



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

– **TELECOM** ESCUELA
TÉCNICA **VLC** SUPERIOR
DE **UPV** INGENIEROS
DE TELECOMUNICACIÓN

USO POTENCIAL DE LA BANDA DE UHF PARA INTERNET OF THINGS: ESPECTRO COMPARTIDO ENTRE SERVICIOS DE TDT E IOT

Autor: Kevin Llamas Muñoz

Tutor: Narcís Cardona Marcet

Director: Gerardo Martínez Pinzón

Trabajo Fin de Grado presentado en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Telecomunicación de la Universitat Politècnica de València, para la obtención del Título de Graduado en Ingeniería de Tecnologías y Servicios de Telecomunicación

Curso 2015-16

Valencia, 29 de junio de 2016

Dedicatoria y Agradecimientos

A mis padres Antonio y Fina, que durante muchos años me han ayudado y apoyado en mis estudios, invirtiendo en mí para poder estar hoy donde estoy, obteniendo mi carrera universitaria y llegando donde, por desgracia, ellos no pudieron llegar. Han sido, son y serán siempre una referencia para mí. De ellos he aprendido el significado del esfuerzo, la dedicación y el sacrificio, para conseguir lo que uno se propone. Gracias a ellos me he convertido en la persona que soy hoy.

A mi hermano Iván, por estar siempre cerca y apoyarme cuando lo he necesitado. Espero que llegue el día en el que sea él quien escriba estas líneas y consiga llegar también donde nuestros padres han intentado siempre conducirnos.

A mi pareja Nerea, por soportar a mi lado todos los momentos de presión y agobio que la carrera me ha traído, dándome siempre su apoyo, ayudándome siempre de la mejor forma e iluminando muchos días grises. Confío en que conseguiré de igual forma todas sus metas, contando con mi completo apoyo, ahora y siempre.

A todos mis abuelos, por preocuparse por mí y darme todo lo que han podido siempre para que avanzase desde niño hasta la actualidad. Nunca olvidaré todo su cariño y esfuerzo para que sus nietos llegasen lo más lejos posible. A ellos siempre los tendré en el corazón, a unos y a otros.

A mi tutor de proyecto Narcís Cardona, por ofrecerme la oportunidad de entrar en su equipo y por confiar en mí, ayudándome en todo lo que ha estado en su mano desde el principio.

A mi director de proyecto en el iTeam Gerardo Martínez, por estar desde el primer día a mi lado en el trabajo diario, ayudándome siempre que lo he necesitado y guiándome en todo momento. Gracias a él, me he convertido en mejor profesional y he aprendido hábitos que seguro que me acompañarán durante toda mi vida laboral.

A todos aquellos magníficos profesores (D. Antonio, Lola, Xavier, Isabel, Rogelio, Cristóbal, Belmar, Chernan, Pepe, etc.) que de vez en cuando han aparecido en mi vida y me han transmitido su pasión por el conocimiento, conduciéndome sin saberlo hasta aquí.

A todos ellos y al resto de personas, familiares, amigos, compañeros o profesores que alguna vez me han ayudado a lo largo de mi vida y trayectoria educativa, les agradezco y dedico este trabajo.

Resumen

Internet of Things (IoT) será la próxima evolución de internet, originando un crecimiento exponencial de aplicaciones y servicios que estarán conectadas a la red. El paradigma que promete IoT, es el gran volumen de datos que producirá para ser gestionado de una forma eficiente y segura, permitiendo así crear nuevos modelos de negocio en todas las áreas que contribuyen al bienestar social tanto a nivel local, como nacional e internacional. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), estima para el año 2020 alrededor de 25 a 50 billones de dispositivos conectados a internet. En la actualidad, se están llevando a cabo estudios para definir tanto la tecnología que lo soportará como las bandas de frecuencias en las que podrá ser desplegado, convirtiéndose en un *hot-topic* de investigación.

