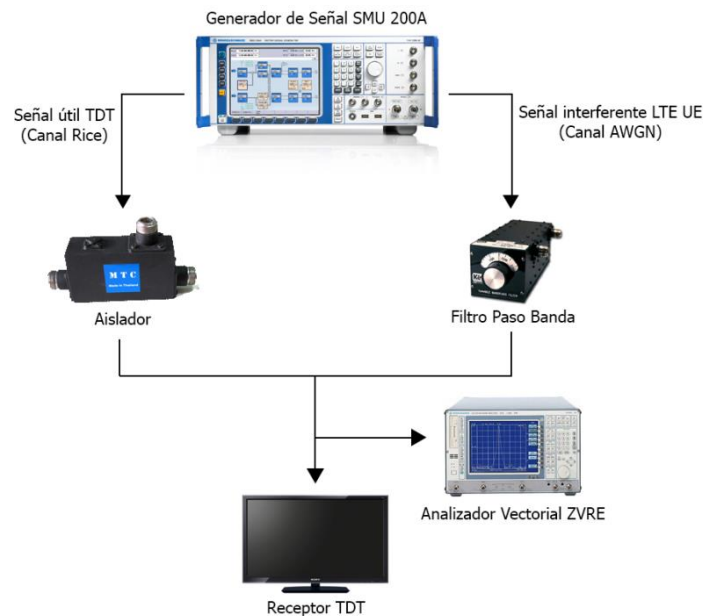


Fig. 15. Montaje genérico utilizado en la medida de los márgenes de protección DVB-T2 útil especificado en la Recomendación ITU-R BT.1368-9 [21].

V.3.1. Método de validación a 8 MHz

En este punto se realizará el mismo método seguido en la recomendación [8], que indica cómo realizar medidas cuando se tiene una señal DVB-T2 útil frente a una interferencia de tipo LTE. Los principales parámetros del proceso son:

- Frecuencia de señal útil: 786 MHz a 8 MHz.
- Frecuencia de señal interferente: ver siguientes Tablas (offset).
- Señal útil DVB-T2: utilizada en Ofcom, ver Tabla 1.
- Señal interferente LTE DL/UL, especificada en Tabla 3.

Los resultados obtenidos y comparados con [8] son:

- Downlink:

Estado LTE:			Idle		50%		100%			
Canal	Offset	Lab.	ITU 50 th	ITU 90 th	Lab.	ITU 50 th	ITU 90 th	Lab.	ITU 50 th	ITU 90 th
N	0 Hz	11,6	10	11	17,8	18	18	18,6	19	19
N+1	+10MHz	-30,2	-44	-24	-36,2	-40	-38	-35,7	-38	-36
N+2	+18MHz	-42,3	-50	-32	-47,7	-48	-44	-45,9	-47	-43
N+3	+26MHz	-46,1	-51	-35	-47,1	-49	-45	-45,6	-48	-44
N+4	+34MHz	-48,9	-52	-39	-46,2	-51	-46	-45,1	-50	-45
N+5	+42MHz	-49,1	-53	-41	-47	-51	-47	-46	-51	-46
N+6	+50MHz	-49	-55	-46	-47,2	-54	-48	-46,3	-52	-47
N+7	+58MHz	-49,9	-56	-46	-47,8	-54	-49	-47	-54	-48
N+8	+66MHz	-50,4	-57	-45	-48,3	-54	-50	-47,2	-53	-49
N+9	+74MHz	-50,5	-58	-45	-48,5	-55	-50	-47,9	-53	-49

Tabla 4. Comparación entre márgenes de protección medidos y obtenidos por la ITU BT.2033 (Downlink) para diferentes cargas de tráfico (0, 50 y 100%).

Se puede observar como la mayoría de los resultados se encuentra dentro de los dos percentiles (50th y 90th), esto significa que con las medidas se obtienen peores resultados que el mejor receptor de [8], pero mejores que la mitad de ellos. Por tanto, estar entre los dos percentiles se traduce en una correcta medida del margen de protección hallado. En la siguiente Figura puede verse este comportamiento.

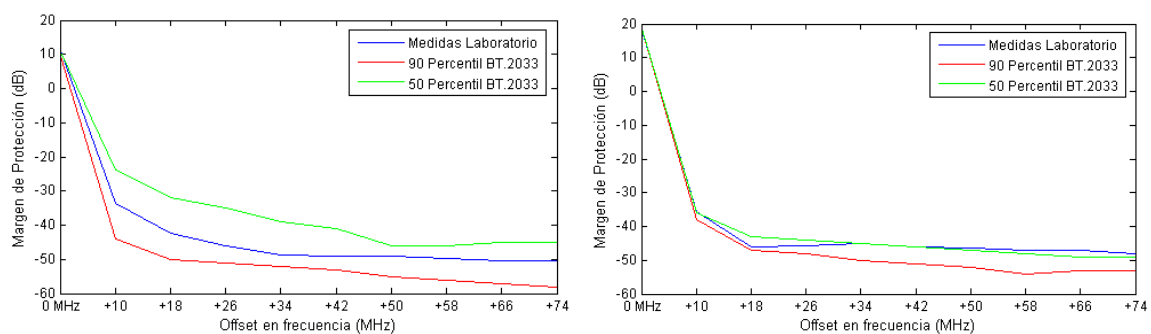


Fig. 16. Márgenes de protección medidos para la validación del método de medida de DVB-T2 vs. LTE DL. Carga IDLE (izquierda) y carga 100% (derecha).

Que algunos márgenes no estén entre estos dos valores no significa que sean inválidos. Valores por encima del 50 percentil en 1 dB aproximadamente (no superan este valor) quiere decir que el receptor para ese margen concreto se encuentra dentro del rango de receptores que funciona peor (la otra mitad). Observando la Fig. 16. Márgenes de protección medidos para la validación del

método de medida de DVB-T2 vs. LTE DL. Carga IDLE (izquierda) y carga 100% (derecha). se aprecia como los márgenes hallados son correctos.

- Uplink:

Estado LTE:			5%		50%			100%		
Canal	Offset	Lab.	ITU 50 th	ITU 90 th	Lab.	ITU 50 th	ITU 90 th	Lab.	ITU 50 th	ITU 90 th
N	0 Hz	10,2	10	11	17,9	18	18	18,8	19	19
N+1	+10MHz	-25,8	-36	-19	-36,7	-41	-39	-36,8	-41	-39
N+2	+18MHz	-36,7	-41	-24	-44,8	-47	-45	-47,3	-47	-43
N+3	+26MHz	-40,8	-44	-26	-42,5	-48	-45	-47	-50	-44
N+4	+34MHz	-45,8	-46	-36	-42,8	-48	-45	-45,3	-52	-45
N+5	+42MHz	-46,8	-47	-37	-44,5	-48	-44	-46	-54	-46
N+6	+50MHz	-48,7	-50	-38	-45,2	-49	-43	-46,8	-52	-45
N+7	+58MHz	-49,8	-50	-41	-47,8	-49	-44	-47,7	-53	-44
N+8	+66MHz	-49,9	-50	-41	-48,2	-49	-42	-48	-54	-45
N+9	+74MHz	-50,2	-50	-43	-48,3	-49	-43	-48,4	-54	-47

Tabla 5. Comparación entre márgenes de protección medidos y obtenidos por la ITU BT.2033 (Uplink) para diferentes cargas de tráfico (5, 50 y 100%).

