



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS DE TELECOMUNICACIÓN



PROYECTO FINAL DE CARRERA

Ingeniería en Telecomunicación

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz



Autor: Eduardo Garro Crevillen
Director: David Gómez Barquero
Tutor: Narcís Cardona Marcet

Índice

Índice.....	2
1 Introducción	4
2 Objetivos	7
3 Descripción de escenarios	8
3.1 TDT vs. LTE en la banda de 800 MHz.....	8
3.1.1 Escenario para Recepción fija sobre tejado.....	9
3.1.2 Escenario para Recepción en interiores.....	9
3.2 TDT vs. LTE en la banda de 700 MHz.....	10
3.2.1 Escenarios para Recepción fija sobre tejado	11
3.2.2 Escenarios para Recepción en interiores	11
3.3 TDT vs. LTE en la Banda de 450 MHz	12
3.3.1 Escenario para Recepción fija sobre tejado.....	12
3.3.2 Escenario para Recepción en interiores.....	13
4 Estado del Arte.....	14
4.1 Descripción de las tecnologías involucradas.....	14
4.1.1 Introducción a DVB-T	14
4.1.2 Introducción a DVB-T2	22
4.1.3 Introducción a LTE	27
4.2 Estudios previos en la banda de 800 MHz	33
4.2.1 Estudios realizados por organismos internacionales	33
4.2.2 Estudios realizados en Reino Unido.....	39
4.2.3 Estudios realizados en Irlanda.....	44
4.2.4 Estudios realizados en Suecia.....	46
4.2.5 Estudios realizados en Francia	48
4.3 Estudios previos en la banda de 700 MHz	50
4.3.1 Estudios realizados por el CEPT	50
4.3.2 Estudios realizados en Japón.....	52
4.3.3 Estudios realizados en Australia.....	52
5 Metodología	55
5.1 Instrumentación empleada.....	55
5.1.1 TDT DVB-T.....	55
5.1.2 TDT DVB-T2.....	55
5.1.3 LTE	56
5.1.4 Filtros Paso Bajo	57
5.1.5 Otros.....	59
5.2 Metodología de medida para Márgenes de Protección.....	60
5.2.1 Medida DVB-T/T2 útil vs. LTE interferente	60
5.3 Metodología para Balance de Enlace	64

5.3.1	Metodología de Balance de Enlace LTE Uplink vs. DVB-T2 con Recepción Fija	64
5.3.2	Metodología de Balance de Enlace LTE Uplink vs. DVB-T2 en recepción interiores	67
5.3.3	Metodología de Balance de Enlace DVB-T2 con Interferencia LTE Downlink.	68
6	Resultados	70
6.1	Medidas de márgenes de protección genéricos entre la red TDT y LTE	70
6.1.1	Márgenes de protección modificando los parámetros de LTE	70
6.1.2	Márgenes de protección modificando los parámetros de TDT	76
6.2	Resultados de Convivencia red TDT vs. LTE en la banda de 800 MHz	79
6.2.1	Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción fija sobre tejado DVB-T2	79
6.2.2	Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción en interiores DVB-T2	82
6.2.3	Balance de Enlace para escenario con recepción fija	83
6.3	Resultados de Convivencia red TDT vs. LTE en la banda de 700 MHz	86
6.3.1	Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción fija sobre tejado DVB-T2	86
6.3.2	Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción en interiores DVB-T2	90
6.3.3	Balance de enlace para escenario con recepción fija	92
6.3.4	Balance de enlace para escenario con recepción en interiores	96
6.4	Resultados de Convivencia red TDT vs. LTE en la banda de 450 MHz	100
6.4.1	Resultados de Márgenes de Protección mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción fija sobre tejado DVB-T2	100
6.4.2	Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción en interiores DVB-T2	101
6.4.3	Balance de enlace para escenario con recepción fija	101
7	Conclusiones y Trabajo Futuro	105
7.1	Conclusiones	105
7.2	Trabajo futuro	108
8	Referencias	109
	Anexo A: Definiciones	113
	Anexo B: Especificaciones de Filtros Empleados en Laboratorio	116
	B.1 Filtros paso bajo a 800 MHz	116
	B.1.1 Filtros paso bajo domésticos a 800 MHz	116
	B.1.2 Filtros paso bajo profesionales a 800 MHz	117
	B.2 Filtros paso bajo profesionales a 700 MHz	118

1 Introducción

Desde el comienzo de las emisiones televisión, la televisión analógica ha utilizado parte de la banda de frecuencias de UHF (470 a 862 MHz) para su emisión. Con la llegada de las tecnologías digitales, así como de nuevos sistemas de compresión de información, el espectro radioeléctrico utilizado para la difusión de un canal de televisión con tecnología analógica permite, con la televisión digital, la transmisión de hasta 6 programas. Este ahorro de un bien tan escaso y valioso como es el espectro radioeléctrico, además de significar una gestión más eficiente del mismo, supone que con la implantación de la televisión digital terrestre y el cese de las emisiones de televisión analógica, se consiga una liberación de espectro. Este excedente de espectro radioeléctrico es lo que se denomina Dividendo Digital.

Inicialmente, parte de las bandas de frecuencias de UHF estaban atribuidas en el Reglamento de Radiocomunicaciones de la ITU (*International Telecommunication Union*) como servicio primario para los servicios de radiodifusión, por lo que era previsible en un principio que, tras el cese analógico, el Dividendo Digital se emplease para incrementar los servicios de televisión digital. No obstante, durante los últimos años ha aumentado la percepción del valor de las tecnologías y servicios de comunicaciones móviles de banda ancha, tanto para la innovación tecnológica, como para conseguir ganancias de productividad, crecimiento, así como reducciones de coste en la economía global. Todos estos factores han llevado a alcanzar un consenso general, a nivel mundial, para disponer de manera urgente de espectro radioeléctrico adicional para redes de telefonía móvil. Teniendo en cuenta esta necesidad, en la **Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007** (*World Radiocommunication Conference, WRC-07*), convocada por la ITU se acordó la atribución de la banda 698-862 MHz al servicio móvil en co-primario con los servicios de radiodifusión, ya que es imprescindible para estimular el despliegue de los servicios de nueva generación móviles, la denominada 4G LTE (*Long Term Evolution*), estándar desarrollado por el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*).

Con el fin de planificar, atribuir y asignar las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico, para que todos los países puedan compartir este recurso limitado de forma adecuada, la ITU ha dividido al mundo en tres Regiones: la Región 1 (abarca Europa y África), la Región 2 (tanto Norteamérica como Sudamérica) y la Región 3 (Asia y Australia). Tal y como se puede observar en la Figura 1:

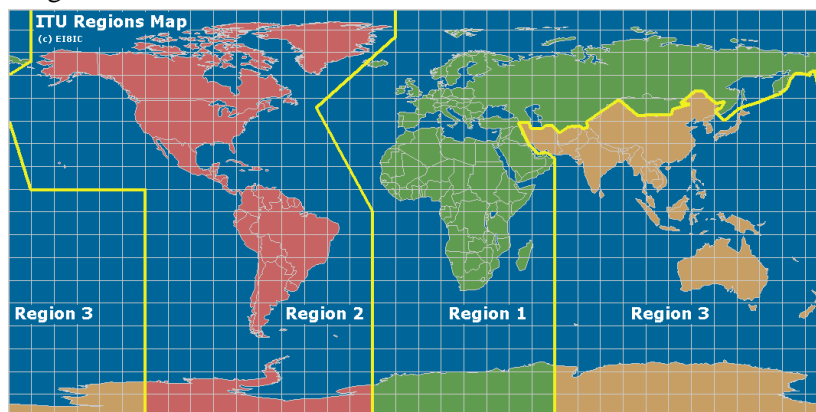


Figura 1. Mapa de Regiones determinadas por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (ITU).

Desde el punto de vista de canalización para señales de televisión en la banda de UHF, la Región 1 y la 3 asumieron un ancho de banda de 8 MHz para cada canal, mientras que la Región 2 decidió asignar un ancho de banda de 6 MHz.

Cada región decidió qué parte del espectro destinado a telefonía móvil en el Dividendo Digital sería utilizado para LTE. Concretamente, en la Región 1 y la 3, se adoptaron destinar inicialmente la banda que abarca de 790-862 MHz (a partir de ahora banda de 800 MHz). Mientras que en la Región 2, se adoptó destinar la banda 698-806 MHz (a partir de ahora banda de 700 MHz) en Norteamérica y Sudamérica. Además, en Sudamérica se ha considerado también la utilización de la banda 450-470 MHz (a partir de ahora banda de 450 MHz) para servicios de 4G. Un resumen de las bandas destinadas a telefonía móvil para cada región se muestra en la Tabla 1:

Bandas asignadas a telefonía móvil	Región 1	Región 2	Región 3
450 – 470 MHz		X (solo en Sudamérica)	
698-806 MHz		X	X (en 9 países)
790-862 MHz	X		X

Tabla 1. Frecuencias UHF asignadas a telefonía móvil.

En cuanto al estándar de televisión digital cada Región adoptó uno diferente. El estándar de televisión digital utilizado en la Región 1 es el DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*), junto con su evolución DVB-T2. En la Región 2 cada país optó por utilizar un estándar digital distinto, por ejemplo, en Estados Unidos adoptaron el estándar ATSC (*Advanced Television Systems Committee*), en varios países de Sudamérica se decantaron por ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting*) y en Colombia se decidió utilizar el mismo estándar considerado en Europa, es decir DVB-T/T2. Los distintos estándares adoptados por cada país se muestran en la Figura 2:

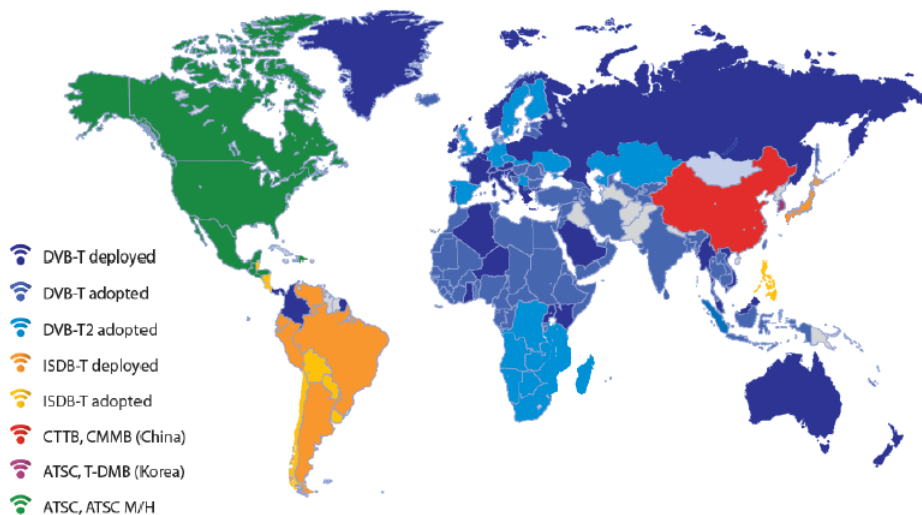


Figura 2. Estándares de Televisión Digital Terrestre.

Actualmente la canalización de las bandas del Dividendo Digital y la banda de 450 MHz destinado a la tecnología 4G es:

- Para la banda de 800 MHz, la EU (European Union) decidió asignar dos bloques pareados de 30 MHz, separados por 11 MHz entre ellos y dejando una banda de guarda con el último canal de la TDT (60) de 1 MHz. El enlace adyacente en este caso es el Downlink. Esta canalización se muestra en la Figura 3.

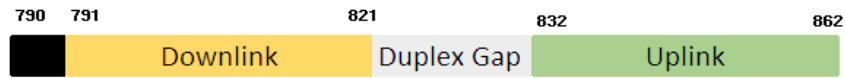


Figura 3. Canalización LTE para la banda 800 MHz adoptada por la UE.

- Para la banda de 700 MHz, la APT (Asia-Pacific Telecommunity) decidió asignar dos bloques pareados de 45 MHz, separados por 10 MHz entre ellos y dejando 5 MHz de banda de guarda con el último canal de la TDT (51). El enlace adyacente en este caso es el Uplink. Esta canalización se muestra en la Figura 4.

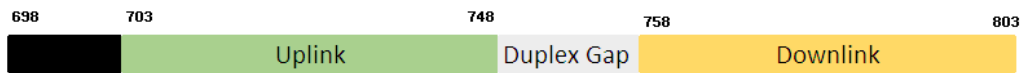


Figura 4. Canalización LTE para la banda de 700 MHz adoptada por la APT.

- Para la banda de 450 MHz, en Colombia se decidió asignar dos bloques pareados de 5 MHz, separados por 5 MHz entre ellos y dejando 2,5 MHz de banda de guarda con el primer canal de la TDT (14). El enlace adyacente en este caso es el Downlink. Esta canalización se muestra en la Figura 5.



Figura 5. Canalización LTE para la banda de 450 MHz adoptada por Colombia.

Por tanto, al tratarse de tecnologías adyacentes, y teniendo en cuenta las recomendaciones de organismos internacionales y los estudios, pruebas y experiencias observadas en otros países, se consideró necesario identificar y analizar las potenciales afectaciones que podrían aparecer como consecuencia de la prestación de servicios LTE en las bandas presentadas anteriormente, y el servicio de televisión digital que se continúa prestando en la banda adyacente. En particular, se deben identificar las posibles interferencias sobre la recepción TDT en los hogares de los usuarios, así como, en su caso, las técnicas para mitigarlas.

2 Objetivos

La realización de este Proyecto Final de Carrera tiene como objetivo principal evaluar las condiciones técnicas que deben existir para asegurar la coexistencia de la televisión digital terrestre, según su estándar DVB-T2 y la telefonía móvil de cuarta generación, LTE, en las distintas bandas del Dividendo Digital. Para ello se han planteado los siguientes objetivos específicos:

- **Medir las interferencias existentes entre tecnología y obtener los márgenes de protección:** Se estudiará el comportamiento de cada uno de los escenarios para interferencias de canal adyacente. Se efectuarán cuatro campañas de medidas:
 - TDT vs LTE de manera genérica.
 - DVB-T2 vs LTE en la banda de 800 MHz.
 - DVB-T2 vs. LTE en la banda de 700 MHz.
 - DVB-T2 vs. LTE en la banda de 450 MHz.
- **Evaluar distintas soluciones** para mitigar las interferencias en línea con lo establecido por otros países, realizando nuevas medidas de márgenes de protección necesarios para los casos estudiados.
- **Acreditar mediante un balance de enlace teórico** los requisitos necesarios para una correcta coexistencia para cada uno de los escenarios evaluados.
- **Recomendar de entre las distintas soluciones** aquella que sea más ventajosa tanto para el usuario como para el organismo licenciatario.

3 Descripción de escenarios

En este apartado se presentan todos los posibles escenarios de convivencia entre las redes implicadas durante este estudio y se dan las razones de por qué algunos son descartados al ser menos críticos. En primer lugar se presentan aquellos posibles escenarios de convivencia en la banda de 800 MHz, donde el enlace LTE interferente adyacente a la TDT es el Downlink. En segundo lugar se presentan los escenarios asociados a la convivencia en la banda de 700 MHz. En este caso es el Uplink el enlace LTE adyacente a la TDT. Por último, se presentarán los escenarios de convivencia a 450 MHz, donde, de nuevo, es el Downlink, en enlace LTE adyacente a la TDT. Estas dos últimas bandas de frecuencia fueron estudiadas con motivo del contrato “Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con otros Servicios de Telecomunicaciones en Bandas de Frecuencias Adyacentes para Colombia” encomendado por la Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia al Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTeAM).

3.1 TDT vs. LTE en la banda de 800 MHz

La convivencia entre la red de TDT DVB-T2 y la red de red telefonía celular 4G LTE, se evaluará mediante el estudio y análisis de interferencias entre ambas en el borde superior de 790 MHz y la red 4G LTE en la banda de 800 MHz. Se considerará como objeto de estudio la situación que se presentará en la Región 1 de la ITU donde la adyacencia entre sistemas estará en los **dos últimos canales de TDT**: Canal 59 (774-782 MHz) y 60 (782-790 MHz), y la red 4G LTE en la banda de 791-821 MHz para el enlace Downlink.

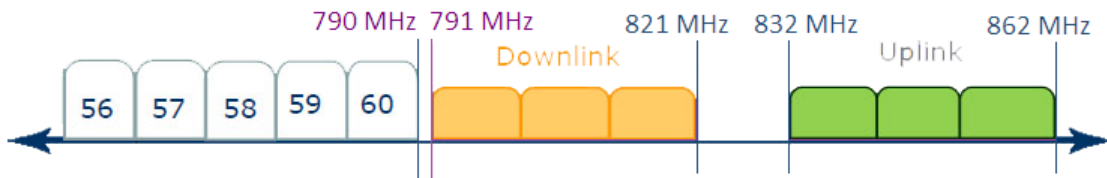


Figura 6. Posible canalización, donde el último canal TDT es el 60, con frecuencia de corte 790 MHz. LTE compuesto por dos bloques de 30 MHz, comenzando en 791 MHz. Banda de guarda 1 MHz entre tecnologías.

El modo de transmisión DVB-T2 que será evaluado para calcular la interferencia producida por LTE en la banda de 800 MHz es el presentado en la Tabla 2, utilizado en Reino Unido:

Parámetro	Modo	Indicador de rendimiento	Valor
Tamaño FFT	32k extendido	CNR Rice (dB)	20
Intervalo de guarda (GI)	1/128	CNR Rayleigh (dB)	22,1
Modulación	256-QAM	Capacidad (Mbps)	40,4
Tasa de codificación (CR)	2/3	Ganancia frente a DVB-T	42%
Patrón Portadoras (PP)	PP7	Distancia SFN (km)	8

Tabla 2. Modo de transmisión DVB-T2 adoptado en Reino Unido.

En este caso, la banda de guarda es solamente de 1 MHz. El caso a estudiar engloba dos escenarios:

- Escenario con recepción DVB-T2 fija sobre tejado interferida por LTE DL.
- Escenario con recepción DVB-T2 en interiores interferida por LTE DL.

3.1.1 Escenario para Recepción fija sobre tejado

En este escenario el caso más crítico será aquel en el que la estación base LTE se encuentra muy cercana al receptor TDT cuya antena está orientada en la misma dirección de apuntamiento que la estación base. Además, se considera que se encuentra en el borde de cobertura de la estación transmisora TDT, recibiendo una potencia cercana al umbral. Como se ha comprobado en el Anexo 2 del Informe número 30 del CEPT [**CEPT-30**], el escenario con recepción en interiores no es tan crítico como el anteriormente mencionado, aunque se ha considerado también, pues se trata de un caso diferente. El escenario con recepción fija es el siguiente:

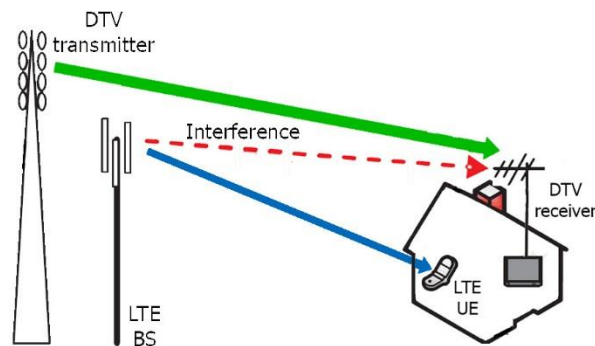


Figura 7. Recepción DVB-T2 fija sobre tejado. Interferencia LTE Downlink. Banda de 800 MHz.

Se calcularán los márgenes de protección necesarios para la señal útil TDT para diferentes casos: en función de la utilización o no de filtros o aumentando la banda de guarda y desestimando el uso del último canal de TDT, tal y como se hizo en Irlanda. Se realizará un balance de enlace en el que se aportarán unas restricciones mínimas para el correcto funcionamiento del mismo. Se supone una distribución de edificios urbana.

3.1.2 Escenario para Recepción en interiores

El escenario con recepción en interiores no es tan crítico como el anterior, ya que en este caso, la señal LTE interferente proveniente de la estación base ha de atravesar paredes con las pérdidas de penetración que ello conlleva, por tanto **se podría descartar su estudio**, pero aun así se realizarán medidas de márgenes de protección. Dicho escenario sería el siguiente:

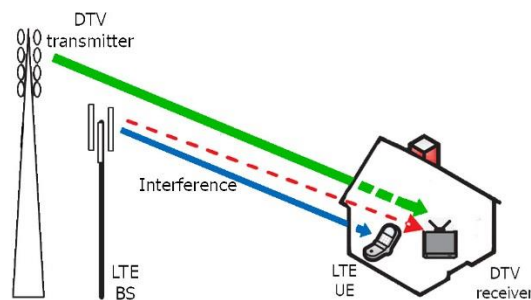


Figura 8. Recepción DVB-T2 portable indoor. Interferencia LTE Downlink. Banda de 800 MHz.

3.2 TDT vs. LTE en la banda de 700 MHz

En este capítulo se presentarán los escenarios asociados a la convivencia entre la red de TDT DVB-T2 y la red de telefonía celular 4G LTE. La red TDT se sitúa en el borde superior de 698 MHz y el enlace Uplink LTE en la banda de 703 a 748 MHz. Se considerará como objeto de estudio los dos últimos canales de TDT: Canal 50 (686-693 MHz) y 51 (693-698 MHz). Como se puede observar en la Figura 9, la canalización adoptada ha sido la que ha aconsejado la APT.

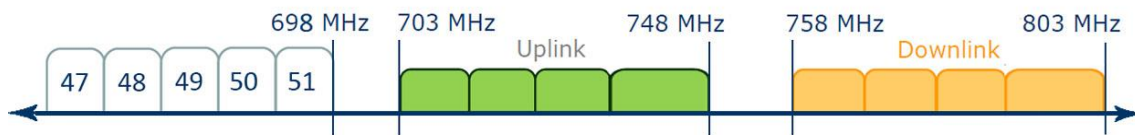


Figura 9. Posible canalización, donde el último canal TDT es el 51, con frecuencia de corte 698 MHz. LTE compuesto por dos bloques de 45 MHz, comenzando en 703 MHz. Banda de guarda 5 MHz entre tecnologías.

Para este caso se considerarán el modo de transmisión DVB-T2 presentado en la Tabla 3:

Parámetro	Modo	Indicador de rendimiento	Valor
Tamaño FFT	16k extendido	CNR Rice (dB)	14,7
Intervalo de guarda (GI)	1/8	CNR Rayleigh (dB)	16,5
Modulación	64-QAM	Capacidad (Mbps)	17,25
Tasa de codificación (CR)	3/5	Ganancia frente a DVB-T	53%
Patrón Portadoras (PP)	PP3	Distancia SFN (km)	90

Tabla 3. Modo de transmisión DVB-T2 para banda 700 MHz.

En este caso, la banda de guarda es de 5 MHz. En la red de telefonía celular en el borde superior emite el terminal móvil, es decir, se analizará el enlace Uplink. Para dicha red se modelarán diferentes casos en función de la carga del sistema y máxima potencia transmitida. Los posibles escenarios que se pueden dar cuando la señal de TDT DVB-T2 es interferida por señales 4G LTE son los siguientes:

- Recepción DVB-T2 fija sobre tejado. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en interior.
- Recepción DVB-T2 fija sobre tejado. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en exterior.
- Recepción DVB-T2 en interiores. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en interior.
- Recepción DVB-T2 en interiores. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en exterior.

3.2.1 Escenarios para Recepción fija sobre tejado

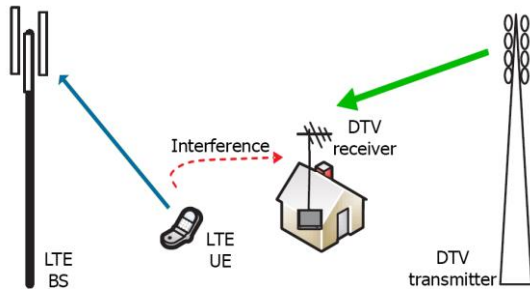


Figura 10. Recepción DVB-T2 fija sobre tejado. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en exterior

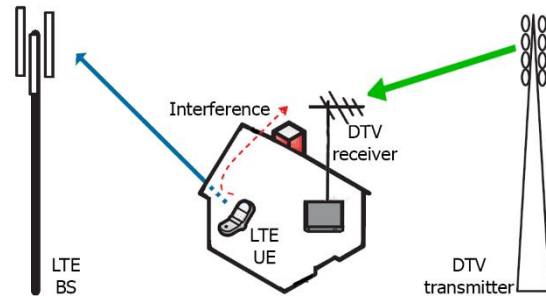


Figura 11. Recepción DVB-T2 fija sobre tejado. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en interior.

En el escenario de la izquierda, 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, es decir, recibiendo la potencia mínima necesaria para su correcto funcionamiento.

En el escenario de la derecha 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 de la Figura 11 se ha desestimado como objeto de estudio.**

Para el escenario de la Figura 10, se calcularán los márgenes de protección necesarios para la señal útil TDT para diferentes casos: en función de la utilización o no de filtros o aumentando la banda de guarda y desestimando el uso del último canal de TDT, tal y como se hizo en Australia. Se realizará un balance de enlace en el que se aportarán unas restricciones mínimas para el correcto funcionamiento del mismo. Se supone una distribución de edificios urbana.

3.2.2 Escenarios para Recepción en interiores

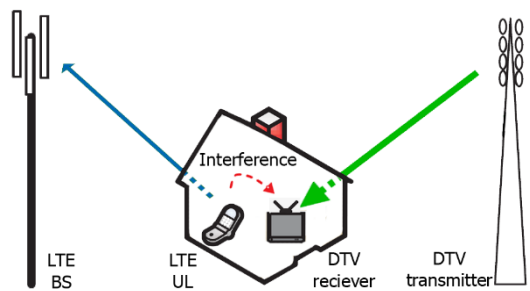


Figura 12. Recepción DVB-T2 en interiores. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en interior.

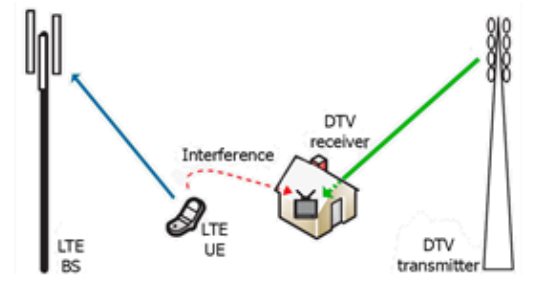


Figura 13. Recepción DVB-T2 en interiores. Interferencia LTE Uplink. Terminal LTE en exterior.

En el escenario de la izquierda, se evaluará inicialmente 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 de la derecha, donde las posibles soluciones serán las mismas que para el escenario anterior, aunque menos restrictivas. Las soluciones para reducir la distancia mínima

entre el terminal móvil y receptor TDT serán similares a las consideradas para el escenario de recepción fija.

3.3 TDT vs. LTE en la Banda de 450 MHz

Por último, en este capítulo se realiza un estudio técnico de convivencia entre la red de TDT DVB-T2 en el borde inferior de 470 MHz y la red 4G LTE en la banda de 450-470 MHz. Se considerará como objeto de estudio los **dos primeros canales de TDT**: Canal 14 (470-476 MHz) y 15 (476-482 MHz), con el modo de transmisión DVB-T2 mostrado en la Tabla 4:

Parámetro	CCNP	Indicador de rendimiento	Valor
Tamaño FFT	16k extendido	CNR Rice (dB)	18
Intervalo de guarda (GI)	1/8	CNR Rayleigh (dB)	20,4
Modulación	64-QAM rotada	Capacidad (Mbps)	20,36
Tasa de codificación (CR)	3/4	Ganancia frente a DVB-T	44%
Patrón Portadoras (PP)	PP2	Distancia SFN (km)	90

Tabla 4. Modo de transmisión DVB-T2 para banda 450 MHz.



Figura 14. Canalización LTE para Colombia en 450 MHz vs. Canales 14 y 15 DVB-T2. Banda de guarda entre tecnologías de 2,5 MHz.

En este caso, la banda de guarda es de 2,5 MHz. El caso de DVB-T2 como señal útil interferido por LTE en la banda de 450 MHz engloba dos escenarios:

- Escenario con recepción DVB-T2 fija sobre tejado interferida por LTE DL.
- Escenario con recepción DVB-T2 en interiores interferida por LTE DL.

3.3.1 Escenario para Recepción fija sobre tejado

Este escenario es similar al presentado en la banda de 800 MHz, donde se evalúa el caso LTE en Downlink, interfiriendo sobre antena fija con recepción en tejado. Como entonces el caso más crítico será aquel en el que la estación base LTE se encuentra muy cercana al receptor TDT, cuya antena está orientada en la misma dirección de apuntamiento que la estación base. Además, se considera que se encuentra en el borde de cobertura de la estación transmisora TDT, recibiendo una potencia cercana al umbral. El escenario con recepción fija es el siguiente:

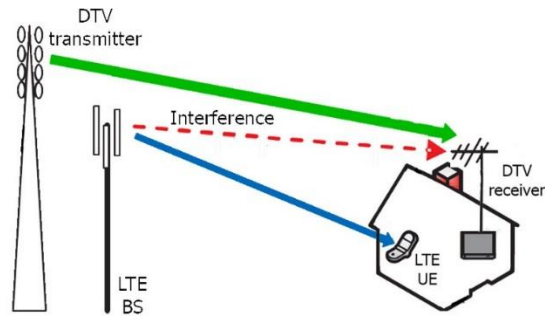


Figura 15. Recepción DVB-T2 fija sobre tejado. Interferencia LTE Downlink. Banda de 450-470 MHz.

Se calcularán los márgenes de protección necesarios para la señal útil TDT y se realizará un balance de enlace en el que se aportarán unas restricciones mínimas para el correcto funcionamiento del mismo. Como siempre se supone una distribución de edificios urbana.

3.3.2 Escenario para Recepción en interiores

El escenario con recepción en interiores, tal y como se dijo en la banda de 800 MHz, no es tan crítico como el anterior, ya que en este caso, la señal LTE interferente proveniente de la estación base tiene que atravesar paredes con las pérdidas de penetración que ello conlleva. Dicho escenario es el siguiente:

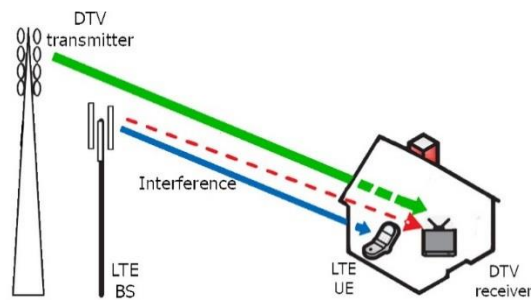


Figura 16. Recepción DVB-T2 portable indoor. Interferencia LTE Downlink. Banda de 450-470 MHz.

Por lo tanto, **se podría descartar su estudio**, pero aun así se realizarán medidas de márgenes de protección igualmente.

4 Estado del Arte

4.1 Descripción de las tecnologías involucradas

4.1.1 Introducción a DVB-T

DVB-T (Digital Video Broadcasting – Terrestrial) es el estándar de televisión digital terrestre creado por la organización europea DVB. Este sistema transmite audio, video y otros datos a través de un flujo MPEG-2, usando una modulación COFDM.

El estándar DVB-T forma parte de toda una familia de estándares de televisión digital terrestre, DVB, que se divide según diversas tecnologías:

- DVB-T: emitido a través la red de distribución terrestre de señal utilizada en la antigua televisión analógica tradicional.
- DVB-S: emitido desde satélites geoestacionarios (GEO).
- DVB-C: emitido vía cable.
- DVB-H: destinado a emisiones a dispositivos móviles con reducida capacidad de procesamiento.
- DVB-IPTV: destinado a emisión de televisión por Internet (ADSL).
- DAB: utilizado para las emisoras de radio en formato Radio-digital.
- DVB-T2: evolución del estándar DVB-T.

En este Proyecto interesa evaluar, de esta familia de estándares, única y exclusivamente DVB-T y DVB-T2.

4.1.1.1 La señal DVB-T

El estándar de televisión digital terrestre DVB-T hace uso de la modulación COFDM. En la transmisión de cada frame consigue grandes capacidades de transmisión (de hasta 30 Mbps), gracias a utilizar miles de subportadoras moduladas a una tasa muy baja (cada subportadoras a unos pocos kbps).

Como cada subportadora transmite únicamente un pequeña parte de la información, si ésta es destruida durante la propagación a lo largo de un canal terrestre, por desvanecimientos de señal debido a la propagación multicamino, ruido en el canal, interferencias, etc., solo esa pequeña cantidad de información se perderá.

El hecho de utilizar COFDM (Coded Orthogonal Division Multiplex) significa que los datos están protegidos, lo que permite al demodulador recuperar los datos perdidos utilizando códigos de protección mediante información redundante. La organización en tiempo-frecuencia de este tipo de modulación se puede observar en la Figura 17.

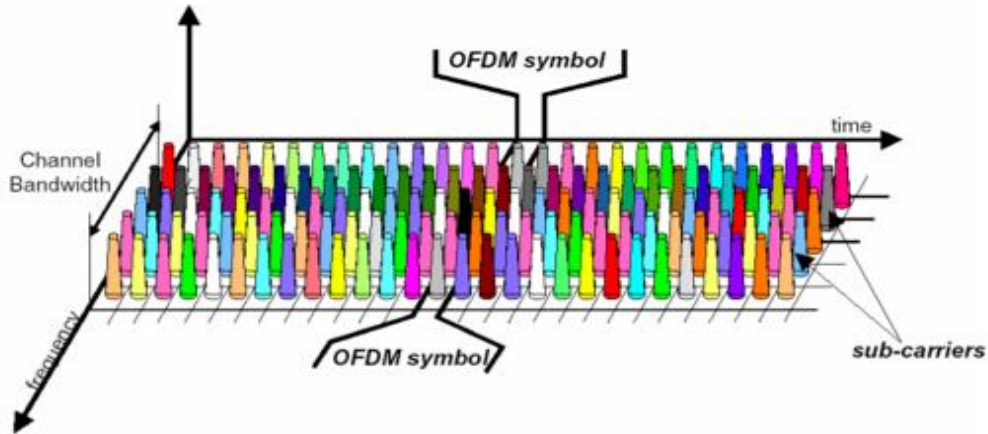


Figura 17. Organización tiempo-frecuencia de un frame DVB-T [HBE-DVBT]

Con el fin de evitar interferencia entre subportadoras (ICI), éstas se encuentran ortogonalmente espaciadas, lo que significa que el espacio se escoge de forma que sea igual a la inversa de la duración de símbolo. Entonces, para un ancho de banda concreto, cuanto mayor sea el espaciado entre portadoras, más pequeña será la duración del símbolo. Esto constituye principalmente el frame que se desea enviar, que cambiará en función de la modulación y el número de portadoras que se desee enviar.

También, para evitar interferencia entre símbolos (ISI), se inserta un intervalo de guarda o prefijo cíclico entre cada símbolo COFDM. Este prefijo cíclico consiste en extender de forma cíclica el símbolo. Así, cada símbolo es precedido por una extensión periódica de sí mismo.

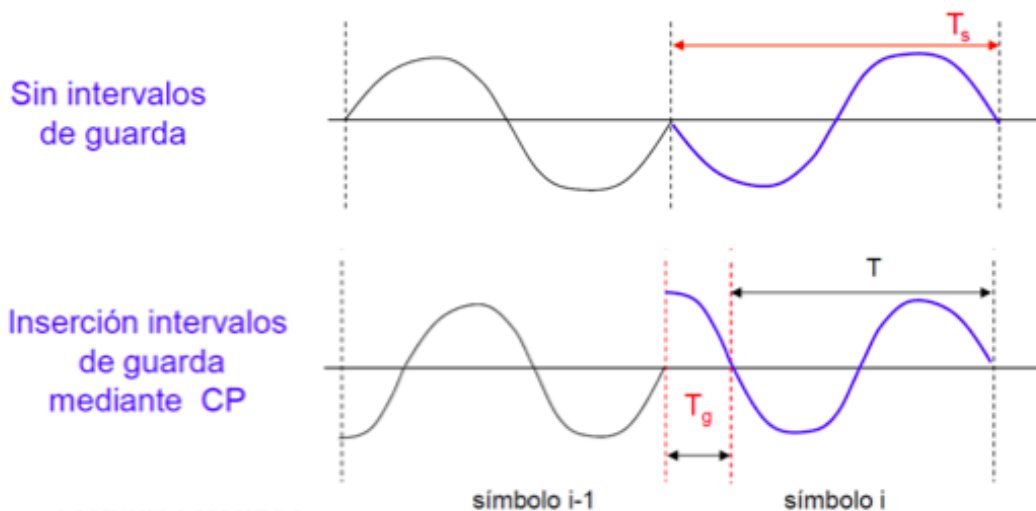


Figura 18. Inserción de Prefijo Cíclico en COFDM.

Este tipo de disposición en la transmisión de un frame permite al receptor tener una ventana FFT durante la cual se muestrea el canal. La duración de la FFT es precisamente la duración del “periodo útil”. En DVB-T existen dos modos principales de operación relacionados con el número de subportadoras:

- Modo FFT 2K
- Modo FFT 8K

En COFDM, la carga útil de datos no depende del número de subportadoras. Por tanto, en DVB-T, aunque la configuración 8K utilice 4 veces más subportadoras que la configuración 2K, se consiguen los mismos bitrates para ambos sistemas.

4.1.1.2 Señalización, sincronización y estimación de canal

Para que el sistema funcione correctamente, hay que considerar otros aspectos en la transmisión de un frame, los cuales, a costa de un mejor funcionamiento, consumen parte del bitrate de la señal de transmisión:

- Señalización: Se utiliza para conocer en recepción qué parámetros se han utilizado para la transmisión de la señal, es decir: número de portadoras, tamaño de la FFT, Code Rate empleado, modulación, intervalo de guarda, etc. Constituye la primera información que el receptor va a capturar para programar el proceso de demodulación. Los parámetros de señalización, a lo largo del frame, se situarán de forma dispersa en tiempo y frecuencia, o siempre sobre determinadas portadoras (portadoras piloto).
- Sincronización: Se traduce principalmente en ignorar la señal recibida durante el periodo del intervalo de guarda y, al mismo tiempo, seleccionar la frecuencia y la ventana para la FFT adecuadas. Para ello, el receptor encontrará algunos indicadores en la señal.
- Estimación de canal: Como los pilotos de la señal son conocidos tanto en transmisión como en recepción, se puede estimar el comportamiento del canal comparando los pilotos recibidos con los que teóricamente se han transmitido. De esta forma se puede recuperar parte de la señal, siempre y cuando el nivel de ruido sea bajo y no degrade demasiado la señal recibida. Esto está directamente relacionado con el nivel de CNR necesario.