Este proyecto, propone el uso compartido de la banda de UHF entre los servicios de Internet of Things y Televisión Digital Terrestre (TDT). Los servicios de IoT a través de la tecnología Narrow Band LTE (NB-LTE) hacen uso eficiente de los espacios en blanco de la banda de TDT, como servicio secundario, y una red de TDT bajo el estándar DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2*) ofrece cobertura para recepción fija sobre tejado, como servicio primario. Los resultados han sido obtenidos mediante medidas de laboratorio que permiten emular el comportamiento real de los sistemas y cálculos teóricos. Los resultados, proporcionarán la máxima Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) transmisible por los nodos y dispositivos IoT en espectro compartido con DVB-T2, garantizando el correcto funcionamiento del servicio primario. Por lo tanto, los resultados obtenidos en este proyecto, contribuirán en el desarrollo de Internet of Things desde dos enfoques: Por un lado, se demostrará la viabilidad del uso de la banda de TDT como espectro compartido para ofrecer los servicios de IoT, y, por otro lado, se definirán los requerimientos técnicos de transmisión (máxima PIRE transmitida por los dispositivos y nodos IoT) que deberá satisfacer la tecnología NB-LTE para soportar el ecosistema de IoT.

Resum

Internet of Things (IoT) serà la pròxima evolució d'Internet, originant un creixement exponencial d'aplicacions i serveis que estaran connectats a la ret. El paradigma que promet IoT, és el gran volum de dades que produirà per ser gestionat d'una manera eficient i segura, permetent així crear nous models de negoci en totes les àrees que contribueixen al benestar social tant a nivell local, com nacional e internacional. La Unió Internacional de Telecomunicacions (UIT), estima per a l'any 2020 al voltant de 25 a 50 bilions de dispositius connectats a internet. En l'actualitat, s'estan duent a terme estudis per a definir tan la tecnologia que la suportarà como les bandes de freqüències en les que podrà ser desplegada, convertint-se en un *hot-topic* de investigació.

Aquest projecte, proposa l'ús compartit de la banda d'UHF entre el serveis de Internet of Things i Televisió Digital Terrestre (TDT). Els serveis de IoT mitjançant la tecnologia Narrow Band LTE (NB-LTE) fan ús eficient dels espais en blanc de la banda de TDT, como a servei secundari, y una ret de TDT sota l'estàndard DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2*) ofereix cobertura per a recepció fixa sobre teulada com a servei primari. Els resultats s'han obtingut mitjançant mesures de laboratori que permeten emular el comportament real dels sistemes i càlculs teòrics. Els resultats, proporcionaran la màxima Potència Isotrópica Radiada Equivalent (PIRE) transmissible pels nodes i dispositius IoT en espectre compartit amb DVB-T2, garantint el correcte funcionament del servei primari. Aleshores, els resultats obtinguts en aquest projecte, contribuiran en el desenvolupament d'Internet of Things des de dos enfocaments: Per una banda, es demostrarà la viabilitat de l'ús de la banda de TDT com espectre compartit per a oferir els serveis de IoT, i, per l'altra banda, es definiran els requeriments tècnics de transmissió (màxima PIRE transmesa pels dispositius i nodes IoT) que haurà de satisfer la tecnologia NB-LTE per suportar l'ecosistema de IoT.

Abstract

Internet of Things (IoT) is the next evolution of the Internet, causing an exponential growth of applications and services that will be connected to the network. The paradigm that promises IoT, is the large volume of data that will be produced to be managed efficiently and safely; allowing creating new business models in all areas that contribute to social welfare at local, national and international levels. The International Telecommunication Union (ITU) estimates by 2020 around 25 to 50 billion Internet-connected devices. Nowadays, studies are being carried out to define both the technology that will support it as the frequency bands which can be deployed, becoming a hot-topic research.

This project proposes sharing the UHF band between Internet of Things and Digital Terrestrial Television (DTT) services. IoT through the Narrow Band LTE (NB-LTE) technology makes efficient use of TV-White Spaces, as a secondary service, and a DTT network under the DVB-T2 standard (Digital Video Broadcasting - Terrestrial 2) provides coverage for fixed rooftop reception, as a primary service. The results have been obtained by laboratory measurements that allow emulate the real behaviour of systems and theoretical calculations. The results provide maximum Equivalent Isotropic Radiated Power (EIRP) that could be transmitted by IoT nodes and devices in spectrum sharing with DVB-T2, ensuring the quality of the primary service. Therefore, the results obtained in this project will contribute to the development of Internet of Things from two approaches: On the one hand, it will be demonstrated the feasibility of using the DTT band as spectrum sharing to provide IoT services, and, on the other hand, the technical requirements of transmission will be defined (maximum EIRP transmitted by IoT devices and nodes) which must satisfy the NB-LTE technology to support the IoT ecosystem.