En *Uplink* se tiene el mismo resultado que en *Downlink*, estando la mayoría de medidas dentro del rango especificado en la recomendación de la ITU. Todos los márgenes que no están dentro del rango distan máximo 1 dB.

Dado que los valores obtenidos para la interferencia entre DVB-T2 útil a 8 MHz y LTE DL/UL interferente a 10 MHz (siendo las mismas señales de referencia) son muy similares a los obtenidos en [8], y tras todas las medidas y comprobaciones realizadas, se puede decir que el método de medida utilizado es **válido**.

V.4. Balance de enlace

Dependiendo del Balance de Enlace que se desee calcular debe seguirse un procedimiento concreto, especificado en el informe del CEPT CPG-15 PTD 010 “*WRC-15 agenda item 1.2: lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility*” [17] y en el informe [4], basados en la Recomendación ITU-R BT.419-3 [24]. En este documento se estudiarán dos escenarios de DVB-T2 interferido por LTE UL ($f_{\text{DVB-T2 (ch.51)}} = 695 \text{ MHz}$, $f_{\text{LTE (ch.1)}} = 708 \text{ MHz}$, $B_G = 5 \text{ MHz}$).

V.4.1. Metodología de balance de enlace DVB-T2 con recepción fija sobre tejado

Este procedimiento está compuesto por los siguientes pasos.

- Escenario y Geometría: Cálculo de Pérdidas

En primer lugar, se debe caracterizar los parámetros de la antena del receptor DVB-T2, tales como figura de ruido, ancho de banda de ruido equivalente, ganancia por apuntado, patrón y altura de la antena, etc. También se debe asumir una serie de parámetros que caractericen la señal interferente LTE UL: potencia máxima transmitida, ancho de banda, ganancia, altura y patrón de la antena, etc.

Una vez definidos los parámetros de ambas tecnologías, utilizando la geometría de referencia mostrada en el Informe 30 del CEPT [4] para el cálculo de las pérdidas mínimas de acoplo entre un terminal móvil y un receptor TDT fijo, se define la geometría de referencia [25].

Para este cálculo, se asume que existe visión directa entre el terminal móvil y la antena TDT fija, en cuyo caso las pérdidas por propagación se calculan, para el modelo de propagación por espacio libre a menos de 40 metros, como:

$$FSL = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (1)$$

donde:

- f = frecuencia (MHz)
- d = distancia (km)

Además, se puede calcular el ángulo de elevación como:

$$\tan \alpha = \frac{h_{RX} - h_{TX}}{d_h} \quad (2)$$

Para el ángulo concreto obtenido, en función de la distancia entre tecnologías (horizontal) y las alturas de ambas antenas, se obtendrán las pérdidas de discriminación por elevación de antena (si no es omnidireccional). Para obtener la distancia a ese ángulo concreto, donde las pérdidas por propagación de la señal interferente son mínimas, se aplica:

$$d = \sqrt{d_h^2 + (h_{RX} - h_{TX})^2} \quad (3)$$

Las pérdidas por acoplo asociadas con la geometría del escenario vienen dadas por:

$$L = FSL + G_{DIR} - G_{RX} + L_{body} \quad (4)$$

donde:

- FSL son pérdidas por espacio libre.
- G_{RX} es la ganancia de la antena TDT incluyendo pérdidas de alimentador.
- G_{DIR} es la discriminación de antena TDT asociada con el patrón de radiación vertical.
- L_{body} son pérdidas debidas al cuerpo humano, situado entre el UE y la antena TDT.

- Interferencia Recibida

Para el cálculo de la interferencia recibida en el receptor de la señal útil, se emplea la siguiente ecuación:

$$I = P_{TX} - G_{TX} - L \quad (5)$$

- Mínima Potencia de Señal Útil Necesaria

La potencia mínima necesaria depende de la figura de ruido del receptor, de la relación SNR mínima necesaria para el modo de transmisión útil utilizado, y del ancho de banda equivalente de ruido. La potencia mínima a la entrada del receptor se calcula como:

$$P_{min} = 10 \log(kTB) + NF + SNR_{min} \quad (6)$$

- Margen de Protección Requerido en el Receptor

El margen de protección requerido (MP_{req}) viene dado por la siguiente ecuación:

$$MP_{req} = PS_{min} - I_{RX} + \delta \quad (7)$$

donde:

- PS_{min} es la potencia mínima necesaria.
- δ es el valor de I/N necesaria. Se calcula como $\delta = -10\log(10^{\gamma/10}-1)$, siendo γ el valor de insensibilización del receptor. Un valor de insensibilización típico de 0,41 dB equivale a un $\delta = -10$ dB.
- I_{RX} es el nivel de interferencia máximo que existirá.

El margen de protección requerido debe ser comparado con el margen de protección real obtenido en el laboratorio.

- ACLR y OOB Requerido del Terminal LTE

A partir del margen de protección requerido (MP_{req}) se puede calcular la relación de interferencia de canal adyacente o *adjacent channel interference ratio* (ACIR) como:

$$ACIR = MP_0 - MP_{req} \quad (8)$$

donde MP_0 es el margen de protección co-canal del receptor TDT.

El cálculo de ACS del receptor puede derivarse del margen medido en laboratorio en éste utilizando la expresión:

$$ACS(\Delta f) = -10 \log \left(10^{-\frac{MP_0 - MP}{10}} - 10^{-\frac{ACLR}{10}} \right) \quad (9)$$

Como se ha mencionado, es posible que sea necesario utilizar un filtro adicional a la entrada del receptor. Éste mejorará el ACS en un factor aproximadamente igual a la atenuación de la banda de rechazo del filtro en la frecuencia no deseada. El ACS total del receptor con filtro es:

$$ACS_{tot}(\Delta f) = ACS(\Delta f) + ACS_{filtro} \quad (10)$$

Entonces, se puede calcular el ACLR del dispositivo interferente necesario para asegurar dicho margen como:

$$ACLR(\Delta f) = -10 \log \left(10^{-\frac{MP_0 - MP}{10}} - 10^{-\frac{ACS_{tot}}{10}} \right) \quad (11)$$