4.1.1.3 Tasa de codificación, mapeo y entrelazado

Una vez se ha definido la estructuración de la trama, y cómo ayudar al receptor a recibir la misma, hay que estudiar cómo transmitir los datos. A la hora de una transmisión digital multiportadora, se tiene diferentes aspectos:

- Qué modulación emplear con el fin de obtener la mejor relación entre robustez y bitrate de transmisión.
- Cómo generar diversidad en frecuencia en el mapeo, teniendo en cuenta que una transmisión selectiva en frecuencia afecta a un número concreto de subportadoras vecinas.
- Cómo generar diversidad en el tiempo, teniendo en cuenta que las variaciones del canal pueden provocar desvanecimientos del mismo durante un cierto periodo, y puede afectar por igual a una serie de símbolos COFDM consecutivos.

Con el fin de solucionar la primera de las tres cuestiones, DVB-T implementa tres tipos de modulaciones para cada subportadora en el mapeo:

- **QPSK** (*Quadrature Phase-Shift Keying*): es la más robusta de las tres. Desplazamiento de fase de 4 símbolos, desplazados entre sí 90° . Normalmente se usan como valores de salto de fase 45° , 135° , 225° , y 315° . Cada símbolo aporta 2 bits.
- **16-QAM** (*16-Quadrature Amplitude Modulation*): la Modulación de amplitud en cuadratura es una técnica que transporta datos, mediante la modulación de la señal portadora, tanto en amplitud como en fase. Esto se consigue modulando una misma portadora, desfasada en 90° . En este caso, cada símbolo aporta 4 bits.
- **64-QAM** (*64-Quadrature Amplitude Modulation*): misma técnica que la anterior, pero aportando 6 bits por símbolo. Es la menos robusta de las tres, pero genera bitrates mayores. Es útil cuando el canal no tiene demasiados desvanecimientos.

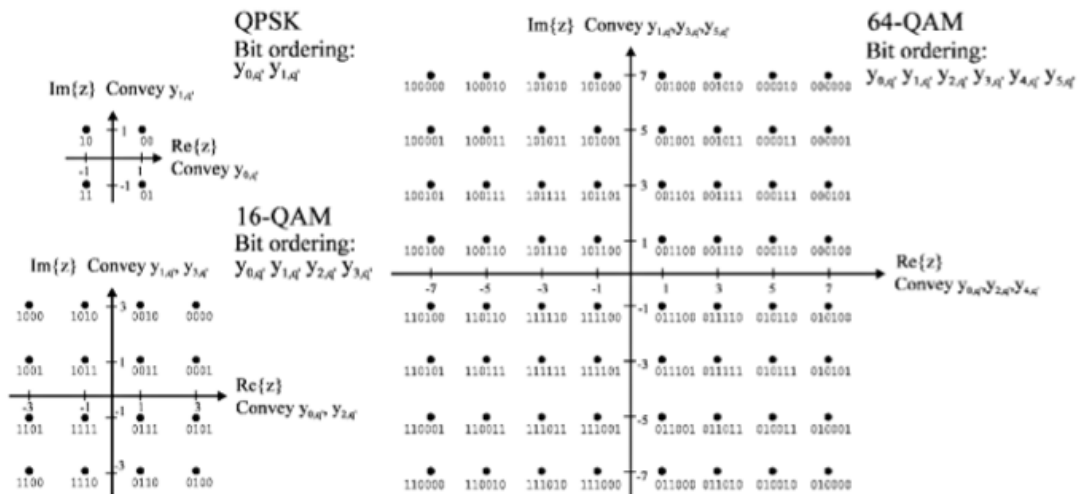


Figura 19. Modulaciones posibles empleadas en el mapeo de las subportadoras con DVB-T.

DVB-T hace uso de codificación de bloque y codificación convolucional de bits (por ejemplo: Reed-Solomon y Viterbi). También implementa entrelazado de bits y entrelazado de bytes. Se añade además un conjunto de bits de paridad por símbolo, también llamado Code Rate, expresado con la relación X/Y , cuyas opciones son: $1/2$, $2/3$, $3/4$, $5/6$, $7/8$, donde X son los bits de datos reales e Y son los bits transmitidos. Obviamente, cuanto mayor es el número de bits de protección, más robusta será la señal.

4.1.1.4 Diagrama de bloques del transmisor

Una vez conocida la señal DVB-T, qué tipo de modulaciones permite, qué técnicas de entrelazado y codificación emplea y qué tasas de codificación o Code Rates implementa, podemos ver en qué orden realiza cada una de estas técnicas, y cómo a partir de un MUX de diferentes Transport Stream se llega a obtener la señal COFDM que será enviada en el tiempo. Se puede observar en el siguiente diagrama de bloques [ETSI300744]:

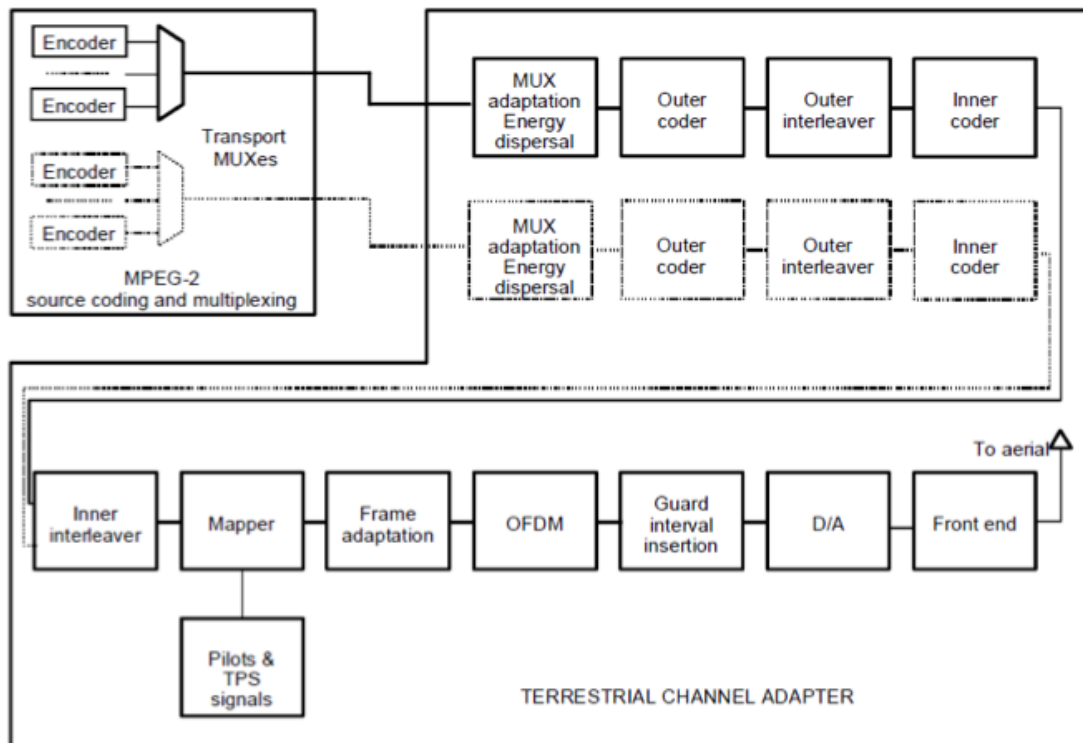


Figura 20. Diagrama de bloques de un Transmisor DVB-T [ETSI300744]

El transmisor DVB-T implementa las siguientes etapas:

1. Adaptación del Multiplex de Transporte y Dispersión de energía.
2. *Outer Coder*: añade bits de paridad mediante codificación Reed-Solomon (204/188, $t=8$), es decir, genera 204 bytes por cada 188 bytes de datos.
3. *Outer Interleaver*: entrelazado en frecuencia de bytes.
4. *Inner Coder*: codificador convolucional. Bloque donde se aplica el Code Rate seleccionado.
5. *Inner Interleaver*: entrelazado en frecuencia de bits y de símbolos.
6. *Mapping*: conversión de los bits a símbolos complejos, en función de la modulación empleada.
7. *Frame Adaptation*: la señal transmitida se organiza en frames. Cada frame tiene 68 símbolos OFDM.
8. Inserción de pilotos: para completar el frame, se inserta la señalización:
 - a. Scattered Pilots.
 - b. Continual Pilots

- c. TPS carriers
- 9. Modulación OFDM
- 10. Inserción del Prefijo Cíclico o Intervalo de Guarda
- 11. Conversión Digital/Analógica

4.1.1.5 Diagrama de bloques del receptor

Tras haber transmitido la señal de interés en el tiempo, y haber atravesado el canal que, según el entorno, el trayecto multicamino, la atenuación por la distancia y otros aspectos a tener en cuenta puede distorsionar dicha señal, ésta pasa por los diferentes bloques del receptor, realizando en cada uno de ellos el proceso inverso a lo que se hizo en transmisión. Al final, si el nivel de señal ha sido lo suficientemente bueno, se recuperarán los diferentes Transport Streams que se enviaron.

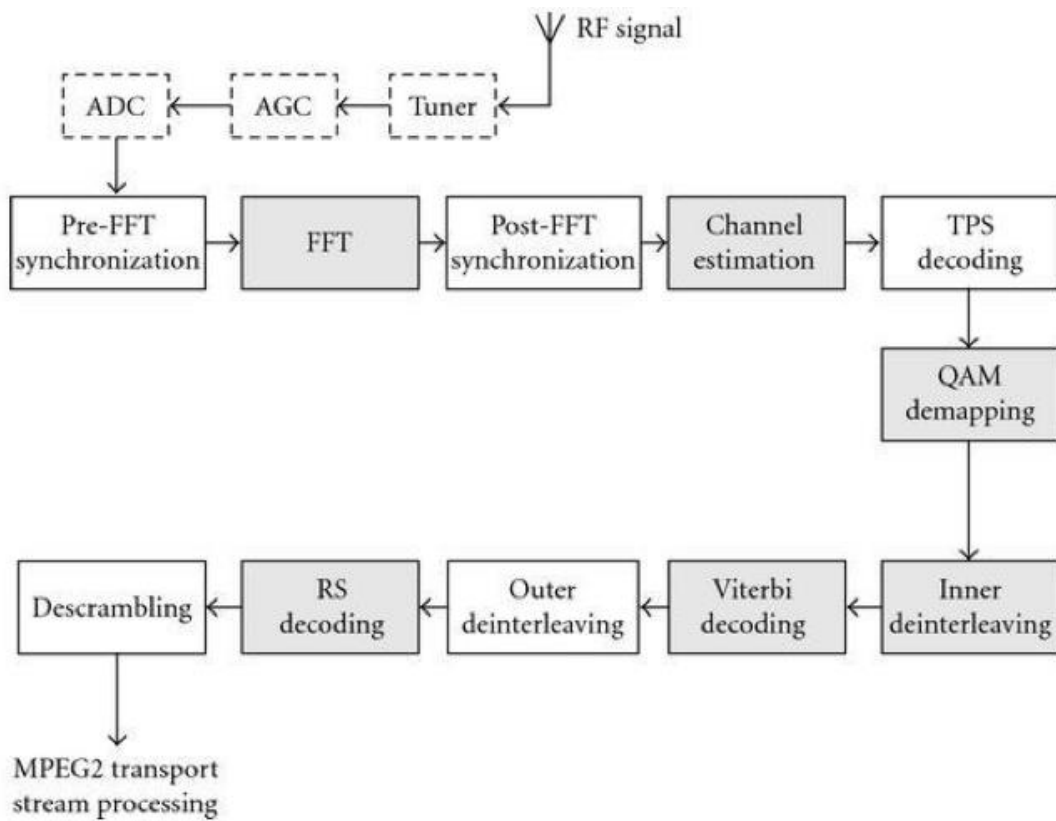


Figura 21. Diagrama de bloques de un receptor DVB-T [LJ957848]

El receptor, por tanto, para recuperar la señal implementa las siguientes etapas:

1. Búsqueda del canal y Conversión Analógica/Digital.
2. FFT: convierte la señal en el tiempo a frecuencia, para poder extraer la información de las diferentes subportadoras. Extrae el Prefijo Cíclico.
3. Estimación de canal: a partir de los pilotos, estima el canal por el que ha pasado la señal y la corrige.
4. Decodificación TPS: utiliza la señalización para sintonizar el modo, Code Rate, intervalo de guarda, etc., y extraer únicamente las subportadoras con información.
5. *Demapping*: extrae los bits a partir de los símbolos, en función de la modulación empleada.
6. *Inner Deinterleaver*: desentrelazado temporal de símbolos y bits.
7. *Viterbi Decoding*: elimina la redundancia por Code Rate.
8. *Outer Deinterleaver*: desentrelazado temporal de bytes.
9. *Outer Decoder*: elimina los bits de paridad, extrae 188 bytes de datos cada 204 bytes.
10. *Descrambling*: deshace la dispersión de energía y extrae los diferentes Transport Streams.

4.1.1.6 Constelación Jerárquica

Hasta ahora, siempre se ha obviado que el tipo de transmisión es regular, pero DVB-T ofrece la posibilidad de utilizar otro tipo de constelación: la Constelación Jerárquica.

Empleando una constelación regular, los datos protegidos y entrelazados se consideran como grupos de 2 (QPSK), 4(16-QAM) y 6(64-QAM) bits que representan la posición del punto modulado dentro de esa constelación. Utilizando la Constelación Jerárquica, el proceso es en esencia el mismo, pero se aplica a dos Transport Stream (TS) diferentes e independientes, como se puede observar en la Figura 20. Este tipo de constelación no puede ser utilizada si se está empleando una modulación QPSK.

El proceso de codificación de canal se aplica independientemente a los dos TS, es decir, atraviesan independientemente las etapas de Dispersión de Energía, Outer Coder, Outer Interleaver e Inner Coder, pero posteriormente se unen mediante la etapa de Inner Interleaver.

El mapeo considera grupos de 4 bits (16-QAM) o 6 bits (64-QAM), pero dentro de estos grupos, 2 bits pertenecen a la trama *High Priority* (HP), mientras que el resto son de la trama *Low Priority* (LP), como se puede ver en la Figura 22.

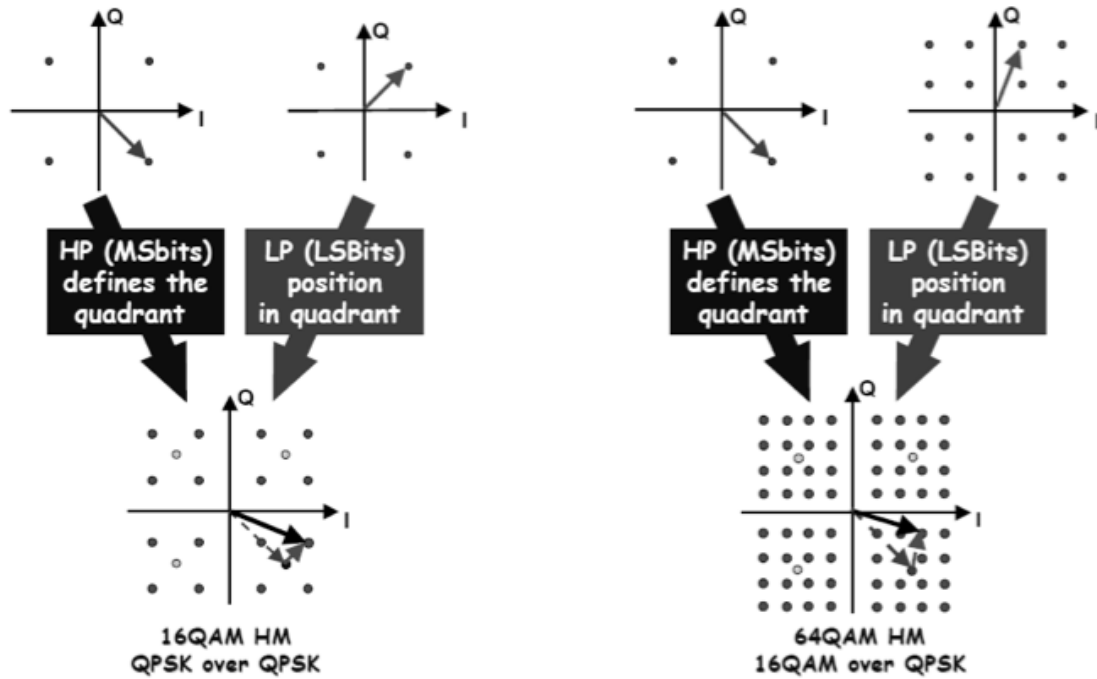


Figura 22. Construcción de la Constelación Jerárquica a partir de los bits HP y LP.

4.1.1.7 Características del espectro

Los símbolos OFDM constituyen, como ya se indicó anteriormente, una yuxtaposición de portadoras equiespaciadas. Las amplitudes y fases de las portadoras de datos varían en función del símbolo, de acuerdo al proceso de Mapeo. La densidad espectral de potencia $P_k(f)$ para cada portadora a la frecuencia:

$$f_k = f_c + \frac{k}{T_u} \left(-\frac{K-1}{2} \leq k \leq \frac{K-1}{2} \right)$$

viene definida con la siguiente expresión:

$$P_k(f) = \left[\frac{\sin \pi(f - f_k)T_s}{\pi(f - f_k)T_s} \right]^2$$

La densidad espectral de potencia total será la suma de todas las densidades espectrales de potencia individuales de cada subportadora, por lo que el espectro teórico de una señal DVB-T se observa en la Figura 23.

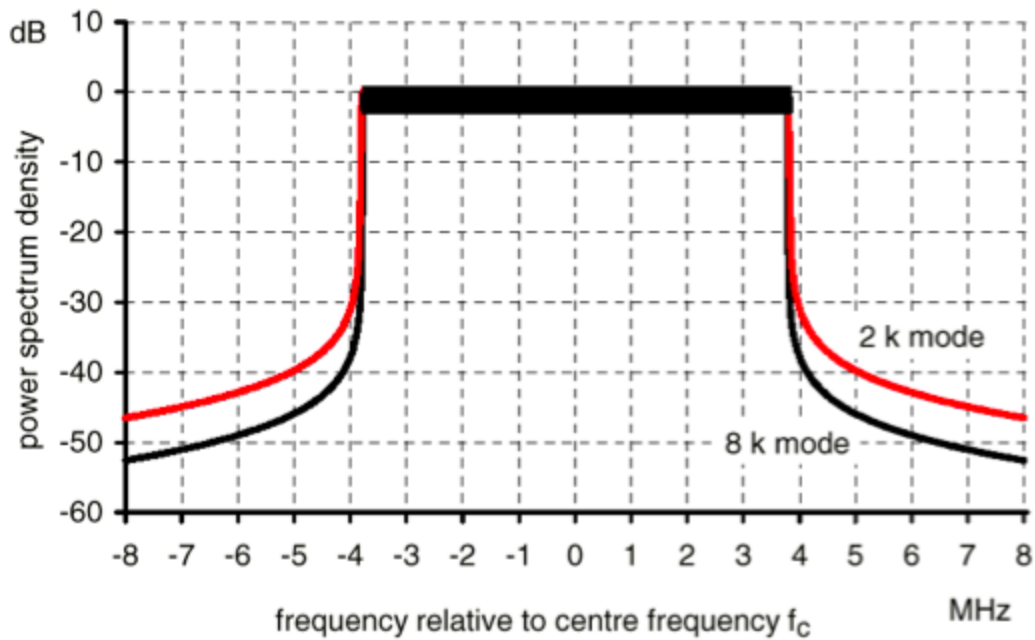


Figura 23. Espectro de la señal DVB-T teórico, para intervalo de guarda 1/4 y BW = 8 MHz.

4.1.2 Introducción a DVB-T2

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. Al haberse desarrollado extensamente el estándar DVB-T, aquí se va a nombrar únicamente las principales ventajas y técnicas novedosas que incorpora con respecto al estándar anteriormente visto.

4.1.2.1 Tamaño de la FFT

DVB-T2 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 configurables:

- 1K. Uso en banda III y banda L con anchos de banda de 1.7 MHz.
- 2K, 4K, 8K, 16K. Usados en el resto de bandas. Su elección depende de las condiciones de robustez (decreciente a mayor número de portadoras) frente a efecto Doppler.
- 32 K. Ofrece las tasas de datos más altas en DVB-TT2. Se recomienda para tasas de datos altas y recepción fija en tejado.

Al incluir tamaños grandes de FFT de 16k y 32k se permite la reducción de las interferencias de canal adyacente gracias a su rápida caída del espectro fuera de banda, cuyo comportamiento en el espectro se puede ver en la Figura 24. Se puede notar claramente la rápida caída en el espectro fuera de banda que produce la utilización de tamaños de FFT de 16k y 32k con la correspondiente reducción de interferencias en canal adyacente.

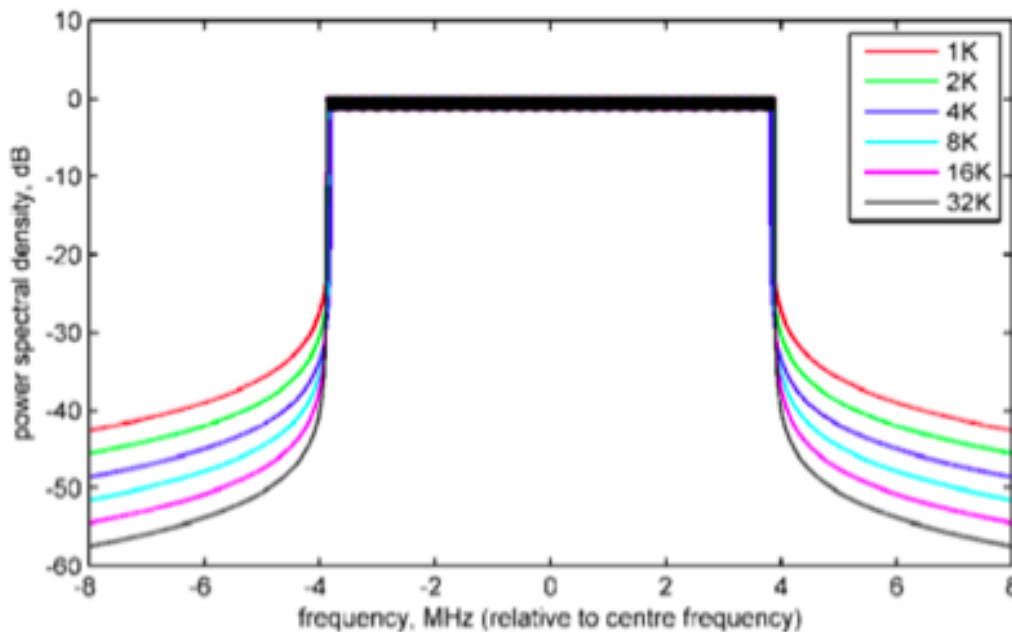


Figura 24. Espectro de la señal OFDM con distinto número de portadoras.

Además el incremento en tamaño de la FFT se traduce en periodos de símbolo OFDM más largos, lo que permite a su vez aumentar el tamaño del intervalo de guarda hasta en 4 veces comparado con DVB-T (máximo tamaño FFT 8k).

4.1.2.2 Modo extendido de FFT

La señal OFDM presenta un espectro aproximadamente rectangular con un factor de roll-off en los extremos que depende del espaciado entre portadoras OFDM. Para un mismo ancho de banda, el uso de un mayor tamaño de FFT (y, por consiguiente, un menor espaciado entre portadoras) propicia una caída más abrupta del espectro fuera de la banda que puede ser aprovechada con el fin de aumentar la capacidad de datos.

El uso del modo de portadora extendido, modifica el factor de roll-off en los extremos del espectro, extendiendo la zona útil de éste. Su utilización está recomendada para tamaños de FFT mayores de 8k con el fin de evitar interferencias de canal adyacente.

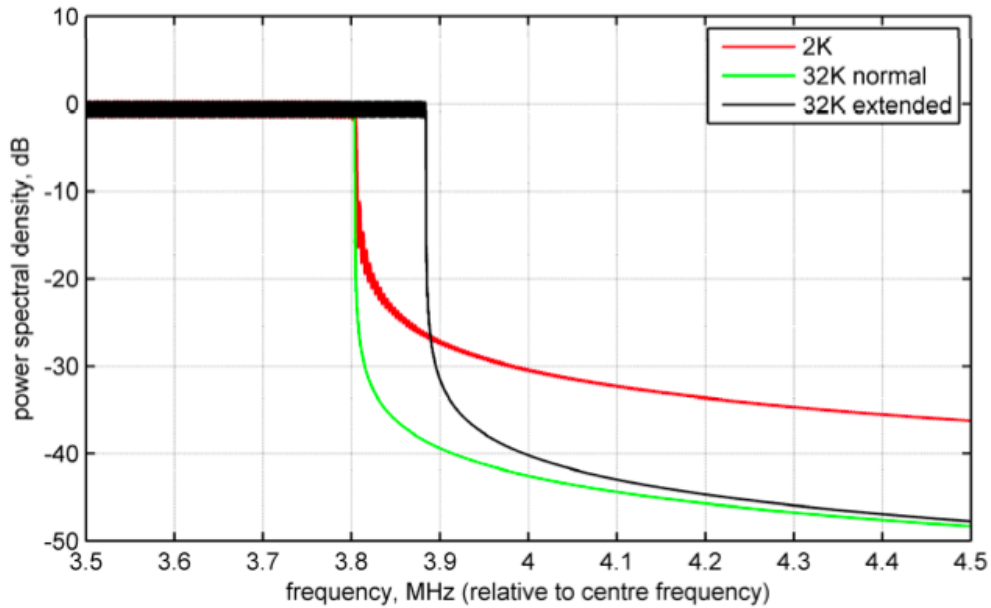


Figura 25. Respuesta espectral para diferentes tamaños de IFFT modo normal y extendido para un Intervalo de Guarda de 1/8.

4.1.2.3 Mecanismos PAPR (Peak-to-Average Power Ratio)

OFDM es una modulación multiportadora que tiene una elevada relación pico a nivel medio de potencia (PAPR), la cual impide que el amplificador de potencia RF trabaje al máximo nivel de salida permitido. DVB-T2 utiliza dos técnicas para la reducción de PAPR que permiten una reducción de los picos de potencia del amplificador de hasta un 25%, y reducir el nivel de emisiones fuera de banda, lo que ayudará a corregir las interferencias sobre otros canales; estas técnicas dan además la posibilidad de trabajar a los amplificadores de potencia a punto de saturación y por tanto aumentar el nivel de cobertura. Las técnicas utilizadas son:

- Tonos Reservados (TR)
- Extensión Activa de la Constelación (ACE)

4.1.2.4 Constelación rotada

Consiste en rotar todos los puntos de la constelación en un ángulo determinado (Figura 26). La idea principal es que los símbolos puedan reconstruirse a partir de un único eje de la constelación de manera que si se pierde el valor del otro eje en la transmisión todavía se pueda reconstruir el símbolo enviado gracias a que cada componente I y Q contiene información suficiente del símbolo transmitido. Al rotar la constelación logramos que los canales I y Q no sean independientes entre sí.

Modulation	QPSK	16-QAM	64-QAM	256-QAM
Φ (degrees)	29,0	16,8	8,6	atan (1/16)

Tabla 5. Ángulo de rotación para cada tipo de modulación.

Una vez generados los símbolos según la nueva constelación rotada, no tendría sentido enviarlos al mismo tiempo, ya que si una interferencia ocurriese en la transmisión afectaría a los

dos símbolos por igual, y el receptor no podría reconstruir el símbolo, por lo que se hace notoria la necesidad de usar un retardo en uno de los canales.

Por tanto, se introduce el concepto de retardo del canal en cuadratura, como el retraso del canal en cuadratura (Q) un tiempo específico, lo que en caso de desvanecimientos aumenta la probabilidad de que solo una componente I o Q de un símbolo se vea afectada, permitiendo recuperar el símbolo a partir de la otra componente.

El principal beneficio de las constelaciones rotadas es mejorar la robustez de la señal en canales con desvanecimientos selectivos en tiempo y frecuencia, experimentando una mayor ganancia con constelaciones de orden bajo (QPSK, 16-QAM) y tasas de codificación elevadas (3/4, 5/6, 7/8).

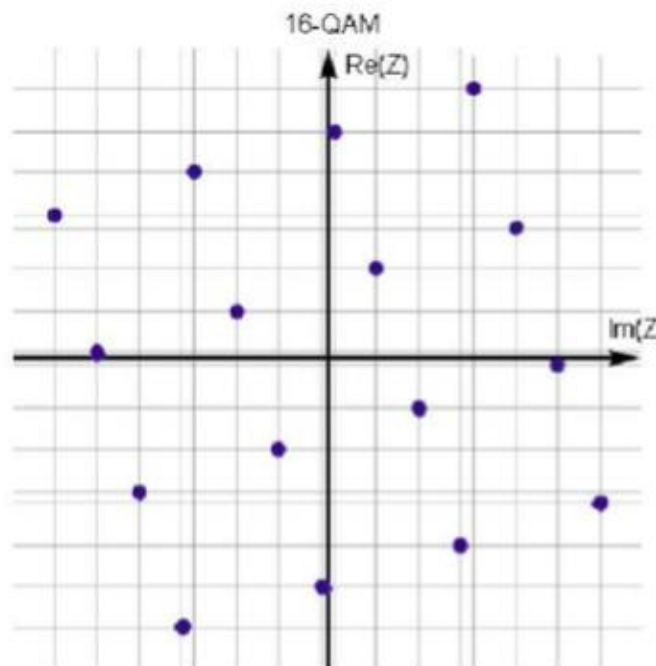


Figura 26. Diagrama de una constelación 16-QAM rotada.

4.1.2.5 Intervalo de guarda

DVB-T2 ofrece la posibilidad de utilizar nuevos intervalos de guarda, y suprime algunos de los que se empleaban con el estándar anterior DVB-T. Estos son los posibles intervalos que ofrece DVB-T2: (1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16, 1/32, 1/128). No todas las combinaciones de intervalo de Guarda y tamaño de la FFT están permitidas. Los intervalos de guarda permitidos dependiendo del tamaño de la FFT se pueden encontrar en [\[ETSI302755\]](#).

4.1.2.6 Patrón de Portadoras Piloto (PP)

Como ya se ha explicado anteriormente, las portadoras piloto son símbolos con amplitud y fase conocida por los receptores, usadas para estimar/ecualizar las características del canal en tiempo y frecuencia. Existen portadoras que son utilizadas continuamente como pilotos y otras que son asignadas dinámicamente. En DVB-T, una de cada 12 celdas OFDM es una portadora piloto, lo cual representa un 8% de overhead.

DVB-T2 define 8 patrones de portadoras piloto (PP1-PP8) con el fin de minimizar el overhead en función del tipo de recepción a la que está orientado el servicio. Las portadoras piloto son moduladas con una secuencia pseudo-aleatoria que puede ser utilizada para mejorar la sincronización en el tiempo y con un mayor nivel de potencia comparado con DVB-T, lo cual mejora la estimación de canal.

Como se ha expuesto, existen 8 patrones de portadoras pilotos adaptados a distintos escenarios (espaciados en tiempo D_y y frecuencia D_x). Su elección implica un compromiso entre capacidad y rendimiento:

- Rendimiento Doppler: mejora con patrones con tiempo de repetición alto ($D_y=2$). Para un entorno móvil/portátil se recomiendan patrones más densos ($D_y=2, 4, 6$).
- Capacidad: se consigue máxima capacidad con patrones poco densos (disminución de overhead).

4.1.2.7 Esquema de modulación

Respecto al esquema de modulación que se puede utilizar en la etapa de Mapping, DVB-T2 incorpora, además de los que ya implementaba DVB-T (QPSK, 16-QAM y 64-QAM), una nueva modulación:

- **256-QAM** (256-Quadrature Amplitude Modulation): este tipo de modulación de amplitud en cuadratura es una técnica que transporta, por cada símbolo, 8 bits. Con 8 bits por símbolo proporciona un 33% más de capacidad que 64-QAM, a costa de requerir un nivel de C/N mayor.

4.1.2.8 Características del espectro

El espectro de una señal DVB-T2 apenas varía respecto de una señal DVB-T, ya que utiliza el mismo tipo de modulación (OFDM), y por tanto, igual que ocurría antes, la densidad espectral de potencia total de las portadoras de datos moduladas es la suma de la densidad espectral de cada una de ellas.

Debido a que la duración de símbolo OFDM es mayor que el inverso del espaciado entre portadoras, el lóbulo principal de la densidad espectral de potencia de cada una de las portadoras es más estrecho que dos veces la separación de portadoras, por tanto la densidad espectral no es constante dentro del ancho de banda nominal. El espectro, incluyendo los nuevos modos de transmisión FFT, es el siguiente:

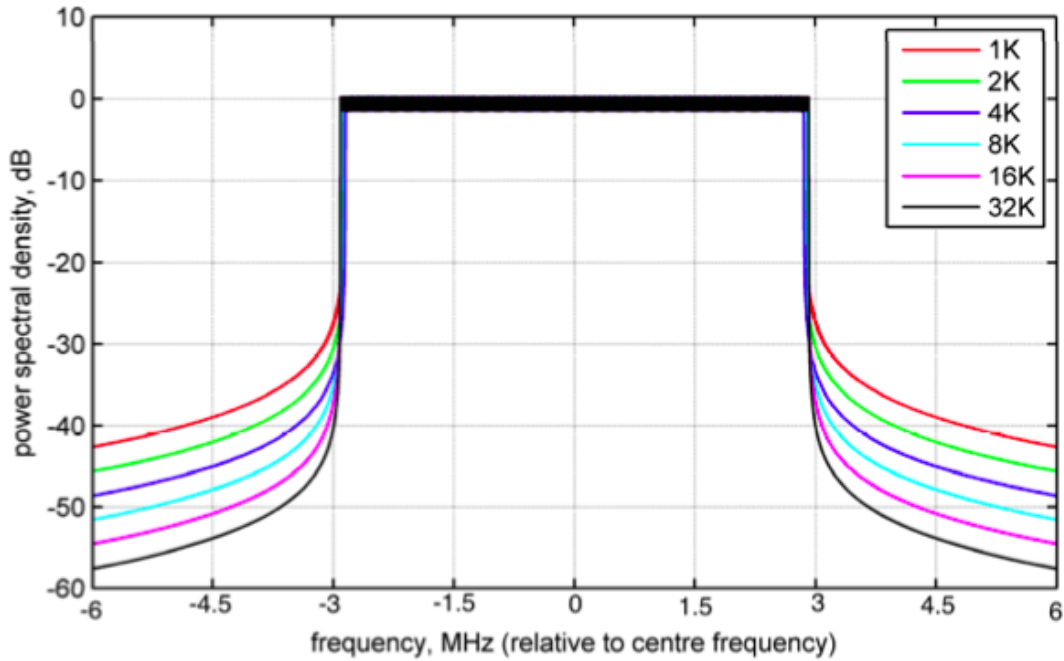


Figura 27. Espectro de la señal OFDM con distinto número de portadoras.

4.1.3 Introducción a LTE

4.1.3.1 Descripción General de la Tecnología

LTE es un estándar de comunicación inalámbrico de cuarta generación 4G telefonía móvil y terminales de datos, que mejora muy significativamente las prestaciones de capacidad y velocidad con respecto a las tecnologías celulares precedentes (2G GSM/EDGE y 3G UMTS/HSPA). LTE tiene las siguientes características:

- Multiplexación multiportadora OFDM.
- Alta eficiencia espectral con utilización de sistemas basados en múltiples antenas 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 de frecuencia.
- Posibilidad de formar redes de frecuencia única.
- Velocidades de pico:
 - Bajada: 326,5 Mbit/s para MIMO 4X4 y 172,8 Mbit/s para MIMO 2X2.
 - Subida: 86,5 Mbit/s (Release 8).
- Óptimo para desplazamiento Doppler de hasta 15 km/h. Permite hasta 500 km/h.
- Soporta más de 200 usuarios por celda para 5 MHz.
- Traspasos (*handover*) entre tecnologías 2G (GSM - GPRS - EDGE), 3G (UMTS - W-CDMA - HSPA) y LTE transparentes para los usuarios.

- Para voz, tanto 2G como 3G están basadas en técnicas de Conmutación de Circuito (CS), 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.

4.1.3.2 Enlace Descendente LTE (Downlink)

Estructura:

El mecanismo de acceso al medio en el Downlink LTE es OFDM, debido a su gran eficiencia espectral y a su reducción del tiempo de latencia. En OFDM, los usuarios tienen asignados un número específico de sub-portadoras durante una cantidad de tiempo predeterminada. Esto es lo que se conoce en las especificaciones de LTE como *Resource Blocks* (RB) [TS-36211].

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, los cuales se asignan a los usuarios de una forma dinámica y oportunista.
 - *Physical Broadcast Channel* (PBCH): transmite un número limitado de parámetros esenciales para el acceso inicial a la celda, como por ejemplo el ancho de banda.
 - *Physical Multicast Channel* (PMC): define la estructura de la capa física 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): si el dato recibido contiene errores, el receptor almacena el dato en vez de desecharlo y solicita una retransmisión al transmisor. Cuando el receptor recibe el dato retransmitido, lo combina con el dato almacenado anteriormente. Es decir, dos o más paquetes recibidos, cada uno con un SNR insuficiente para permitir la decodificación de manera individual pueden combinarse de tal manera que puede ser decodificada la señal total.

Diagrama de bloques de un canal físico DL:

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

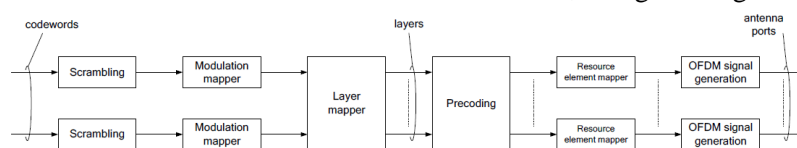


Figura 28. Diagrama de bloques del proceso de generación del canal físico Downlink [TS-36211].

La Figura 28 muestra los pasos a seguir para generar una señal en banda base de un canal físico. Se pueden distinguir los siguientes procesos:

- *Scrambling*: Aleatorización de los bits codificados.
- *Modulation Mapper*: Modulación de los bits aleatorizados para la generación de símbolos de valor complejo.
- *Layer Mapper*: Mapeo de los símbolos de valor complejo modulados en una o más capas de transmisión.
- *Precoding*: Precodificación de los símbolos de valor complejo modulados en cada capa de transmisión en los puertos de antena.
- *Resource Element Mapper*: Mapeo de los símbolos de valor complejo modulados de cada puerto de antena en los Resource Elements correspondientes.
- *OFDM Signal Generation*: Generación de 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.

4.1.3.3 Enlace Ascendente LTE (Uplink)

Estructura:

LTE utiliza para el Uplink la técnica de acceso al medio *Single Carrier – Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), que no es más que una OFDMA con una transformada de Fourier previa. SC-FDMA es un esquema de acceso múltiple que utiliza modulación de portadora única, multiplexación en frecuencia ortogonal y ecualización en el dominio de la frecuencia. Se ocupa al igual que otros esquemas de acceso múltiple (TDMA, FDMA, CDMA, OFDMA) de la asignación de varios usuarios a un recurso de comunicación compartido.