ÍNDICE

1.	Introducción	12
1.1	Motivación	14
1.2	Estructura de la memoria	15
2.	Objetivos	17
3.	Estado del Arte.....	18
3.1	Espectro Radioeléctrico	18
3.2	Internet de las cosas (Internet of Things).....	21
3.2.1	Historia y evolución.....	21
3.2.2	Requerimientos	22
3.2.3	Posibles Tecnologías Propuestas	23
3.3	Tecnologías propuestas para espectro compartido. TDT bajo el estándar DVB-T2 ...	27
4.	Descripción de los Escenarios	29
4.1	Configuración General.....	29
4.2	Escenario 1: Ciudad Inteligente (Smart Cities) - Urbano	30
4.2.1	Caso A: Aparcamiento inteligente (Smart Parking)	30
4.2.2	Caso B: Monitorización de la Congestión del Tráfico (Traffic Congestion).....	31
4.3	Escenario 2: Agricultura y Ganadería Inteligente - Rural	31
4.3.1	Caso C: Monitorización Agraria Inteligente (Smart Farming Monitoring).....	32
4.3.2	Caso D: Control y Seguimiento de Animales y Ganado (Animal Tracking)	32
4.4	Escenario 3: eHealth - Interiores.....	33
4.4.1	Caso E: Vigilancia de Pacientes (Patients Surveillance)	33
4.5	Resumen de alturas consideradas en cada escenario	33
5.	Metodología	34
5.1	Instrumentación empleada	34
5.1.1	Generación y Transmisión DVB-T2.....	34
5.1.2	Recepción y Análisis de la señal DVB-T2	35
5.1.3	Generación y Transmisión NB-LTE (IoT)	35
5.1.4	Recepción y Análisis de ambas señales	36
5.1.5	Otros dispositivos y cableado	37
5.2	Generación de las señales de DVB-T2 y NB-LTE	39
5.2.1	Generación de la señal DVB-T2.....	39
5.2.2	Generación de la señal NB-LTE	40
5.2.3	Cálculo de la BEM para NB-LTE.....	43
5.3	Medidas del Margen de protección.....	44
5.3.1	Metodología de evaluación.....	44

5.3.2	Método de punto de fallo subjetivo	45
5.3.3	Casos considerados en las medidas de Márgenes de Protección	46
5.4	Balance de Enlace (Link Budget)	46
5.4.1	Ganancia por pérdidas del canal	46
5.4.2	Topología general	47
5.4.3	Máxima PIRE transmisible por los Nodos y dispositivos IoT.....	48
5.5	Tasa binaria de pico de NB-LTE-IoT	48
6.	Resultados	50
6.1	Medidas de Márgenes de Protección	50
6.1.1	Interferencia de NB-LTE en función del tipo de enlace	51
6.1.2	Influencia del Ciclo de Trabajo para NB-LTE	51
6.2	Ganancia por pérdida de Canal	54
6.3	Máxima PIRE transmitida por los nodos y dispositivos de IoT	54
6.3.1	Máxima PIRE transmitida por los Nodos IoT	55
6.3.2	Máxima PIRE transmitida para los dispositivos IoT	56
6.3.3	Tasas de bit de pico para NB-LTE.....	59
6.4	Impacto económico debido al uso eficiente de espectro.....	60
7.	Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro	62
7.1	Conclusiones	62
7.2	Recomendaciones	64
7.3	Trabajo Futuro	65
7.4	Difusión de los resultados.....	65
8.	Referencias.....	66
9.	Anexos	68

Índice de Figuras

Figura 1. Crecimiento en el tiempo del número de dispositivos conectados.....	13
Figura 2. Primer dividendo digital en la Región 1 de la UIT.	14
Figura 3. Segundo dividendo digital en la Región 1 de la UIT.	14
Figura 4. Ejemplos y características de espectro dedicado y compartido.....	18
Figura 5. Ejemplo de White Spaces de tipo temporal/frecuencial.....	19
Figura 6. Ejemplo de White Spaces de tipo espacial en UK.	19
Figura 7. Banda de UHF con difusión analógica y con difusión digital, antes y después del primer dividendo digital.....	20
Figura 8. El IoT permitirá el desarrollo masivo de aplicaciones en proyectos de Smart Cities..	21
Figura 9. Ejemplo de conexión IoT.	22
Figura 10. Ejemplo wearable de Smartwatch.	22
Figura 11. Importancia de la seguridad y suministro energético en el IoT.....	22
Figura 12. Una portadora NB-LTE consiste en 12 subportadoras con 15 kHz de separación. ...	25
Figura 13. Esquema temporal para el downlink de NB-LTE.	25
Figura 14. Diagrama de bloques para la transmisión de la señal NB-LTE en downlink.....	25
Figura 15. Reestructuración temporal de los recursos radio NB-LTE en uplink.....	26
Figura 16. Esquema temporal para el uplink de NB-LTE.	26
Figura 17. Diagrama de bloques para la transmisión de la señal NB-LTE en uplink.....	27
Figura 18. Adopción y despliegue de los estándares de TDT en el mundo.....	27
Figura 19. Estructura temporal de DVB-T2.	28
Figura 20. Topología general con todos los escenarios bajo estudio.....	30
Figura 21. Topología en Smart Parking.	31
Figura 22. Topología en Traffic Congestion.	31
Figura 23. Topología en Smart Farming Monitoring	32
Figura 24. Topología para Animal Tracking	32
Figura 25. Topología en Patients Surveillance.	33