Finalmente, y como recomendación final, se puede obtener el límite fuera de banda como:

$$OOB_{max} = PIRE - ACLR \quad (12)$$

V.4.2. Metodología de balance de enlace DVB-T2 con recepción indoor

Para realizar el estudio de escenarios *indoor*, se sigue el procedimiento descrito en el Anexo 3 del Informe 30 del CEPT [4]. En primer lugar, se calcula la potencia de ruido como:

$$P_N = 10 \log(kTB) + NF \quad (13)$$

A continuación, se calcula la potencia interferente en el receptor como:

$$P_I = P_N - \delta \quad (14)$$

La potencia interferente en el terminal es una combinación de la potencia propia del mismo en su banda de emisión, el ACS del receptor de TDT y la potencia OOB del terminal en la banda útil:

$$P_{I(TS)} = 10\log(10^{(P_{TX}-ACS)/10} - 10^{OOB/10}) \quad (15)$$

Las pérdidas mínimas por acoplo entre la señal interferente y el receptor vendrán dadas por:

$$G_{CG} = P_I - P_{I(TS)} \quad (16)$$

Y las pérdidas en el enlace totales se calculan a partir de las pérdidas de acoplo halladas, las pérdidas por penetración, las pérdidas del cuerpo humano y la ganancia de la antena receptora:

$$G_{PG} = G_{CG} - G_{WL} - L_{body} - G_{RX} \quad (17)$$

Dadas las pérdidas finales, queda despejar la distancia mínima necesaria entre terminal LTE y receptor TDT a partir de la ecuación de las pérdidas de propagación:

$$d_{min} = 10^{\frac{147,56 - 20\log(f) - G_{PG}}{20}} \quad (18)$$

VI. RESULTADOS

VI.1. Márgenes de protección obtenidos

Dadas las señales DVB-T2 y LTE descritas anteriormente, se han calculado los márgenes de protección necesarios para de los tres primeros canales LTE Uplink (suponiendo que son de 10 MHz de ancho de banda) sobre los cuatro últimos canales de TDT, utilizando un modelo de canal gaussiano AWGN. En este caso, se han utilizado los tres receptores a 6 MHz descritos en el punto

V.1. Los resultados son:

Rx	Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
			LTE-1 (708)	LTE-2 (718)	LTE-3 (728)
SONY BRAVIA	48	677	-57,1	-58,3	-58
	49	683	-56	-57,3	-58,1
	50	689	-55,3	-57,2	-57,8
	51	695	-51,6	-55,9	-58,1
Multitech	48	677	-51,6	-55,5	-55,6
	49	683	-48,4	-52,4	-54,8
	50	689	-46,7	-48,8	-52,9
	51	695	-44,1	-46,8	-50,9
Transmundial tv	48	677	-49,7	-51,3	-55,2
	49	683	-48,5	-50,5	-54,6
	50	689	-46,2	-49	-52,4
	51	695	-43,4	-46,3	-51,5

Tabla 6. Márgenes de protección medidos. Receptores SONY BRAVIA, Multitech y Transmundialtv.

Modelo de canal AWGN en señal útil e interferente.

Los márgenes de protección obtenidos son diferentes para cada receptor, aunque la relación entre ellos se mantiene. El mejor receptor es el SONY BRAVIA, con el que se han obtenido

márgenes de hasta aproximadamente 8 dB menores que los obtenidos por los otros dos. De entre los tres, los peores resultados para la mayoría de canales se han obtenido con el receptor de Transmundialtv. Se toma el margen de protección final como el peor caso entre los tres receptores.

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (708)	LTE-2 (718)	LTE-3 (728)
48	677	-49,7	-51,3	-55,2
49	683	-48,4	-50,5	-54,6
50	689	-46,2	-48,8	-52,4
51	695	-43,4	-46,3	-50,9

Tabla 7. Márgenes de protección finales. Modelo de canal AWGN.

Se puede observar como el margen de protección más crítico es el de canal 51 interferido por el primer canal LTE, por el hecho de ser el inmediatamente adyacente en frecuencia. Este es el caso que hay que comprobar mediante el balance de enlace, estudiando si es suficiente, y en caso negativo, solucionándolo con alguna de las soluciones propuestas.

Para obtener márgenes de protección aplicables a los escenarios descritos, es necesario aplicar modelos de canal que simulen la propagación de ambas señales en ellos.

VI.1.1. Márgenes de protección con recepción DVB-T2 fija sobre tejado

El primero de los dos escenarios que hay que medir es el Escenario 1. Para simular el Escenario 1 se han asumido dos modelos de canal, uno para cada señal participante en el modelo:

- Señal DVB-T2: Canal Rice (LOS).
- Señal LTE: Canal Rice (LOS).

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (708)	LTE-2 (718)	LTE-3 (728)
48	677	-48	-50,3	-54,3
49	683	-46,9	-49,2	-53,3
50	689	-45,1	-47	-51
51	695	-42,3	-44,8	-50,1

Tabla 8. Márgenes de protección finales para el Escenario 1. Caso peor medido para los 3 receptores DVB-T2. Modelo de canal Rice en ambas señales.

Al suponer que la señal útil no tiene visión directa, el modelo de canal empleada que principalmente influye es el de señal útil. Esto se traduce en unos márgenes de protección entre 0,8 y 1,8 dB más restrictivos.

VI.1.2. Márgenes de protección con recepción DVB-T2 portable indoor

En el caso del otro escenario a evaluar, el escenario 3, se han asumido los siguientes modelos:

- Señal DVB-T2: Canal Rayleigh (NLOS).
- Señal LTE: Canal Rice (LOS).

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (708)	LTE-2 (718)	LTE-3 (728)
48	677	-46,8	-49,1	-53,2
49	683	-45,4	-48	-52,4
50	689	-43,9	-45,7	-49,5
51	695	-40,9	-42,7	-47,3

Tabla 9. Márgenes de protección finales para el Escenario 3. Caso peor medido para los 3 receptores DVB-T2. Modelo de canal Rice en ambas señales.

El caso *indoor*, comparado con el anterior caso, es el más restrictivo. El hecho de que el receptor TDT no tenga visión directa con la antena de transmisión se traduce en un desvanecimiento a largo plazo o *fading* que afecta negativamente a los resultados. Los márgenes de protección aumentan entre 2 y 3,6 dB.

VI.1.3. Efecto del ancho de banda LTE

Hasta el momento, se ha supuesto que el ancho de banda de LTE que se va a asignar a los operadores es de 10 MHz. Sin embargo, la ANE contempla la posibilidad de ofrecer bloques de 2x15 MHz y de 2x20 MHz a los operadores, por lo que es necesario estudiar cómo afecta el cambio de ancho de banda de la señal interferente. El hecho de disponer de un total de 2x45 MHz no deja más que 3 posibilidades:

- 3 bloques de 2x10 MHz + 1 bloque de 2x15MHz.
- 3 bloques de 2x15 MHz.
- 1 bloque de 2x10 MHz + 1 bloque de 2x15 MHz + 1 bloque de 2x20 MHz.

Por tanto, en el canal inmediatamente adyacente se recomienda situar el canal menos interferente. Los resultados para el canal 1 de LTE frente al 51 de TDT son:

Ancho de banda LTE	10 MHz	15 MHz	20 MHz
fc LTE (MHz)	708	710,5	713
Margen de Protección	-43,4	-42	-39,3

Tabla 10. Margen de protección entre el canal LTE-1 y el canal 51 de TDT ($f_c = 695$ MHz), en función del ancho de banda LTE. Modelo de canal AWGN en ambas señales.