SC-FDMA tiene una gran eficiencia espectral y un tiempo de latencia muy bajo, igual que OFDM, y además reduce la potencia de pico de la señal (PAPR) respecto a ésta. Esto se traduce en que el terminal móvil necesite una menor potencia de transmisión para ofrecer la misma cobertura, ya que permite operar el amplificador en los terminales más cerca del punto de saturación, haciendo un uso más eficiente del mismo.

Utilizar SC-FDMA también implica una asignación de los recursos distinta. Con OFDM, los *Resource Blocks* se asignan a los usuarios a lo largo de la frecuencia durante un *slot* completo en el tiempo (7 símbolos OFDM), mientras que con SC-FDMA sucede lo contrario, se asigna a un usuario todas las portadoras a lo largo de un símbolo completo OFDM (ver Figura 29).

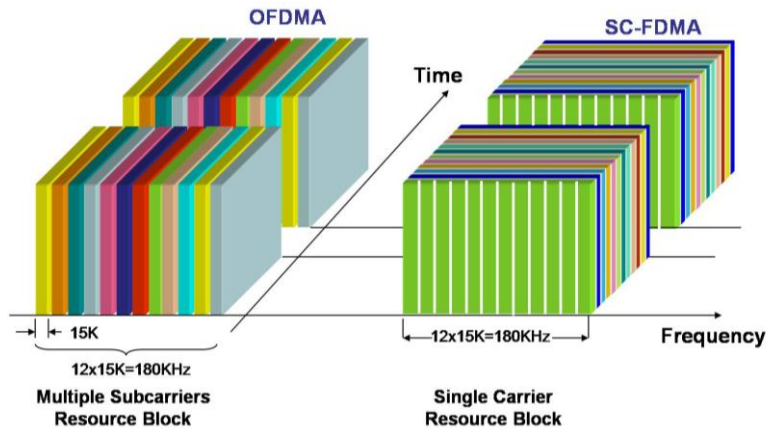


Figura 29. Diferencia en la asignación de recursos con OFDMA y SC-FDMA en tiempo y frecuencia.

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).

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.

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:

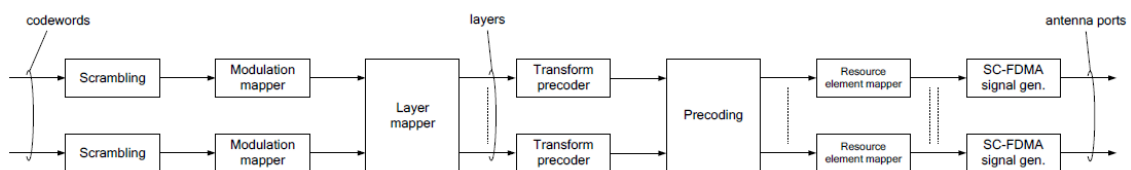


Figura 30. Diagrama de bloques del proceso de generación del canal físico *Uplink* [TS-36211].

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). Como se mencionó, la única diferencia entre este bloque y OFDM es una FFT adicional que se realiza antes de éste.

4.1.3.4 Filtros RF de Máscara Espectral para Transmisores LTE

El espectro de salida de un terminal de usuario actuando como transmisor está compuesto por tres componentes; el ancho de banda del canal, las emisiones fuera de banda *Out Of Band* (OOB) y el dominio de emisiones espurias.

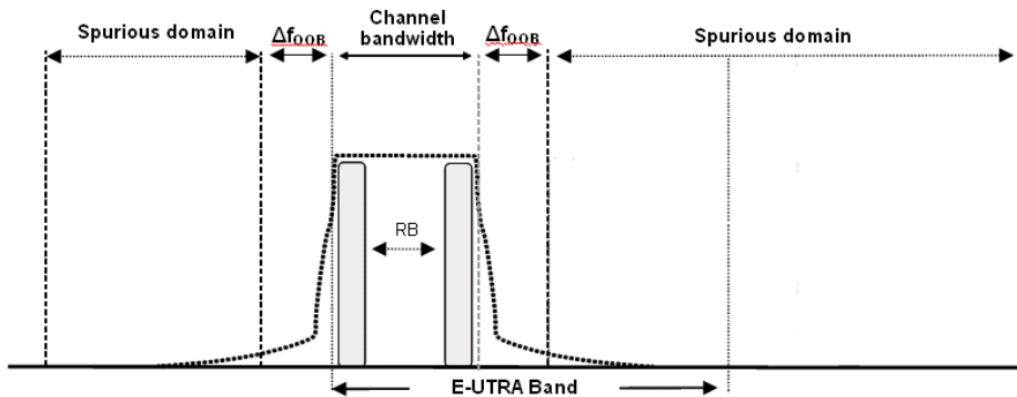


Figura 31. Espectro RF del transmisor LTE.

Ancho de banda ocupado:

Definido como el ancho de banda que contiene el 99% de la potencia media total integrada del espectro de transmisión del canal asignado. Este ancho de banda ocupado, para todos los posibles anchos de banda de transmisión (RB) debe ser menor que el ancho de banda teórico total (1.4, 3, 5, 10, 15 ó 20).

Emisión fuera de bloque (OOB):

Las emisiones fuera de banda son emisiones indeseadas situadas inmediatamente adyacentes al ancho de banda del canal asignado, resultantes del proceso de modulación y no-linealidades del transmisor, excluyendo emisiones espurias. Este límite se expresa en términos de máscara de emisión espectral. La máscara de emisión espectral del transmisor aplica a frecuencias situadas en el rango Δf_{OOB} , comenzando por el \pm borde del ancho de banda E-UTRA asignado.

La potencia de cualquier UE LTE no puede exceder los niveles especificados en la siguiente tabla, para el ancho de banda especificado.

Límite de emisión espectral (dBm) / Ancho de banda					
Δf_{OOB} (MHz)	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz	BW de la medida
$\pm 0-1$	-15	-18	-20	-21	30 kHz
$\pm 1-2,5$	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2,5-2,8$	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 2,8-5$	-10	-10	-10	-10	1 MHz
$\pm 5-6$	-13	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 6-10$	-25	-13	-13	-13	1 MHz
$\pm 10-15$		-25	-13	-13	1 MHz
$\pm 15-20$			-25	-13	1 MHz
$\pm 20-25$				-25	1 MHz

Tabla 6. Máscara de emisión espectral UE LTE [3GPP36-101].

Estos límites se muestran en la siguiente figura:

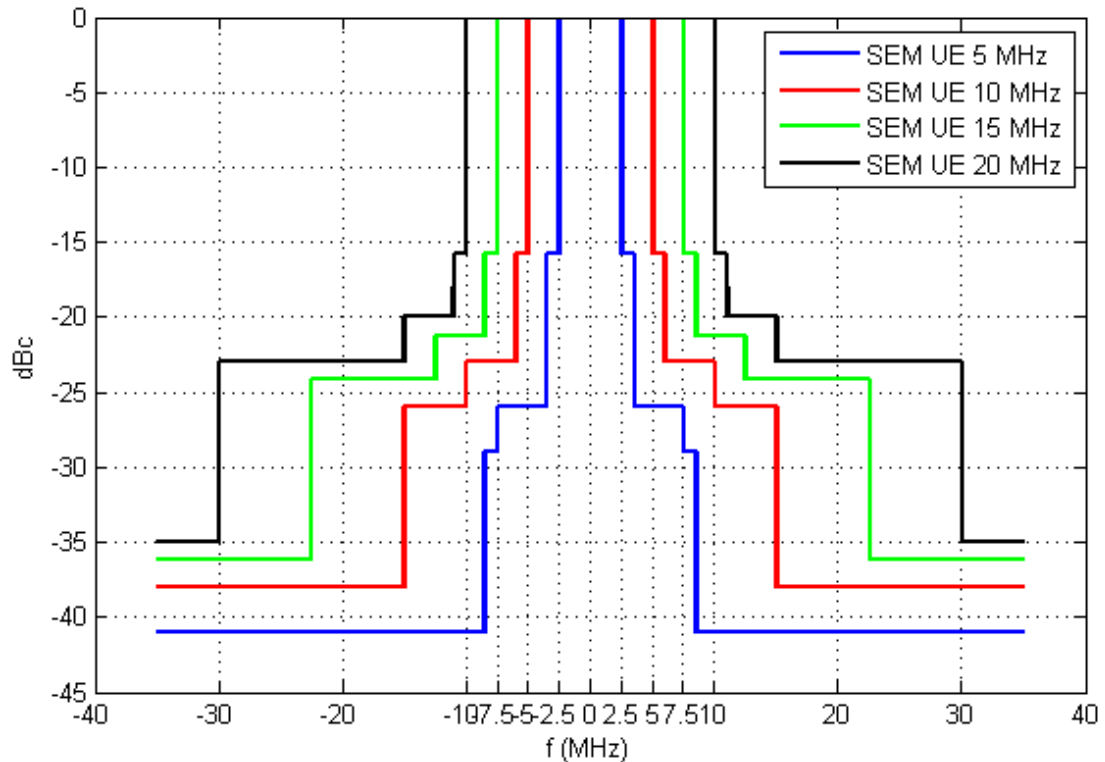


Figura 32. Máscara de emisión espectral UE LTE, para ancho de banda de 5, 10, 15 y 20 MHz. [3GPP36-101]

Se ve que se es más exigente con señales de un ancho de banda de menor

4.2 Estudios previos en la banda de 800 MHz

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

4.2.1 Estudios realizados por organismos internacionales

4.2.1.1 CEPT

- Pagina web : www.cept.org

La *Conférence Européenne des Administrations des postes et des Télécommunications* (CEPT) fue establecida en 1959 como principal coordinador de las telecomunicaciones en Europa. 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*” [CEPT-30] publicado en Octubre de 2009 propone unas condiciones técnicas mínimas, definiendo la máscara de bloque de un canal LTE para que no interfiera a TDT. La componente fuera de bloque (OOB), de la BEM consiste en un límite de potencia que no se debe superar en el límite de frecuencia inferior del canal útil (*BEM baseline*) para asegurar la protección con el canal adyacente. No obstante, se ha comprobado que son necesarias unas técnicas adicionales para mitigar estas interferencias, como se ha descrito anteriormente.

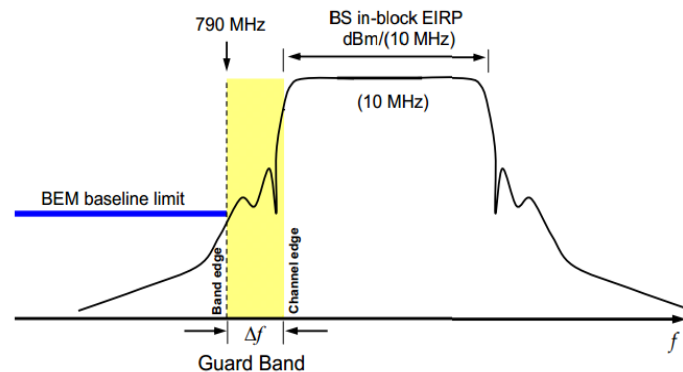


Figura 33. Definición gráfica de concepto de BEM baseline: límite de potencia que no se debe superar en el límite de frecuencia inferior del canal útil [CEPT-30].

En este estudio, se llegó a las siguientes conclusiones:

- a. Compatibilidad entre estaciones base LTE y receptores TDT:

Las simulaciones realizadas sobre varios escenarios indicaron que el funcionamiento en localizaciones donde el receptor TDT puede tener niveles inaceptables de interferencia no mejoran significativamente con una reducción de la línea de base de la *Block-Edge Mask* (BEM) en las estaciones base LTE menor a 0dBm/8 MHz, basándose en valores típicos de ACS (80 dB) y en un rango de PIRE (in-block) en la BS mayor a 59dBm/10MHz. Sin embargo, para PIRE menores, esta fracción de localizaciones mejora significativamente con una reducción de la BEM en las estaciones base LTE. Los límites permitidos aparecen en la Tabla 7:

Protección requerida	Ancho de Banda (MHz)	PIRE BS LTE (dBm/10 MHz)	OOB Máximo BS LTE (dBm)
Para canales TDT que requieran protección máxima	8	$P \geq 59$	0
		$36 \leq P < 59$	(P-59)
		$P < 36$	-23
Para canales TDT que requieran protección intermedia	8	$P \geq 59$	10
		$36 \leq P < 59$	(P-49)
		$P < 36$	-13
Para canales TDT que no requieran protección	8	Sin condición	22

Tabla 7. Máximo nivel OOB permitido por una BS LTE [CEPT-30].

Se debe especificar un límite de PIRE en la estación base LTE. Se recomienda un rango de entre 56dBm/(5MHz) y 64dBm/(5MHz). En el caso de que un límite concreto se especifique, la administración puede considerar autorizar un límite mayor para situaciones particulares, como por ejemplo, áreas rurales. No obstante, como se ha comprobado en el estudio realizado en Suecia por la PTS en el año 2012, esta normativa no es lo suficientemente estricta y serán necesarias técnicas adicionales para mitigar las interferencias.

b. Compatibilidad entre terminales LTE y receptores TDT:

Para considerar problemas de coexistencia entre TDT y el enlace Uplink de LTE, se utilizó la canalización TDD recomendada, de acuerdo a los informes “*Technical considerations regarding harmonisation options for the Digital Dividend*” [CEPT-23] [CEPT-31], que considera toda la banda del DD para Uplink o para Downlink dependiendo del instante de tiempo, considerando una banda de guarda recomendada inicialmente de 7 MHz. Así cuando se trabaje en modo Uplink, esta configuración se asemejará en gran medida a la situación colombiana. Esta opción se ilustra en la Figura 34:

790-797	797-802	802-807	807-812	812-817	817-822	822-827	827-832	832-837	837-842	842-847	847-852	852-857	857-862
Guard band	Unpaired												
7 MHz	65 MHz (13 blocks of 5 MHz)												

Figura 34. Opción TDD acordada para el DD en el Informe 31 de la CEPT [CEPT-31].

De nuevo, para un ACS = 80 dB en el receptor TDT, a frecuencias inferiores a 790 MHz, 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. Las administraciones pueden modificar este límite en determinadas situaciones, por ejemplo en terminales situados en áreas rurales, siempre que la protección de otros servicios, redes y aplicaciones no se vean comprometidas y se cumplan las obligaciones fronterizas.

c. Banda de guarda necesaria entre LTE Uplink y TDT:

En el caso de la interferencia de terminales LTE sobre receptores de TDT, el tamaño apropiado de la banda de guarda se relaciona con:

- El ancho de banda requerido para la máscara de emisión del terminal LTE, que cumpla con el límite de la línea base BEM especificado.
- El ancho de banda necesario para el ACS del receptor TDT, que cumpla con el valor de ACS se utiliza al calcular los límites de la línea base BEM.

En la Figura 35 y Figura 36 se muestran los niveles de ACS para condiciones fijas y portátiles respectivamente:

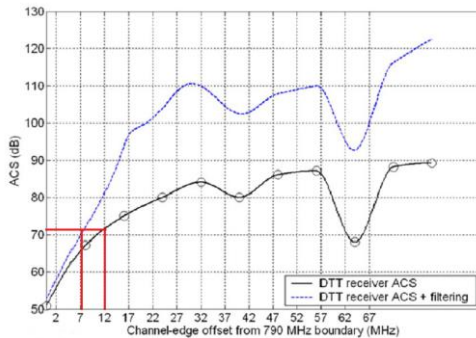


Figura 35. ACS para recepción fija [CEPT-30].

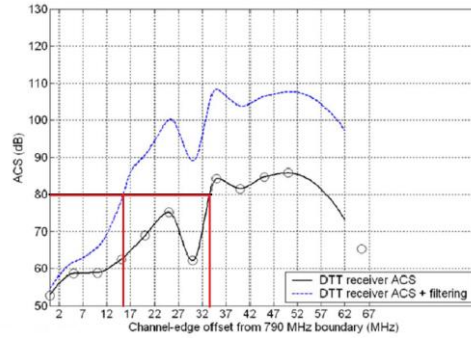


Figura 36. ACS para recepción portátil [CEPT-30].

Considerando la emisión fuera de bloque más restrictiva (-65 dBm/8MHz), los valores de ACS que aseguran la recepción TDT sin interferencias es 72 dB para recepción fija y 80 dB para portátil. En ese caso, observando las Figuras de arriba se llega a la conclusión de:

- Para **recepción fija**, la banda de guarda debe ser de al menos **7 MHz (con filtro) o 12 MHz (sin filtro)**.
- Para **recepción portátil**, la banda de guarda debe ser de al menos **17 MHz (con filtro) o de 37 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. En los próximos entregables de este informe se estudiará de manera más detallada las medidas necesarias para Colombia.

Para llegar a todas estas recomendaciones, se realizaron diferentes balances de enlace y estudios de planificación (Anexos 1 y 3 del [CEPT-30]). Como se ha comentado anteriormente, se ha considerado la utilización de filtros para relajar los requisitos exigidos. A continuación se muestra la respuesta en frecuencia del filtro utilizado por el CEPT para sus estudios, junto a su promediado de ventana deslizante a 10 MHz:

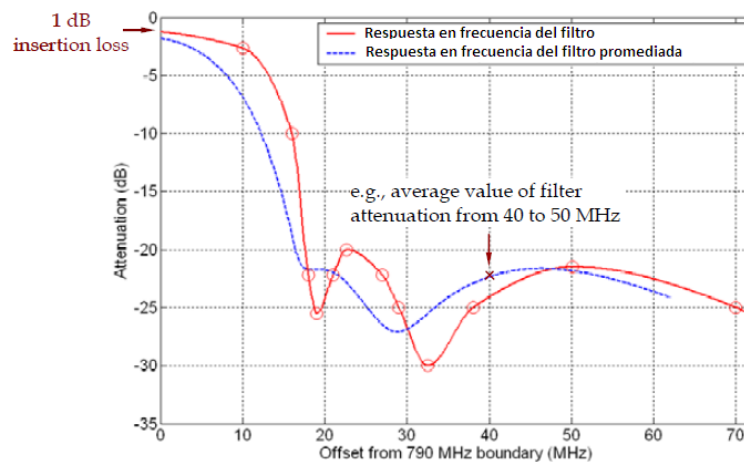


Figura 37. Respuesta en frecuencia de los filtros utilizados por el CEPT para sus estudios [CEPT-30].

En esta figura, se puede observar como en la banda de paso existe 1 dB de pérdidas de inserción, parámetro que reduciría la cobertura de los servicios de TDT. También se observa una atenuación de más de 20 dB para aquellas frecuencias superiores a 812 MHz, siendo ésta menor para las frecuencias anteriores. **La atenuación existente en las frecuencias inmediatamente posteriores al último canal TDT útil determinará el correcto funcionamiento del mismo.**

Por último, enumeraron una serie de técnicas para mitigar la interferencia:

- Utilizar misma localización para la estación base LTE y la torre transmisora TDT.
- Utilizar diferente polarización.
- Reducir la PIRE de la estación base LTE.
- Modificar las características de la antena de la estación base LTE (altura, patrón de radiación, tilt).
- Introducción de filtros a la entrada del receptor de TDT.

4.2.1.2 EBU

- Página web: www.ebu.ch

Se trata de la alianza más importante en el mundo de las entidades públicas proveedoras de servicios multimedia. También realizó estudios sobre el impacto del desarrollo de LTE sobre la recepción de la TDT, algunos de ellos plasmados en el informe del CEPT número 30 [CEPT-30]. Principalmente se analizó la interferencia existente en la banda de 800 MHz tras la introducción del DD y la interferencia en superficies donde existe solape entre tecnologías (ver Figura 38) [EBU-WORK].

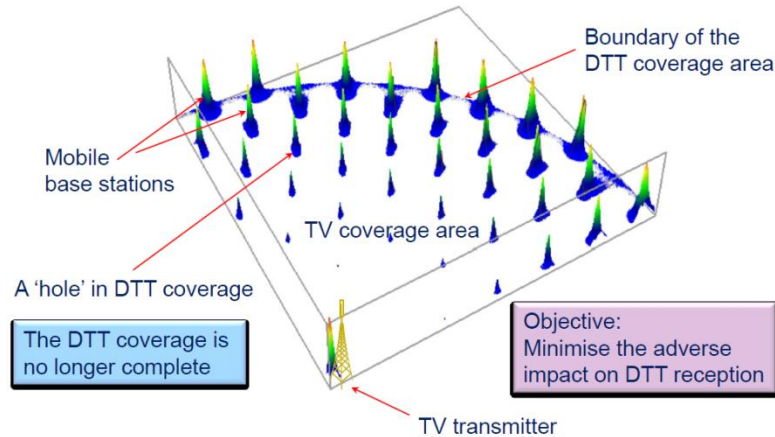


Figura 38. Problemática de la interferencia de tipo solapamiento entre TDT y LTE [EBU-WORK].

Los estudios teóricos realizados fueron los siguientes:

Condiciones técnicas y regulatorias para el desarrollo de LTE [CEPT-30]:

- Disposición de un canal dúplex inverso en redes FDD.
- Establecimiento de límites de potencia para las emisiones fuera de bloque de las estaciones base (también para los terminales de usuario).
- Una serie de técnicas de mitigación de la interferencia.

Reconocimiento de determinados asuntos legales:

- Variedad de tipos de receptores de TDT e instalaciones de recepción.
- Necesidad de establecer un mecanismo para resolver el problema de la interferencia, con responsabilidades claramente definidas.

También se realizaron las siguientes medidas:

Test controlados:

- Medidas de laboratorio y de campo.
- Posibilidad de manipular los parámetros tanto de los equipos LTE como de los de TDT.
- Observación inicial del comportamiento del sistema y los mecanismos de interferencia involucrados.

Pruebas de campo:

- Se probó un número limitado de escenarios de interferencia.
- No todos los tipos de receptores TDT.
- Ausencia de equipo de usuario LTE.
- Pruebas limitadas a la información pública disponible.
- Medidas con redes reales y observación del comportamiento de la señal LTE.

Los resultados de las medidas se correspondieron en gran medida a los estudios teóricos realizados anteriormente y las medidas de mitigación de interferencia fueron adecuadas en la mayoría de los casos. Sólo hubo un pequeño número de incidentes con interferencia. Se observó:

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

- El riesgo de interferencia es mayor cuando una estación base LTE está geográficamente situada entre el transmisor de TDT y la antena receptora de TV.
- Son más vulnerables aquellas antenas de recepción TDT con amplificador.
- Se ha observado interferencia a distancias mayores de 700 metros de la estación base.
- La interferencia puede ocurrir en canales de TV distantes, no sólo en el canal 60.
- La variabilidad de la interferencia generalmente está correlada con la carga de tráfico LTE.
- No hubo casos de interferencia desde los terminales móviles.

A partir de estas observaciones, se recomendó:

- Una selección cuidadosa de la micro-localización de las estaciones base.
- Ajustes en los parámetros de las estaciones base, incluyendo potencia de transmisión, diagramas de antena, etc.
- Que las autoridades nacionales estén involucradas y atentas.
- Responsabilidades claramente definidas.
- Cooperación entre administraciones, operadores de red móvil, operadores de red TDT y técnicos locales.
- La necesidad pública de ser adecuadamente informados.

4.2.1.3 ITU

- Página web : www.itu.int

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 [[ITU-BT2033](#)].

En esta recomendación, principalmente, para el modo de referencia DVB-T2 utilizado por Ofcom y diferentes señales LTE (UL y DL), se muestran una serie de márgenes de protección y umbrales de saturación entre ambas tecnologías que servirán como referencia para comparar con las medidas realizadas en el laboratorio y poder validar así los resultados obtenidos. De entre los resultados presentados destacan:

- Márgenes de protección DVB-T2 vs. DVB-T2 en co-canal.
- Márgenes de protección DVB-T2 vs. LTE DL (idle, 50% y 100%).
- Overloading thresholds DVB-T2 vs. LTE DL (idle, 50% y 100%).
- Márgenes de protección DVB-T2 vs. LTE UL (1, 10 y 20 Mbit/s).
- Overloading thresholds DVB-T2 vs. LTE UL (1, 10 y 20 Mbit/s).

Además, en sus Recomendaciones 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*” [[ITU-BT1368](#)] e ITU-R BT.2215-2. “*Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers*” [[ITU-BT2215](#)] se ha definido la metodología de medidas que se ha de seguir para la obtención de estos márgenes de protección y umbrales de saturación.

4.2.2 Estudios realizados en Reino Unido

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

	Modulación	CR	FFT	GI	Data Rate (Mbit/s)	BW (MHz)	CNR Rx Fija	CNR Rx Portable
DVB-T	64-QAM	2/3	8k	1/32	24,1	8	19,5	21,8
DVB-T2	256-QAM	2/3	32k	1/128	40,2	8	19,9	21,9

Tabla 8. Parámetros DVB-T y DVB-T2 de la señal deseada [ERA-OFCOM].

El 20 de febrero de 2013 se anunciaron los operadores ganadores de la subasta de espectro 4G en las bandas del DD (800 MHz) y la banda de 2,6 GHz. El único operador que actualmente ofrece el servicio 4G es *Everything Everywhere* (asociación de Orange y T-Mobile), operando en la banda de 2,6 GHz. El 1 de marzo de 2013 se publicaron las asignaciones definitivas:

Licencia	Espectro ganado (Feb. 2013)	Frec. asignadas (Mar. 2013)	Precio base
Everything Everywhere Limited	2 x 5 MHz of 800 MHz and 2 x 35 MHz of 2.6 GHz	796 a 801 MHz 837 a 842 MHz 2535 a 2570 MHz 2655 a 2690 MHz	£588,876,000
Hutchison 3G UK Limited	2 x 5 MHz of 800 MHz	791 a 796 MHz 832 a 837 MHz	£225,000,000
Niche Spectrum Ventures Limited	2 x 15 MHz of 2.6 GHz and 1 x 20 MHz of 2.6 GHz	2520 a 2535 MHz 2640 a 2655 MHz 2595 a 2620 MHz	£186,476,000
Telefónica UK Limited	2 x 10 MHz of 800 MHz (coverage obligation lot)	811 a 821 MHz 852 a 862 MHz	£550,000,000
Vodafone Limited	2 x 10 MHz of 800 MHz, 2 x 20 MHz of 2.6 GHz and 1 x 25 MHz of 2.6	801 a 811 MHz 842 a 852 MHz 2500 a 2520 MHz 2620 a 2640 MHz 2570 a 2595 MHz	£790,761,000

Tabla 9. Repartición de las bandas de 800 MHz y 2,6 GHz entre los principales operadores del Reino Unido para ofrecer servicios 4G [AW-OFCOM].

En esta asignación, Telefónica UK recibió la licencia con la condición *coverage obligation lot*, es decir, con la obligación de ofrecer cobertura a un determinado porcentaje de la población. La asignación de frecuencias en la banda de 800 MHz puede verse de forma gráfica en la siguiente figura:



Figura 39. Representación gráfica de la repartición de la banda de 800 MHz entre los operadores ganadores de la subasta 4G en Reino Unido. H3G: Hutchison 3G, EE: Everything Everywhere, VOD: Vodafone, TEL: Telefónica O2.

En la banda de 800 MHz, Vodafone ha anunciado que desplegará las redes LTE después del verano de 2013, mientras que Telefónica O2 lo hará durante el mismo. EE y H3G lo harán a

finales de año. Ofcom ha anunciado también que los operadores LTE en esta banda cubrirán el 98% de la población en interiores, e incluso más en exteriores.

Los operadores que han ganado la licencia en el DD, dados los problemas de interferencia del 4G sobre la TDT existentes, tienen la obligación de resolver dichos problemas. Para ello, se ha creado la asociación **at800**, cuyo funcionamiento se explica en el punto 4.2.2.2.

4.2.2.1 Ofcom

- Página web: www.ofcom.org.uk

Regulador oficial del espectro radioeléctrico en el Reino Unido. Fue el primero que estudió este tipo de problema. En el estudio: “*Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interference into DTT Receivers*” [ERA-OFCOM] se realizaron estudios de interferencias junto a ejercicios de planificación. Se recomendó la utilización de filtros a la entrada de aquellos receptores de TDT que recibían una relación señal a interferencia insuficiente.

Para generar la señal interferente LTE, se utilizó como fuente una señal grabada de 10 MHz de ancho de banda de una red de prueba de un operador LTE a 800 MHz. Se observó que es importante evaluar los dos estados en los que se puede encontrar una estación base (*base station*, BS) LTE, pues los receptores de TDT son más susceptibles a interferencias cuando la BS se encuentra en estado “*idle*” que cuando se encuentra en estado “conectado”.

En el estado “*idle*”, al no haber tráfico en la red, únicamente existen conexiones puntuales que sirven como señalización entre la estación base y el terminal, produciéndose lo que se conoce como emisiones de tipo ráfaga o discontinuas en el tiempo. Esto es porque en la máquina de estados de LTE existen dos estados básicos: conectado & *idle* (Figura 40). En el estado conectado (con diferentes cargas de tráfico), se utiliza alta potencia mientras se transmiten o esperan datos. En el estado *idle*, la radio está apagada y utiliza baja potencia para mantenerse a la espera de una conexión.

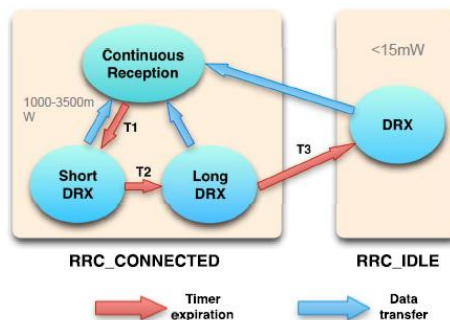


Figura 40. La máquina de estados LTE.

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

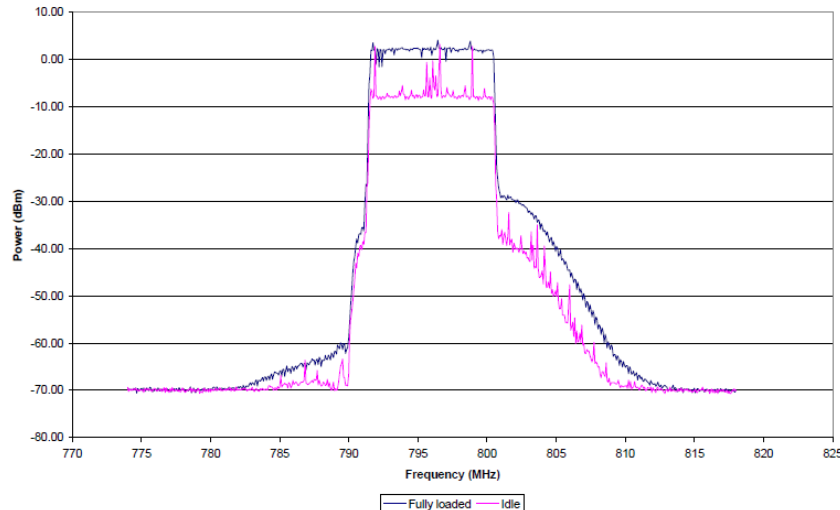


Figura 41. Espectro de la señal Downlink utilizado en los estudios de Ofcom, para el estado conectado (rosa), con carga 100% (azul), y el estado *idle*. Ancho de banda de la señal 10 MHz [ERA-OFCOM].

Se estudió el margen de protección necesario, que hace referencia a la relación mínima necesaria entre la señal de TDT útil e interferente LTE para asegurar un correcto funcionamiento en recepción de la TDT (ver definición en A.2). Los márgenes de protección se midieron sobre 13 receptores. En las Tablas 10 y 11 se lista el rango entre el margen mínimo y máximo obtenido de entre los 13 receptores para las dos tecnologías TDT evaluadas (en el documento [ERA-OFCOM] no se muestra ningún resultado final, sino las medidas realizadas para cada uno de ellos).

Para receptores DVB-T se obtuvo los siguientes resultados, operando en el último canal de TDT adyacente con LTE:

Modo de operación	Carga 100%		IDLE	
Potencia útil (dBm)	-70	-30	-70	-30
Margen de Protección (dB)	-46 a -41	-28 a -22	-42 a -19	-22 a 0

Tabla 10. Márgenes de protección medidos por Ofcom para una señal útil DVB-T, para varios receptores (máximo y mínimo margen medido) [ERA-OFCOM].

Para receptores DVB-T2 operando en el último canal:

Modo de operación	Carga 100%		IDLE	
Potencia útil (dBm)	-70	-30	-70	-30
Margen de Protección (dB)	-43 a -35	-29 a -17	-37 a -17	-20 a 1

Tabla 11. Márgenes de protección medidos por Ofcom para una señal útil DVB-T2, para varios receptores (máximo y mínimo margen medido) [ERA-OFCOM].

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. La diferencia radica en que DVB-T2 ofrece una mayor capacidad, dada su mayor eficiencia espectral.
- Los receptores son más susceptibles conforme aumenta el nivel de señal útil.
- Analizando los casos más críticos de los anteriores resultados, 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.

4.2.2.2 *at800*

- Página web: www.at800.tv

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), y que durante la subasta del espectro se hicieron responsables de asegurar la coexistencia junto a la TDT. 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 [**PR-AT800**]. Durante estas pruebas, los ciudadanos que perdían la señal de TDT se ponían en contacto, vía telefónica, con un centro de control de llamadas para notificar la pérdida de señal TDT.

Para los casos en los que se detecten interferencias, se utilizarán filtros de manera gratuita para los usuarios. Para hogares con más de un televisor, la adquisición del resto de filtros corre a cuenta del usuario. at800 informa de distintos puntos de venta donde se pueden adquirir.

Se llegó a un acuerdo con DTG Testing para validar que los filtros cumplen las especificaciones exigidas por at800 [**DTG-TEST**]. Los filtros han sido clasificados en dos grupos: filtros domésticos que se sitúan a la entrada del receptor de TV, y filtros profesionales, de mayor calidad, que debe colocar un instalador acreditado justo entre la antena y el amplificador de mástil, o en caso de antenas comunitarias, a la salida de esta. En la figura se puede observar el listado de filtros aprobados bajo el sello at800, a fecha de agosto de 2013. Se puede observar cómo a su vez, diferencian entre filtros de canal 59 y de canal 60. Esto es debido a que en algunas regiones el canal 60 no es utilizado, con lo que la frecuencia de corte del filtro puede ser menor de 790 MHz.

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

MANUFACTURER	BRAND	PRODUCT CODE / MODEL NUMBER	CONSUMER		PROFESSIONAL			
			INDOOR		OUTDOOR		COMMUNAL	
			CH59	CH60	CH59	CH60	CH59	CH60
Filtronic	Filtronic	UK-PSD006-V3-P	TRADE	YES				
		UK-PSD008-V5-P	TRADE		YES			
		UK-PSD006-V5-P	TRADE			YES		
		UK-PSD008-V8-P	TRADE				YES	
		UK-PSC006-V3-P	TRADE					YES
		UK-PSC007-V2-P	TRADE					
Link Microtek	Lynx	14.00551.19.00LM	TRADE	YES				
		14.00555.19.00LM			YES			
		14.00553.19.00LM	TRADE					YES
		14.00554.19.00LM	TRADE					
Philex	Labgear	F4GA	RETAIL TRADE	YES				
Radio Design	Radio Design	RD 0479-01	TRADE					YES
		RD 0480-01	TRADE					
Televés	Televés	404401	RETAIL TRADE	YES				
Triax	Telecam	316259	RETAIL	YES				
	Triax	314080	TRADE	YES				
Vision	Vision	V25-259	TRADE	YES				

Figura 42. Listado de filtros aprobados por at800 [AT800-FIL].

at800 enviará, con al menos 3 semanas antes del despliegue, **un único filtro doméstico de manera gratuita** a los hogares que se considera puedan estar afectados. Junto al filtro, se ha adjuntarán las instrucciones explicando dónde debe ser colocado.

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. Se procederá del mismo modo en caso de pisos que utilicen una antena comunitaria para todo el edificio. El coste de toda instalación correrá a cargo de at800.

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.

Si tras la introducción de dicho filtro, el usuario sigue sin recibir la señal de TV, at800 ofrece distintas vías de contacto (central telefónica, redes sociales) para llevar a cabo una inspección en el hogar por parte de un instalador acreditado.

Los requisitos que deben cumplir los instaladores acreditados son:

- Haber recibido un curso específico impartido por at800.
- Tener un seguro de responsabilidad civil vigente con altas calificaciones en su trabajo.
- Ser miembro de *Confederation of Aerial Industries* (CAI) o de *Registered Digital Insititute* (RDI).

Las compañías instaladoras que superen estos requisitos serán divididas en dos tipos: **instaladores independientes**, con menos de 10 empleados que cumplan los requisitos arriba

mencionados o **contratistas regionales**, con más de 10 empleados que también cumplan estos requisitos, y que, además, sean capaces de mantener una correcta recepción de TV en una o más provincias.

Algunas de las opciones contempladas para solucionar la interferencia son: inserción de más de un filtro, mejorar las conexiones entre receptor y antena, o sustituir la antena por otra con mejores características. Si tras todos estos procedimientos llevados a cabo, sigue sin recibirse correctamente la señal de TV, se negociará la posibilidad de cambiar a otra plataforma, como por ejemplo, televisión por satélite.

4.2.3 Estudios realizados en Irlanda

- Página web del regulador: www.comreg.ie

La *Commission for Communications Regulation* (ComReg) es el regulador general de comunicaciones de Irlanda. 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*” [COMREG]. 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**. Así, los posibles casos de interferencia se reducen, aunque como sucede en Reino Unido, puede haber interferencias sobre el canal 59, interferencias que deben ser estudiadas. Los casos con interferencia necesitarán por tanto de un filtro de canal 59, del cual todavía no se ha acordado si se hace cargo el regulador, el usuario o los operadores móviles (MNOs).

Se evaluó la saturación de los receptores, otra forma de interferencia, que hace referencia al nivel de señal interferente en adyacencia por encima del cual el receptor comienza a comportarse de forma no lineal. Se llegó a la conclusión de que, cuando se use un amplificador en el mástil para la **recepción** de televisión **fija** (como en Reino Unido) y pueda producirse una saturación, puede solucionarse utilizando **un filtro entre la antena y el amplificador**. El problema se puede observar en la Figura 43.