Figura 26. Interfaz del Transmisor DekTec T2Xpress DVB-T2 Signal Generator.....	34
Figura 27. Set-Top Box Multitech DT2-M007.....	35
Figura 28. Televisión DVB-T2: SONY BRAVIA.....	35
Figura 29. Interfaz de Matlab.....	35
Figura 30. Interfaz del ARB Toolbox Plus de R&S.	36
Figura 31. R&S SMU 200A Vector Signal Generator.	36
Figura 32. Anritsu Spectrum Master MS270T (Spectrum Analyzer).....	37
Figura 33. Atenuador variable de Televés con un margen de 20dB.....	37
Figura 34. Divisor, combinador y conectores pasivos empleados.....	37
Figura 35. Cable M17/152-00001 de Harbour Industries (50 Ohm).	38
Figura 36. Cable coaxial RG-59/U de 75 Ohm.	38
Figura 37. HDMI E340033 AWM Style 2027.	38
Figura 38. Programa en Visual Studio para generar ciclos de trabajo.....	38
Figura 39. Espectro de la señal DVB-T2 utilizada en el laboratorio para el estudio de coexistencia.....	39
Figura 40. Codificador convolucional de LTE.	40
Figura 41. Esquema de Interleaving y Rate Matching basado en el de LTE.....	41
Figura 42. Multiplexación y mapeado de los resources elements entre los diferentes canales físicos para el downlink de NB-LTE.	42
Figura 43. Espectro de la señal NB-LTE generado en laboratorio.	42
Figura 44. Estructura de dominios de la BEM para NB-LTE con un ancho de banda da útil de 200 kHz.....	43
Figura 45. Máscara espectral de borde de bloque (BEM) que deben cumplir los nodos y dispositivos IoT en transmisión.	44
Figura 46. Montaje genérico utilizado en la medida de los márgenes de protección DVB-T2 útil especificado en la Recomendación ITU R BT.1368-9.	45
Figura 47. Topología general para el cálculo de la ganancia por pérdidas de canal.....	47
Figura 48. Discriminación angular de la antena de TDT.....	47
Figura 49. Ganancia por pérdidas de canal frente a distancia horizontal.	48

Figura 50. Resource Block LTE correspondiente a 0,5ms.	49
Figura 51. Márgenes de protección para una seña DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE para el enlace descendente y ascendente.	51
Figura 52. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE para el enlace ascendente en función del ciclo de trabajo.	52
Figura 53. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE para el enlace ascendente con diferentes tiempos de transmisión.	53
Figura 54. Máxima PIRE que puede transmitir el Nodo NB-LTE para 0 y 16dB de discriminación de la antena.....	55
Figura 55. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso A..	57
Figura 56. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso B..	57
Figura 57. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso C..	58
Figura 58. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso D..	58
Figura 59. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso E..	58
Figura 60. Tasa de pico para el enlace ascendente de NB-LTE, en función del tiempo de transmisión y el tiempo de espera.	59
Figura 61. Perfil frecuencial de la BEM.	68
Figura 62. Descripción de margen de protección y umbral de saturación de un receptor de TDT ideal.....	69