Como se puede observar en la Tabla 12, cuanto mayor es el ancho de banda LTE utilizado, mayor es la interferencia sobre la señal TDT. Es por esto que los canales cuyo ancho de banda sea menor, deberán ir situados en las frecuencias más bajas de la banda asignada a LTE en 700 MHz.

VI.1.4. Efecto de la carga de tráfico LTE (5%, 50%, 100%)

Es necesario discutir cómo afecta en los márgenes de protección DVB-T2 la carga de usuarios existente en la señal LTE UL. Cuando se habla de la carga de usuarios nos referimos al porcentaje del espectro que está siendo utilizado en un determinado enlace por los mismos. Los márgenes de protección, en función de la carga de tráfico LTE UL y medidos para los 3 receptores, son:

Carga LTE	Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
			LTE-1 (708)	LTE-2 (718)	LTE-3 (728)
5 %	48	677	-49,7	-51,3	-55,2
	49	683	-48,4	-50,5	-54,6
	50	689	-46,2	-48,8	-52,4
	51	695	-43,4	-46,3	-50,9
50 %	48	677	-53,9	-55,9	-55,8
	49	683	-54,5	-55	-55,8
	50	689	-52,3	-53,3	-55,2
	51	695	-50,2	-52,4	-55,2
100 %	48	677	-54	-56,1	-56
	49	683	-54,2	-54,6	-55,9
	50	689	-53,5	-54,6	-56,2
	51	695	-52	-53,6	-55,9

Tabla 11. Márgenes de protección medidos para los 3 receptores DVB-T2 a 6 MHz (peor caso), con señal interferente LTE UL al 5, 50 y 100% de carga.

En el caso de utilizar el enlace UL de LTE interfiriendo a DVB-T2, se observa que los márgenes de protección son más altos cuando la velocidad utilizada es del 5%. Esto se debe a que cuanto menor es la carga de tráfico, mayor variabilidad temporal existe en la señal, mientras que si la carga se acerca al 100%, es cuando más se aproxima al ruido blanco gaussiano, desde un punto de vista interferente, afectando menos dada la naturaleza de la señal OFDM de DVB-T2.

VI.1.5. Efecto del uso de Downlink en lugar de Uplink

Utilizar *Downlink* en las frecuencias de *Uplink* supone un cambio notable en los márgenes de protección, pues se trata de un tipo de modulación diferente (OFDMA en lugar de SC-FDMA). Si en la canalización colombiana se utilizara el enlace descendente en las frecuencias inferiores, los resultados serían (para una señal en estado IDLE):

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (708)	LTE-2 (718)	LTE-3 (728)
48	677	-51,6	-52,1	-52,8
49	683	-51,1	-52,1	-52,8
50	689	-50	-51,7	-52,4
51	695	-49,1	-50,6	-52,5

Tabla 12. Márgenes de protección medidos para DVB-T2 a 6 MHz, con señal interferente LTE DL en estado IDLE.

Cuando se utiliza Downlink, sobre todo en estado IDLE donde la variabilidad temporal y frecuencial es mayor, los márgenes de protección son menos restrictivos. Esto se debe a la modulación OFDMA. En Colombia se ha decidido utilizar Uplink para reducir la potencia de los terminales móviles (menor frecuencia, menor potencia) a costa de reducir este margen, aprovechando que la banda de guarda existente es 4 MHz mayor a la de Europa.

VI.1.6. Efecto de la modulación DVB-T2 empleada

Otro factor a tener en cuenta es el MODCOD (modulación + *code rate*) empleado. Anteriormente el MODCOD de la señal útil de televisión utilizado era 64-QAM, y su *code rate* 3/5. Si estas condiciones cambian, la relación señal a interferencia necesaria para su funcionamiento también, pues cambia su robustez. Los márgenes de protección, para el último canal TDT (695 MHz) y el primero LTE (708 MHz) al 5 % son:

Modulación	Code Rate	CNR necesaria	MP (dB)
QPSK	3/5	4	-52,7
16-QAM	3/5	8	-48,4
64-QAM	3/5	13	-45,4
256-QAM	3/5	18	-43,5

Tabla 13. Márgenes de protección medidos para distintas modulaciones DVB-T2 a 6 MHz, frente a señales interferentes LTE UL.

Lógicamente, aumentar el MODCOD utilizado se traduce en una menor robustez de la señal a costa de aumentar la tasa de bit. Esto significa que el sistema dejará de funcionar con niveles de interferencia menores y por tanto el margen de protección es mayor. En Colombia, se ha decidido apostar por el modo 64-QAM en lugar de 256-QAM (Europa) para ofrecer una mayor robustez en sacrificio de utilizar una menor capacidad, pues en muchos hogares existe recepción *indoor*, cuyas exigencias son mayores.

VI.1.7. Efecto de la banda de guarda

Una posible configuración propuesta para la canalización empleada en Colombia es la descrita en el punto 3, la cual se puede ver en la Figura 8. En un principio, se propone dejar 5 MHz de banda de guarda para asegurar una protección mayor frente a interferencia de tipo adyacente LTE. En este punto se pretende analizar en qué medida afecta esta banda de guarda (BG), y si sería conveniente utilizarla o no. Se han medido los márgenes de protección para las siguientes bandas de guarda:

Banda de guarda (BG) (MHz)	LTE N+1 (703 MHz + BG)	
	MP Canal 50 (dB)	MP Canal 51 (dB)
0	-47	-38,8
1	-47,7	-40,3
3	-48,1	-43,8
5	-48,2	-45,4
7	-48,4	-46
9	-48,5	-46,2

Tabla 14. Márgenes de protección para canales 50 y 51 medidos en función de la banda de guarda existente entre ambos estándares.

A partir de la utilización de una banda de guarda de 5 MHz, los resultados obtenidos son muy similares. Es por esto que no merece la pena dejar una banda de guarda mayor a la dejada en Colombia.

VI.2. Balance de enlace

VI.2.1. DVB-T2 con recepción fija sobre tejado / LTE Uplink

- Escenario y Geometría: Cálculo de Pérdidas

Este punto analiza el impacto de la interferencia proveniente de un terminal IMT operando a la frecuencia de 708 MHz sobre receptores TDT operando en el canal 51.

Los parámetros de la antena fija del receptor TDT son:

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Figura de ruido	7	dB	[26]
Ancho de banda de ruido equivalente	5,78	MHz	
Ganancia de antena	9.15	dBi	[26]
Altura de la antena	10	m	[26]
Patrón de la antena	De ITU-R BT.419-3		[24]

Tabla 15. Parámetros de antena fija de receptor TDT, dados por ITU-R BT.419-3 [17].

El patrón de antena utilizado se muestra en la siguiente Figura. Éste se utiliza tanto en azimut como elevación.