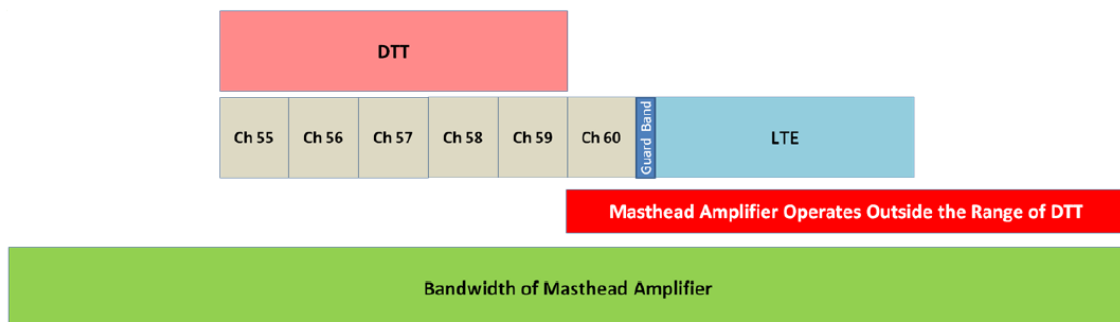


Figura 43. Frecuencias de operación típicas de los amplificadores de mástil operando fuera del rango de TDT [COMREG].

Como se puede ver en la Figura 43, el ancho de banda total del amplificador de mástil es el de la banda reservada para TDT sin el DD (hasta 862 MHz, en verde). Por tanto, éste amplifica también la banda reservada para LTE con el nuevo DD (rojo). Esto supone un incremento de la interferencia LTE procedente de las estaciones base. Por ello, se utilizan filtros.

ComReg obtuvo una serie de filtros LTE actualmente disponibles en el mercado. Estos se probaron bajo condiciones de laboratorio con el fin de evaluar su idoneidad para evitar la sobrecarga de RF. Los filtros utilizados fueron los siguientes: Filtro de LTE Triax TBSO, Filtro de LTE Johansson 6022 y Filtro de LTE Johansson 6023.

La respuesta en frecuencia de dichos filtros es:

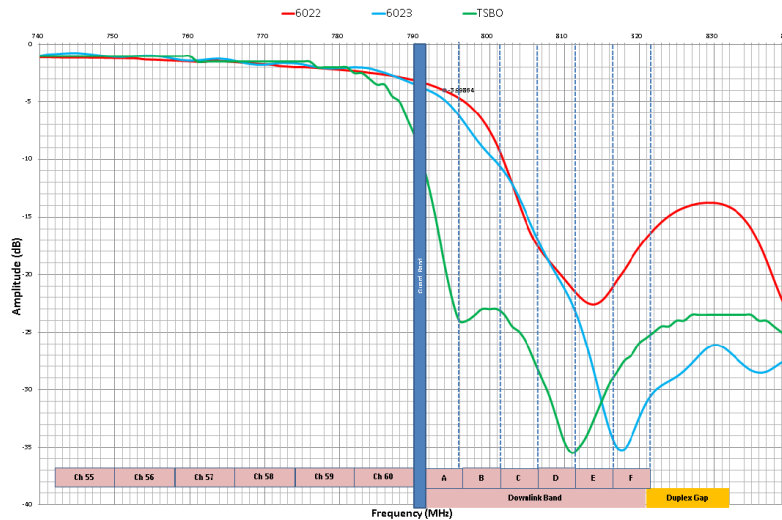


Figura 44. Respuesta en frecuencia de los filtros utilizados por ComReg en sus estudios [COMREG].

Como se aprecia en la figura, la caída fuera de banda del canal 60 para los filtros Johansson 6022 y 6023 es muy lenta, teniendo únicamente una atenuación en el canal 1 LTE (la que realmente importa) de **4 y 5 dB**, respectivamente. Para estos filtros, la atenuación del canal 60 es de 2 dB, aproximadamente. Estos filtros domésticos serían insuficientes en muchos casos de interferencia, razón por la que se **desestimó el uso del canal 60**. En el caso del filtro TSBO, la atenuación fuera de banda para el primer canal es de **17 dB**, aunque la atenuación del canal 60 es mayor, 4 dB aproximadamente.

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.
- Este problema puede solucionarse mediante la eliminación del amplificador de mástil o con el uso del filtro apropiado en casos donde la amplificación sea necesaria. El inconveniente será un menor nivel de señal TDT, llegando a ser menor de lo necesario en algunos hogares, por lo que esta solución es más arriesgada.
- Tras probar una muestra representativa de los filtros disponibles LTE, se comprobó que el rendimiento especificado por el fabricante coincide con el evaluado en el laboratorio y se consideran capaces de eliminar dicha saturación RF.
- 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.

4.2.4 Estudios realizados en Suecia

- Página web del regulador: www.pts.se/en-gb

El regulador oficial de los servicios de comunicación es el PTS (en inglés: *Swedish Post and Telecom Authority*, en sueco: *Post-och TeleStyrelsen*). Se trata de la agencia del Gobierno que regula, controla y supervisa el servicio de correo, telefonía, IT y radio en Suecia. La canalización adoptada fue la A3 propuesta por la ITU [ITU-1036] que divide el espectro en canales de 5 MHz, con duplexación por frecuencia, como se puede observar a continuación:

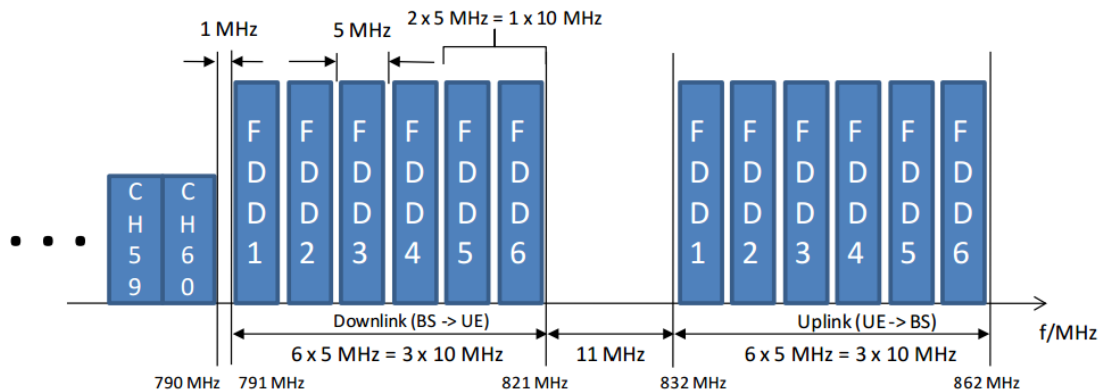


Figura 45. Canalización A3 adoptada en Suecia, que divide el espectro en canales FDD de 5 MHz [NORDIG].

Como principal decisión regulatoria destaca: los operadores licenciados serán los encargados de solucionar todo tipo de interferencias 4G sobre los sistemas de TDT, y deberán trabajar de manera conjunta para agilizar la solución. **Mientras no sea solucionado el problema**, las estaciones base interferentes deberán permanecer **fuera de servicio**.

En su informe “*The impact of rollout in the 800 MHz band on terrestrial television – one year assignment*” [PTS-ER-2012] evaluaron las condiciones tras un año desde el despliegue del 4G. Se informó de lo siguiente:

- Se establecieron unos límites de potencia radiada por las estaciones base y se definieron unas máscaras de emisión:
 - Aquellas estaciones base cuya altura efectiva sea inferior a 50 metros, no pueden radiar más allá de PIRE = 64 dBm/5MHz.
 - Aquellas estaciones base cuya altura efectiva sea superior a 50 metros, no pueden radiar más allá de PIRE = 67 dBm/5MHz.
 - En las áreas donde se use el canal 60 de TDT, aquellos operadores que hayan obtenido la licencia en los canales FDD1 y FDD2 de LTE deberán utilizar **polarización vertical** para mantener los niveles de potencia radiada mencionados anteriormente. En caso de que no utilicen polarización vertical, esos niveles deberán reducirse a PIRE = 54 dBm/5MHz indistintamente de la altura efectiva de la antena.
 - Las máscaras de emisión para los canales FDD1/2 y FDD6 se ilustran en la Figura 46 y Figura 47 respectivamente.

Se puede comprobar como estos valores se asemejan a los expuestos por la CEPT en el punto siguiente, siendo estos más específicos.

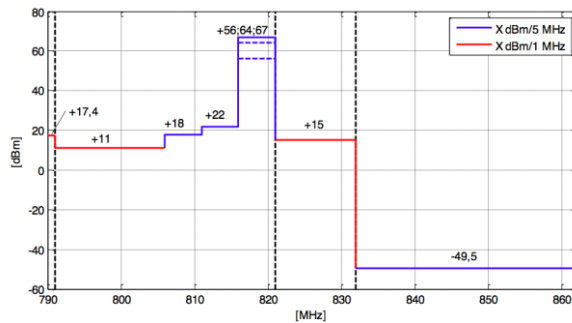


Figura 46. Máscara de emisión canales FDD1/2 de LTE

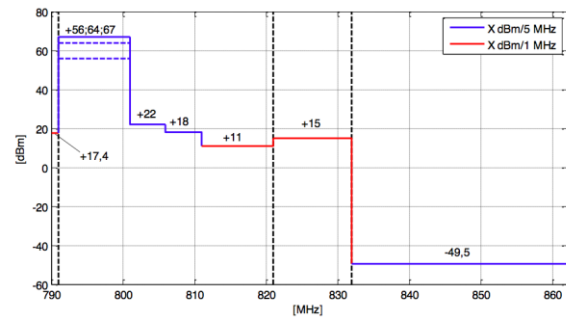


Figura 47. Máscara de emisión canal FDD6 de LTE

Para comprobar que el culpable de la interferencia detectada en la señal TDT no era una estación base LTE, se establecieron dos normas adicionales:

- El margen de protección adyacente (dB) entre los canales LTE y los canales TDT debe ser menor de lo mostrado en la Tabla 12:

Canal TDT/Canal LTE	FDD1	FDD2	FDD3	FDD4	FDD5	FDD6
Canal 60	30	30	37	37	37	37
Canal 59	37	37	37	37	47	47
Canal 58	37	37	47	47	47	47
Canales 21-57	47	47	47	47	47	47

Tabla 12. Márgenes de protección definidos por PTS.

- La PIRE máxima permitida (dBm/5MHz) a la estación base LTE no debe superar los límites presentados en la Tabla 13:

Canal TDT/Canal LTE	FDD1	FDD2	FDD3	FDD4	FDD5	FDD6
Canal 60	-5	-5	0	0	0	0
Canal 59	0	0	0	0	0	0
Canal 58	0	0	0	0	0	0
Canales 21-57	0	0	0	0	0	0

Tabla 13. PIRE máxima permitida para que estación base LTE no sea considerada interferente sobre la señal TDT [PTS-ER-2012]

Durante el primer trimestre de 2012, los operadores enviaron un informe a la PTS contabilizando cientos de llamadas informando de posibles interferencias, todas ellas resueltas mediante la introducción del filtro adecuado a cada caso. Aun así, en algunas localizaciones seguían informando de que todavía existían interferencias. Tras comprobar que las posibles estaciones base interferentes cumplían los requisitos arriba expuestos concluyeron que la interferencia sería debido a cualquier otro fenómeno independiente de la red 4G, por ejemplo, a las condiciones climatológicas de la zona en cuestión.

Por otra parte, en Enero de 2013, Nordig (alianza que representa a los operadores de TDT de los países nórdicos -Dinamarca, Finlandia, Islandia, Noruega y Suecia-) creó una nueva acción regulatoria respecto al resto de países. Actualizó su normativa “*Nordig Unified Requirements for IRDs*” [NORDIG] que define las especificaciones técnicas mínimas que deben cumplir los receptores de televisión para diversos tipos DVB-T/DVB-T2, añadiendo una cláusula relativa a los márgenes de protección exigidos a estos receptores para impedir posibles interferencias producidas por LTE (para cualquier tipo de carga):

Canal DVB-T/DVB-T2	Ancho de Banda (MHz)	Margen de Protección		
		Downlink FDD1/2 (10 MHz)	Downlink FDD3/4/5/6 (10 MHz)	Uplink (10 MHz)
5 – 12	7	40	40	40
21 - 37	8	40	40	40
38 - 59	8	40	40	40
60	8	30	40	40

Tabla 14. Márgenes de protección definidos por Nordig [NORDIG].

4.2.5 Estudios realizados en Francia

- Página web del regulador: www.anfr.fr

Agencia Nacional de Frecuencias de Francia (ANFR) realizó medidas de campo en la localidad de Laval, tanto en zonas rurales como en áreas urbanas, para analizar el rendimiento de receptores de TDT DVB-T en presencia de señales interferentes LTE en la banda de 800 MHz en colaboración con France Telecom, SFR (*Société Française de Radiotéléphonie*) y Bouygues Telecom como operadores móviles y TDF (*TéléDiffusion de France*) como difusor de contenidos de televisión digital.

Se evaluaron los canales 57, 58 y 60 de DVB-T como señal útil, y los canales LTE en enlace descendente, de 10 MHz de ancho de banda y centrados en las frecuencias 796, 806 y 816 MHz como se observa en la Figura 48.

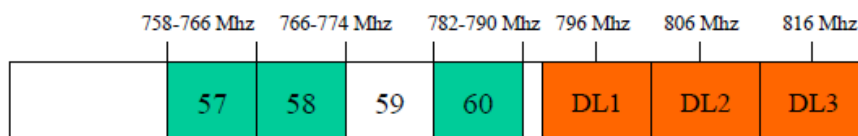


Figura 48. Canales evaluados por la ANFR [ANFR].

Para el estudio en condiciones rurales, se colocaron dos estaciones base LTE a 25 km de distancia de la torre transmisora de TDT situada en Laval-Mont Rochard y se estudió la recepción de TDT en hogares alejados del núcleo urbano [ANFR-RUR]. En el caso de área urbana se utilizaron 10 estaciones base dentro de la ciudad y se evaluó la recepción en distintas ubicaciones del núcleo urbano [ANFR-URB]. En ambos casos, se consideró recepción fija sobre tejado, como en Reino Unido e Irlanda.



Figura 49. Escenario urbano estudiado por ANFR [ANFR-URB].

Se observó que cuando la señal LTE se encontraba en estado IDLE, el margen de protección necesario aumentaba hasta un factor de 15 dB respecto al estado de carga máxima (para una señal útil TDT de -60 dBm, se pasa de -17 dB necesarios como MP en estado IDLE a -32 dB al 100%). Se concluyó que el principal modo de interferencia es la saturación en la cadena de recepción de televisión [ANFR]. 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 [ANFR-URB2].

Se aconsejó la introducción de un filtro selectivo (profesional) entre la antena y el amplificador para la reducción de interferencias, como en Irlanda. En simulaciones en laboratorio se evaluaron las prestaciones de filtros de distintas características. En la Tabla 15 están listados los filtros evaluados y sus respuestas en frecuencia se ilustran en la Figura 50, Figura 51 y Figura 52 [ANFR-URB2].

Marca	Modelo	Tipo
TRIAx	TFV-5K	Paso Bajo
ANTTRON	R135	Paso Bajo
BRAUN	LPF 782	Paso Bajo
BRAUN	LPF 790	Paso Bajo
TGN	LP9-3N	Paso Bajo
TGN	BPF-790	Paso Bajo
SIAM	BJF-F-B	Elimina-banda
MUGLER	AG - LTE782	Elimina-banda
MUGLER	AG - LTE787	Elimina-banda
Commercial Microwave Technology	CM793	Cavidades
SIAM	BJF-AB/IK	Cavidades

Tabla 15. Filtros utilizados por ANFR en sus diversos estudios sobre interferencias entre tecnología TDT y LTE [ANFR-URB2].

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

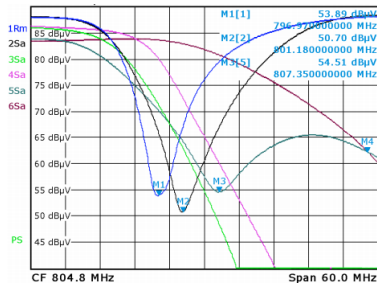


Figura 50. Filtros Paso Bajo [ANFR-URB2].

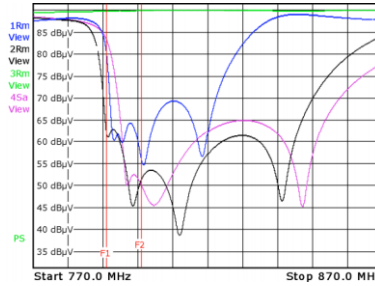


Figura 51. Filtros Elimina-Banda [ANFR-URB2].

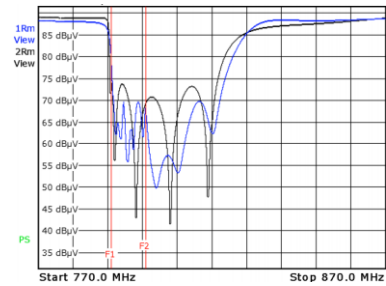


Figura 52. Filtros de Cavidades [ANFR-URB2].

De los filtros estudiados, los filtros Paso Bajo domésticos (Figura 50) son los que peor atenuación fuera de banda presentan, y aunque su resultado en frecuencias superiores es mejor, esto es menos significativo, pues lo importante es tener una buena atenuación en el primer canal LTE, como se ha mencionado en anteriores ocasiones. Los filtros Elimina-Banda (Figura 51) presentan mejores resultados, con atenuaciones fuera de banda de hasta **20 y 25 dB** y por tanto son una mejor solución, aunque la atenuación de los canales de TDT es algo mayor en este caso. En cuanto a los filtros de cavidades, filtros selectivos que se pueden situar antes del amplificador de mástil (como en otros países) la atenuación fuera de banda es similar, aunque la de los canales TDT es menor. Estos filtros presentan los mejores resultados.

4.3 Estudios previos en la banda de 700 MHz

4.3.1 Estudios realizados por el CEPT

En Europa está sujeto 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). Por ello, en la Resolución 232 se invitó a la ITU-R a estudiar la disposición de estos canales para servicios LTE adaptada a la nueva banda por debajo de 790 MHz, teniendo en cuenta, entre otras, la compatibilidad de bandas adyacentes con otros servicios primarios.

En el Reino Unido se ha recomendado que el borde inferior de esta nueva canalización móvil deba ser 694 MHz. Por ello, se ha realizado el estudio “WRC-15 agenda item 1.2: lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility” de la CEPT [CPG-010], 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:

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

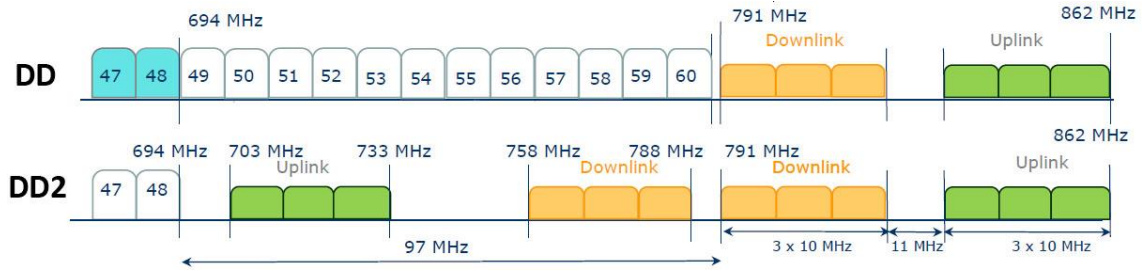


Figura 53. Canalización europea con el DD y posible canalización con el nuevo DD2. Tecnologías TDT y LTE.

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). Por ello, en [CPG-010] se calcula el nivel máximo del terminal móvil fuera de banda necesario para proteger los receptores TDT con recepción fija sobre tejado para un número concreto de escenarios utilizando un análisis de pérdidas mínimas de acoplo. También se aplica el método de Monte Carlo para realizar aproximaciones estadísticas.

Dado el nivel de OOB calculado para proteger receptores TDT con antena fija *outdoor*, se analiza también las distancias mínimas necesarias entre dicho receptor y el terminal LTE cuando el escenario escogido es con recepción portable *indoor*.

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 son:

Recepción fija *outdoor*:

- La **distancia horizontal entre la antena TDT y terminal LTE para el peor caso es de 22 metros**. Esto se debe a que a dicha distancia, la ganancia de la antena TDT por elevación es máxima, teniendo así interferencia máxima.
- Asumiendo un nivel típico de ACS = 80dB (definición en 0) en el receptor TDT, se puede dar un nivel máximo **OOB en el terminal móvil de entre -58,6 y -52,6 dBm/8MHz**, dependiendo del valor de insensibilización escogido.

Recepción portable *indoor*:

- Asumiendo los mismos niveles de OOB para recepción *outdoor*, y asumiendo un ACS = 80dB, se necesitan las siguientes distancias mínimas entre antena TDT y terminal LTE:

Umbral I/N (dB)	Nivel OOB en el terminal LTE dBm/(8MHz)	Distancia de separación (metros)			
		Misma sala Att. 0dB	Distinta sala Att. 8dB	Modelo rural Att. 15dB	Modelo urbano Att. 20dB
-6	-52,9	11,24	4,47	2,00	1,12
-10	-58,6	11,1	4,42	1,97	1,11

Tabla 16. Distancias de separación estimadas para los distintos escenarios indoor evaluados [CPG-010].

4.3.2 Estudios realizados en Japón

Japón también reorganizará la banda de 700 MHz a partir de 2015 para el uso de servicios IMT. Uno de los principales pilares de esta nueva reorganización es el hecho de que las frecuencias asignadas al enlace Downlink estarán por encima de los 770 MHz, con el fin de evitar interferencias al amplificador de bajo ruido de TV (LNA), el cual funciona en Japón por debajo de tal frecuencia (asignada previamente a televisión analógica). En las modificaciones propuestas del documento 6A/235-E para la Recomendación ITU-R BT.2247-1 [6A235-E] se realizaron estudios sobre posibles interferencias, el ancho necesario de la banda de guarda y la distancia de separación entre los sistemas TDT ISDB-T (DTTB) e IMT (Uplink y Downlink).

Es necesario destacar que el último canal utilizado en Japón correspondiente a esta reorganización corresponde al canal 52, desde 704 a 710 MHz. Dicha reorganización puede verse en la siguiente figura.



Figura 54. Distribución de frecuencias con la nueva reorganización del plan en la banda de 700 MHz en Japón.

En Junio de 2012, el MIAC (*Ministry of Internal Affairs Communications*) adjudicó los derechos de uso del espectro en 700 MHz a los operadores NTT DoCoMo, KDDI y e-Mobile, con un bloque de 2x10MHz a cada uno. En total, se provee a los servicios IMT de 30 MHz para cada enlace, en línea con el plan Asia Pacífico [GSMA-DD]. Por tanto, en este caso, el enlace más cercano a la TDT es el Uplink.

Los experimentos realizados en [6A235-E] demostraron, teniendo en cuenta que se han de utilizar técnicas de mitigación de interferencias adicionales, como la utilización de un filtro paso bajo a la entrada del receptor, que:

- En Uplink, la banda de guarda necesaria es de **6 MHz** cuando la separación horizontal entre la estación base LTE y la torre TDT no está limitada, y de **4 MHz** cuando la separación mínima asegurada es de 2,3 km.
- En Downlink, la banda de guarda necesaria es de **60 MHz** cuando no se limita la separación entre sistemas, y de **30 MHz** cuando se aseguran 470 metros entre ambos.
- Dados estos resultados, se adjudicó una **banda de guarda final de 8 MHz** entre el último canal de TDT y el enlace Uplink, como se observa en la Figura 54.

4.3.3 Estudios realizados en Australia

En Australia, en el 9º *meeting* del *APT Wireless Group* (AWG-09), en septiembre de 2010, se llegó a un acuerdo para la canalización de frecuencias FDD y TDD para LTE en la banda de frecuencias de 698 a 806 MHz en la Región 3. Se decidió que el espectro debe asignarse del siguiente modo:

- Es necesaria una **banda de guarda inferior de 5 MHz** en las frecuencias de **698 a 703 MHz** (como en el caso colombiano).
- Es necesaria una banda de guarda superior de 3 MHz en las frecuencias de 803 a 806 MHz.

Utilizando el plan FDD basado en una disposición dúplex convencional con **2 bloques de 45 MHz** y una banda entre ambos de 10 MHz.

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*” [AWG-10], se estudió la interferencia potencial de LTE Uplink sobre la TDT (DVB-T) para obtener qué restricciones de ambos estándares serían necesarias para asegurar su correcto funcionamiento.

Los análisis indicaron que los niveles OOB de LTE Uplink necesarios para una correcta coexistencia serían como máximo de -50dBm/MHz. De todas formas, no tiene en cuenta algunos aspectos como los mayores requerimientos técnicos de los esquemas de modulación de mayor orden que se utilizarán en el futuro en servicios de TDT. Será necesario un margen de entre -9 y -11 dB para tenerlo en cuenta. En total, teniendo en cuenta todos los factores, **será suficiente un nivel de LTE UE OOB de entre -59dBm/MHz y -61dBm/MHz** para asegurar la coexistencia.

Los límites de emisión UE se dividen en dos casos: para casos sin la presencia de otros sistemas LTE, el límite viene dado por -36dBm/100kHz, y para el caso de co-existencia con bandas LTE protegidas de frecuencias similares es -50dBm/MHz. En la siguiente figura se pueden ver los límites de emisión para los UE en la presencia de su dúplex desde la BS.

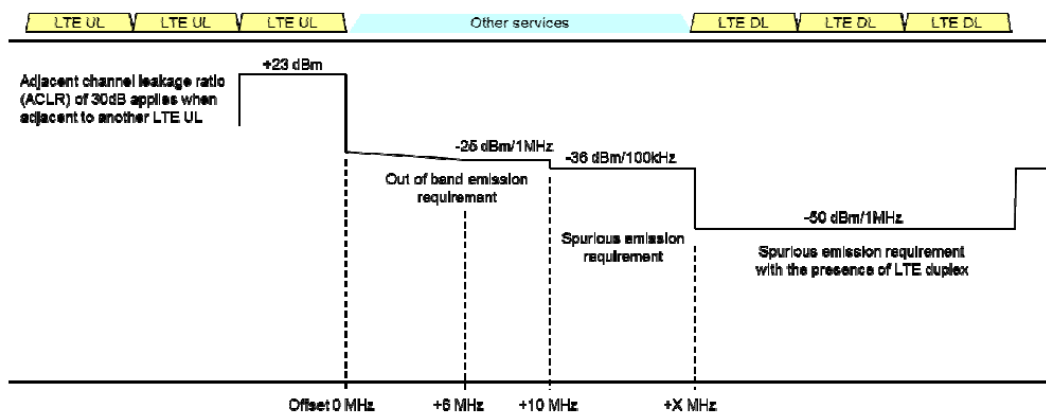


Figura 55. Ejemplo de límites de emisión espectral (incluyendo emisión fuera de banda y espúrea) para canales de 5MHz pareados en una disposición dúplex convencional [AWG-10].

En la Figura 56 también se puede ver el caso de un UE que se encuentra espectralmente adyacente a un servicio no LTE.

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

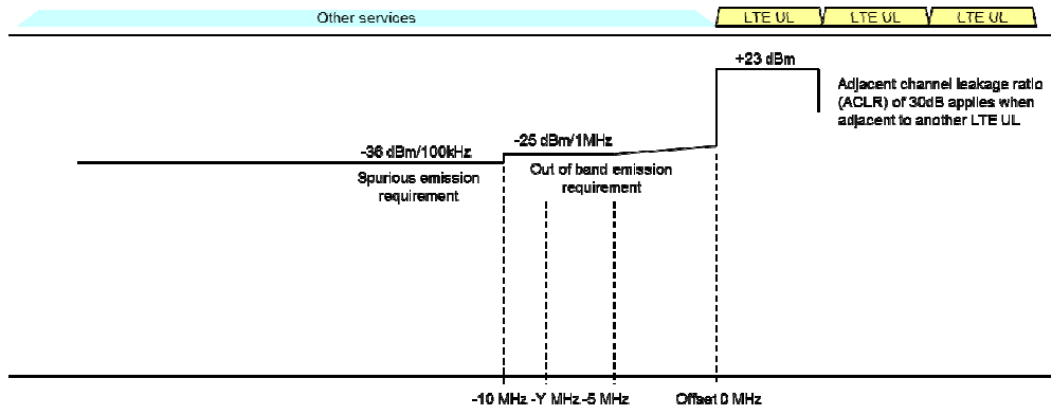


Figura 56. Ejemplo de límites de emisión espectral de UE (incluyendo emisión fuera de banda y espúrea) para canales de 5MHz pareados en una disposición dúplex convencional, en presencia de otros servicios en la banda adyacente inferior [AWG-10].

En el 11° 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” [AWG-11], Australia llevó a cabo un estudio probabilístico y empírico de coexistencia entre ambas tecnologías.

El estudio probabilístico determinó la reducción de la probabilidad de error de cobertura mediante el uso de un margen de protección (MP) determinado, o un rango de MP en varias situaciones, donde la señal útil seguirá siendo DVB-T. **Los resultados 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%.**

El estudio empírico obtuvo una lista de MP de canal adyacente. Se tuvo en cuenta diferentes escenarios, incluyendo emisiones LTE estáticas y dinámicas para anchos de banda desde 5 hasta 20 MHz. Los MP medios medidos (con una **banda de guarda de 9 MHz**) se encontraron en **-45 y -22 dB** para 5 y 20 MHz, respectivamente.

Concretamente, la subasta de licencias en la banda de 700 MHz realizada en Australia, para servicios 4G, concluyó en Mayo de 2013 con un total de 2x30 MHz ofertados según comunicó la *Australian Communications and Media Authority* (ACMA) [DDAUS]. Los operadores que consiguieron licencia fueron Optus Mobile (2x10 MHz) y Telstra (2x20 MHz) de acuerdo a la distribución mostrada en la Figura 57:



Figura 57. Distribución del DD en la banda de 700 MHz en Australia [DDAUS]

También se decidió que estos operadores no se harán cargo de los gastos necesarios para mitigar posibles interferencias entre el 4G y la TDT; sino que **serán los propios usuarios afectados, los responsables de solucionar su problema específico, adquiriendo el filtro que adecuado para cada caso.**

5 Metodología

En este punto se describe cómo se van a obtener los resultados de márgenes de protección y de balance de enlace. Además, en primer lugar se describe la instrumentación empleada en laboratorio

5.1 Instrumentación empleada

5.1.1 TDT DVB-T

5.1.1.1 Transmisión DVB-T

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-T y 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.



Figura 58. R&S SMU 200A Vector Signal Generator.

5.1.2 TDT DVB-T2

5.1.2.1 Transmisión DVB-T2

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.

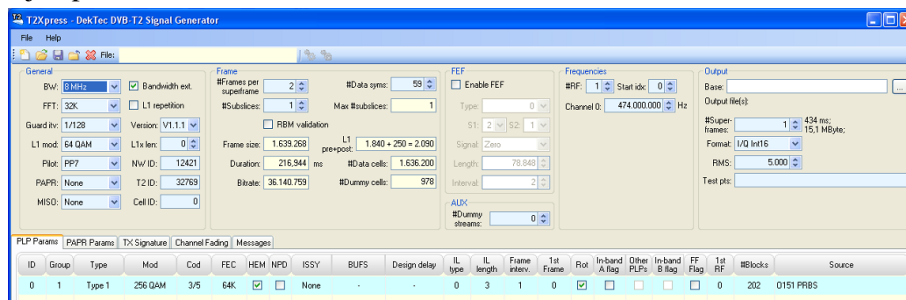


Figura 59. Interfaz del Transmisor DekTec T2Xpress DVB-T2 Signal Generator.

5.1.2.2 *Recepción y Análisis de Señal DVB-T2*

Televisión SONY BRAVIA:

Receptor empleado para medir las márgenes de protección de señales DVB-T/T2, interferidas por cualquier otro tipo de señal (LTE).



Figura 60. Televisión DVB-T2: SONY BRAVIA.

Set-Top Box Multitech DT2-M007:

Segundo receptor TDT a 6 y 8 MHz utilizado en este proyecto para obtener más resultados sobre los márgenes de protección de señales DVB-T/T2.



Figura 61. Set-Top Box Multitech DT2-M007.

Set-Top Box Transmundialtv.com CTM-900HD:

Receptor empleado para obtener más resultados sobre los márgenes de protección de señales DVB-T/T2 a 6 y 8 MHz.



Figura 62. Set-Top Box Transmundialtv.com CTM-900HD.

5.1.3 LTE

5.1.3.1 *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. En el caso de generación de señales LTE, permite la configuración de los canales PDSCH y PUSCH de forma que se puede controlar la carga de tráfico, la modulación, etc.



Figura 63. Aeroflex SGD utilizado para generar señales LTE.

5.1.4 Filtros Paso Bajo

- Banda 800 MHz:

 <p>Triax TBSI 260: doméstico, utilizado en [COMREG].</p>	 <p>ALCAD FR-619: doméstico.</p>
 <p>Televés 403401: doméstico.</p>	 <p>Televés 403301: profesional (microcavidades).</p>
 <p>ALCAD RB-619: doméstico.</p>	 <p>ALCAD RB-609: profesional (microcavidades).</p>
 <p>Fagor 85044 LBF 790: doméstico.</p>	 <p>IKUSI FLTE601: profesional.</p>



Figura 64. Filtros Paso Bajo de Canal 60 (Canalización europea) empleados en las medidas de laboratorio para la obtención de ACS_{filtro} y márgenes de protección.

- **Banda 700 MHz:**

No sólo se ha utilizado estos filtros diseñados para la banda de 800 MHz. Se ha contactado con Fagor y Televés, los cuales se han encargado de fabricar **filtros específicos para este proyecto**, para la banda de 700MHz. Dichos filtros son:

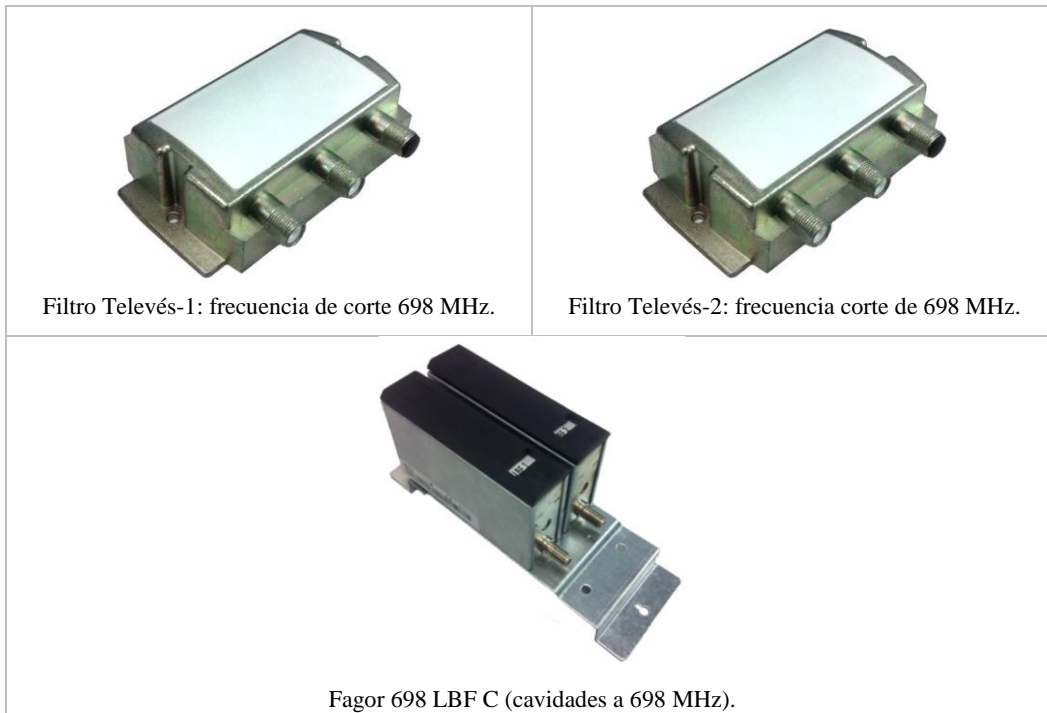


Figura 65. Filtros diseñados exclusivamente para este proyecto (Canalización colombiana) y empleados en las medidas de laboratorio para la obtención de ACS_{filtro} y márgenes de protección.

Tanto las especificaciones técnicas de los filtros que se han nombrado como la caracterización realizada en laboratorio para la obtención de parámetros como ACS_{filtro} o atenuación de canal 59 y 60 TDT están descritos en el **Anexo B**.

5.1.5 Otros

- **Analizador Vectorial R&S ZVRE:**

Empleado para visualizar la respuesta en frecuencia de los diferentes estándares, su potencia de pico, el nivel de ruido, etc.

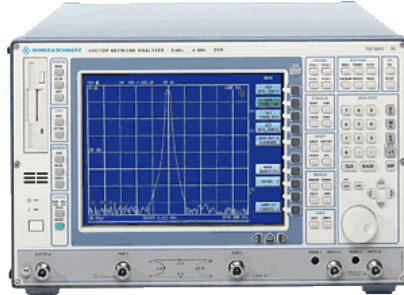


Figura 66. Analizador Vectorial R&S ZVRE.

- **Filtro Paso Banda 5BT-375/750-5-O/O:**

Filtro sintonizable (375-750 MHz) utilizado en las medidas de márgenes de protección, bajo la Recomendación ITU-R BT.2215-2 [ITU-BT.2215], para limitar la señal interferente a la banda de interés.



Figura 67. Filtro Paso Banda 5BT-375/750-5-O/O.

- **Aislador MTC C189VFF:**

Se utiliza para evitar reflexiones indeseadas en la combinación de señal útil e interferente que puedan afectar al generador de señales. Utilizado en la Recomendación ITU-R BT.2215-2 [ITU-BT.2215]. Frecuencia de paso: 650-850 MHz.



Figura 68. Aislador MTC C189VFF.

- **Cables y conectores.**

5.2 Metodología de medida para Márgenes de Protección

5.2.1 Medida DVB-T/T2 útil vs. LTE interferente

La metodología seguida en las medidas está basada en la utilizada en la recomendación [ITU-BT2215], y en ella se utilizan las señales y canales descritos en la especificación [ITU-BT2033], especificación en la cual se obtienen márgenes de protección a 8 MHz (DVB-T2) y 10 MHz (LTE DL).