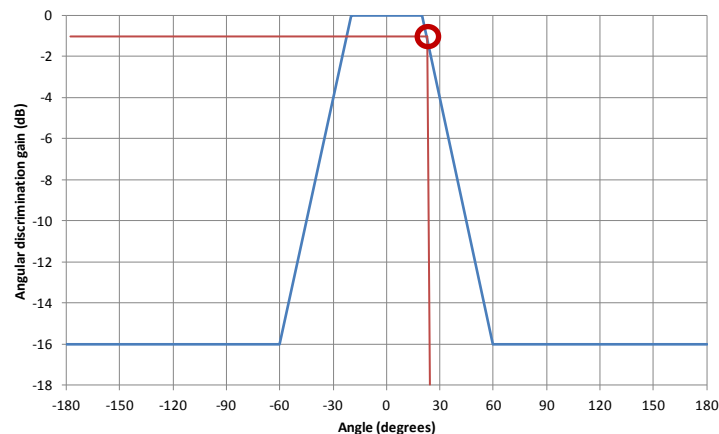


Fig. 17. Patrón de antena de recepción fija TDT utilizado [17].

Los parámetros asumidos para el terminal móvil LTE se detallan a continuación.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Potencia máxima transmitida	23	dBm	[26]
Ancho de banda	10	MHz	[26]
Ganancia de antena	-3	dBi	[26]
Altura de antena	1.5	m	
Patrón de antena	Omni-direccional		
Pérdidas por cuerpo humano	4	dB	[26]

Tabla 16. Parámetros de antena del terminal IMT en transmisión, dados por ITU-R BT.419-3 [17].

Como peor caso de este escenario, en el que la separación entre antenas se calcula considerando tanto las pérdidas por propagación como el patrón de elevación de la antena TDT, y utilizando la geometría de referencia utilizada en el Informe 30 del CEPT [4] para el cálculo de las pérdidas mínimas de acople entre un terminal móvil y un receptor TDT fijo, se tiene:

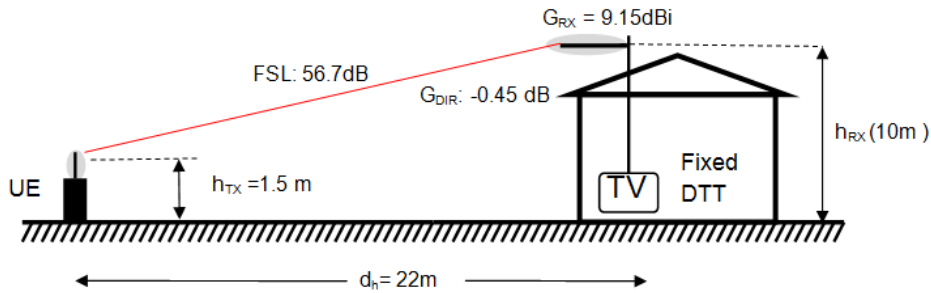


Fig. 18. Geometría de referencia para el acoplo entre un terminal móvil y un receptor de TDT fijo [25].

Para este cálculo, se asume que existe visión directa entre el terminal móvil y la antena TDT fija, en cuyo caso las pérdidas por propagación se calculan utilizando la Ec.1. Dados $d_h = 22\text{m}$, $h_{TX} = 1,5\text{m}$ y $h_{RX} = 10\text{m}$, se puede calcular el ángulo de elevación, obteniendo $21,1^\circ$ (Ec.2). Para este ángulo concreto, observando la Fig. 17. Patrón de antena de recepción fija TDT utilizado [17]., se tiene una ganancia por discriminación de la antena de $-0,45\text{ dB}$. Se asume una distancia de $23,6\text{m}$, siguiendo la Ec.3.

Las pérdidas por propagación son $FSL = 56,7\text{ dB}$. Para el cálculo de estas pérdidas, se ha asumido el peor caso de 22 metros , donde la ganancia total del enlace entre el terminal móvil y el receptor TDT fijo es más crítico ($-47,9\text{ dB}$), como se observa en la Fig. 19. Ganancia total de la antena en función de la separación horizontal hasta el terminal IMT.

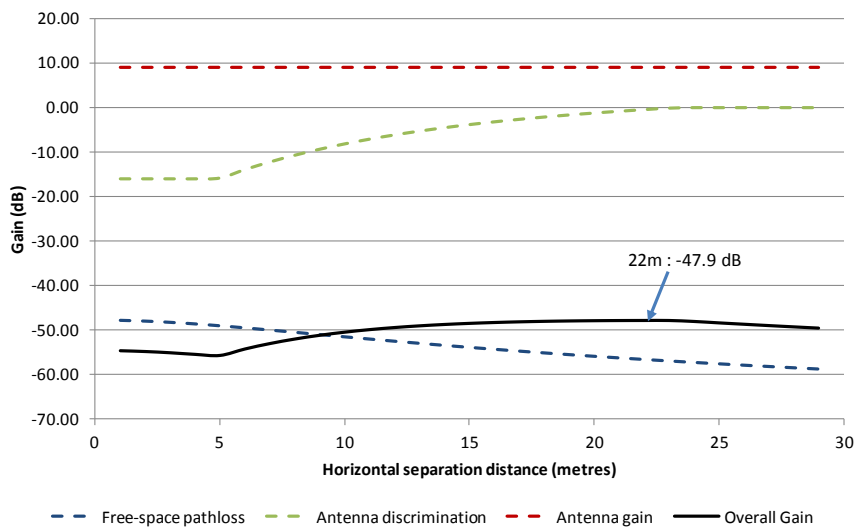


Fig. 19. Ganancia total de la antena en función de la separación horizontal hasta el terminal IMT.

Las pérdidas por acoplo asociadas con la geometría del escenario, utilizando la Ec.4, son $L = 51.99\text{dB}$.

- Interferencia IMT Recibida

Para un terminal móvil LTE con una potencia de transmisión P_{TX} de 23 dBm (potencia máxima, caso más crítico) con una ganancia de antena G_{TX} de -3 dBi (radiando con una PIRE de 20 dBm), la interferencia recibida, utilizando la Ec.5, en el receptor TDT será $I = -31,9\text{dBm}$.

- Mínima Potencia de Señal TDT Necesaria

La potencia mínima requerida en este escenario para demodular la señal de TDT depende del modo de transmisión DVB-T2 escogido. Para el caso RTVC, cuyo modo es: 64-QAM 3/5 FFT 16k extendido, se requiere una relación señal a ruido mínima (CNR_{min}) de 14,7 dB. Un receptor DVB-T2 tiene una figura de ruido de 7 dB, y un ancho de banda equivalente de ruido de 5,78 MHz para el modo propuesto. La potencia mínima necesaria P_{min} es, según la Ec.6, $P_{min} = -84,6$ dBm.