5.2.1.1 Metodología de evaluación

Existen diferentes métodos para obtener los márgenes de protección necesarios para una señal digital. 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 = 2×10^{-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 [ITU-BT.1368].
- 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 [ITU-BT.1368] e ITU-R BT.2215 [ITU-BT.2215]. Además, en el estándar DVB-T2, obtener el BER no es tan trivial como en otros estándares, como indica DIGITALEUROPE en el punto 3 de su White Paper “Standardized DVB-T2 RF specifications” [DIGEUR-WP]. 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 márgenes de protección, se ha empleado una señal útil DVB-T/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 o set top box) 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 medir. 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:

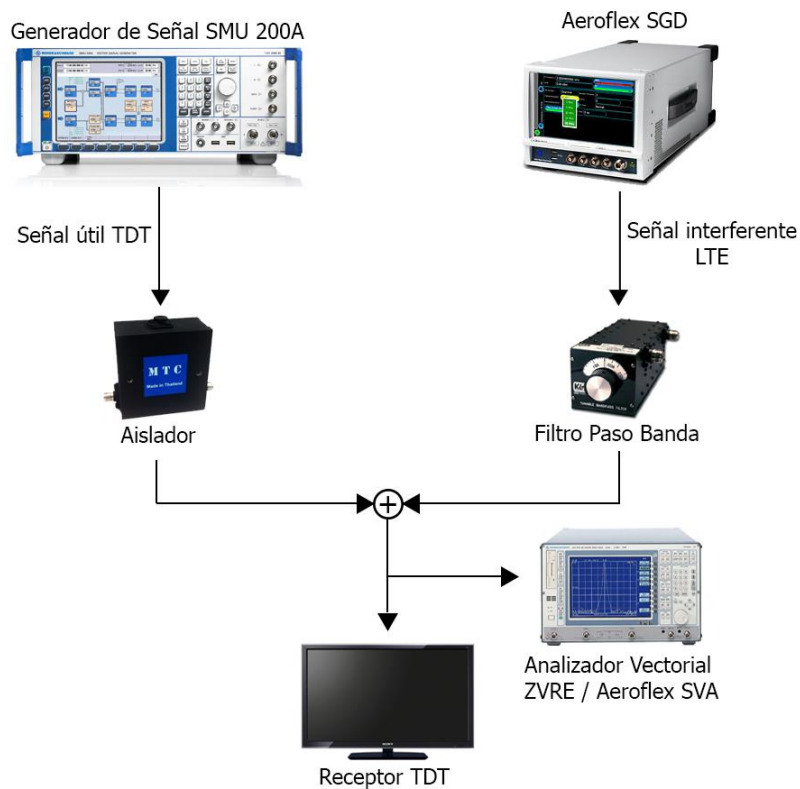


Figura 69. Montaje genérico utilizado en la medida de los márgenes de protección DVB-T/T2 útil (sin utilización de filtro a la entrada del receptor TDT) especificado en la Recomendación ITU-R BT.1368-9 [ITU-BT.1368].

5.2.1.2 Validación de la metodología empleada

En este punto se realizará el mismo método seguido en la recomendación [ITU-BT2033], que indica cómo realizar medidas cuando se tiene una señal DVB-T/T2 útil frente a una interferencia de tipo LTE. Si los resultados obtenidos son similares, se podrá validar el proceso y comenzar a medir márgenes de protección reales.

En primer lugar, es necesario especificar los parámetros que se van a utilizar en este proceso de validación a 8 MHz en el método planteado (parámetros utilizados en la recomendación [ITU-BT2033]).

- Frecuencia de señal útil: 786 MHz a 8 MHz.
- Frecuencia de señal interferente: ver siguientes tablas (offset).
- Receptor utilizado: Transmundialtv Set Top Box (permite recepción a 8 MHz).
- Modelo de canal: se asume canal AWGN pues es el utilizado en [ITU-BT2033].

Señal útil DVB-T2 (utilizada en Ofcom, ITU-R):

Modulación	CR	FFT	Modo	GI	Patrón Portadoras	BW (MHz)	Rate (Mbps)
256-QAM	2/3	32k	Extendido	1/128	PP7	8	40,2

Tabla 17. Parámetros de la señal útil DVB-T2 utilizada en ITU-R BT.2033.

Señal interferente LTE en UL/DL (utilizada en la BBC, Ofcom, ITU-R):

Modulación	CR	CQI	GI	FFT	BW (MHz)	RB
QPSK	1/3	9	Normal	1024	10	50

Tabla 18. Parámetros de la señal interferente LTE DL utilizada en ITU-R BT.2033.

Además, en el método de validación, las señales LTE se pueden categorizar como:

Downlink:

- *Idle*: sincronización más datos ocasionales.
- 50%: carga media.
- *Fully loaded* 100%: todos los RB se utilizan al mismo tiempo.

Uplink:

- 1 Mbit/s: sólo un pequeño número de RB se utilizan.
- 10 Mbit/s: carga media.
- 20 Mbit/s: carga alta.

Es importante destacar que los resultados de esta validación han sido cargando las señales que utilizó la BBC en sus estudios en el Aeroflex SGD, mismas señales que se utilizan en la Recomendación ITU-R BT.2033. Los resultados obtenidos y comparados con **[ITU-BT2033]** son:

Downlink:

Estado LTE:		Idle			50%			100%		
Canal	Offset	Medida Lab.	BT.2033 50 th	BT.2033 90 th	Medida Lab.	BT.2033 50 th	BT.2033 90 th	Medida Lab.	BT.2033 50 th	BT.2033 90 th
N	0 Hz	11	10	11	17,1	18	18	17	19	19
N+1	+10MHz	-45,1	-44	-24	-45,1	-40	-38	-46	-38	-36
N+2	+18MHz	-49	-50	-32	-48,5	-48	-44	-50,8	-47	-43
N+3	+26MHz	-48,9	-51	-35	-48,6	-49	-45	-51	-48	-44
N+4	+34MHz	-49	-52	-39	-48,5	-51	-46	-51	-50	-45
N+5	+42MHz	-49	-53	-41	-48,6	-51	-47	-51,1	-51	-46
N+6	+50MHz	-49,1	-55	-46	-48,6	-54	-48	-51,2	-52	-47
N+7	+58MHz	-49	-56	-46	-48,5	-54	-49	-51,2	-54	-48
N+8	+66MHz	-49,1	-57	-45	-48,5	-54	-50	-51,1	-53	-49
N+9	+74MHz	-49	-58	-45	-48,6	-55	-50	-51,1	-53	-49

Tabla 19. Comparación entre márgenes de protección medidos y obtenidos por la ITU BT.2033 (Downlink) para diferentes cargas de tráfico (0, 50 y 100%).

Para poder validar el método de medida planteado en el anterior punto de este documento, se han comparado los márgenes obtenidos con los obtenidos por la Recomendación ITU-R BT.2033. Estos datos están sacados para señales UL y DL con diferentes cargas de tráfico al 50 y 90 percentil, que atraviesa un canal gaussiano. Por ejemplo, 90 percentil se refiere a una medida realizada con 10 receptores como mínimo, de los cuales se descarta el peor resultado, obteniendo el resultado final como el resultado del noveno peor receptor.

Se puede observar como la mayoría de los resultados se encuentra dentro de los dos percentiles, esto significa que con las medidas se obtienen peores resultados que el mejor receptor de [ITU-BT2033], 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 para señales LTE en estado idle:

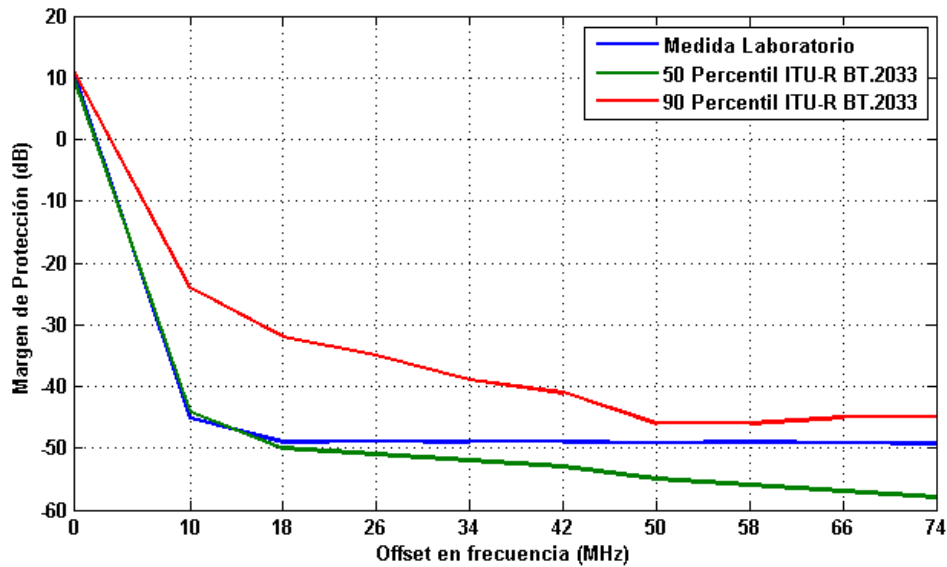


Figura 70. Márgenes de protección medidos para la validación del método de medida de DVB-T2 vs. LTE DL. Carga de estado idle.

Observando la Figura 70 se aprecia como los márgenes hallados son correctos, pues los valores obtenidos para los primeros canales son muy parecidos a los valores del 50 percentil, y conforme aumenta el offset entre tecnologías, se acercan más al 90 percentil, pero en todo caso, se encuentran entre ambos percentiles.

Uplink:

Canal	Offset	1 Mbit/s			10 Mbit/s			20 Mbit/s		
		Medida Lab.	BT.2033 50 th	BT.2033 90 th	Medida Lab.	BT.2033 50 th	BT.2033 90 th	Medida Lab.	BT.2033 50 th	BT.2033 90 th
N	0 Hz	8,8	10	11	15,7	18	18	16,3	19	19
N+1	+10MHz	-35,4	-36	-19	-38,3	-41	-39	-47	-41	-39
N+2	+18MHz	-41,2	-41	-24	-47,4	-47	-45	-50,5	-47	-43
N+3	+26MHz	-43,9	-44	-26	-47,1	-48	-45	-50,8	-50	-44
N+4	+34MHz	-47,2	-46	-36	-47,1	-48	-45	-50,6	-52	-45
N+5	+42MHz	-47,7	-47	-37	-47,3	-48	-44	-49,2	-54	-46
N+6	+50MHz	-48,7	-50	-38	-47,4	-49	-43	-48,5	-52	-45
N+7	+58MHz	-49,2	-50	-41	-47,7	-49	-44	-48,7	-53	-44
N+8	+66MHz	-49,4	-50	-41	-47,9	-49	-42	-49	-54	-45
N+9	+74MHz	-49,3	-50	-43	-47,5	-49	-43	-48,4	-54	-47

Tabla 20. Comparación entre márgenes de protección medidos y obtenidos por la ITU BT.2033 (Uplink) para diferentes cargas de tráfico (0, 50 y 100%).

En *Uplink* se tiene el mismo resultado que en *Downlink*, estando las medidas dentro del rango especificado en la recomendación de la ITU. Para el caso de velocidad media de 1 Mbit/s, los márgenes de protección comparados con los obtenidos por la ITU son:

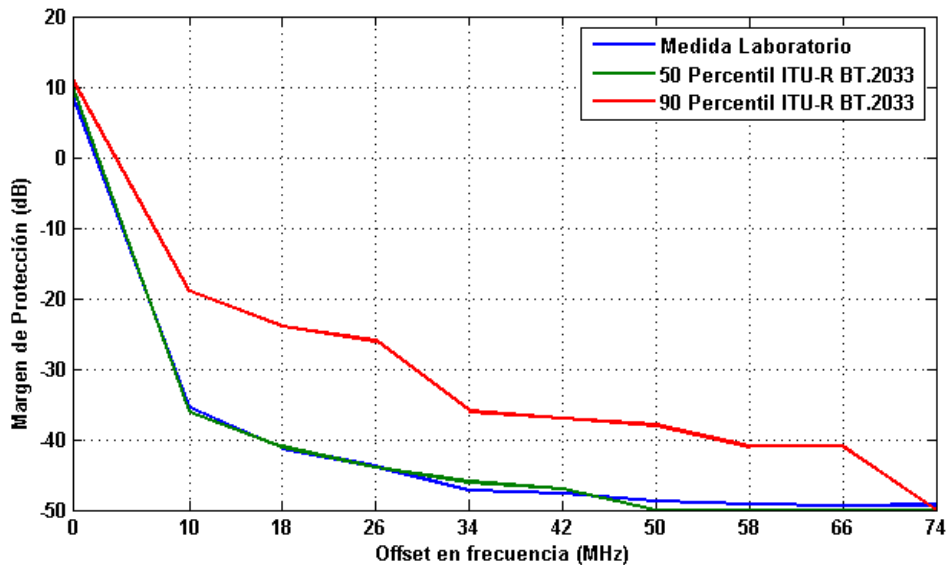


Figura 71. Márgenes de protección medidos para la validación del método de medida de DVB-T2 vs. LTE UL. Velocidad UL 1 Mbit/s.

La frecuencia de offset para N+1 es de 10 MHz en la [ITU-BT2033] porque así queda 1 MHz de guarda entre ambas tecnologías, como en el dividendo digital (ver Figura 71). Posteriormente se incrementa el offset de 8 en 8 MHz para obtener la interferencia sobre el anterior canal de TDT, pues es equivalente desplazar LTE hacia la derecha a desplazar DVB-T2 a la izquierda. 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 [ITU-BT2033], y tras todas las medidas y comprobaciones realizadas, se puede decir que **el método de medida utilizado es válido**.

5.3 Metodología para Balance de Enlace

5.3.1 Metodología de Balance de Enlace LTE Uplink vs. DVB-T2 con Recepción Fija

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” [CPG-010] y en el informe [CEPT-30], basados en la Recomendación ITU-R BT.419-3 [ITU-BT419-3]. Este procedimiento está compuesto por los siguientes pasos.

En primer lugar, es necesario definir el escenario a estudiar. En este documento se estudiará:

- DVB-T2 interferido por LTE UL ($f_{\text{DVB-T2 (ch.51)}} = 695 \text{ MHz}$, $f_{\text{LTE (ch.1)}} = 708 \text{ MHz}$, $B_G = 5 \text{ MHz}$).

5.3.1.1 Escenario y Geometría: Cálculo de Pérdidas

Cada caso se divide en diferentes escenarios, que analizarán el correcto funcionamiento del sistema dependiendo de la posición de los receptores, o el tipo de enlace utilizado.

A continuación, se debe caracterizar los parámetros de la antena del receptor de señal útil, 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: potencia máxima transmitida, ancho de banda, ganancia, altura y patrón de la antena, etc.

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

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:

$$FSL = 32.4 + 20 \log(f) + 20 \log(d) \quad (\text{Ec. 1})$$

donde:

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

Además, se puede calcular el ángulo de elevación como:

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

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:

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

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

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

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 asociada con el patrón de radiación vertical de la antena TDT.
- L_{body} son pérdidas debidas al cuerpo humano, situado entre el UE y la antena TDT.

5.3.1.2 Cálculo de la Interferencia Recibida

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

$$I = P_{TX} + G_{TX} - L \quad (\text{Ec. 5})$$

5.3.1.3 Cálculo de la 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:

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

Para calcular la CNR (SNR) mínima cuando la señal útil es DVB-T2, será necesario el uso de la siguiente ecuación:

$$CNR_{min} = CNR_{MODCOD} + \Delta_{CH} + \Delta_{PP3} + D \quad (\text{Ec. 7})$$

donde:

- CNR_{MODCOD} es la CNR mínima determinada por la modulación y tasa de codificación de la señal.
- Δ_{CH} es el incremento de CNR por el uso de un determinado canal: Rice, Rayleigh (Tabla 2.13 de la [EBU3348]).
- Δ_{PP3} es el incremento de CNR por el uso de un determinado patrón de portadoras piloto (Tabla 2.10 de la [EBU3348]).
- D es el factor para compensar el nivel back-stop noise a -33 dBc generado principalmente por el ruido de sintonización de fase y el ruido de ecualización (Tabla 2.11 de la [EBU3348]).

5.3.1.4 Cálculo del Margen de Protección Requerido en el Receptor

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

$$MP_{req} = P_{Smin} - I_{RX} + \delta \quad (\text{Ec. 8})$$

donde:

- P_{Smin} 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, siguiendo el procedimiento descrito en el punto 5.2.1.

5.3.1.5 Cálculo del 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:

$$ACIR = MP_0 - MP_{req} \quad (\text{Ec. 9})$$

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:

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

Este valor nos permite relacionar el MP_{req} con el MP medido en el laboratorio para poder saber qué se ha de hacer en el receptor de TDT.

En el caso de TDT útil, es posible 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, y siempre ha de ser mayor que el ACIR. El ACS total del receptor con filtro sería:

$$ACS_{tot}(\Delta f) = ACS(\Delta f) + ACS_{filtro} \quad (\text{Ec. 11})$$

5.3.2 Metodología de Balance de Enlace LTE Uplink vs. DVB-T2 en recepción interiores

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

$$P_N(\text{dBm}) = 10 \log(kTB) + NF(\text{dB}) \quad (\text{Ec. 12})$$

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

$$P_I(\text{dBm}) = P_N(\text{dBm}) - \delta(\text{dB}) \quad (\text{Ec. 13})$$

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. En unidades lineales esta relación se muestra en la Ecuación 14:

$$P_{I(TS)} = \frac{P_{IB(TS)}}{ACS} + P_{OOB(TS)} \quad (\text{Ec. 14})$$

Las pérdidas mínimas por acoplo entre la señal interferente y el receptor vendrán dadas por los dos parámetros anteriores.

$$G_{CG} = P_I - P_{I(TS)} \quad (\text{Ec. 15})$$

Las pérdidas en el enlace totales vienen dadas por las pérdidas de acoplo halladas, las pérdidas por penetración, las pérdidas del cuerpo humano y la ganancia de la antena receptora.

$$G_{PG} = G_{CG} - G_{WL} - L_{body} - G_{RX} \quad (\text{Ec. 16})$$

Dadas las pérdidas finales, queda despejar la distancia mínima necesaria a partir de la ecuación de las pérdidas de propagación.

$$d_{min} = 10^{\frac{147,56 - 20 \log(f) - G_{PG}}{20}} \quad (\text{Ec. 17})$$

5.3.3 Metodología de Balance de Enlace DVB-T2 con Interferencia LTE Downlink.

La metodología cuando el enlace interferente LTE es Downlink cambia respecto a las descritas anteriormente. En primer lugar, es necesario definir los escenarios a estudiar. En este documento se estudiarán:

- DVB-T2 interferido por LTE DL ($f_{\text{DVB-T2 (ch.60)}} = 786 \text{ MHz}$, $f_{\text{LTE (ch.1)}} = 796 \text{ MHz}$, $B_G = 1 \text{ MHz}$).
- DVB-T2 interferido por LTE DL ($f_{\text{DVB-T2 (ch.14)}} = 473 \text{ MHz}$, $f_{\text{LTE (ch.1)}} = 465 \text{ MHz}$, $B_G = 2,5 \text{ MHz}$).

Para este nuevo caso, es necesario definir de nuevo los parámetros de las antenas de ambos sistemas (TDT y LTE).

Dados los parámetros definidos y aplicando el modelo de pérdidas utilizado en el Anexo 6 del [CEPT-30], se puede llegar a obtener las pérdidas máximas permitidas en el enlace TDT, y por tanto, el radio de cobertura existente. Del mismo modo, habrá que obtener el radio de cobertura máximo que se tiene para las características del enlace LTE.

Una vez definidos los radios de cobertura de cada red por separado, “*lo que se buscará será definir una distancia mínima entre las estaciones base LTE y las antenas receptoras de TDT a partir de la cual estas antenas no sufran interferencias*”, según recomienda el sumario ejecutivo explicado en el Informe 21 del CEPT [CEPT-21].

El área interferida será calculada para distintas localizaciones de las celdas LTE, como se muestra en la Figura 72. La localización exacta de estas celdas no es necesaria, al no tener en cuenta efectos estadísticos. Así, se testea la intensidad de campo eléctrico DVB-T2 en toda la celda de TDT, y se van situando celdas LTE en aquellas zonas donde los receptores de TDT reciban una intensidad de campo eléctrico de 49 dB μ V/m, 59 dB μ V/m y 69 dB μ V/m.

Celda de red LTE	(A)	(B)	(C)
Potencia recibida DVB-T2: Ps (dBm)	-77	-67	-57
Campo eléctrico DVB-T2: E (dB μ V/m)	49	59	69

Tabla 21. Características de las diferentes celdas LTE

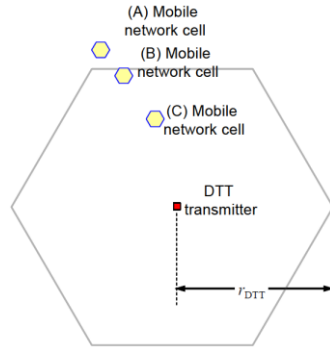


Figura 72. Localización de las diferentes celdas LTE [CEPT-30].

Dentro de estas celdas LTE, el radio de la zona interferente se estima calculando la distancia para la cual la potencia recibida de la señal interferente LTE en el receptor TDT es igual a la potencia recibida de la señal útil DVB-T/T2, más un margen de protección (medido en laboratorio).

Para que el receptor de TV funcione correctamente, se requiere que $\frac{P_s}{P_I} > SIR$, donde SIR es el margen de protección co-canal. Como nuestro interés está enfocado en medir interferencias con canal adyacente, siguiendo la Ec.18 se relacionan el margen de protección adyacente con el margen de protección co-canal.

$$ACIR = \frac{SIR}{PR} \quad (\text{Ec. 18})$$

donde:

- ACIR: Rechazo a la interferencia de canal adyacente.
- PR: Margen de protección de canal adyacente.

Por último, sabiendo la expresión del parámetro ACIR, se puede obtener las pérdidas de propagación en el enlace TDT-LTE permitidas para un margen de protección de canal adyacente dado:

$$ACIR = \frac{P_{IB(BS)} G_{A(TV)} G_{PL(TDT-LTE)} G_{(BS)} G_{(TT)}}{P_I} \quad (\text{Ec. 19})$$

$$G_{PL(TDT-LTE)} = \frac{P_s}{PR} P_{IB(BS)}^{-1} G_{A(TV)}^{-1} G_{(BS)}^{-1} G_{(TT)}^{-1} \quad (\text{Ec. 20})$$

donde:

- P_s : es la potencia de la señal DVB-T/T2 recibida en la antenna receptora de TDT.
- PR: Margen de protección de canal adyacente.
- $P_{IB(BS)}$: es la potencia de la señal LTE recibida en la antenna receptora de TDT.
- $G_{A(TV)}$: la ganancia de la antenna receptora de TDT.

Observando estas pérdidas, se puede dilucidar un radio de la zona de protección en torno a un transmisor LTE y el porcentaje dentro de esa área de la celda LTE donde un receptor TDT

puede ser interferido, utilizando el modelo de propagación definido en el Anexo 6 del [CEPT-30].

6 Resultados

Para la campaña de medidas, tal y como se indicó en los objetivos, en primer lugar se han realizado medidas de márgenes de protección para un caso genérico evaluando cómo afectan los distintos parámetros característicos de las redes 4G LTE y de TDT. Posteriormente, se ha evaluado la convivencia en las distintas bandas planteadas durante el proyecto para sus características específicas.

6.1 Medidas de márgenes de protección genéricos entre la red TDT y LTE

Para la campaña de medidas genéricas se ha realizado un primer apartado cuantificando las interferencias provocadas al variar un determinado parámetro LTE sobre una señal de TDT específica. En segundo lugar, se ha visto cómo afectan alguno de los parámetros que pueden ser modificados en la red TDT, considerando las señales LTE más interferentes halladas anteriormente.

6.1.1 Márgenes de protección modificando los parámetros de LTE

Como se ha dicho, en este apartado se ha evaluado cómo afectan la variación de los parámetros de la señal LTE sobre una señal TDT víctima. Por tanto, se ha fijado como modo de transmisión TDT el modo DVB-T2 utilizado por la ITU en sus estudios, que es el que han adoptado en Reino Unido. Las señales LTE están basadas en formas de onda grabadas de 10 MHz de ancho de banda de estaciones base y equipos de usuario reales, con diferentes cargas de tráfico (y utilizadas por la BBC, Ofcom, ITU-R, etc. para la obtención de sus resultados). Tanto el modo de DVB-T2 como el de LTE empleados se muestran a continuación:

Modulación	CR	FFT	Modo	GI	Patrón Portadoras	BW (MHz)
256-QAM	2/3	32k	Extendido	1/128	PP7	8

Tabla 22. Parámetros de la señal útil DVB-T2 utilizada.

Multiplex	Modulación	FFT	GI	BW (MHz)	RB	Velocidad media
OFDM	QPSK	1024	Normal	10	50	Idle-50%-100%

Tabla 23. Parámetros de la señal interferente LTE DL utilizada en ITU-R BT.2033.

Multiplex	Modulación	FFT	GI	BW (MHz)	RB	Velocidad media
SC-FDMA	QPSK	1024	Normal	10	50	1, 10, 20 Mbit/s

Tabla 24. Parámetros de la señal interferente LTE UL utilizada en ITU-R BT.2033.

Las señales en Uplink emplean el tipo de multiplexación de usuarios SC-FDMA, en lugar de OFDM (utilizado en Downlink). SC-FDMA no es más que una OFDM 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 OFDM. La señal en tiempo y frecuencia tiene un comportamiento totalmente diferente.

Para asegurar el correcto funcionamiento de las medidas y los modos utilizados, tanto DVB-T2 como LTE, se ha llevado a cabo un **proceso de validación**, detallado en el apartado de metodología, donde los márgenes eran medidos para un modelo de canal gaussiano. Una vez validado el método de medida, se han estudiado los siguientes casos:

- Efecto de la carga de tráfico de cada enlace:
 - Uplink: 1Mbit/s, 10 Mbit/s y 20 Mbit/s
 - Downlink: Idle, 50% y 100%.
- Efecto del ancho de banda de la señal LTE: 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz, 20 MHz.
- Efecto del enlace interferente LTE: Downlink, Uplink.

Se toma el margen de protección final como el peor caso entre los tres receptores descritos en la metodología (generalmente se toman valores para percentil 90% para un total de 10 receptores o más, pero al tener únicamente tres se toma el peor caso [**ITU-BT2033**]). Se han realizado medidas con todas las configuraciones posibles que serán detalladas en los siguientes apartados.

6.1.1.1 Efecto de la carga de tráfico

En primer lugar se evaluó cómo afecta la carga de tráfico de la señal LTE. Como se ha mencionado, las señales LTE tanto en Uplink como en Downlink fueron grabadas con diferentes cargas de tráfico [**ITU-BT2033**]. Las cargas de tráfico Downlink fueron categorizadas del siguiente modo:

- Idle – consiste principalmente en sincronización y señales broadcast con datos ocasionales.
- Carga del 50% - carga media.
- Carga del 100% - donde todos los *Resource blocks* (RB) se utilizan todo el tiempo.

Las cargas de tráfico Uplink se categorizaron como:

- 1 Mbit/s – carga ligera donde solo un pequeño número de *Resource Blocks* se utilizan una pequeña parte de tiempo.
- 10 Mbit/s – carga media.
- 20 Mbit/s – carga alta.

En Downlink, a mayor número de *Resource Blocks* transmitidos, más potencia transmitirá la estación base. En Uplink, el control de potencia depende, entre otros parámetros del número de *Resource Blocks* utilizados (relacionado con la velocidad de transmisión) y de las pérdidas de propagación (relacionadas con la distancia entre el terminal y su estación base) según se especifica en [**3GPP36-942**]. En las siguientes figuras se muestran tres señales Downlink y tres Uplink con distintas cargas de tráfico, reproducidas con el Aeroflex SGD (ancho de banda 10 MHz) y observadas en el analizador vectorial:

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

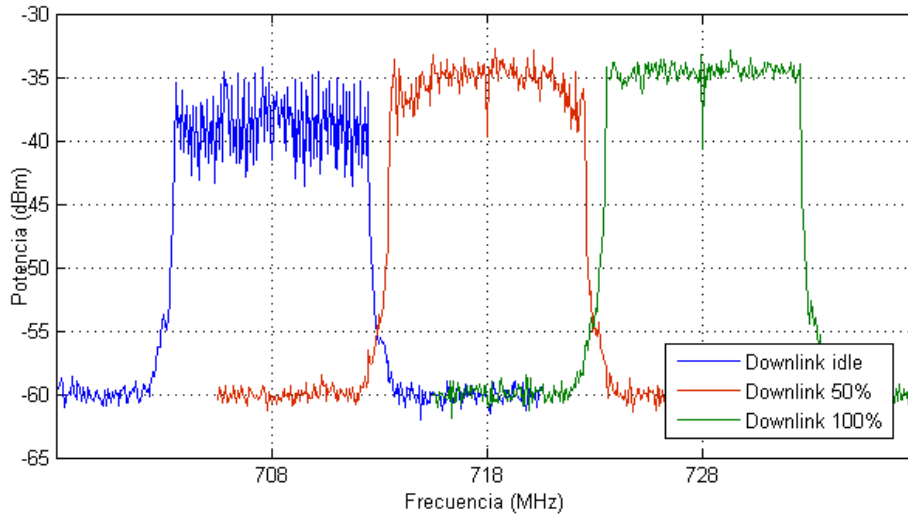


Figura 73. Señal LTE Downlink de ancho de banda 10 MHz empleada en las medidas. Cargas de tráfico idle, 50% y 100%.

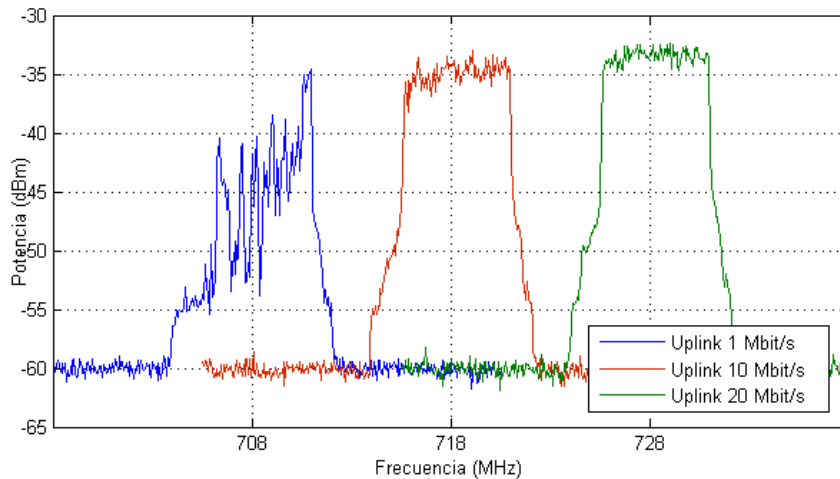


Figura 74. Señal LTE Uplink de ancho de banda 10 MHz empleada en las medidas. Cargas de tráfico 1, 10 y 20 Mbit/s.

Se comprobó que en el enlace Downlink la señal LTE afecta más conforme aumenta su nivel de carga. Para ello, a modo de ejemplo se muestran la Tabla 25 y la Tabla 26 con los valores obtenidos para anchos de banda de señal LTE de 5 MHz y 10 MHz y se observa su evolución en la Figura 75 y Figura 76 respectivamente.

Banda de Guarda	Idle	50%	100 %
0 MHz	-46,3	-42,9	-42,6
1 MHz	-46,4	-44,9	-44,8
5 MHz	-48,3	-46,7	-46,5
9 MHz	-49,2	-47	-46,8
11 MHz	-49,5	-47,9	-48

Tabla 25. Márgenes de protección para distintas cargas de tráfico para una señal LTE Downlink de 5 MHz.

Banda de Guarda	Idle	50%	100 %
0 MHz	-46,8	-44,2	-44,4
1 MHz	-47,9	-46,5	-46
5 MHz	-48,6	-47,9	-47,6
9 MHz	-49,4	-48,3	-48,4
11 MHz	-49,8	-48,6	-48,5

Tabla 26. Márgenes de protección para distintas cargas de tráfico para una señal LTE Downlink de 10 MHz

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

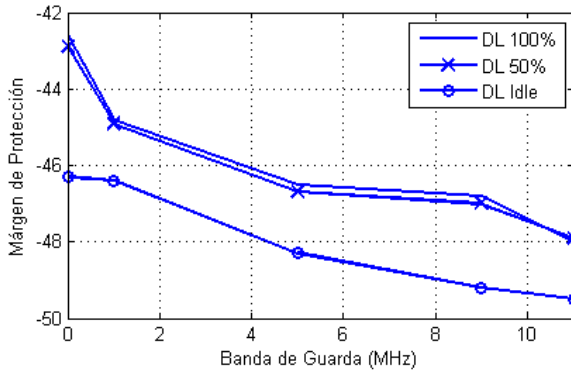


Figura 75. Evolución del margen de protección para distintas cargas de tráfico para una señal LTE Downlink de 5 MHz.

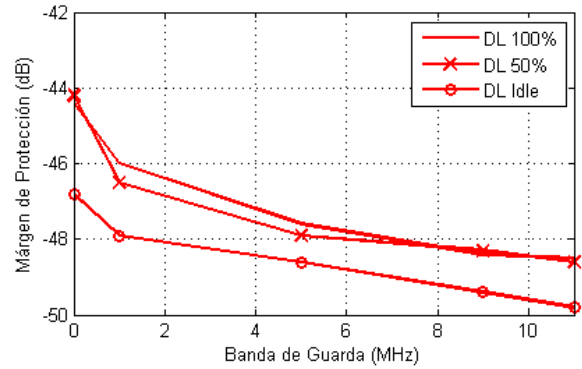


Figura 76. Evolución del margen de protección para distintas cargas de tráfico para una señal LTE Downlink de 10 MHz

En la Figura 77 se muestra un ejemplo de cómo evoluciona la potencia permitida para la señal LTE conforme se va alejando de la señal DVB-T2.

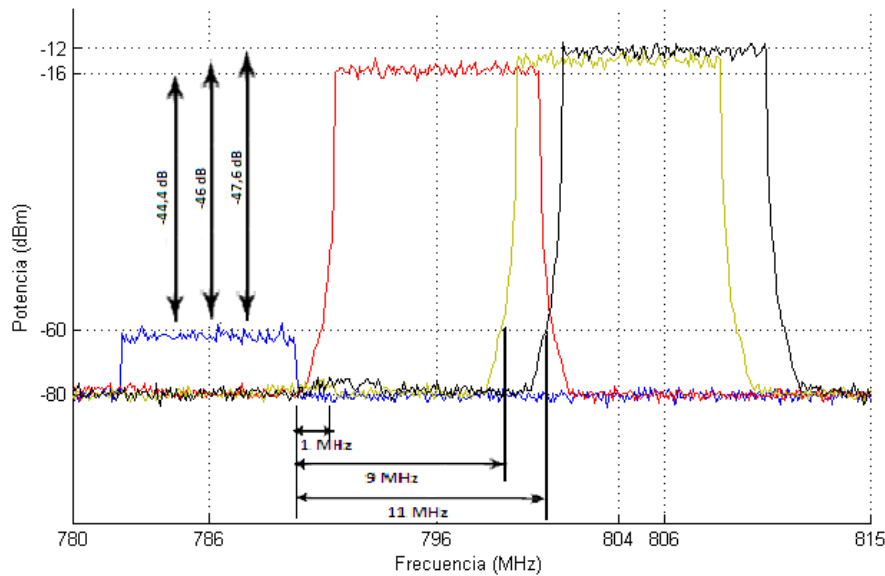


Figura 77. Márgenes de protección en función de la banda de guarda existente entre tecnologías. DVB-T2 con ancho de banda 8 MHz y LTE DL ancho de banda 10 MHz cargada al 100%.

En cuanto al enlace Uplink, la señal que más afecta es aquella que utiliza una menor carga. La razón radica en que al utilizar menor capacidad, la señal es más variante con el tiempo, apareciendo y desapareciendo picos de interferencia que afectarán en mayor medida que una señal más cargada donde hay una menor variabilidad temporal. Este efecto se puede comprobar en la Tabla 27 y la Tabla 28, junto a sus figuras correspondientes.

Banda de Guarda	1 Mbit/s	10 Mbit/s	20 Mbit/s
0 MHz	-31	-35,6	-47
1 MHz	-32,8	-37,5	-48,4
5 MHz	-42,7	-45,4	-50,5
9 MHz	-43,4	-45,6	-51,2
11 MHz	-44	-46	-51,3

Tabla 27. Márgenes de protección para distintas cargas de tráfico. Señal LTE Uplink de 5 MHz

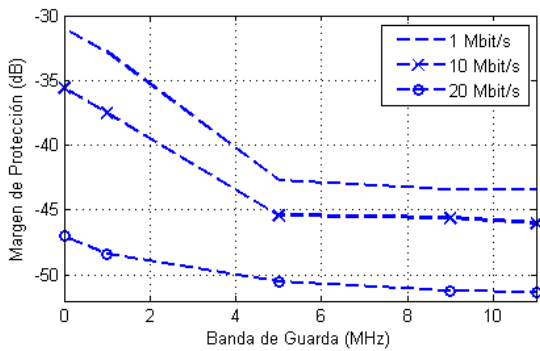


Figura 78. Evolución del margen de protección para distintas cargas de tráfico para una señal LTE Uplink de 5 MHz.

Banda de Guarda	1 Mbit/s	10 Mbit/s	20 Mbit/s
0 MHz	-32,2	-37,6	-48,6
1 MHz	-33,5	-38,9	-49,5
5 MHz	-39,3	-43,8	-50,6
9 MHz	-40,1	-45,2	-50,9
11 MHz	-42,4	-45,8	-50,8

Tabla 28. Márgenes de protección para distintas cargas de tráfico. Señal LTE Uplink de 10 MHz

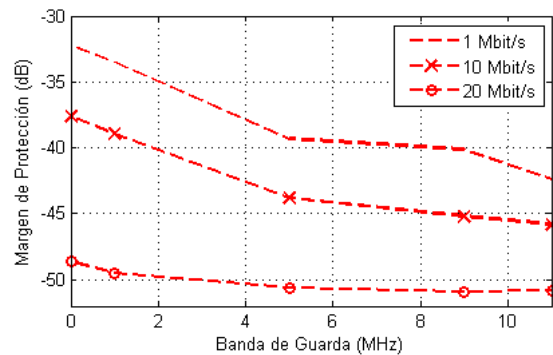


Figura 79. Evolución del margen de protección para distintas cargas de tráfico para una señal LTE Uplink de 10 MHz.

6.1.1.2 Efecto del Ancho de Banda

En segundo lugar se comparó, para el nivel de tráfico más interferente, la evolución de los márgenes de protección para los cuatro anchos de banda considerados. En el caso del Downlink, cuya carga más interferente era el 100%, se observó que si se aumenta el ancho de banda de la señal LTE, disminuye la interferencia, independientemente de la banda de guarda existente entre tecnologías. Esto se muestra en la Tabla 29 y la Figura 80:

Banda de Guarda	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
0 MHz	-42,6	-44,4	-45,5	-45,9
1 MHz	-44,8	-46	-46,2	-46,2
5 MHz	-46,5	-47,6	-48,2	-48,2
9 MHz	-46,8	-48,4	-49,1	-49
11 MHz	-48	-48,5	-49,3	-49,1

Tabla 29. Márgenes de protección para una señal LTE Downlink cargada al 100% para distintos anchos de banda.