- Margen de Protección Requerido en el Receptor

Los cálculos de pérdidas mínimas por acoplo anteriores permiten valores de insensibilización del receptor TDT de 0,41dB. Este valor se corresponde con un valor de $I/N = -10$ dB aproximadamente. Comercialmente, se ha considerado que en la práctica un valor alternativo de insensibilización de 1 dB sería suficiente, correspondiente a una $I/N = -5,8$ dB.

Entonces, se tendrá dos casos:

- $\delta = 0,41 \rightarrow MP_{req} = -84,6 - (-31,9) - 10 = -62,6$ dB
- $\delta = 1 \rightarrow MP_{req} = -84,6 - (-31,9) - 5,8 = -58,4$ dB

En este estudio se tomará como valor $\delta = 1$, valor que se ha adoptado comercialmente.

- Margen de Protección medido en Laboratorio

El margen de protección requerido para el canal 51, calculado en el punto anterior, debe ser comparado con el margen de protección real obtenido en el laboratorio para este escenario. En este caso, el margen de protección medido sin filtro a la entrada del receptor es $MP_{lab} = -43,4$ dB, es decir, 15 dB mayor al margen de protección necesario. Esto quiere decir que se necesita un filtro cuya atenuación en la banda del canal adyacente (ACS_{filtro}) sea, al menos, de 15 dB. Observando las características de los tres filtros de la Tabla B1 del Anexo B, se observa que todos cumplen con el requisito, obteniendo valores de rechazo de entre 23,1 y 29,8 dB. Por tanto, la utilización de un filtro a la entrada del receptor TDT es una posible solución al problema planteado.

- ACLR Requerido del Terminal IMT

A partir del margen de protección requerido (MP_{req}) calculado en la sección anterior, se tiene que $ACIR = 19 - (-58,4 \text{ dB}) \rightarrow ACIR = 77,6$ dB. A partir de este valor, y utilizando la Ecuación 10, se tiene una $ACS = 62,6$ dB. Como se ha dicho, una mejora de 15 dB (20 dB para asegurar el funcionamiento) será suficiente para proteger al receptor de la interferencia LTE.

El ACS total del receptor con filtro es $ACS_{tot} = 82,6$ dB. Redondeando, un ACS de 83 dB será suficiente para que el sistema funcione dada la canalización propuesta y el escenario descrito.

Dado el margen de protección requerido (MP_{req}) y el valor de ACS del receptor con el filtro paso bajo adicional, se puede calcular el ACLR del dispositivo IMT necesario para asegurar dicho margen. El resultado es $ACLR_{req} = 79,1$ dB.

- Límite OOB del terminal

Finalmente, el máximo nivel fuera de banda que puede emitir un terminal móvil para que no se produzca interferencias cuando se utilizan filtros a la entrada del receptor, utilizando la Ecuación 12, es $OOB_{max} = -56,1 \text{ dBm}/6\text{MHz}$.

VI.2.2. DVB-T2 con recepción indoor / LTE Uplink

- Escenario y Geometría

De nuevo, es necesario especificar los parámetros de las antenas, utilizados en el informe del CEPT CPG-15 PTD 010 [17], basados en la Recomendación ITU-R BT.419-3 [24]. Los parámetros de la antena portable del receptor TDT *indoor* son:

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Figura de ruido	7	dB	[26]
Ancho de banda de ruido equivalente	5,78	MHz	
Ganancia de antena	2,15	dBi	[26]
Altura de la antena	1,5	m	[26]
Patrón de la antena	Omnidireccional		

Tabla 17. Parámetros de antena de recepción fija TDT [17].

Los parámetros asumidos para el terminal móvil en este estudio son los mismos que en el anterior escenario, resumidos en la Tabla 16. Parámetros de antena del terminal IMT en transmisión, dados por ITU-R BT.419-3 [17].

En la siguiente Tabla se listan los parámetros generales asumidos en este estudio para recepción portable indoor.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente
Frecuencia	695	MHz	
Pérdidas por muro (receptor TDT y terminal en la misma habitación)	0	dB	
Pérdidas por muro – WP 6A	8	dB	[4]
Pérdidas por muro – WP 5D urbano/suburbano	20	dB	[4]

Tabla 18. Pérdidas por penetración en muro en función de la frecuencia [17].

Si el terminal móvil se encuentra en una habitación distinta al receptor se considerarán unas pérdidas medias de 8 dB, mientras que si se encuentra fuera del hogar, se éstas serán de 20 dB (caso urbano). En este escenario, será necesario estimar la distancia mínima que debe existir entre el terminal IMT y el receptor TDT para asegurar el funcionamiento del sistema.

- Cálculo de Out-of-Block (OOB)

En primer lugar, se asume la misma potencia de ruido que se tiene para recepción fija, pues el ancho de banda y la figura de ruido son los mismos. Entonces, $P_N = -99,36\text{dBm}$. Si se vuelve a considerar una insensibilización de $\delta = 1 \text{ dB}$, se tiene de nuevo que $I/N = -5,87\text{dB}$. Por tanto, la potencia interferente máxima permitida será en este caso de $P_I = -105,23\text{dBm}/6\text{MHz}$.

La potencia interferente en el terminal móvil es una combinación de la potencia de éste (23 dBm), el ACS del receptor (asumimos 80 dB, el filtro paso bajo ya ha sido incluido) y la potencia OOB del terminal en el receptor. Se realizará un barrido de niveles OOB desde -45 a -80 dBm/6MHz, para calcular la distancia mínima para cada uno de ellos y así obtener aquel máximo a la que dicha distancia se mantiene. Siguiendo la metodología descrita, se calcula dicha potencia en el terminal móvil, la ganancia de acoplo, la ganancia del enlace total y la distancia mínima necesaria. Ésta última, para cada nivel de OOB, se muestra en la Fig.20:

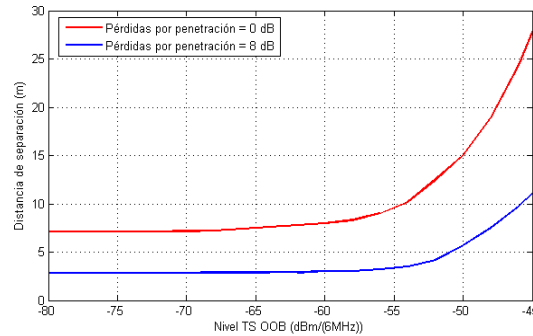


Fig. 20. Recepción Indoor. Emisión OOB vs. Distancia.

Como se observa en la figura, utilizar una OOB < -65 dBm/6MHz no repercute en una mejora de la distancia mínima necesaria entre el terminal y el receptor TDT, por lo que dicho valor se asume como el nivel OOB óptimo en este escenario.