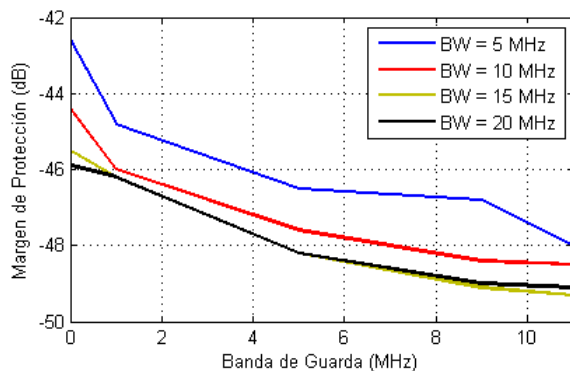


Figura 80. Evolución del margen de protección para una señal LTE Downlink cargada al 100% para distintos anchos de banda.

Mientras, en Uplink, donde la señal más interferente era aquella con un menor nivel de carga, el efecto del ancho de banda sobre los márgenes de protección varía dependiendo de la banda de guarda entre las tecnologías. Si las señales LTE se encuentran cerca de la señal TDT, ocurre

como en Downlink, es decir, afecta más una señal con un ancho de banda menor. Sin embargo, si la banda de guarda aumenta más allá de 3 MHz, a mayor ancho de banda más interferencia. Se considera que este efecto está influido por la máscara de emisión de las señales LTE, donde se es más restrictivo para señales con un mayor ancho de banda. La Tabla 30 y la Figura 81 demuestran lo comentado:

Banda de Guarda	5 MHz	10 MHz	15 MHz	20 MHz
0 MHz	-31	-32,2	-35	-35,1
1 MHz	-32,8	-33,5	-36,2	-36
5 MHz	-42,7	-39,3	-38,8	-37,8
9 MHz	-43,4	-40,1	-40,7	-39,8
11 MHz	-44	-42,4	-41,2	-40,4

Tabla 30. Márgenes de protección para una señal LTE Uplink cargada al 1Mbit/s para distintos anchos de banda.

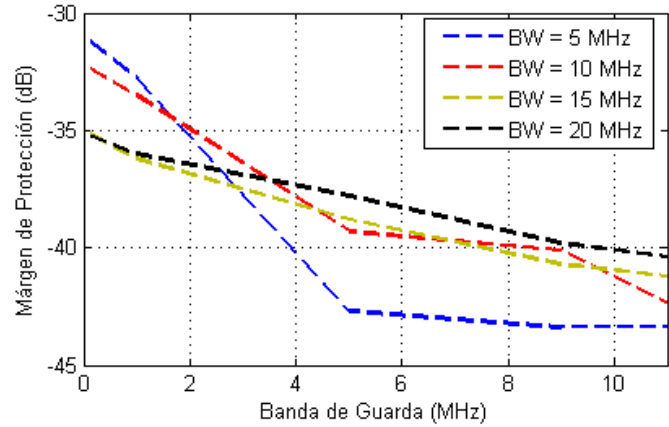


Figura 81. Evolución del margen de protección para una señal LTE Uplink cargada a 1Mbit/s para distintos anchos de banda.

6.1.1.3 Efecto del enlace interferente

Por último, se comparó qué enlace era más interferente, si el Uplink o el Downlink. Se observó que el enlace Uplink era más interferente que el Downlink, sobre todo a bandas de guarda pequeñas. En la Tabla 31 y la Tabla 32, junto a sus figuras correspondientes se muestran los márgenes de protección obtenidos para señales con anchos de banda 5 MHz y 10 MHz, cuando cada enlace se encuentra en su estado más interferente.

Banda de Guarda	Uplink 1 Mbit/s	Downlink 100%
0 MHz	-31	-42,6
1 MHz	-32,8	-44,8
5 MHz	-42,7	-46,5
9 MHz	-43,4	-46,8
11 MHz	-44	-48

Tabla 31. Márgenes de protección para enlaces Uplink y Downlink para una señal LTE 5 MHz.

Banda de Guarda	Uplink 1 Mbit/s	Downlink 100%
0 MHz	-32,2	-44,4
1 MHz	-33,5	-46
5 MHz	-39,3	-47,6
9 MHz	-40,1	-48,4
11 MHz	-42,4	-48,5

Tabla 32. Márgenes de protección para enlaces Uplink y Downlink para una señal LTE 10 MHz

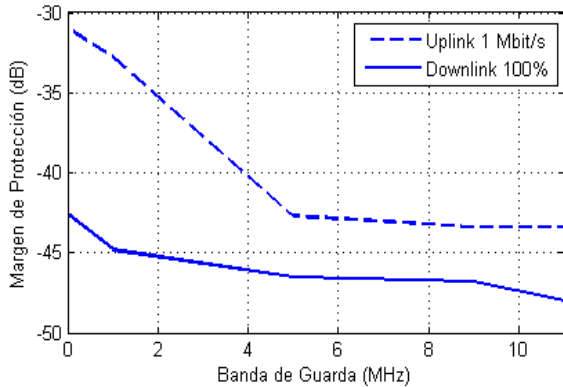


Figura 82. Evolución del margen de protección para enlaces Uplink y Downlink para una señal LTE 5 MHz.

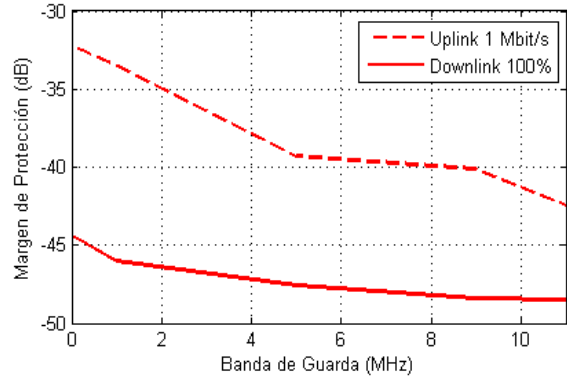


Figura 83. Evolución del margen de protección para enlaces Uplink y Downlink para una señal LTE 10 MHz.

Viendo todas las tablas y figuras presentadas se concluye que la banda de guarda óptima, tanto para cuando el enlace LTE adyacente es el Uplink como si es el Downlink es 5 MHz, ya que a partir de entonces no se notan grandes mejorías en la interferencia.

6.1.2 Márgenes de protección modificando los parámetros de TDT

En este segundo apartado se ha considerado una señal LTE interferente de 10 MHz de ancho de banda en enlace Downlink y Uplink. Los parámetros modificables de la señal TDT han sido:

- Estándar de TDT utilizado: DVB-T y DVB-T2.
- Ancho de banda de la señal TDT: 6 MHz y 8 MHz.
- Tipo de recepción: Recepción fija sobre tejado y Recepción en interiores.

6.1.2.1 Efecto del uso del estándar DVB-T o DVB-T2

La razón por la que todas las bandas de convivencia han sido evaluadas con el estándar DVB-T2 es debido a que se obtienen los mismos márgenes de protección que con DVB-T, pero además, DVB-T2 ofrece una mayor capacidad, como se mostró en las tablas presentadas durante los escenarios. No obstante, para corroborar este hecho se va a evaluar en este apartado el margen de protección necesario para el modo DVB-T equivalente al modo DVB-T2 considerado durante los apartados previos. Así, en la Tabla 33 se presentan las características del modo DVB-T evaluado y en la Tabla 34 se presentan los márgenes de protección obtenidos:

Modulación	CR	FFT	Modo	GI	BW (MHz)	CNR Rice (dB)
64-QAM	3/4	8k	Normal	1/8	8	20

Tabla 33. Modo DVB-T equivalente al modo DVB-T2 estudiado considerado en Reino Unido.

Modo TDT	Carga Tráfico LTE		
	Idle	50%	100%
DVB-T2	-47,9	--46,5	-46
DVB-T	-46,4	-45,4	-45

Tabla 34. Márgenes de protección en función del estándar TDT empleado.
 $BW_{TDT} = 8 \text{ MHz}$, $BW_{LTE} = 10 \text{ MHz}$, $BG = 1 \text{ MHz}$.

Las diferencias en margen de protección están entre 1 y 1,5 dB. Estas diferencias radican en el hecho de que el modo DVB-T equivalente tiene una CNR para recepción fija de 20 dB, mientras que la CNR del modo DVB-T2 era de 21 dB. De ahí, que el modo DVB-T2 tenga unos márgenes de protección aproximadamente 1 dB peores.

6.1.2.2 Efecto del ancho de banda de la señal TDT

En la Tabla 35 y la Figura 84 se muestran los márgenes de protección para los dos anchos de banda de la señal TDT considerados para distintas bandas de guarda respecto a la señal TDT, cuando es interferida tanto por una señal LTE Downlink como por una señal LTE Uplink.

Banda de Guarda	LTE DL	LTE DL	LTE UL	LTE UL
	BW _{TDT} = 8 MHz	BW _{TDT} = 6 MHz	BW _{TDT} = 8 MHz	BW _{TDT} = 6 MHz
0 MHz	-44,4	-45,4	-32,2	-33,3
1 MHz	-46	-46,1	-33,5	-34,5
5 MHz	-47,6	-48,6	-39,3	-41
9 MHz	-48,4	-49,4	-40,1	-42,5
11 MHz	-48,5	-49,9	-42,4	-44,3

Tabla 35. Márgenes de protección en función del ancho de banda de la señal TDT. BW_{LTE} = 10 MHz, tanto en Uplink como en Downlink.

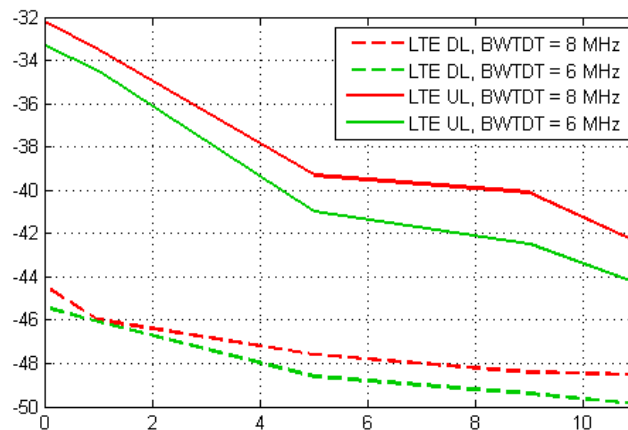


Figura 84. Evolución del margen de protección en función del ancho de banda de la señal TDT

Se comprueba que la señal TDT con un ancho de banda de 6 MHz es entre **1 dB y 1,6 dB** más robusta que una con un ancho de banda de 8 MHz. Esto es debido a que, a pesar de que el ancho de banda no influya en la CNR, el tener un menor ancho de banda, reduce el nivel de potencia de ruido y por tanto, como ambas medidas se hicieron para un mismo nivel de señal útil se estaba mejorando la CNR de la señal de 6 MHz. No obstante, no causa un gran impacto en la medida de los márgenes realizados hasta ahora.

6.1.2.3 Efecto del tipo de recepción de TDT

Hasta ahora, todas las medidas habían sido realizadas considerando un canal de propagación gaussiano. En la realidad, para medidas de planificación de redes de TDT hay que considerar otros canales. Cuando la red es planificada para recepción fija sobre tejado se debe considerar

un modelo de canal Rice, mientras que cuando se planifica para recepción en interiores se ha de considerar un modelo de canal Rayleigh.

Cuando el enlace interferente es el Downlink, tanto la TDT como LTE utilizan el mismo modelo de canal. Estos modelos hacen que los márgenes de protección empeoren en caso de recepción fija sobre tejado (Rice) en media **1,6 dB** respecto a los que se obtendrían en caso de utilizar únicamente un modelo de canal gaussiano. Para recepción en interiores (Rayleigh) los márgenes de protección empeoran **3,2 dB**.

La señal LTE UL ha utilizado modelo AWGN, puesto que la propia naturaleza de la señal ya tiene en cuenta las distintas potencias que genera cada usuario en función de su posición respecto a la estación. Por tanto, si se consideraran canal Rice o Rayleigh para la TDT los márgenes de protección empeoran respecto a los resultados obtenidos en los apartados anteriores en media **0,4 dB** y **0,7 dB** respectivamente. En la Tabla 36 y la Figura 85 se muestra la diferencia entre los tres modelos de canal considerados.

Banda de Guarda	Canal AWGN	Canal Rice	Canal Rayleigh
0 MHz	-32,2	-31,9	-31,7
1 MHz	-33,5	-33,4	-33,1
5 MHz	-39,3	-38,9	-38,6
9 MHz	-40,1	-39,6	-39,4
11 MHz	-42,4	-41,8	-41,4

Tabla 36. Márgenes de protección para distintos modelos de canal para una señal LTE Uplink de 10 MHz y una de TDT de 8 MHz

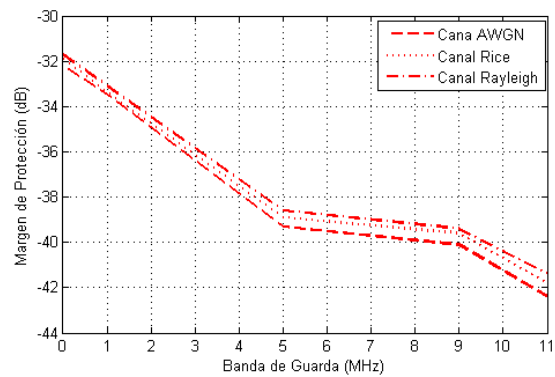


Figura 85. Evolución del margen de protección para distintos modelos de canal para una señal LTE Uplink de 10 MHz y una de TDT de 8 MHz.

6.2 Resultados de Convivencia red TDT vs. LTE en la banda de 800 MHz

En este apartado y en los siguientes se estudiará la problemática específica de cada banda. Concretamente para esta banda, el hecho de disponer de un total de 2x30 MHz permite diversas configuraciones, pero aquí se considerarán dos: 3 bloques de 10 MHz o 6 bloques de 5 MHz, tal y como se estudió en otros países europeos (Suecia, Reino Unido). Se recuerda que en este caso el enlace LTE adyacente es el Downlink, con lo que esas serán las señales LTE interferentes consideradas. Los márgenes de protección propuestos para sistemas DVB-T2 se han obtenido para el modo presentado en la Tabla 22. Los valores para cualquier otro modo se pueden calcular a partir de los obtenidos.

6.2.1 Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción fija sobre tejado DVB-T2

Para este escenario, como se considera recepción fija sobre tejado se debe asumir un modelo de canal Rice tanto para la señal DVB-T2 como para la señal LTE Downlink a la hora de realizar las medidas. Se han estudiado los siguientes casos:

- Cálculo de márgenes de protección para las dos distribuciones típicas consideradas en diversos países de la Región 1 de la ITU en estudios anteriores.
- Efecto del empleo de filtros paso bajo a la entrada del receptor TDT: domésticos y profesionales.

6.2.1.1 Márgenes de Protección según las Posibles Distribuciones de Canalización de LTE

Caso 1: 3 bloques de 10 MHz

En este caso, se ha medido la interferencia de canales LTE Downlink suponiendo una distribución de 3 canales de 10 MHz sobre los dos últimos canales de TDT. Esta distribución puede verse a continuación:



Figura 86. Primer caso de interferencia LTE: 3 bloques de 10 MHz.

Se tienen los siguientes márgenes de protección:

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (796) BW 10 MHz	LTE-2 (806) BW 10 MHz	LTE-3 (816) BW 10 MHz
59	778	-45,7	-46,1	-46,5
60	786	-44,4	-46,3	-46,7

Tabla 37. Caso 1: 3 bloques LTE de 10 MHz. Caso peor medido. Modelo de canal Rice en DVB-T2 y LTE.

Cuando el ancho de banda LTE utilizado en el canal 1 es de 10 MHz, el **margen de protección crítico para el caso de recepción fija es de -44,4 dB para el canal 60 y -45,7 dB para el canal 59.**

Caso 2: 6 bloques de 5 MHz

La segunda posible distribución de LTE se muestra a continuación:



Figura 87. Segundo caso de interferencia LTE: 6 bloques de 5 MHz.

En este caso, al utilizar bloques de 5 MHz de ancho de banda, será necesario medir interferencia sobre TDT de 6 bloques distintos. Los resultados cambian respecto a la distribución anterior:

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (frecuencia en MHz)					
		LTE-1 (793,5)	LTE-2 (798,5)	LTE-3 (803,5)	LTE-4 (808,5)	LTE-5 (813,5)	LTE-6 (818,5)
59	778	-45,2	-45,6	-45,7	-46	-46	-45,9
60	786	-43,2	-45,3	-45,5	-45,6	-45,6	-45,5

Tabla 38. Caso 2: 6 bloques LTE de 5 MHz. Modelo de canal Rice en DVB-T2 y en LTE.

Observando la Tabla 38, los valores son más restrictivos que para el anterior caso (el ancho de banda es menor). Concretamente, **el margen de protección más crítico en este caso es de -43,2 dB para el canal 60 y -45,2 para el canal 59.** Esto supone una diferencia de 1,2 dB para el canal 60 por el hecho de utilizar un ancho de banda de 5 MHz en lugar de 10 en el primer canal LTE.

En la Figura 88 se muestran los márgenes de protección para cada canal según las distintas configuraciones estudiadas:

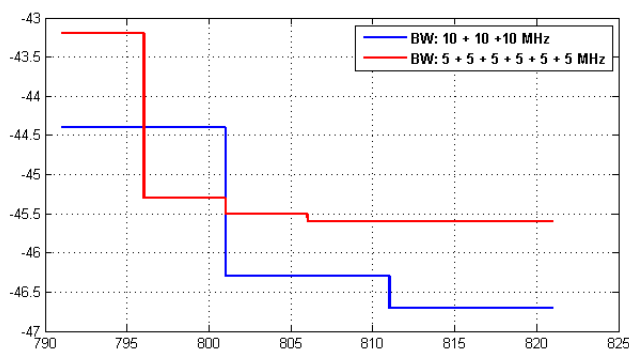


Figura 88. Márgenes de protección para cada canal según las 2 configuraciones estudiadas.

Se observa que la segunda configuración provocará un mayor número de interferencias que la primera. Por tanto se aconsejaría utilizar la primera de las dos, es decir, asignar canales de 10 MHz.

6.2.1.2 Efecto del Empleo de Filtros Paso Bajo a la Entrada del Receptor

Para intentar mejorar la recepción de la señal TDT, una vez medido el margen de protección necesario para el último canal, se ha situado un filtro paso bajo adicional a la entrada del receptor. De esta forma se observa en cuánto se mejora dicho margen.

Los filtros a **800 MHz** de los que se dispone en el laboratorio pueden dividirse en dos categorías: profesionales (de microcavidades) y domésticos (diseñados en cerámica).

- Los filtros domésticos proporcionan, para una banda de guarda de 1 MHz, un ancho de banda DVB-T2 de 8 MHz y un ancho de banda LTE de 10 MHz, bandas de rechazo de entre **2,3 y 23,1 dB**.
- Los filtros profesionales proporcionan para las mismas condiciones una banda de rechazo de entre **17,4 y 31,5 dB**.

Los nuevos márgenes de protección medidos para los filtros domésticos son:

	Sin Filtro	Televés 403401	Fagor LBF 790	Triax TBSI 260	ALCAD RB-619
LTE BW 10 MHz	-44,4	-47,4	-44,4	-45,4	-46
LTE BW 5 MHz	-43,2	-47,1	-43,4	-44,4	-45,4

Tabla 39. Márgenes de protección con y sin filtro paso bajo a la entrada del receptor. Interferencia de canal LTE-1 en función de su ancho de banda, sobre canal TDT 60. Filtros domésticos a 800 MHz.

Los resultados para los filtros profesionales son:

	Sin Filtro	Televés 403301	Fagor 790-2	ALCAD RB-609	IKUSI FLTE601	ALCAD FR-619
LTE BW 10 MHz	-44,4	-47,5	-46,2	-46,9	-46	-47,8
LTE BW 5 MHz	-43,2	-47,4	-45,6	-46,2	-46,4	-45,9

Tabla 40. Márgenes de protección con y sin filtro paso bajo a la entrada del receptor. Interferencia de canal LTE-1 en función de su ancho de banda, sobre canal TDT 60. Filtros profesionales a 800 MHz.

Comparando los resultados, utilizar filtros domésticos mejora el margen de protección **1,4 dB** en media para interferencia LTE de ancho de banda 10 MHz. Para 5 MHz, mejora **1,9 dB** en media. Por tanto, en caso de utilizar un filtro paso bajo a la entrada del receptor, es más efectivo frente a señales LTE de anchos de banda menores. Sin embargo, el resultado final es similar, teniendo márgenes de protección similares independientemente del ancho de banda.

Los filtros profesionales, obtienen resultados casi idénticos, teniendo un margen de protección medio **2,5 dB** mejor para 10 MHz, **3,1 dB** mejor para 5 MHz. Por tanto, se consigue al menos 1 dB en media de mejora en el margen de protección con respecto a lo obtenido utilizando filtros domésticos. En cualquier caso, los resultados son muy semejantes.

6.2.2 Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción en interiores DVB-T2

Para este escenario la única variación respecto al anterior es la modificación del modelo de canal empleado. Si anteriormente se usaba un modelo de canal Rice, esta vez se ha de considerar un modelo de canal Rayleigh, que como se mencionó en el apartado 6.1.2.3 es **1,6 dB** en media peor que el Rice.

6.2.2.1 Márgenes de protección según las posibles distribuciones de Canalización de LTE

Esta vez solo se ha medido la interferencia del primer canal LTE sobre los dos primeros canales de TDT. Los anchos de banda de la señal LTE considerados han sido 5 MHz y 10 MHz, al igual que se hizo para el escenario de recepción fija. Los resultados para el peor caso son:

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)	
		LTE-1 (796) BW 10 MHz	LTE-1 (793,5) BW 5 MHz
		59	778
60	786	-42,8	-41,6

Tabla 41. Márgenes de protección DVB-T2 vs. LTE (Downlink) en función del ancho de banda de la señal LTE. Modelo de canal Rayleigh en DVB-T2 y LTE. Caso peor medido

Se comprueba que son 1,6 dB peores que los obtenidos para el escenario de recepción fija.

6.2.2.2 Efecto del Empleo de Filtros Paso Bajo a la Entrada del Receptor

De nuevo, una vez medido el margen de protección necesario para el último canal TDT, se ha situado un filtro paso bajo adicional a la entrada del receptor para observar en cuánto se reduce el margen.

Los filtros a **800 MHz** de los que se dispone en el laboratorio y que pueden utilizarse en condiciones de recepción en interiores son solo los domésticos. Los nuevos márgenes de protección medidos para tales filtros son:

	Sin Filtro	Televés 403401	Fagor LBF 790	Triax TBSI 260	ALCAD RB-619
LTE BW 10 MHz	-42,8	-45,8	-42,8	-43,8	-44,4
LTE BW 5 MHz	-41,6	-45,5	-41,8	-42,8	-43,8

Tabla 42. Márgenes de protección con y sin filtro paso bajo a la entrada del receptor. Interferencia de canal LTE-1 en función de su ancho de banda, sobre canal TDT 60. Filtros domésticos a 800 MHz.

Se obtienen las mismas mejoras que se obtenían para el escenario de recepción fija.

6.2.3 Balance de Enlace para escenario con recepción fija

En primer lugar se definen los parámetros radiantes del sistema TDT:

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente: Documento
PIRE urbano	72,15	dBm	[CEPT-30]
PIRE rural	79,15	dBm	[CEPT-30]
Ancho de banda de ruido equivalente	7,6	MHz	[CEPT-30]
Ganancia por apuntado de antena	15	dBi	[CEPT-30]
Altura de la antena	100/200	m	Urbano/rural
Patrón de la antena	Anexo 1 CEPT-30		[CEPT-30]

Tabla 43. Parámetros de antena transmisora TDT, dados por ITU-R BT.419-3 [CEPT-30].

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente: Documento
Figura de ruido	7	dB	[EBU3348]
Ancho de banda de ruido equivalente	7,6	MHz	
Ganancia de antena	9,15	dBi	[EBU3348]
Altura de la antena	10	m	[EBU3348]
Patrón de la antena	De ITU-R BT.419-3		[ITU-BT419]

Tabla 44. Parámetros de antena fija de receptor TDT, dados por ITU-R BT.419-3 [CPG-010].

Con estos parámetros se calculan las pérdidas de propagación máximas y a continuación el radio de cobertura de la estación transmisora de TDT.

Parámetro	Unidades	Downlink	Comentarios
Link BW	MHz	7,6	Ancho de banda ocupado por el enlace
Potencia de Ruido Térmico	dBm	-135,17	kTB
Figura Ruido Receptor	dB	7	CEPT30
Potencia Ruido	dBm	-98,17	$P_n = kTB + NF$
Cell edge reliability		95%	
Gaussian Confidence factor (F_G)		1,645	
Desviación estándar shadowing (σ_{SL})	dB	5,5	
Desviación estándar penetración (σ_{WL})	dB	0	
Desviación estándar total (σ_T)	dB	5,5	Suma de las raíces de los cuadrados
Loss margin	dB	9,05	$L_{MARGIN} = F_G * \sigma_T$
Mínima SNR en borde de celda TDT	dB	21	SNR_{min}
Target "mean" received signal level	dBm	-68,12	$P_{TARGET} = (P_N + SNR_{min}) + L_{MARGIN}$
PIRE urbano	dBm	72,15	PIRE
PIRE rural	dBm	79,15	PIRE
Perdidas por penetración	dB	0	L_w
Ganancia Antena Receptora	dBi	9,15	G_a
Pérdida máx. de propagación urbano	dB	149,42	$L_P = (PIRE - L_w + G_a) - P_{TARGET}$
Pérdida máx. de propagación rural	dB	156,42	$L_P = (PIRE - L_w + G_a) - P_{TARGET}$

Tabla 45. Pérdidas máximas de propagación permitidas en enlace TDT.

Para las pérdidas halladas en la tabla anterior, considerando el modelo de propagación utilizado en [CEPT-30] se obtiene un radio de cobertura $d_{\text{TDTurbano}} = 28,4 \text{ km}$ en un entorno urbano y $d_{\text{TDrural}} = 49,1 \text{ km}$ para rural.

En cuanto a la red LTE, los parámetros de la antena transmisora en la estación base son:

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente: Documento
PIRE (limitada por ruido)	61	dBm	[CEPT-30]
PIRE (limitada por balanceo UL/DL)	59	dBm	[CEPT-30]
Ancho de banda	5	MHz	[CEPT-30]
Altura de antena	30/60	Metros	Urbano/Rural
Patrón de antena	ITU-R F.1336 sec. A1.2		

Tabla 46. Parámetros de antena transmisora de BS LTE [CEPT-30].

El radio de cobertura LTE en Downlink:

Parámetro	Unidades	Downlink	Comentarios
Frecuencia	MHz	796	
Número de RBs disponibles		50	Cada RB tiene un BW = 180 kHz
Número de RBs usados		50	
Link BW	MHz	9	Ancho de banda ocupado por el enlace
Thermal Spectral Density	dBm	-104,43	kTB
Figura Ruido Receptor	dB	9	
Potencia de ruido (inc. NF)	dBm	-95,43	$P_n = kTB + NF$
Cell edge reliability		95%	
Gaussian Confidence factor (F_G)		1,645	
Desviación estándar shadowing	dB	5,5	
Desviación estándar penetración	dB	5,5	
Desviación estándar total (σ_T)	dB	7,78	Suma de las raíces de los cuadrados
Loss margin	dB	12,80	$L_{\text{margin}} = F_G * \sigma_T$
Mínima SNR	dB	0	SNR _{min}
Target "mean" received signal level	dBm	-82,64	$P_{\text{target}} = (P_n + \text{SNR}_{\text{min}}) + L_{\text{margin}}$
PIRE	dBm	59	PIRE
Pérdidas penetración	dB	0	L_w
Ganancia Antena Receptora	dBi	0	G_a
Pérdidas de propagación	dB	133,64	$L_p = (\text{PIRE} - L_w + G_a) - P_{\text{target}}$

Tabla 47. Pérdidas máximas de propagación permitidas en enlace LTE.

Para las pérdidas halladas en la tabla anterior, y de nuevo usando el modelo de propagación empleado en [CEPT-30] se obtiene un radio de cobertura $d_{\text{LTE-DLurbano}} = 2,7 \text{ km}$ en un entorno urbano, y $d_{\text{LTE-DLrural}} = 3,6 \text{ km}$ en un entorno rural.

Dados los radios de cobertura de ambas redes, es necesario obtener el área total de la celda LTE donde existe interferencia sobre la TDT. Para ello se debe tomar el margen de protección adyacente obtenido en el apartado 6.2.1 más restrictivo. En este caso, el valor era **-44,4 dB**.

Para ese margen de protección y sabiendo los datos radiantes del enlace, se obtienen los distintos radios de protección para cada uno de los entornos (rural y urbano) con la intensidad de campo recibida.

Intensidad de campo (dB μ V/m)		Escenario rural (3,6 km)	Escenario urbano (2,7 km)
49	Radio de protección	1 km	770 m
	Porcentaje de área interferida	7,88 %	8,36 %
59	Radio de protección	600 m	350 m
	Porcentaje de área interferida	2,76 %	1,7 %
69	Radio de protección	350 m	155 m
	Porcentaje de área interferida	0,97 %	0,34 %

Tabla 48. Radios de protección y porcentajes de área interferida de las celdas LTE para los distintos entornos estudiados.

Observando la tabla anterior, se puede decir que el aumento de la señal útil TDT se traduce en un menor radio de cobertura LTE en el que existirá interferencia sobre ésta (únicamente las zonas cercanas a la estación base LTE). Dicho de otro modo, cuanto mayor sea la señal recibida TDT, menor será el porcentaje de interferencias en el área de cobertura LTE.

Según este análisis, para este escenario, se aconseja una **separación mínima** entre receptores TDT y estaciones LTE de **1 km en entornos rurales y 770 metros en entornos urbanos**. Además, para evitar cualquier distancia mínima entre receptor y estación base LTE, se recomienda una intensidad de campo TDT recibida mayor a **86 dB μ V/m**. En tal caso, no existirá interferencia en ningún lugar de la celda LTE (siempre y cuando la PIRE de LTE no supere 61 dBm).

En las siguientes figuras se muestran cómo se reduce el radio de interferencia de la estación base LTE conforme aumenta el nivel de intensidad de campo recibido TDT para el escenario urbano.

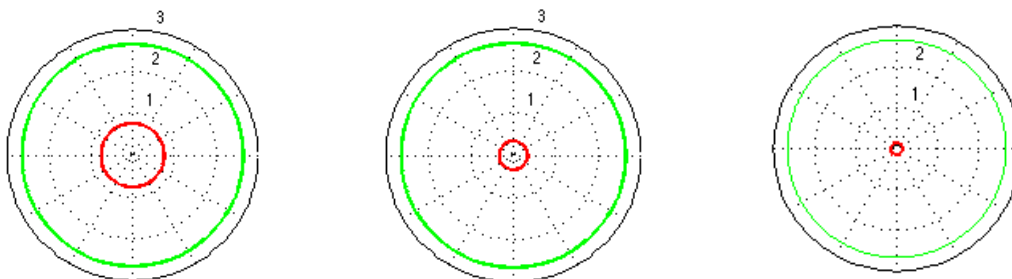


Figura 89. Radios de interferencia de la estación base LTE para zonas con intensidad de campo TDT recibida 49 dB μ V/m (izquierda), 59 dB μ V/m (centro), 69 dB μ V/m (derecha)

También es posible obtener el radio de protección y el porcentaje de área interferida en caso de emplear uno de los filtros propuestos anteriormente. Dichos valores se han obtenido para el caso

peor de los tres anteriormente evaluados, es decir, cuando la intensidad de campo TDT es 49 dB μ V/m. Los resultados, para las distintas posibles soluciones para un escenario urbano son:

Escenario		Sin	Filtro	Filtro
		filtrado	Doméstico	Profesional
Urbano (2,7 km)	Radio de protección	770 m	670 m	580 m
	Porcentaje de área interferida	8,36 %	6,48%	4,87%

Tabla 49. Radios de protección y porcentajes de área interferida de las celdas LTE para las distintas soluciones planteadas: filtro paso bajo profesional o doméstico en el receptor TDT.

6.3 Resultados de Convivencia red TDT vs. LTE en la banda de 700 MHz

Para esta banda se tiene un mayor ancho de banda total asignado a LTE, 2x45 MHz con lo que aquí se contemplará la posibilidad de ofrecer bloques de 10, 15 y 20 MHz a los operadores. Así se considerarán tres posibilidades:

- 3 bloques de 10 MHz + 1 bloque de 15MHz
- 3 bloques de 15 MHz
- 1 bloque de 10 MHz + 1 bloque de 15 MHz + 1 bloque de 20 MHz

Se recuerda que en este caso el enlace LTE adyacente es el Uplink, con lo que esas serán las señales LTE interferentes consideradas. Los márgenes de protección propuestos para sistemas DVB-T2 se han obtenido para el modo presentado en la Tabla 50. Los valores para cualquier otro modo se pueden calcular a partir de los obtenidos:

Modulación	CR	FFT	Modo	GI	Patrón Portadoras	BW (MHz)
64-QAM	3/5	16k	Extendido	1/8	PP3	6

Tabla 50. Parámetros de la señal útil DVB-T2 utilizada en las medidas de márgenes de protección.

6.3.1 Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción fija sobre tejado DVB-T2.

Para este escenario se ha de tener en cuenta que como se considera recepción fija sobre tejado se debe asumir un modelo de canal Rice para la señal TDT a la hora de realizar las medidas. En cambio, la señal Uplink ha utilizado modelo AWGN, puesto que la propia naturaleza de la señal ya tiene en cuenta las distintas potencias que genera cada usuario en función de su posición respecto a la estación. Se han estudiado los siguientes casos:

- Cálculo de márgenes de protección para las distintas distribuciones de canales LTE.
- Efecto del empleo de filtros paso bajo a la entrada del receptor TDT: profesionales.

6.3.1.1 *Márgenes de Protección según las Posibles Distribuciones de Canalización de LTE*

Caso 1: 3 bloques de 10 MHz + 1 bloque de 15 MHz

En este caso, se ha medido la interferencia de canales LTE Uplink suponiendo una distribución de 3 canales de 10 MHz y 1 de 15 MHz sobre los dos últimos canales de TDT. Esta distribución puede verse a continuación:



Figura 90. Primer caso de interferencia LTE: 3 bloques de 10 MHz + 1 bloque de 15MHz.

Se tienen los siguientes márgenes de protección:

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)			
		LTE-1 (708) BW 10 MHz	LTE-2 (718) BW 10 MHz	LTE-3 (728) BW 10 MHz	LTE-4 (740,5) BW 15 MHz
50	689	-44,2	-48	-48,7	-50
51	695	-40	-44,2	-45,7	-46,3

Tabla 51. Caso 1: 3 bloques LTE de 10 MHz y 1 de 15 MHz. Caso peor medido. Modelo de canal Rice en DVB-T2 y AWGN en LTE.

Cuando el ancho de banda LTE utilizado en el canal 1 es de 10 MHz, el margen de protección crítico para el caso de recepción fija es de -40 dB para el canal 51 y -44,2 dB para el canal 50.

Caso 2: 3 bloques de 15 MHz

La segunda posible distribución de LTE se muestra a continuación:



Figura 91. Segundo caso de interferencia LTE: 3 bloques de 15 MHz.

En este caso, al utilizar bloques de 15 MHz de ancho de banda, tan sólo será necesario medir interferencia sobre TDT de 3 bloques distintos. Los resultados cambian respecto a la distribución anterior:

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (710,5) BW 15 MHz	LTE-2 (725,5) BW 15 MHz	LTE-3 (740,5) BW 15 MHz
50	689	-42,8	-46,7	-50
51	695	-37,5	-41,9	-46,3

Tabla 52. Caso 2: 3 bloques LTE de 15 MHz. Caso peor medido. Modelo de canal Rice en DVB-T2 y AWGN en LTE.

Observando la Tabla 52, para el canal 1 y 2 de LTE los valores son más restrictivos que para el anterior caso (el ancho de banda es mayor), mientras que los márgenes para el canal 3 son iguales, pues coincide en frecuencia con el canal 4 del caso 1. Concretamente, **el margen de protección más crítico en este caso es de -37,5 dB para el canal 51 y -42,8 para el canal 50.** Esto supone una diferencia de 2,5 dB para el canal 51 por el hecho de utilizar un ancho de banda de 15 MHz en lugar de 10 en el primer canal LTE.

Caso 3: 1 bloque de 10 MHz + 1 bloque de 15 MHz + 1 bloque de 20 MHz

La tercera posibilidad a la hora de distribuir los bloques en la banda asignada a LTE es:

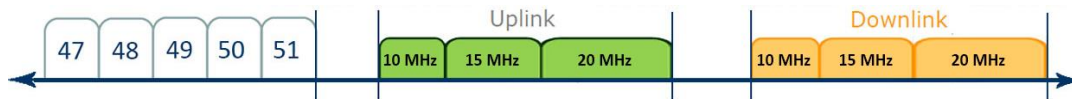


Figura 92. Tercer caso de interferencia LTE: 1 bloque de 10 MHz + 1 bloque de 15 MHz + 1 bloque de 20 MHz.

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (708) BW 10 MHz	LTE-2 (720,5) BW 15 MHz	LTE-3 (738) BW 20 MHz
50	689	-44,2	-46,3	-47,7
51	695	-40	-40,8	-42,5

Tabla 53. Caso 3: 1 bloque de 10 MHz + 1 bloque de 15 MHz + 1 bloque de 20 MHz. Márgenes de protección. Caso peor medido para cada canal. Modelo de canal Rice.

En este caso el primer canal LTE vuelve a ser de nuevo un bloque de 10 MHz, por lo que el margen de protección para la primera señal LTE coincide con el caso 1. Los márgenes para los otros dos canales son más restrictivos que los obtenidos en el primer caso, pues el ancho de banda de estos es mayor.

En la Figura 93 se muestran los márgenes de protección para cada canal según las distintas configuraciones estudiadas:

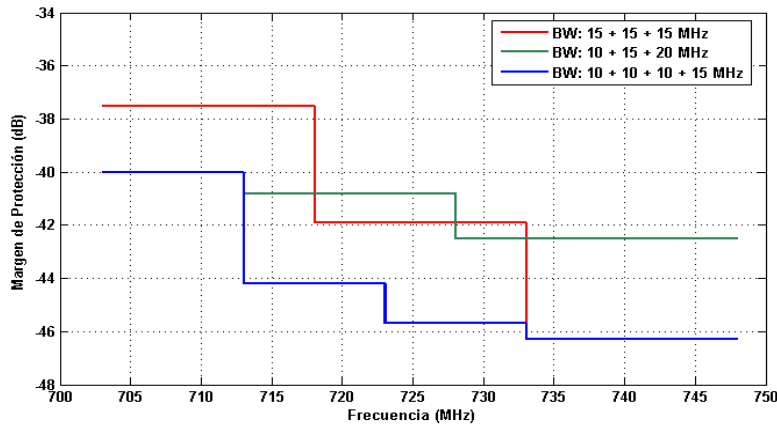


Figura 93. Márgenes de protección para cada canal según las 3 configuraciones estudiadas.

6.3.1.2 Efecto del Empleo de Filtros Paso Bajo a la Entrada del Receptor

Una vez medido el margen de protección necesario para el último canal TDT, se ha situado un filtro paso bajo adicional a la entrada del receptor. De esta forma se observa en cuánto se reduce dicho margen. Es importante destacar que los filtros diseñados por dos fabricantes exclusivamente para este proyecto a **700 MHz** son **filtros profesionales**, filtros que en un escenario real irán situados tras el mástil de antena y que por tanto, no pueden ser utilizados en un caso de recepción en interiores. Proporcionan, para una banda de guarda de 5 MHz, un ancho de banda DVB-T2 de 6 MHz y un ancho de banda LTE de 10 MHz, bandas de rechazo de entre **27 y 31,8 dB**. Los resultados son:

	Sin Filtro	Televés-1	Televés-2	Fagor 698
LTE BW 10 MHz	-40	-55,8	-55,8	-55,7
LTE BW 15 MHz	-37,5	-56,1	-55,9	-56
LTE BW 20 MHz	-34,9	-54,5	-54,3	-54,4

Tabla 54. Márgenes de protección medidos en laboratorio para el canal 51 de TDT, con y sin filtro paso bajo a la entrada del receptor. Interferencia de canal LTE-1, en función de su ancho de banda.

El hecho de **utilizar un filtro paso bajo reduce el margen de protección en mayor medida cuando el ancho de banda es mayor**. Así, se tiene una disminución media del margen de protección de **15,8 dB** cuando el ancho de banda es 10 MHz, **18,5 dB** cuando el ancho de banda es 15 MHz y **19,5 dB** cuando el ancho de banda es 20 MHz. Esto se debe a la respuesta del filtro (ver respuesta en el Anexo B).

Cabe destacar que en las medidas realizadas se ha observado un comportamiento distinto de la señal TDT frente a interferencia LTE cuando ha sido filtrada, cambiando en 0,1 dB de verse correctamente a no reproducir nada. Esto no ocurriría sin filtro, donde la variabilidad de la señal LTE Uplink comienza a dañar ciertos píxeles TDT con cada aumento de la señal interferente, degradando poco a poco la señal útil (la señal desaparece completamente subiendo 0,5 ó 1 dB más que el margen permitido).

6.3.2 Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción en interiores DVB-T2.

Para simular este escenario, se ha asumido un modelo de canal Rayleigh para la señal DVB-T2, ya que no existe visión directa entre transmisor y receptor en un caso indoor. La señal LTE UL ha utilizado modelo AWGN. Para este escenario, se han estudiado los siguientes casos:

- Cálculo de márgenes de protección para distintas distribuciones de canales LTE, a partir de los estudios anteriores.

6.3.2.1 Márgenes de Protección según las Posibles Distribuciones de Canalización de LTE

En este apartado se muestran los márgenes de protección necesarios para cada una de las configuraciones, que serán peores que para el escenario con recepción fija.

Caso 1: 3 bloques de 10 MHz + 1 bloque de 15MHz

Se tienen los siguientes márgenes de protección:

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)			
		LTE-1 (708) BW 10 MHz	LTE-2 (718) BW 10 MHz	LTE-3 (728) BW 10 MHz	LTE-4 (740,5) BW 15 MHz
50	689	-42,1	-45,9	-46,8	-47,8
51	695	-38,7	-40,9	-44,5	-45,2

Tabla 55. Caso 1: 3 bloques LTE de 10 MHz y 1 de 15 MHz. Caso peor medido. Modelo de canal Rayleigh en DVB-T2 y AWGN en LTE.

Caso 2: 3 bloques de 2x15 MHz

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (710,5) BW 15 MHz	LTE-2 (725,5) BW 15 MHz	LTE-3 (740,5) BW 15 MHz
50	689	-41,2	-45,2	-47,8
51	695	-36,3	-40	-45,2

Tabla 56. Caso 2: 3 bloques LTE de 15 MHz. Caso peor medido. Modelo de canal Rayleigh en DVB-T2 y AWGN en LTE.

Caso 3: 1 bloque de 10 MHz + 1 bloque de 15 MHz + 1 bloque de 20 MHz

Canal TDT	Frecuencia TDT (MHz)	Canal LTE interferente (Frecuencia en MHz)		
		LTE-1 (708) BW 10 MHz	LTE-2 (720,5) BW 15 MHz	LTE-3 (738) BW 20 MHz
50	689	-42,1	-44,8	-44,9
51	695	-38,7	-39	-40,8

Tabla 57. Caso 3: 1 bloque LTE de 10 MHz, 1 de 15 MHz y 1 de 20 MHz. Caso peor medido. Modelo de canal Rayleigh en DVB-T2 y AWGN en LTE.

Se ve que estos valores son más restrictivos que los obtenidos para el escenario con recepción fija. De los tres casos anteriores, el segundo es aquel más crítico, pues es el único que emplea un ancho de banda de 15 MHz en el primer canal. Así, el margen de protección más restrictivo para las distribuciones propuestas es **-36,3 dB** para el caso indoor.

Por tanto, y tal y como se estudió en el apartado 6.1.1.2, si el enlace LTE adyacente es el Uplink y la banda de guarda es mayor de 5 MHz, se aconsejaría utilizar un ancho de banda menor para los primeros canales LTE.

6.3.2.2 Efecto del Empleo de Filtros Paso Bajo a la Entrada del Receptor

Se recuerda que el caso indoor en cuanto a filtros paso bajo es un caso particular. Al tener recepción con antena portable, **no es posible colocar un filtro profesional**, pues estos van situados tras el mástil amplificador de la antena en edificios comunes a varios vecinos con recepción fija. Esto reduce las posibilidades únicamente a los filtros **domésticos a 800 MHz** de los que se dispone en el laboratorio.

Los filtros domésticos proporcionan, para una banda de guarda de 5 MHz, un ancho de banda DVB-T2 de 6 MHz y un ancho de banda LTE de 10 MHz, bandas de rechazo de entre **8 y 27 dB**.

Para medir la disminución del margen de protección por el hecho de utilizar estos filtros a 800 MHz es necesario realizar el desplazamiento en frecuencia, situando los canales TDT de forma que el filtro atenúe únicamente los canales LTE. Las frecuencias utilizadas son:

- Canal 50: desplazado al canal 66. Frecuencia central 785 MHz (782 a 788 MHz).
- LTE-1: desplazado a la frecuencia central 798 MHz (para BW 10 MHz).

Los resultados para los filtros domésticos empleados son:

	Sin Filtro	Televés 403401	Fagor LBF 790	Triax TBSI 260	ALCAD RB-619
LTE BW 10 MHz	-38,7	-51,5	-41,8	-43,4	-50,9
LTE BW 15 MHz	-36,3	-52,8	-42,8	-47,2	-52,3
LTE BW 20 MHz	-34,6	-51,2	-42,6	-46	-50,8

Tabla 58. Márgenes de protección con y sin filtro paso bajo a la entrada del receptor. Interferencia de canal LTE-1, en función de su ancho de banda. Filtros domésticos a 800 MHz. Caso indoor.

En este escenario, utilizar filtros domésticos mejora el margen de protección entre **3,1 y 12,8 dB** para interferencia LTE de ancho de banda 10 MHz. Para 15 MHz, mejora entre **6,5 y 16,8 dB** y para 20 MHz, entre **8 y 16,6 dB**. Por tanto, en caso de utilizar un filtro paso bajo doméstico a la entrada del receptor, éste será más efectivo frente a señales LTE de anchos de banda mayores.

6.3.3 Balance de enlace para escenario con recepción fija

Este punto analiza el impacto de la interferencia proveniente de un terminal operando a la frecuencia de 708 MHz sobre receptores TDT en el canal 51 de TDT. Los parámetros de la antenna fija del receptor TDT son los mismos que se consideraron en el apartado 6.2.3. En este caso el enlace LTE adyacente es el Uplink, por eso los parámetros asumidos para el terminal móvil LTE se detallan a continuación.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente: Documento
Potencia máxima transmitida	23	dBm	[EBU3348]
Pot. media transmitida (urbano/suburbano)	-9	dBm	[EBU3348]
Ancho de banda	10	MHz	[EBU3348]
Ganancia de antenna	-3	dBi	[EBU3348]
Altura de antenna	1,5	m	
Patrón de antenna	Omni-direccional		
Pérdidas por cuerpo humano	4	dB	[EBU3348]

Tabla 59. Parámetros de antenna del terminal IMT en transmisión, dados por ITU-R BT.419-3 [CPG-010].

Como peor caso de este escenario, se tiene:

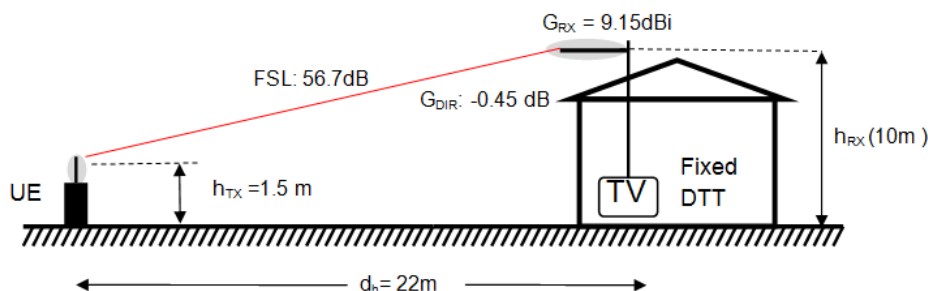


Figura 94. Geometría de referencia para el acoplo entre un terminal móvil y un receptor de TDT fijo [CPG-057].

Para este cálculo, se asume que existe visión directa entre el terminal móvil y la antenna TDT fija, en cuyo caso las pérdidas por propagación se calculan para el modelo de propagación Hata a menos de 40 metros mediante la Ecuación 2. Dados $d_h = 22\text{m}$, $h_{TX} = 1,5\text{m}$ y h_{RX} se puede calcular el ángulo de elevación, obteniendo $21,1^\circ$. Para este ángulo concreto, se tiene una

ganancia por discriminación de la antena de -0,45 dB. Así, la distancia entre la antena del terminal móvil y la de recepción TDT sería:

$$d = \sqrt{d_h^2 + (h_{RX} - h_{TX})^2} = 23,6m \quad (\text{Ec. 21})$$

El considerar una distancia horizontal de 22 metros es debido a que es la distancia exacta donde menores pérdidas sufriría la señal LTE interferente. Para la distancia d, las pérdidas por propagación en espacio libre son **FSL = 56,69 dB**.

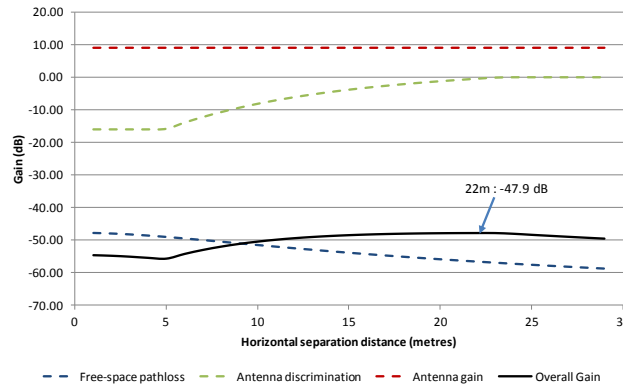


Figura 95. Ganancia total de la antena en función de la separación horizontal hasta el terminal IMT.

A partir de entonces, para el cálculo de los siguientes parámetros se utilizarán las ecuaciones descritas en el apartado de metodología. Considerando la ganancias de la antena TDT junto a las pérdidas del cuerpo humano, las pérdidas por acoplo asociadas con la geometría del escenario, son **L = 51,99 dB**.

Si un terminal móvil LTE transmite a su máxima potencia de transmisión P_{TX} de 23 dB y se considera que tiene una ganancia de antena G_{TX} de -3 dBi, la interferencia recibida en el receptor TDT será: $I=23-3-51,9 \rightarrow I = -31,99 \text{ dBm}$.

La potencia mínima requerida en este escenario para demodular la señal de TDT depende del modo de transmisión DVB-T2 escogido. Para el caso considerado, ver Tabla 3, 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. Por tanto la potencia mínima necesaria es **$P_{min} = -84,66 \text{ dBm}$** .

Cálculo y comparación entre el Margen de Protección Requerido y Medido en el Receptor

Los receptores TDT tienen unos valores mínimos de insensibilización de 0,41 dB. Este valor se corresponde con un valor de $I/N=-10 \text{ dB}$ aproximadamente. Aunque comercialmente, los receptores usan en la práctica un valor de insensibilización de 1 dB, correspondiente a una $I/N=-5,87 \text{ dB}$. El Margen de Protección requerido (MP_{req}) para ambos casos sería:

- $\delta = 0,41 \rightarrow MP_{req} = -84,6 - (-31,9) - 10 = -62,7 \text{ dB}$
- $\delta = 1 \rightarrow MP_{req} = -84,6 - (-31,9) - 5,87 = -58,5 \text{ dB}$

Así, si se tiene una $\delta = 0,41$ y la C/I existente es de -60 dB el sistema TDT no funcionaría, pues se necesita una diferencia de 62,7 dB. Pero si se tiene una $\delta = 1$ para la misma C/I sí funcionará,

pues la diferencia señal útil-interferente es mayor de la necesaria. En este estudio se tomará como valor $\delta = 1$. Aplicando este valor $I/N = -5,87$ dB, se **obtiene como margen de protección requerido para el enlace planteado: $MP_{req} = -58,5$ dB.**

Por otro lado, el margen de protección medido sin filtro en el laboratorio a la entrada del receptor, utilizando los modelos de canal correspondientes a este escenario (TDT Rice / LTE AWGN) era $MP = -40$, es decir, **18,5 dB** mayor al margen de protección necesario.

Cálculo del ACLR, ACIR y ACS

También, es necesario medir el margen de protección co-canal, necesario para el cálculo del ACLR requerido en el terminal IMT, medido en laboratorio con ambas tecnologías centradas en 695 MHz, es de **13 dB** para el peor caso, cuando la señal LTE interferente tiene una tasa de 1 Mbit/s. A partir del margen de protección requerido (MP_{req}) y el margen de protección co-canal, calculados en las secciones anteriores, se tiene que $ACIR = 13 - (-58,5 \text{ dB}) \rightarrow$ **ACIR = 71,5 dB.**

Por otro lado a partir del margen de protección real, obtenido en laboratorio, el margen de protección co-canal y el valor de ACLR del transmisor, se tiene una **ACS = 53,3 dB.**

Debe cumplirse que el valor del ACS sea mayor que el del ACIR, esto quiere decir que se necesita un filtro cuya atenuación fuera de banda sea al menos de 18,2 dB. Observando los filtros profesionales diseñados para la banda de 700 MHz todos cumplen con este requisito, teniendo entre **27 y 31,8 dB** de atenuación. Si se consiguieran filtros domésticos como los diseñados para la banda de 800 MHz en la banda de 700 MHz se podría decir que solo cumpliría los requisitos 1 de los 4 disponibles, puesto que estos tienen una atenuación fuera de banda entre **2,3 y 23,1 dB.**

El ACS total del receptor con un filtro de 19 dB de rechazo es $ACS_{tot} = 53,3 + 19 = 72,3$ dB. Redondeando, un **ACS de 73 dB** será suficiente para que el sistema funcione dada la canalización propuesta y el escenario descrito.

En la tabla que a continuación se muestra se puede observar un resumen de todos los requerimientos calculados para el correcto funcionamiento de la TDT cuando es interferida por un terminal.

Parámetro	Unidades	Valor	Comentarios
Frecuencia	MHz	695,00	f_0
NF Receptor	dB	7,00	NF
Ancho de banda de ruido (B)	MHz	5,78	B
Ruido (N)	dBm	-99,36	$N = 10\log(kTB) + NF + 30$
CNRmin	dB	14,70	Modo: 64-QAM 3/5 DVB-T2
Potencia Señal RX mínima (P_{Smin})	dBm	-84,66	$P_{Smin} = SNR_{min} + N$
Potencia transmitida máxima UE	dBm	23,00	P_{TX}
Ganancia de antena interferente	dBi	-3,00	G_{TX}
Distancia horizontal Tx-Rx	m	22,00	d_h (peor caso)

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

Altura Tx	m	1,50	h_{TX}
Altura Rx	m	10	h_{RX}
Distancia Total	m	23,58	$D = \sqrt{d_h^2 + (h_{RX} - h_{TX})^2}$
Pérdidas por Espacio Libre	dB	56,69	LF_s
Ganancia Rx discriminación de elevación (α)	dB	-0,45	G_{Dir}
Ganancia Rx Apuntado de antena	dBi	9,15	G_{RX}
Pérdidas por cuerpo humano	dB	4,00	L_{Body}
Ganancia total de acople (G_{path})	dB	-51,99	$G_{path} = -L_{FS} + G_{Dir} + G_{RX} - L_{Body}$
Interferencia recibida en receptor TDT (I_{RX})	dBm	-31,99	$I_{RX} = PIRE + G_{path}$
Insensibilización permitida en Rx (γ)	dB	1,00	γ
I/N necesaria (δ)	dB	-5,87	$\delta = -10\log(10^{7/10}-1)$
Margen de Protección necesario (MP_{req})	dB	-58,53	$MP_{req} = P_{Smin} - I_{RX} + \delta$
Margen de Protección medido	dB	-40,00	
Margen de Protección co-canal (PR_0)	dB	13,00	
ACLR del generador en medidas de MP	dB	65,00	
ACIR equivalente al PR_{req}	dB	71,53	$ACIR = MP_0 - MP_{req}$
ACS del receptor (ACS)	dB	53,28	$ACS(\Delta f) = -10\log\left(10^{-\frac{MP_0 - MP}{10}} - 10^{-\frac{ACLR}{10}}\right)$
Atenuación adicional filtro paso bajo	dB	19,00	

Tabla 60. Cálculo de atenuación fuera de banda del filtro para recepción fija en la banda de 700 MHz.

Otros casos de Balance de Enlace con Recepción Fija sobre Tejado

Es interesante evaluar el balance total del enlace para otros casos de interferencia, ya que el caso crítico no es un caso realista: el terminal no transmite a la máxima potencia todo el tiempo y en todo el espectro. También, se tendrán en cuenta los siguientes aspectos:

- Efecto del aumento de la banda de guarda, desestimando el uso del primer canal LTE.
- Evaluación de potencia máxima LTE y mínima TDT para evitar el uso de cualquier filtro paso bajo.

Si se aumenta la banda de guarda a 11 MHz (desestimando el uso del canal 51 de la TDT) o a 15 MHz (no usando el primer canal LTE), el margen de protección a utilizar es el mismo y se reduciría a -44,2 dB. Volviendo a calcular los parámetros para este margen se obtiene:

Parámetro	BG 5 MHz	BG 11 MHz	BG 15 MHz
MP co-canal	13 dB	13 dB	13 dB
MP adyacente	-40 dB	-44,2 dB	-44,2 dB
Atenuación Filtro	19 dB	14,5 dB	14,5 dB

Necesaria			
------------------	--	--	--

Tabla 61. Atenuación del filtro paso bajo a la entrada del receptor necesaria, en función de la banda de guarda existente entre tecnologías.

En este caso, dejar una mayor banda de guarda mejora los resultados, necesitando filtros alrededor **4 dB** menos selectivos que los requeridos anteriormente. Con cualquiera de las dos opciones la reducción de la atenuación necesaria es insuficiente, por lo que **no se recomienda el no utilizar el primer canal LTE o el último TDT.**

A continuación se muestra una tabla con todos los resultados obtenidos

La otra opción a evaluar consiste en considerar que el terminal transmite con potencias menores o el receptor TDT obtiene niveles mayores al de sensibilidad. Por tanto, existen dos posibilidades para **evitar el uso de un filtro paso bajo:**

- **Potencia LTE:** No se necesitaría filtro si se reduce la potencia de transmisión interferente a 4,7 dBm. Por tanto, para las potencias típicas de entornos rurales y urbanos, es decir, 2 y -9 dBm respectivamente [**CPG-010**], no sería necesario su uso.
- **Potencia TDT:** Si la señal útil recibida supera los -66,3 dBm no sería necesaria la utilización de un filtro (siempre que el terminal transmita a la máxima potencia). Esta es una posibilidad también factible, pues los márgenes de protección se miden para un nivel de -60 dBm.

6.3.4 Balance de enlace para escenario con recepción en interiores

El balance de enlace para recepción en interiores no es exactamente igual que el de recepción fija, pues el objetivo no es calcular exclusivamente la atenuación fuera de banda de un filtro necesaria, sino recomendar una serie de distancias mínimas entre terminal LTE y receptor TDT, en función de la potencia de emisión del terminal y de si se utiliza un filtro paso bajo a la entrada del receptor o no.

En primer lugar se presentan las características de una antena TDT diseñada para recepción en interiores:

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente: Documento
Figura de ruido	7	dB	[CEPT-30]
Ancho de banda de ruido equivalente	5.78	MHz	[CEPT-30]
Ganancia de antena	2.15	dBi	[CEPT-30]
Altura de la antena	1,5	m	
Patrón de la antena	Omnidireccional		

Tabla 62. Parámetros de antena de recepción en interiores [CPG-010**].**

Los parámetros asumidos para el terminal móvil en este estudio son los mismos que en el anterior escenario. En la siguiente tabla se listan los parámetros generales asumidos en este estudio para recepción en interiores.

Parámetro	Valor	Unidad	Fuente: Documento
Frecuencia	695	MHz	
Pérdidas por muro (receptor TDT y terminal en la misma habitación)	0	dB	
Pérdidas por muro – WP 6A	8	dB	[CEPT-30]
Pérdidas por muro – WP 5D urbano/suburbano	20	dB	[CEPT-30]

Tabla 63. Pérdidas asumidas para distintas ubicaciones del terminal móvil.

Por tanto, 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, éstas serán de 20 dB (caso urbano).

En primer lugar, se asume la misma potencia de ruido que se tiene para recepción fija y la misma insensibilización. Por tanto, la potencia interferente máxima permitida será $P_I = -99,36 - 5,87 \rightarrow P_I = -105,23 \text{ dBm}$. La potencia interferente en el terminal móvil es una combinación de la potencia de éste, el ACS del receptor (asumiendo 80 dB como valor típico de los receptores de TDT portátiles sin filtro [CEPT-30]) y la potencia OOB del terminal en el receptor. Se realizará un barrido de niveles OOB, para obtener aquel nivel de OOB a partir del cual, por mucho que se reduzca su potencia, no se observa un aumento en la distancia permitida. En la Figura 96 se presenta la relación Distancia vs. Nivel de OOB para una $P_{LTE} = 23 \text{ dBm}$, y un ACS = 80 dB. Se tiene en cuenta la existencia (o no) de pérdidas por penetración por encontrarse el terminal LTE y el receptor DVB-T2 en la misma sala (o en una contigua) respectivamente:

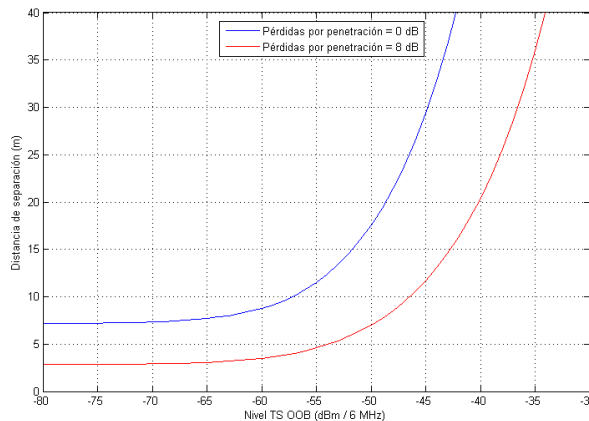


Figura 96. Relación Distancia de separación vs. Nivel OOB del terminal LTE para un ACS = 80 dB y $P_{LTE} = 23 \text{ dBm}$.

Como se observa en la figura, utilizar una **OOB < -65 dBm** 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. Este nivel máximo fuera de banda se utiliza en el siguiente cálculo para obtener la distancia mínima existente que debe haber entre el terminal LTE y el receptor TDT:

Parámetro	Unidades	Misma sala	Salas distintas	Comentarios
Frecuencia	MHz	695,00	695,00	f_0
Insensibilización permitida en Rx (γ)	dB	1,00	1,00	γ
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 de ruido (B)	MHz	5,78	5,78	B
Ruido (N)	dBm	-99,36	-99,36	$N = 10\log(kTB) + NF + 30$
Potencia interferente máxima	dBm	-105,23	-105,23	$P_I = N + \delta$
ACS del receptor (ACS)	dB	80,00	80,00	Valor asumido
Potencia transmitida máxima UE	dBm	23,00	23,00	P_{TX}
Límite OOB para UE (OOB_{max})	dBm	-65,00	-65,00	
Potencia interferente del UE	dBm	-56,36	-56,36	$P_{I(TS)}$
Ganancia de acoplo (G_{CG})	dB	-48,87	-48,87	$G_{CG} = P_I - P_{I(TS)}$
Pérdidas por penetración	dB	0,00	-8,00	G_{WL}
Pérdidas por cuerpo humano	dB	-4,00	-4,00	L_{Body}
Ganancia Rx Apuntado de antena	dB	2,15	2,15	G_{RX}
Ganancia total (G_{PG})	dB	-47,02	-34,72	$G_{PG} = G_{CG} - G_{WL} - L_{BODY} - G_{RX}$
Distancia mínima	metros	7,70	1,87	$d_{min} = 10^{\frac{147,56 - 20\log(f) - G_{PG}}{20}}$

Tabla 64. Cálculo de distancias mínimas necesarias entre terminal y receptor TDT para una $P_{LTE} = 23$ dBm.

La distancia mínima en el escenario estudiado (terminal y receptor TDT en la misma sala) es de **7,7 metros**. De todos modos, esta distancia de seguridad sólo será necesaria en el caso más crítico, donde el terminal transmite a la máxima potencia. En casos menos restrictivos, esta distancia se verá reducida en gran medida, como se verá a continuación.

Otros casos

Como se ha mencionado, es interesante evaluar el balance total del enlace para otros casos de interferencia, pues el caso crítico no es un caso realista donde el terminal transmita a máxima potencia todo el tiempo y en todo el espectro. Así se ha calculado la potencia de transmisión necesaria para permitir que la distancia de separación sea de 0m. También se han calculado las distancias para las potencias típicas de entornos rurales y urbanos descritas anteriormente. Las distancias mínimas obtenidas están resumidas en la siguiente tabla:

Potencia LTE	Misma sala	Sala adyacente
23 dBm	7,7 m	1,87 m
2 dBm	0,8 m	0,2 m
-9 dBm	0,25 m	0,13 m
-13 dBm	0 m	0 m

Tabla 65. Distancias mínimas entre el terminal LTE y el receptor TDT en función de la potencia LTE transmitida, para una misma sala o salas distintas. Canal 51 de TDT, SIN utilización de filtro paso bajo.

Para entorno rural, la distancia en la misma sala se ve reducida a 80 cm, mientras que en un entorno urbano/suburbano a 25 cm, lo cual ya es completamente posible. Además, **cuando exista una potencia menor a -13 dBm no se requiere distancia mínima entre terminal LTE y receptor TDT.**

El hecho de utilizar un filtro, cuya atenuación en su banda de rechazo sea de 8 dB (la atenuación de filtros domésticos evaluados en laboratorio va desde 2,3 dB hasta 23,1 dB) repercute en un valor de selectividad del canal adyacente $ACS = 80 + 8 = 88 \text{ dB}$ para el receptor portable. Para ese valor, se consigue reducir la distancia de separación en un factor 2 aproximadamente tal y como se puede observar en la Tabla 66:

Potencia LTE	Misma sala	Sala adyacente
23 dBm	4 m	1 m
2 dBm	0,6 m	0,14 m
-9 dBm	0,18 m	0 m
-11 dBm	0 m	0 m

Tabla 66. Distancias mínimas entre el terminal LTE y el receptor TDT en función de la potencia LTE transmitida, para una misma sala o salas distintas. Canal 51 de TDT, CON utilización de filtro paso bajo doméstico de 8 dB de rechazo.

Hay que resaltar que para una potencia menor a -11 dBm no se requiere distancia mínima entre terminal LTE y receptor TDT (se permite 2 dB más de potencia con el filtro). Si se aumenta **la banda de guarda a 11 o a 15 MHz** el margen de protección mejora hasta -40,9 o -42,1 dB. Esta reducción del margen de protección se ve reflejada directamente sobre el nivel de ACS permitido en el receptor para ese canal, teniendo ahora 83,2 dB. Volviendo a calcular los parámetros para este margen se obtiene:

Potencia LTE	Misma sala BG 11 MHz	Sala adyacente BG 11 MHz	Misma sala BG 15 MHz	Sala adyacente BG 15 MHz
23 dBm	5,6 m	1,3 m	5,7 m	1,4 m
2 dBm	0,66 m	0,16 m	0,67 m	0,16 m
-9 dBm	0,2 m	0,05 m	0,2 m	0,05 m

Tabla 67. Distancias mínimas entre el terminal LTE y el receptor TDT en función de la potencia LTE transmitida, para distintas bandas de guarda.

En este caso, dejar una mayor banda de guarda mejora los resultados, aunque en el caso más crítico las distancias siguen siendo excesivas y en el resto de casos las distancias mejoran entre 5 y 20 cm únicamente. Con cualquiera de las dos opciones la reducción de la atenuación necesaria es insuficiente, por lo que **no se recomienda el no utilizar el primer canal LTE o el último TDT.** Así, el parámetro que más influye en las distancias es la relación entre potencias TDT y LTE.

6.4 Resultados de Convivencia red TDT vs. LTE en la banda de 450 MHz

Para esta banda solo se tiene ancho de banda asignado a LTE de 5 MHz con lo que esa será la única posibilidad contemplada. Se recuerda que en este caso el enlace LTE adyacente es el Downlink, situado 2,5 MHz por debajo de la señal TDT. Pero además, al existir solo una banda de guarda de 12,5 MHz entre el enlace Uplink y el primer canal de la TDT también se han realizado medidas para este caso. Los márgenes de protección propuestos para sistemas DVB-T2 se han obtenido para el modo presentado en la Tabla 68. Los valores para cualquier otro modo se pueden calcular a partir de los obtenidos:

Modulación	CR	FFT	Modo	GI	Patrón Portadoras	BW (MHz)
64-QAM	3/4	16k	Extendido	1/8	PP2	6

Tabla 68. Parámetros de la señal útil DVB-T2 utilizada en las medidas de márgenes de protección.

Hay que decir que para este escenario no se han encontrado ni diseñado filtros. Tampoco se ha podido realizar el desplazamiento en frecuencia realizado en el apartado 6.3.2.2, puesto que la problemática para este caso haría necesario la utilización de filtros paso alto y no de filtros paso bajo de los que se disponían para las bandas de 700 MHz y 800 MHz. Se proyecta como trabajo futuro el conseguir este tipo de filtro para poder evaluar sus prestaciones.

6.4.1 Resultados de Márgenes de Protección mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción fija sobre tejado DVB-T2.

Al igual que en la banda de 800 MHz, para simular este escenario, se ha asumido un modelo de canal Rice para ambas señales, pues existe visión directa entre estación base y receptor, tanto TDT como terminal LTE. Utilizar este modelo hace que los márgenes de protección empeoren en media **1,6 dB** respecto a los que los que se obtendrían en caso de utilizar únicamente un modelo de canal gaussiano para ambas señales.

6.4.1.1 Márgenes de Protección para la única Distribución LTE Posible

Para este escenario, como se ha mencionado, se ha medido la interferencia de las dos bandas reservadas para LTE sobre los dos primeros canales de TDT. Para el peor caso, se tienen los siguientes márgenes de protección:

Canal TDT	Frecuencia Central TDT (MHz)	Banda LTE (MHz)	
		Inferior (455) (Uplink)	Superior (465) (Downlink)
14	473	-46,3	-49,5
15	479	-48,8	-52,4

Tabla 69. Márgenes de protección DVB-T2 vs. LTE DL a 450 MHz. Caso peor medido para cada canal. Modelo de canal Rice.

La conclusión principal que se puede extraer de esta tabla es que, a pesar de que el enlace Uplink está situado 10 MHz más abajo que el Downlink, su interferencia es mayor, pues por el hecho de utilizar la modulación SC-FDMA en lugar de OFDM supone una mayor variación temporal de la señal, que genera armónicos de gran amplitud que acaban interfiriendo sobre

canales lejanos en frecuencia. De todos modos, el margen de protección más restrictivo para Downlink es **-49,5 dB**.

6.4.2 Resultados de Márgenes de Protección Mediante Medidas de Laboratorio para escenario con recepción en interiores DVB-T2.

Como ocurría en la banda de 800 MHz, para simular este escenario, se ha asumido un modelo de canal Rayleigh para ambas señales, pues no existe visión directa entre estación base y receptor, tanto TDT como terminal LTE. Utilizar este modelo hace que los márgenes de protección empeoren en media **3,2 dB** respecto a los que los que se obtendrían en caso de utilizar únicamente un modelo de canal gaussiano para ambas señales.

6.4.2.1 Márgenes de Protección para la única Distribución LTE Posible

Para este escenario, como se ha mencionado, se ha medido la interferencia de las dos bandas reservadas para LTE sobre los dos primeros canales de TDT. Los resultados para el peor caso son:

Canal TDT	Frecuencia Central TDT (MHz)	Banda LTE (MHz)	
		Inferior (455)	Superior (465)
14	473	-44,7	-47,9
15	479	-45,2	-50,8

Tabla 70. Márgenes de protección DVB-T2 vs. LTE DL a 450 MHz. Caso peor medido para cada canal. Modelo de canal Rayleigh.

Como venía sucediendo, a pesar de que el enlace Uplink está situado 10 MHz más abajo que el Downlink, su interferencia es mayor. El margen de protección más restrictivo para Downlink es **-47,9 dB**.

6.4.3 Balance de enlace para escenario con recepción fija

En este caso el balance de enlace es similar al realizado en la banda de 800 MHz, ya que coincide el Downlink como el enlace LTE adyacente a la TDT. Obviamente cambiarán ciertos parámetros, como el margen de protección obtenido al utilizar anchos de banda de las señales LTE y TDT diferentes. El margen de protección medido en esta banda era **-49,5 dB**. Además, al tratarse de una frecuencia inferior, las pérdidas de propagación del enlace serán menores y, por tanto, los radios de las celdas LTE serían mayores. Concretamente, siguiendo el mismo procedimiento se obtiene un radio de cobertura $d_{\text{LTE-DLurbano}} = 3,66 \text{ km}$ en un entorno urbano, y $d_{\text{LTE-DLrural}} = 5,02 \text{ km}$ en un entorno rural. Finalmente, para estas características, las distancias de protección y el porcentaje de área interferida se muestran a continuación:

Intensidad de campo (dB μ V/m)	Escenario rural (5,02 km)		Escenario urbano (3,66 km)
	49	Radio de protección	850 m
Porcentaje de área interferida		2,91 %	2,69 %
59	Radio de protección	510 m	270 m
	Porcentaje de área interferida	1,02 %	0,54 %
69	Radio de protección	300 m	120 m
	Porcentaje de área interferida	0,36 %	0,11 %

Tabla 71. Radios de protección y porcentajes de área interferida de las celdas LTE para los distintos entornos estudiados.

Según este análisis, para este escenario, se aconseja una **separación mínima** entre receptores TDT y estaciones LTE de **850 metros en entornos rurales y 600 metros en entornos urbanos**. Esas distancias son menores a las obtenidas en la banda de 800 MHz. La razón radica en que el margen de protección obtenido en esta banda era mejor que el obtenido a 800 MHz debido a la mayor banda de guarda que existe entre ambas tecnologías.

Por último se muestra unas imágenes con un extracto de los estudios de planificación realizados con la herramienta ICS con motivo del proyecto encomendado por la ANE al iTeAM donde se corrobora las distancias halladas anteriormente. En la primera figura se muestra la huella de cobertura de la estación DVB-T2 y la localización aproximada de dos redes LTE implementadas. Tenían un ancho de banda de 5 MHz, y las celdas estaban divididas en tres sectores orientados a unos azimuts de 0°, 120° y 240° respectivamente.

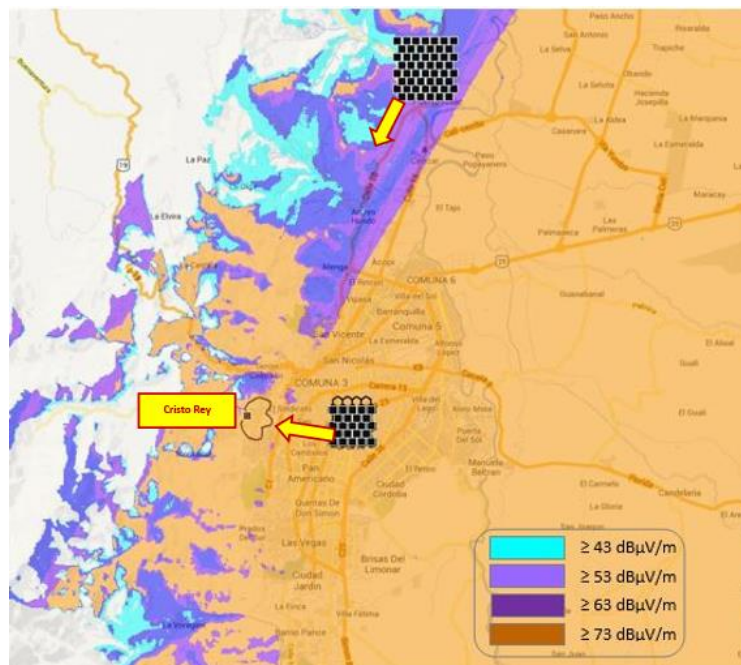


Figura 97. Huella de cobertura de la estación DVB-T2 de Cristo Rey.

La segunda red LTE se situó cerca de Yumbo, debido a que es una zona donde la señal útil DVB-T2 recibida desde la estación de Cristo Rey se encuentra cerca del borde de la huella de cobertura tal y como se puede ver en la Figura 98.