- Distancia mínima entre terminal LTE y receptor TDT

Para dicho nivel de OOB, la distancia mínima, en función de las pérdidas por penetración asumidas, es:

Parámetro	Unidades	Misma sala	Salas distintas	Comentarios
Frecuencia	MHz	695,00	695,00	f0
I/N necesaria (δ)	dB	-5,87	-5,87	$\delta = -10\log(10\gamma/10-1)$
NF Receptor	dB	7,00	7,00	NF
Ancho de banda ruido (B)	MHz	5,78	5,78	B
Ruido (N)	dBm	-99,36	-99,36	$N = 10\log(kTB) + NF + 30$
Potencia iterferente máxima	dBm	-105,23	-105,23	$PI = N + \delta$
ACS del receptor (ACS)	dB	80,00	80,00	Valor asumido
Potencia transmitida máxima UE	dBm/10MHz	23,00	23,00	PTX
Límite OOB para UE (OOBmax)	dBm/6MHz	-65,00	-65,00	
Potencia interferente del UE	dBm	-57,75	-57,75	PI(TS)
Ganancia de acoplo (GCG)	dB	-47,48	-47,48	$GCG = PI - PI(TS)$
Pérdidas por penetración	dB	0,00	8,00	GWL
Pérdidas por cuerpo humano	dB	-4,00	-4,00	LBody
Ganancia Rx Apuntado de antena	dBi	2,15	2,15	GRX
Ganancia total (GPG)	dB	-41,33	-33,33	$GPG = GCG - GWL - LBODY - GRX$
Distancia mínima	metros	4,00	1,59	

Tabla 19. Tabla resumen del Link Budget para Escenarios 3 y 4. Distancias mínimas necesarias entre terminal IMT y receptor TDT.

La distancia mínima en el escenario estudiado (terminal y receptor TDT en la misma sala) es de 4 metros. En los resultados se ha incluido la utilización del filtro que se determinó en el punto anterior. De todos modos, esta distancia de seguridad sólo será necesaria en el caso más crítico, donde el terminal transmite a la máxima potencia, utilizando los RB más cercanos al canal de TDT 51, etc. En casos reales, esta distancia se verá reducida en gran medida.

VII. CONCLUSIONES

En **Europa**, con la puesta en marcha del DD, en la banda superior TDT de 800 MHz, la banda de guarda entre DVB-T2 y LTE en Downlink es de **1 MHz**. En Reino Unido, se observó que a pesar de los estudios previos realizados existía interferencia entre ambos sistemas, por la cual, los operadores 4G ganadores de la subasta deben proveer de filtros paso-bajo a los hogares afectados.

Otros países como Irlanda decidieron no utilizar el último canal de la TDT (**Canal 60**), de forma que la banda de guarda en este caso aumenta a **9 MHz**.

En **Colombia**, se decidió utilizar la canalización Asia-Pacífico para los sistemas móviles 4G LTE, dejando una banda de guarda de **5 MHz** entre estos y la TDT, y situando el enlace Uplink en la parte inmediatamente adyacente a ésta.

Los estudios realizados indican que la solución a adoptar en los casos más críticos para los escenarios supuestos se basa en la utilización de **filtros paso-bajo**, cuya atenuación fuera de banda sea de **15 dB** como mínimo.

Desestimar el uso del canal 51 como posible solución no se recomienda por tanto, pues los resultados indican que con la utilización de filtros, ya sean domésticos o profesionales, cuya atenuación fuera de banda sea la indicada es suficiente.

En el caso de recepción *indoor*, el caso más crítico indica que la distancia mínima entre terminal móvil LTE y receptor TDT debe ser de **4 metros** como mínimo en la misma sala, y de 1,6 metros en salas distintas. Esta distancia puede ser menor siempre y cuando el terminal no transmita a la máxima potencia.

ANEXO A: DEFINICIONES DE TÉRMINOS EMPLEADOS EN LABORATORIO

A.1. Margen Señal a Interferencia (C/I)

Es la diferencia entre la potencia de la señal deseada y la potencia total de la señal interferente, expresada en dB, más ruido evaluada a la entrada del receptor. Generalmente, la relación C/I se expresa en función de la diferencia en frecuencia entre la señal útil y la interferente dentro de un determinado rango.

A.2. Margen de Protección (MP)

El margen de protección es el valor mínimo de diferencia entre la señal deseada y la no deseada, expresado en dB, a la entrada del receptor para que se cumpla un requisito de calidad determinado.

A.3. Adjacent Channel Leakage Ratio (ACLR)

El ACLR de una señal se define como la diferencia entre la potencia de señal, generalmente en la banda de paso, y la potencia de señal medida a la salida del filtro del receptor (nominalmente rectangular) centrado en la frecuencia del canal adyacente. Sirve para caracterizar el comportamiento del transmisor [27].

A.4. Adjacent Channel Selectivity (ACS)

El ACS de un receptor se define como la diferencia entre la atenuación del filtro del receptor en la banda de paso y la atenuación de dicho filtro en la frecuencia del canal [27].

A.5. Adjacent Channel Interference Ratio (ACIR)

Es la relación de potencia total interferente y la potencia que afecta al canal adyacente. En otras palabras, es la diferencia entre el margen de protección co-canal y el margen de protección necesario en el canal adyacente [28]. Muestra el comportamiento de todo el sistema, y puede calcularse como:

$$\frac{1}{ACIR} = \frac{1}{ACLR} + \frac{1}{ACS} \quad ACIR = \frac{PR_0(f_I = f_w)}{PR(f_I \neq f_w)}$$

A.6. Out-of-Block Emission Limit (OOB)

Potencia máxima permitida fuera del bloque espectral asignado a la transmisión de la señal. Se calcula como la diferencia entre la potencia isotópica radiada equivalente (PIRE) del transmisor y la ACLR permitida por éste. Sus unidades son dBm/X Hz, donde X hace referencia al ancho de banda fuera de bloque evaluado, y que suele ser el ancho de banda del canal adyacente.

ANEXO B: ESPECIFICACIONES DE FILTROS EMPLEADOS EN LABORATORIO

- Respuesta en frecuencia de los Filtro Paso-Bajo utilizados:

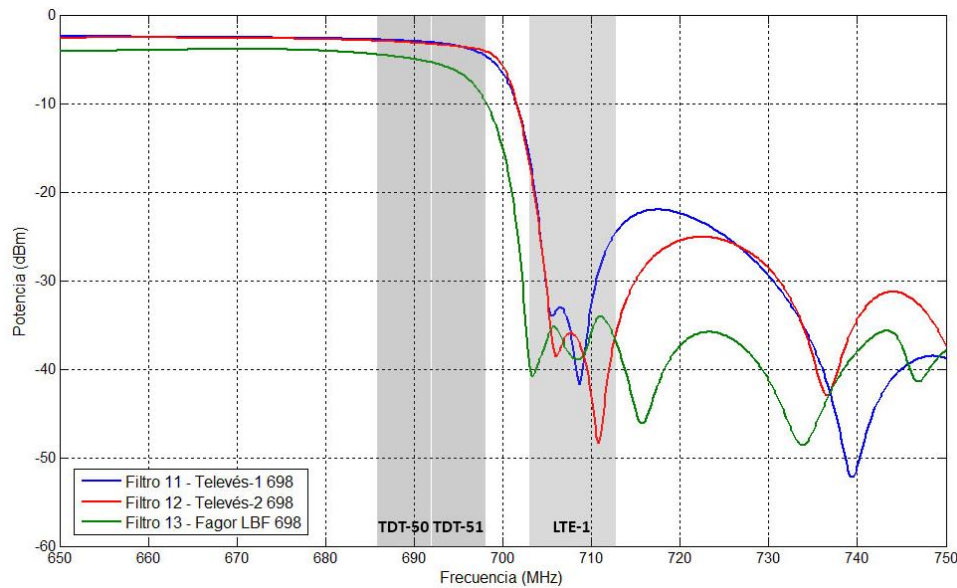


Fig. B1. Respuesta en frecuencia de los Filtro Paso-Bajo utilizados para la canalización colombiana.