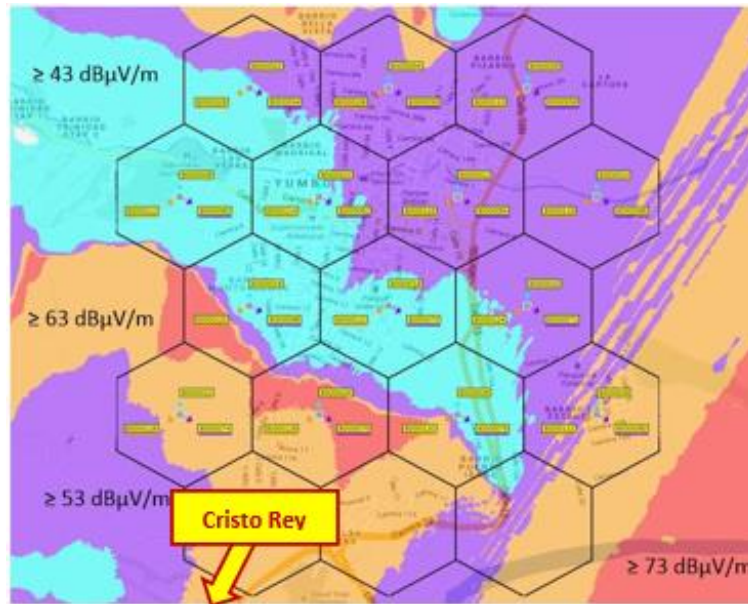


Figura 98. Huella de cobertura de la estación DVB-T2 de Cristo Rey sobre la red LTE situada en Yumbo.

Durante el estudio del balance de enlace se estimó que la distancia mínima de protección entre una estación base y un receptor de TDT ubicado en zonas de intensidad de campo mínimas era de aproximadamente 600 metros. Se comprobó situando tres estaciones base LTE separadas más de 1,5 km entre sí, y ubicadas en intensidades de campo de TDT cercanas al umbral.

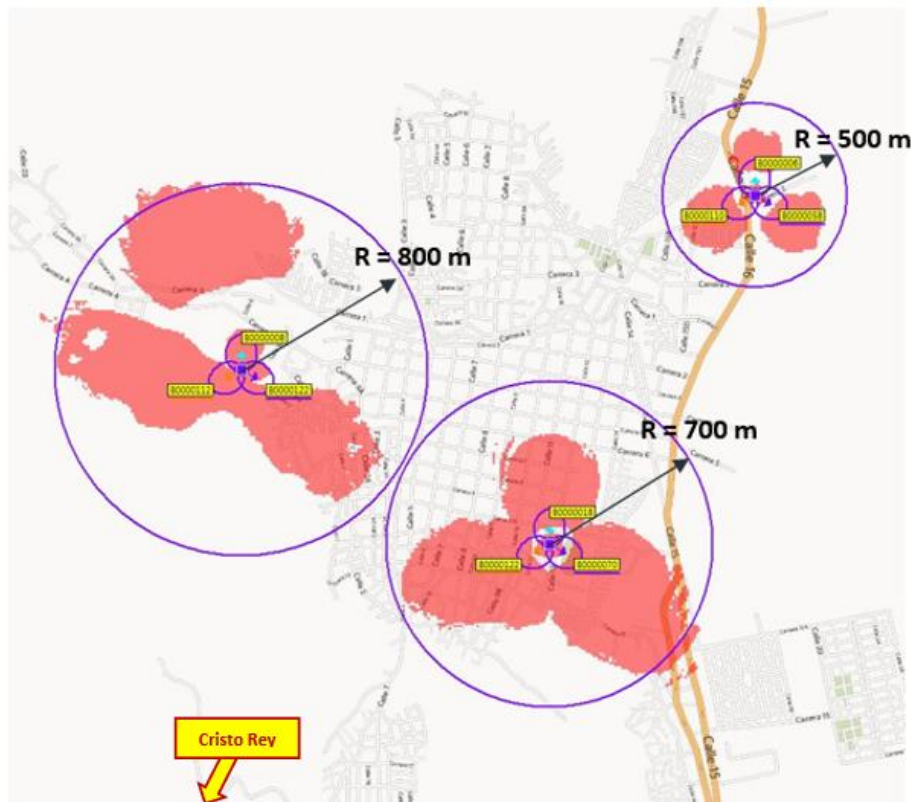


Figura 99. Radios de protección entre estaciones base LTE y receptores DVB-T2.

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de 450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

En la Figura 99 se comprueba la distancia de protección hallada con el balance de enlace. En este caso las distancias mínimas requeridas se encontraban entre 500 y 900 metros, en función del nivel de señal útil recibida. Estos valores eran levemente superiores a los estimados en el balance de enlace.

También se comprobó que en la primera red LTE situada en el centro de la huella de cobertura de Cristo Rey no aparecía interferencia alguna, tal y como se puede observar en la Figura 100:

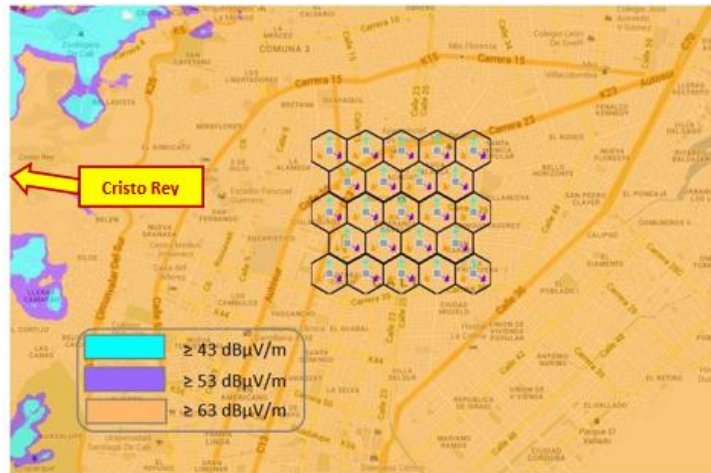


Figura 100. 0% interferencias de red hexagonal LTE de radio 500 metros, transmitiendo a la máxima potencia situada en el centro de la ciudad de Cali.

7 Conclusiones y Trabajo Futuro

7.1 Conclusiones

El estudio de interferencias entre la televisión digital terrestre TDT y redes celulares 4G LTE se antoja como un elemento primordial debido a la futura convivencia entre ambas en el Dividendo Digital. De este Proyecto Final de Carrera son numerosas las conclusiones que se pueden extraer:

En cuanto a medidas de márgenes de protección sin especificar un escenario determinado:

- Dentro de los posibles parámetros a configurar de la señal LTE:
 - Cuando el enlace LTE adyacente a la TDT es el Downlink, la interferencia será mayor conforme aumente la carga de tráfico que transporta la señal LTE.
 - Cuando el enlace LTE adyacente a la TDT es el Uplink, la interferencia será mayor si se utiliza una carga de tráfico pequeña, debido a su mayor variabilidad temporal.
 - El hecho de aumentar el ancho de banda de la señal LTE afecta de distinta forma dependiendo del enlace interferente.
 - En el caso de que el enlace interferente sea el Downlink siempre será recomendable utilizar un ancho de banda mayor, independientemente de la banda de guarda existente entre ambas tecnologías.
 - Por el contrario, si es el Uplink el enlace interferente, afecta más un ancho de banda menor si la banda de guarda es menor de 3 MHz, y si la banda de guarda está por encima de esos 3 MHz afectará más aquella señal LTE que tenga un ancho de banda mayor.
 - El Uplink es el enlace más perjudicial en cuanto a que los márgenes de protección exigidos son peores que cuando interfiere el Downlink.
- Dentro de los posibles parámetros a configurar de la señal TDT:
 - El estándar DVB-T2 se ve interferido en un valor similar al estándar DVB-T, pero además ofrece un mejor rendimiento en cuanto a capacidad. La razón de este aumento en capacidad es debido a que emplea técnicas novedosas como las constelaciones rotadas, la utilización del espectro ensanchado, control del PAPR, etc.
 - En cuanto a la comparación entre los dos anchos de banda utilizados en el mundo, el utilizar un ancho de banda de 6 MHz ofrece una mejor capacidad frente a interferencias que una señal TDT con un ancho de banda de 8 MHz. Esto es debido a que, al tener un menor ancho de banda, su potencia de ruido es menor y, a igualdad de nivel de señal útil se obtiene una mejor CNR.
 - La recepción en interiores siempre es más vulnerable a interferencias que si la red está diseñada para recepción fija sobre tejado.

- Cuando el enlace interferente es el Downlink, los márgenes de protección obtenidos para recepción en interiores son 1,6 dB peores en media que los asociados a recepción fija sobre tejado.
- Cuando el enlace interferente es el Uplink, los márgenes de protección para recepción en interiores son 0,4 dB peores que los obtenidos para recepción fija sobre tejado.

En cuanto a la convivencia en la banda de 800 MHz, donde la señal TDT tiene un ancho de banda de 8 MHz e inicialmente la banda de guarda entre tecnologías es de 1 MHz:

- Se consideraron dos posibles anchos de banda para la señal LTE Downlink, 5 MHz y 10 MHz. Se comprobó que los márgenes de protección a 10 MHz eran mejores, por lo que si se tuviera que recomendar algo en este aspecto se aconsejaría que el primer canal LTE tuviera el mayor ancho de banda posible.
- Se evaluaron dos posibles soluciones.
 - Aumentar la banda de guarda entre tecnologías desestimando el uso del último canal de TDT (Banda de Guarda aumenta a 9 MHz) o del primer canal LTE (Banda de Guarda aumenta a 11 MHz). Los márgenes de protección conseguidos mejoraban 2 dB.
 - Utilizar filtros paso bajo a la entrada de los receptores. Existen dos modalidades de filtros, domésticos o profesionales. En el primer caso se conseguían de nuevo 2 dB de mejora, mientras que para el segundo caso la mejora obtenida era de 3 dB.
 - Por tanto, la mejor opción de las tres planteadas es utilizar filtros profesionales, aunque en caso de que la red esté diseñada para interiores, éstos no puedan ser utilizados.
- Se realizó un balance de enlace para hallar la distancia a la que debe encontrarse un receptor de una estación base en el escenario crítico. Esto es, cuando una estación base, que se encuentra en el borde de huella de cobertura de TDT, transmite a su máxima potencia. Se cuantificó en 800 metros la distancia mínima exigida. Si se introducía un filtro paso bajo profesional, tal y como se aconsejaba anteriormente, esta distancia se reducía hasta algo menos de 600 metros.

Para la convivencia en la banda de 700 MHz, donde la señal TDT tiene un ancho de banda de 6 MHz e inicialmente la banda de guarda entre tecnologías es de 5 MHz:

- Se consideraron tres posibles anchos de banda para la señal LTE Uplink, 10 MHz, 15 MHz y 20 MHz. Se comprobó que, al estar por encima de 4 MHz la banda de guarda, los márgenes de protección a 10 MHz eran mejores, por lo que si se tuviera que recomendar algo en este aspecto se aconsejaría que el primer canal LTE tuviera el menor ancho de banda posible.
- También se evaluaron dos posibles soluciones:
 - Aumentar la banda de guarda entre tecnologías desestimando el uso del último canal de TDT (Banda de Guarda aumenta a 11 MHz) o del primer canal LTE (Banda de Guarda aumenta a 15 MHz). El margen de protección mejoraba 4 dB

- al alcanzar los 11 MHz de banda de guarda y no mejoraba más por aumentarla hasta 15 MHz.
- Utilizar filtros paso bajo a la entrada de los receptores. Existen dos modalidades de filtros, domésticos o profesionales. En el primer caso se consideraron los filtros obtenidos para la banda de 800 MHz y conseguían 12 dB de mejora, mientras que para el segundo caso la mejora obtenida era de 16 dB.
 - Por tanto, la mejor opción de las tres planteadas es utilizar filtros profesionales.
 - Se realizaron balances de enlace para recepción en interiores y recepción fija:
 - Para recepción en interiores se halló la distancia que debe haber un terminal móvil y un receptor de TDT para el escenario crítico. Sin utilizar ninguna medida mitigadora se vio que el terminal no debía acercarse a más de 8 metros si estaban en la misma sala o a 2 metros si estaban en salas adyacentes. Si se aumentaba la banda de guarda las distancias se reducían apenas un metro, mientras que utilizando filtros domésticos se reducían a la mitad.
 - Para recepción fija sobre tejado se cuantificó la atenuación fuera de banda que debía cumplir cualquier filtro que se considerara introducir. Para el escenario crítico se exigía una atenuación de al menos 19 dB. Todos los filtros profesionales de la banda de 700 MHz disponibles en el laboratorio cumplían con ese requisito, mientras que de los domésticos de la banda de 800 MHz solo lo cumplía 1 de 4.

En cuanto a la convivencia en la banda de 450 MHz, donde la señal TDT tiene un ancho de banda de 6 MHz e inicialmente la banda de guarda entre tecnologías es de 2,5 MHz:

- La señal LTE Downlink solo podía tener un ancho de banda 5 MHz. Comparando los resultados con los obtenidos en la banda de 800 MHz para el mismo ancho de banda, el margen de protección obtenido era 6 dB mejor. La razón es porque, como se dijo, la señal de 6 MHz es más robusta que la de 8 MHz, además de que la banda de guarda ha aumentado de 1 a 2,5 MHz.
- Se realizó, al igual que en la banda de 800 MHz, un balance de enlace para hallar la distancia a la que debe encontrarse un receptor de una estación base en el escenario crítico. Se exigían menores distancias, cuantificando en 600 metros la distancia mínima para un escenario urbano.

Por tanto, evaluando las condiciones en las tres bandas, cada una tiene sus características propias, pero se puede considerar que la banda de 800 MHz es la que inicialmente tiene mayor necesidad de medidas mitigadoras. La razón principal es debido a que la potencia a la que transmite una estación base es unos 40 dB mayor a la que transmiten los terminales móviles. No obstante, en los estudios preliminares que está realizando el CEPT de cara a una canalización para un posible segundo dividendo digital se está aconsejando que la banda de guarda entre tecnologías sea mayor a 5 MHz, aconsejando que la banda de guarda sea de al menos 9 MHz.

7.2 Trabajo futuro

El hecho de finalizar este Proyecto Final de Carrera no significa que no se siga trabajando sobre todo lo que se ha estado estudiando a lo largo del mismo. Con el fin de perfeccionar todos los estudios anteriormente relacionados, se van a desarrollar una serie de tareas:

- Al igual que se hizo para la banda de 800 MHz se contactará con diversos fabricantes para solicitar el suministro de filtros domésticos para la banda de 700 MHz y abordar de manera más exacta la convivencia entre ambas tecnologías cuando la red TDT está diseñada para interiores.
- Se solicitará también tanto filtros domésticos como profesionales para las características específicas de la banda de 450 MHz, donde el enlace LTE se encontraba a una frecuencia menor que la TDT.
- Se realizarán estudios de planificación para la banda de 800 MHz localizándolo en la ciudad de Valencia, utilizando la herramienta ICS Telecom, ya empleada durante el transcurso del contrato “Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con otros Servicios de Telecomunicaciones en Bandas de Frecuencias Adyacentes para Colombia” encomendado por la ANE iTeAM.
- Se realizarán medidas de márgenes de protección para otros estándares de TDT, como ATSC o ISDB-Tb, para comparar los resultados con los obtenidos durante este proyecto.
- Se desarrollarán dos artículos para que sean publicados en revistas científicas dedicados a esta materia.

8 Referencias

[3GPP36-101]	ETSI TS 136 101 V12.1.0. “ <i>LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception</i> ”. Septiembre 2013
[3GPP36-942]	ETSI TR 136 942 V11.0.0. “ <i>LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios</i> ”. Octubre 2012
[6A235-E]	Documento 6A/235-E. Radiocommunication Study Group. “ <i>Proposed modifications to Report ITU-R BT.2247-1, Study on interference between ISDB-T and IMT in the 700 MHz band</i> ”. Abril 2013.
[ANFR]	ANFR. “ <i>Performance of DTT receivers in the presence of interference from LTE signals in the 800 MHz band</i> ”. 2011.
[ANFR-RUR]	ANFR Rural. “ <i>Rapport de l’ANFR sur les expérimentations concernant la compatibilité TNT/LTE autour de 790 MHz</i> ”. Marzo 2011.
[ANFR-URB]	Anexo ANFR Urbano. “ <i>Annexes techniques au compte rendu de l’expérimentation LTE Laval II</i> ”. Octubre 2011.
[ANFR-URB2]	Paper ANFR Urbano “ <i>Compte rendu de l’expérimentation LTE Laval II</i> ”. Octubre 2011.
[AT800-FIL]	https://at800.tv/guide/4g-filters-buying-guide/
[AW-OFCOM]	Ofcom. “ <i>Award of the 800 MHz and 2.6 GHz spectrum bands – Publication of final results of auction under regulation 111 of the Wireless Telegraphy (License Award) Regulations 2012</i> ”. Marzo 2013.
[AWG-10]	10° meeting APT Wireless Group (AWG-10). “ <i>Required LTE UE out of band emission limits to ensure coexistence of mobile services and adjacent broadcasting services below 698 MHz</i> ”. Marzo 2011.
[AWG-11]	11° meeting APT Wireless Group (AWG-11). “ <i>Required LTE UE out-of-band emission limits to ensure coexistence of mobile services and adjacent broadcasting services below 698 MHz</i> ”. Septiembre 2011.
[CEPT-21]	CEPT REPORT 21. “ <i>Technical considerations regarding harmonization options for the Digital Dividend</i> ” & “ <i>Compatibility issues between “cellular /</i>

	<i>low power transmitter” networks and “larger coverage / high power / tower” type of networks”</i> . Marzo 2007.
[CEPT-23]	CEPT Report 23. <i>“Technical considerations regarding harmonization options for the Digital Dividend”</i> . Julio 2008.
[CEPT-30]	CEPT REPORT 30. <i>“The identification of common and minimal (least restrictive) technical conditions for 790 - 862 MHz for the digital dividend in the European Union”</i> . Octubre 2009.
[CEPT-31]	CEPT REPORT 31. <i>“Technical considerations regarding harmonization options for the digital dividend in the European Union” y “Frequency (channeling) arrangements for the 790-862 MHz band” (Task 2 of the 2nd Mandate to CEPT on the digital dividend)”</i> . Octubre 2009.
[COMREG]	ComReg LTE Filter Testing. <i>“Analysis of the Effectiveness of Currently Available LTE Filters at Reducing and Eliminating RF Overload in Masthead Amplifiers in the Presence of LTE Signals”</i> . Septiembre 2012.
[CORAGE-PT2]	Proyecto CORAGE: COgnitive RADio GEneration. <i>“Paquete de trabajo 2: Análisis de nuevas tecnologías inalámbricas”</i> .
[CPG-010]	CPG-15 PTD #2. <i>“WRC-15 agenda item 1.2: lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility”</i> . Enero 2013.
[CPG-057]	CPG-15 PTD #3. <i>“WRC-15 agenda item 1.2: lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility”</i> . Abril 2013.
[DDAUS]	ACMA. <i>“Digital Dividend auction – result”</i> . Mayo 2013
[DIGEUR-WP]	DIGITALEUROPE White Paper. <i>“Standardized DVB-T2 RF specifications”</i> . Abril 2012.
[DTG-TEST]	Digital TV Group. <i>“DTG Testing awarded at 800 4G filter testing contract”</i> . Marzo 2013.
[EBU3348]	EBU TECH – 3348. <i>“Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2”</i> . Génova, Mayo 2012.
[EBU-WORK]	EBU Operating Eurovision, EC Workshop. <i>“Coexistence challenges of LTE deployment: the readiness of equipment standards and related issues”</i> . Octubre 2012.

[ERA-OFCOM]	ERA Technology Ltd. – Ofcom. “ <i>Assessment of LTE 800 MHz Base Station Interferences into DTT Receivers</i> ”. Julio 2011.
[ETSI300744]	TSI EN 300 744 v1.6.1. Digital Video Broadcasting (DVB); “ <i>Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television</i> ”. Enero 2009
[ETSI302755]	ETSI EN 302 755 v1.3.1. Digital Video Broadcasting (DVB); “ <i>Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)</i> ”. Abril 2012.
[GSMA-DD]	GSMA. “ <i>Digital Dividend Auctions Summary. Awards of the Digital Dividend Spectrum</i> ”. 2012.
[HBE-DVBT]	Harris Broadcast Europe. “ <i>DVB-T: New operative modes for digital terrestrial TV</i> ”. Año 2002.
[IJ957848]	International Journal of Digital Multimedia Broadcasting. Article ID 937848. “ <i>Research Article Implementing a DVB-T/H Receiver on a Software-Defined Radio Platform</i> ”. 2009.
[ITU-1036]	ITU-R M.1036-4. “ <i>Frequency arrangements for implementation of the terrestrial component of International Mobile Telecommunications (IMT) in the bands identified for IMT in the Radio Regulations (RR)</i> ”. Marzo 2012
[ITU-BT1368]	Recomendación ITU-R BT.1368-9. “ <i>Criterios para la planificación, incluidas las relaciones de protección, de los servicios de televisión digital terrenal en las bandas de ondas métricas/decimétricas</i> ”. Diciembre 2012.
[ITU-BT2033]	Recomendación ITU-R BT.2033. “ <i>Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands</i> . Enero 2013.
[ITU-BT2215]	Recomendación ITU-R BT.2215. “ <i>Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers</i> ”. Junio 2012.
[ITU-BT419-3]	Recomendación ITU-R BT.419-3. “ <i>Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting</i> ”. 1992.
[NORDIG]	NorDig v.2.4 “ <i>NorDig Unified Requirements for IRDs</i> ”. Enero 2013.

Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con Servicios 4G LTE en las bandas de
450 MHz, 700 MHz y 800 MHz

[PR-AT800]	LET'S BE CLEAR at800, Press Release. " <i>at800 updates estimate of likely impact of 4G at 800 MHz on Freeview</i> ". Junio 2013.
[PTS-ER-2012]	PTS. " <i>The impact of rollout in the 800 MHz band on terrestrial television – one year assignment</i> ". Abril 2012.
[RXT01020]	TeamCast solutions. " <i>Specifications of RXTO-1020 2-Way DVB-T Diversity Demodulator</i> ". Marzo 2012.
[SeCaHand10]	SEAMCAT Handbook. January 2010.
[TS-36211]	3GPP TS 36.211 v10.6.0, " <i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation (Release 10)</i> ". Diciembre 2012.

Anexo A: Definiciones

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 (ver Figura 101).

A.3. Umbral de Saturación (U_{SAT})

El umbral de saturación u *overloading threshold* es el nivel de señal interferente por encima del cual el receptor comienza a perder su capacidad para discriminar dicha señal a frecuencias diferentes a las de la señal útil (es decir, el inicio de un comportamiento no lineal de la interferencia). Por tanto, por encima del umbral de saturación el receptor se comportará de una forma no lineal, lo cual no significa necesariamente un fallo inmediato, dependiendo de las características del receptor y la interferencia. Tanto el concepto de MP como de U_{SAT} puede verse en la Figura 101.

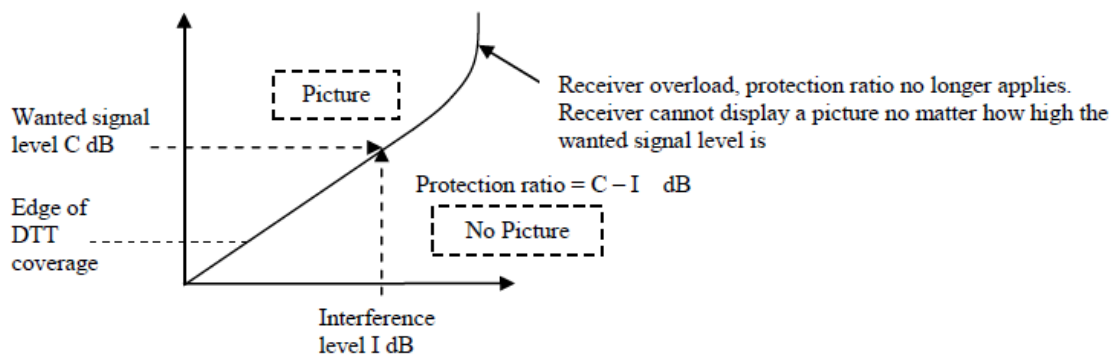


Figura 101. Descripción de margen de protección y umbral de saturación de un receptor de TDT ideal.

A.4. 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 [[SeCaHand10](#)].

A.5. 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 [SeCaHand10]. La diferencia entre ACS y ACLR puede verse en la siguiente figura:

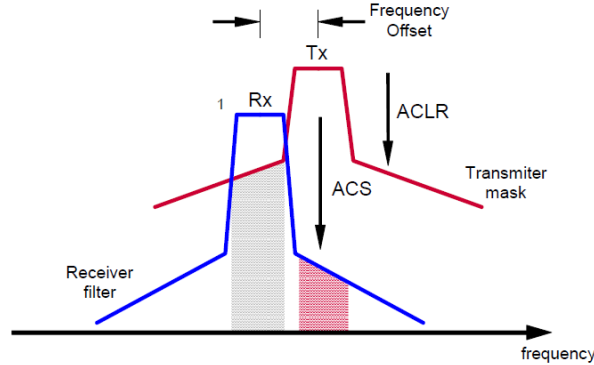


Figura 102. Interferencia como resultado de un ACLR y un ACS limitados [SeCaHand10].

A.6. 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 [CORAGE-PT2]. 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.7. Block Edge Mask (BEM)

Una máscara de bloque de borde (BEM) especifica los niveles de potencia permitidos en el bloque de espectro de interés y sus bloques adyacentes. Está diseñada para ofrecer suficiente protección a la interferencia de cualquier sistema en la frecuencia inmediatamente adyacente. La máscara de emisión espectral (SEM), por otra parte, describe el perfil de emisión real de un dispositivo. La SEM tiene que cumplir con la BEM con el fin de mantenerse dentro de la normativa. Por lo tanto la BEM se relaciona más bien a las condiciones regulatorias de un bloque de espectro, mientras que la SEM se refiere a las emisiones reales de los equipos de radio.

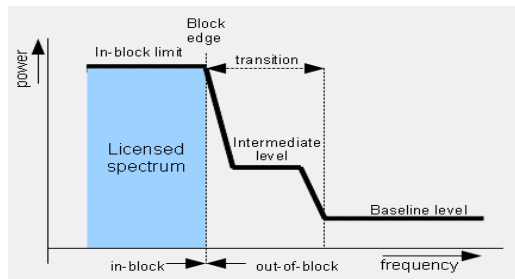


Figura 103. Ejemplo de BEM.

A.8. 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

En este Anexo se adjuntan los datos extraído de los Filtros Paso-Bajo que fueron empleados en el laboratorio.

B.1 Filtros paso bajo a 800 MHz

Se han analizado los siguientes filtros para la problemática existente en la Región 1 de la ITU:

- 4 filtros paso bajo domésticos en la banda de 800 MHz
- 5 filtros paso bajo profesionales en la banda de 800 MHz.

B.1.1 Filtros paso bajo domésticos a 800 MHz

Respecto a los filtros analizados para el canal 60 en la banda de 800 MHz, se han analizado los siguientes parámetros, suponiendo un ancho de banda de la señal LTE DL de 10 MHz:

- Pérdidas de inserción en la banda TDT.
- Atenuación del canal 59.
- Atenuación del canal 60.
- Atenuación fuera de banda para canal 1 LTE (respecto a canal 60).
- Atenuación fuera de banda para canal 2 LTE (respecto a canal 60).

La respuesta en frecuencia de dichos filtros es la siguiente:

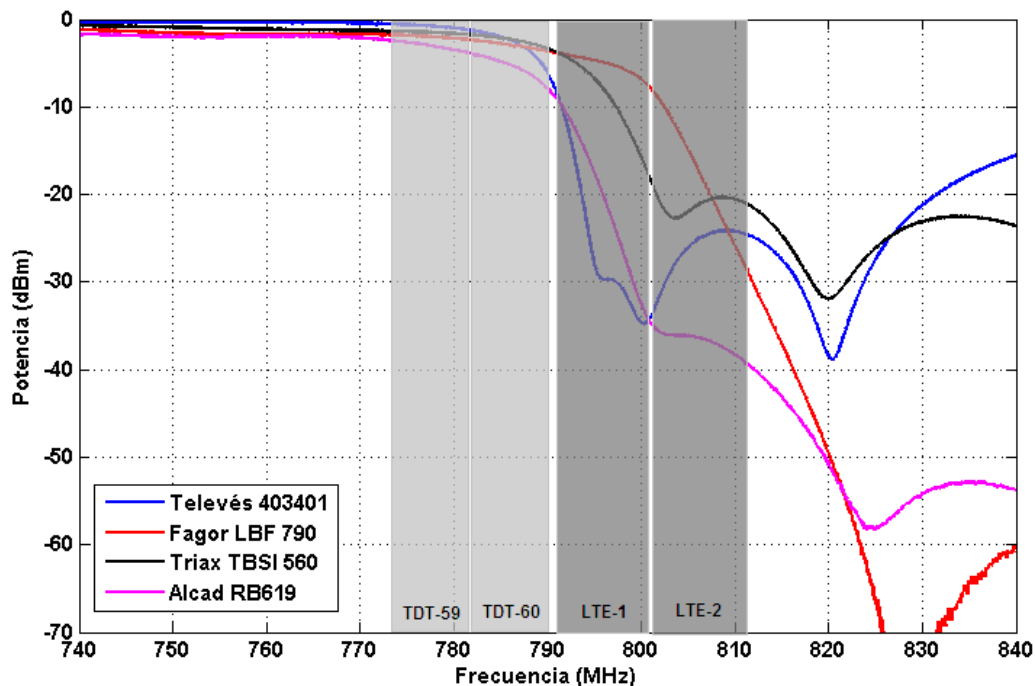


Figura 104. Respuesta en frecuencia de los filtros domésticos a 800 MHz de Canal 60 analizados.

A partir de la misma, y midiendo la potencia total en toda la banda TDT, se pueden obtener los siguientes parámetros:

Filtro analizado	Att. TDT (470-790 MHz)	Att. Canal 59	Att. Canal 60	Att. fuera de banda (LTE-1)	Att. fuera de banda (LTE-2)
Televés 403401	1,4	0,9	2,8	23,1	23,6
Fagor LBF 790	1	2,1	2,9	2,3	14,4
Triax TBS 260	0,7	1,6	2,4	6,8	18,7
Alcad RB619	1,2	3,2	5,5	15,6	31,3

Tabla 72. Atenuaciones (dB) de los filtros domésticos a 800 MHz de Canal 60 analizados.

Los filtros domésticos proporcionan, para una banda de guarda de 1 MHz, un ancho de banda DVB-T2 de 8 MHz y un ancho de banda LTE de 10 MHz, bandas de rechazo de entre **2,3 y 23,1 dB**.

B.1.2 Filtros paso bajo profesionales a 800 MHz

De nuevo, para los filtros analizados para el canal 60 en la banda de 800 MHz, en este caso profesionales, y suponiendo un ancho de banda de la señal LTE DL de 10 MHz, se han analizado los siguientes parámetros:

- Pérdidas de inserción en la banda TDT.
- Atenuación del canal 59.
- Atenuación del canal 60.
- Atenuación fuera de banda para canal 1 LTE (respecto a canal 60).
- Atenuación fuera de banda para canal 2 LTE (respecto a canal 60).

La respuesta en frecuencia de dichos filtros es la siguiente:

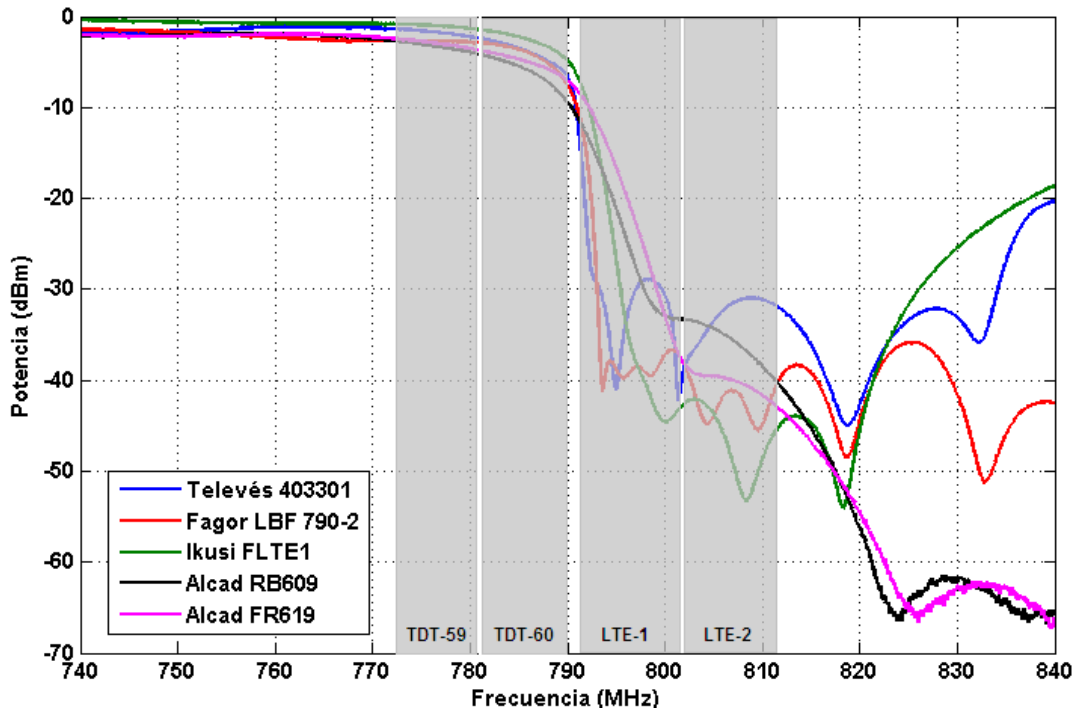


Figura 105. Respuesta en frecuencia de los filtros profesionales a 800 MHz de Canal 60 analizados.

A partir de la misma, y midiendo la potencia total en toda la banda TDT, se pueden obtener los siguientes parámetros:

Filtro analizado	Att. TDT (470-790 MHz)	Att. Canal 59	Att. Canal 60	Att. fuera de banda (LTE-1)	Att. fuera de banda (LTE-2)
Televés 403301	1,3	2	4,1	28,5	31,7
Fagor LBF 790-2	1,5	2,8	4,4	31,5	39,5
Ikusi FLTE601	1,2	1,2	2,8	28,6	45,3
Alcad RB609	1,3	3,6	6,3	20,2	31,9
Alcad FR619	1,1	3,2	5,2	17,4	36,7

Tabla 73. Atenuaciones (dB) de los filtros profesionales a 800 MHz de Canal 60 analizados.

Los filtros profesionales proporcionan para las mismas condiciones que los filtros domésticos una banda de rechazo de entre **17,4 y 31,5 dB**. Es decir, al consiguen 15 dB más de rechazo para el caso peor en comparación con los filtros domésticos.

B.2 Filtros paso bajo profesionales a 700 MHz

Como se ha mencionado, también se ha estudiado un caso concreto existente en la Región 2 de la ITU, donde la interferencia más próxima al último canal de la TDT es LTE Uplink. Además, la banda de guarda en este caso es mayor (5 MHz), por lo que no se necesitan filtros tan selectivos como los existentes a 800 MHz. Además, el ancho de banda de los canales TDT es de 6 MHz en lugar de 8 MHz. En este caso se han analizado:

- 3 filtros paso bajo profesionales en la banda de 700 MHz, de canal 51.

La respuesta en frecuencia de estos cuatro filtros, suponiendo un ancho de banda de la señal LTE DL de 10 MHz, es la siguiente:

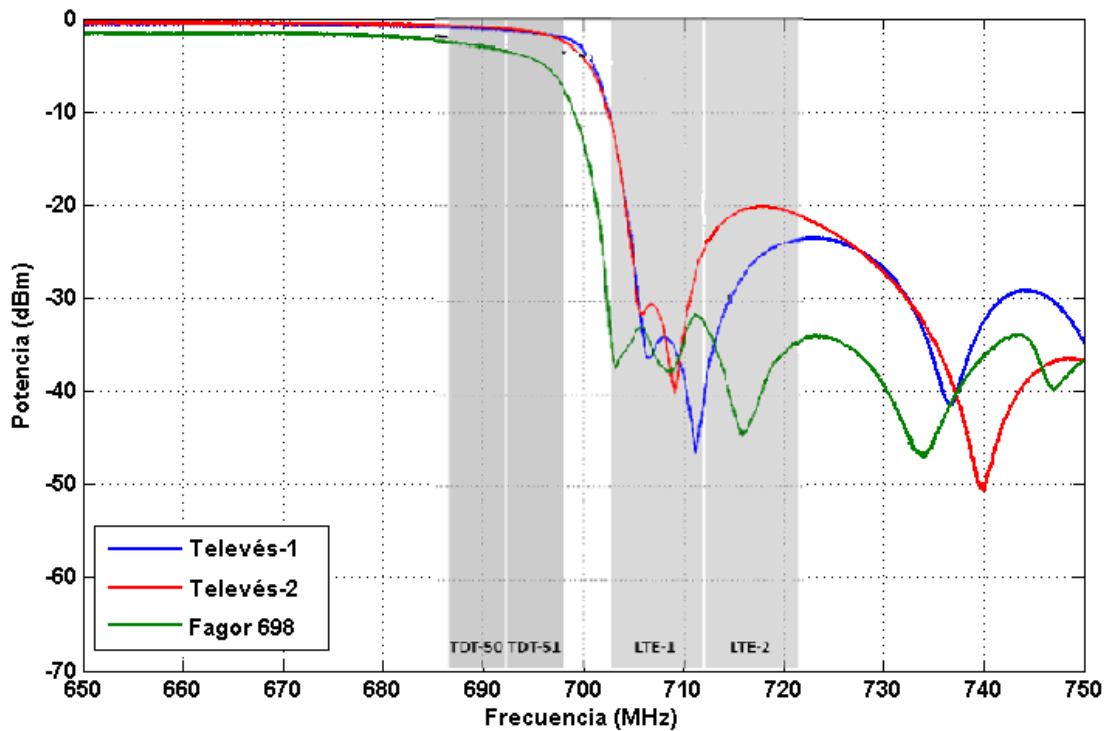


Figura 106. Respuesta en frecuencia de los filtros profesionales a 700 MHz de Canal 51 analizados. Caso concreto de Colombia.

En este caso, los parámetros de atenuación de los filtros analizados son:

Filtro analizado	Att. TDT (470-698 MHz)	Att. Canal 50	Att. Canal 51	Att. fuera de banda (LTE-1)	Att. fuera de banda (LTE-2)
Televés-1	0,5	1	1,5	31,8	24,9
Televés-2	0,4	0,9	1,5	27	19,6
Fagor 698	1,6	2,7	4,4	30,4	33,7

Tabla 74. Atenuaciones (dB) de los filtros profesionales a 700 MHz de Canal 51 analizados.

Los filtros profesionales para la banda de 700 proporcionan, para una banda de guarda de 5 MHz, un ancho de banda DVB-T2 de 6 MHz y un ancho de banda LTE de 10 MHz, un rechazo de entre **27 y 31,8 dB** de atenuación.