- Tabla de caracterización de los filtros:

Filtros Paso Bajo	Att. TDT (470-790 MHz)	Att. Canal 50	Att. Canal 51	ACS _{FILTRO} (BG 5 MHz)	ACS _{FILTRO} (BG 11 MHz)
Televisión-1 698	2,4	2,9	3,6	23,1	20,2
Televisión-2 698	2,4	3,1	3,6	25,3	26,7
Fagor LBF 698	3,5	4,9	6,7	29,8	31,3

Tabla B1. Caracterización de filtros utilizados para canalización Europea y Colombiana (con desplazamiento en frecuencia). Unidades en dB.

Las tres respuestas en frecuencia representadas en la Figura B1 pertenecen a los tres filtros diseñados específicamente para este proyecto, a la canalización colombiana. Como se puede observar, y comparando con las especificaciones de algunos filtros europeos también empleados en el laboratorio, **la atenuación en los canales de TDT también oscila en valores de entre 3 y 7 dB**, pero al dejar **una banda de guarda de 5 MHz**, los filtros consiguen obtener una mayor caída fuera de banda, consiguiendo valores de entre **23 y 32 dB** para la **guarda de 5 MHz**, valores muy superiores a los obtenidos para la canalización europea.

Cuando la banda de guarda es de 11 MHz (sin utilización de canal 51), los resultados apenas mejoran, e incluso en el primer caso empeora. Es por esto que dada esta canalización, desestimar el uso del canal 51 se ha descartado.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo y éxito de esta tesina de máster forma parte del proyecto que a continuación se nombra, cuyo presupuesto ha sido indispensable para poder llevarla a cabo:

Título del proyecto: Contrato de consultoría N° 000069 de 2013 entre la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia e Ingenia Telecom, S.L.

Entidad financiadora: Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia

Duración desde: 19/07/2013

Hasta: 08/11/2013

Investigador principal: Cardona Marcet, Narcís

Importe de la subvención: 155.784€

N° total investigadores del proyecto: 6

Quisiera dar las gracias por el apoyo prestado a mis directores de tesina de máster David Gómez Barquero y Narcís Cardona Marcet por permitirme la posibilidad de participar en este proyecto y formar parte de este gran equipo. También quisiera dar las gracias a mis compañeros de laboratorio, por su constante ayuda en el trabajo diario.

Finalmente, me gustaría dedicar este trabajo a mi familia y amigos, pues sin el apoyo de los cuales llevarlo a cabo no hubiera sido posible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Report ITU-R BT.2254, *Frequency and Network Planning aspects of DVB-T2*. Septiembre 2012.
- [2] 3GPP TS 36.211 v10.6.0, *3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 10)*. Diciembre 2012.
- [3] DVB, *Study on specification and use of in-line filters to reduce interference in broadcast bands from mobile base stations (SB2122)*.
- [4] CEPT REPORT 30, *The identification of common and minimal (least restrictive) technical conditions for 790 - 862 MHz for the digital dividend in the European Union*. Octubre 2009.
- [5] DIGITALEUROPE, *Recommendations on DTT interference avoidance from LTE transmissions*. Bruselas, Diciembre 2012.
- [6] OFCOM, Technical Report, *Technical analysis of interference from mobile network base stations in the 800 MHz band to digital terrestrial television*. Febrero 2012.
- [7] EBU Operating Eurovision, EC Workshop, *Coexistence challenges of LTE deployment: the readiness of equipment standards and related issues*. Bruselas, Octubre 2012.
- [8] Recomendación ITU-R BT.2033, *Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands*. Enero 2013..
- [9] ERA Technology Ltd. – Ofcom, *Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interferences into DTT Receivers*. Julio 2011.

- [10] LET'S BE CLEAR at800 Press Release, *at800 updates estimate of likely impact of 4G at 800 MHz on Freeview*. Junio 2013.
- [11] ComReg LTE Filter Testing, *Analysis of the Effectiveness of Currently Available LTE Filters at Reducing and Eliminating RF Overload in Masthead Amplifiers in the Presence of LTE Signals*. Septiembre 2012.
- [12] ANFR, *Performance of DTT receivers in the presence of interference from LTE signals in the 800 MHz band*. 2011.
- [13] Paper ANFR Urbano, *Compte rendu de l'expérimentation LTE Laval II*. Octubre 2011.
- [14] BNetzA, *Sustainable Coexistence in the UHF Band 470 – 862 MHz*. Octubre 2012.
- [15] Boletín Oficial del Estado, *Orden ITC/2508/2011*. Septiembre 2011.
- [16] Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. *Orden IET/787/2013, de 25 de abril, por la que se aprueba el cuadro nacional de atribución de frecuencias*. Mayo 2013.
- [17] CPG-15 PTD #2. *WRC-15 agenda item 1.2: lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility*. Enero 2013.
- [18] 10º meeting APT Wireless Group (AWG-10), *Required LTE UE out of band emission limits to ensure coexistence of mobile services and adjacent broadcasting services below 698 MHz*. Marzo 2011.
- [19] 11º meeting APT Wireless Group (AWG-11), *Required LTE UE out-of-band emission limits to ensure coexistence of mobile services and adjacent broadcasting services below 698 MHz*. Septiembre 2011.
- [20] Documento 6A/235-E Radiocommunication Study Group, *Proposed modifications to Report ITU-R BT.2247-1, Study on interference between ISDB-T and IMT in the 700 MHz band*. Abril 2013.
- [21] Recomendación ITU-R BT.1368-9, *Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas*. Diciembre 2012.
- [22] Recomendación ITU-R BT.2215, *Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers*. Junio 2012.
- [23] DIGITALEUROPE White Paper, *Standardized DVB-T2 RF specifications*. Abril 2012.
- [24] Recomendación ITU-R BT.419-3, *Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting*. 1992.
- [25] CPG-15 PTD #3, *WRC-15 agenda item 1.2: lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility*. Abril 2013.
- [26] EBU TECH – 3348, *Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2*. Génova, Mayo 2012.
- [27] SEAMCAT, *SEAMCAT Handbook*. Enero 2010.
- [28] Proyecto CORAGE: COgnitive RADio Generation, *Paquete de trabajo 2: Análisis de nuevas tecnologías inalámbricas*. 2012.