Índice de Tablas

Tabla 1. Comparativa de las distintas tecnologías en relación a los requerimientos IoT.	24
Tabla 2. Alturas de dispositivos IoT en cada uno de los escenarios considerados.....	33
Tabla 3. Parámetros de funcionamiento de la señal DVB-T2 según un modo privado de UK. ...	39
Tabla 4. Modo de funcionamiento de NB-LTE siguiendo el estándar.	40
Tabla 5. Mapeado de la modulación QPSK.....	41
Tabla 6. Casos considerados para las medidas de margen de protección para Uplink.....	52
Tabla 7. Parámetros utilizados para el estudio de la variación del tiempo de transmisión.....	53
Tabla 8. Ganancia por pérdidas de canal desde los nodos y dispositivos IoT hasta el receptor de TDT, para los distintos escenarios considerados.	54
Tabla 9. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT según el escenario.....	56
Tabla 10. Coste económico del espectro expresado en €/MHz/Pop, para los dos países de Europa (Alemania y Francia) que han realizado la subasta de la banda de 700 MHz.....	60
Tabla 11. Ahorro económico del espectro aprovechado por IoT en la banda de TDT.....	60
Tabla 12. Márgenes de PIRE transmisibles para los nodos y dispositivos IoT en cada uno de los escenarios bajo estudio para un ciclo de trabajo del 2%.....	64

Acrónimos y Abreviaturas

3GPP	3rd Generation Partnership Project
BEM	Block Edge Mask
BER	Bit Error Rate
CAPEX	Capital Expenditures
CP	Cyclic Prefix
DC	Duty Cycle
DL	Downlink
DVB-T2	Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2
EBU	European Broadcasting Union
EC-GSM	EGPRS Enhancements for Internet of Things
eMTC	Enhancements for Machine Type Communications
FDD	Frequency Division Duplex
FSL	Free Space Loss
G_{PL}	Ganancia por Pérdidas de Canal
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
IoT	Internet of Things
ITU/UIT	International Telecommunication Union
LDPC	Low Density Parity Check
LOS	Loss of Sight
LTE	Long Term Evolution
MCL	Maximum Coupling Loss
MP	Margen de Protección
NB-LTE-IoT	Narrow Band LTE for Internet of Things
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
OPEX	Operating expense
PAPR	Peak-to-average power ratio
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency division multiple access
STB	Set Top Box
TDD	Time Division Duplex
TDT	Televisión Digital Terrestre
UL	Uplink

1. Introducción

Hoy en día, la sociedad hace uso de numerosas aplicaciones y servicios que permiten hacer más fácil multitud de tareas y mejorar la calidad de vida de la sociedad. La tendencia que se observa es que el desarrollo de este tipo de aplicaciones continuará creciendo, y, nos conducirá a un futuro cercano caracterizado por una interconexión masiva de dispositivos u objetos conectados a la red. Éste ecosistema es lo que conforma el concepto o idea de “Internet de las Cosas” o “*Internet of Things*” (IoT, por sus siglas en inglés) y representa la próxima evolución del actual Internet. De la misma forma, IoT generará una gran cantidad de datos de información derivados de estas aplicaciones, que mediante una gestión eficiente y segura permitirá crear nuevos modelos de negocio en todas las áreas que contribuyen al desarrollo de la humanidad, como son la educación, las comunicaciones, los negocios, la ciencia, la política o el medioambiente, afectando a todos los ámbitos y niveles desde lo local a lo global.

En la actualidad aún no está definida la tecnología que soportará los servicios de IoT, no obstante, los requisitos que deberán cumplir ya han sido especificados [1]. Los requerimientos que debe satisfacer son: soportar un número masivo de dispositivos; ofrecer bajas tasa de transmisión; nivel de latencia bajos en función de la aplicación; consumo energético reducido; baja complejidad; permitir larga vida de las baterías del orden de hasta 10 años, escalabilidad, fiabilidad, movilidad y ofrecer una cobertura extendida incluyendo escenarios de interiores. Tomando en consideración estos requerimientos, se están llevando a cabo numerosas investigaciones para estandarizar la tecnología que podrá soportar IoT. Por un lado, se han propuesto tecnologías de campos específicos, tales como, Wi-Fi (*Wireless Fidelity*, por sus siglas en inglés), Bluetooth, ZigBee y LpWA (*Low Power Wide Area Networks* por sus siglas en inglés) [2]. Sin embargo, estas tecnologías no satisfacen algunos requerimientos como escalabilidad, fiabilidad, cobertura extendida o soporte de movilidad, y tendrían unos costes de implementación de redes muy elevados para garantizar buena cobertura. Por otro lado, el 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*, por sus siglas en inglés) está evaluando diferentes tecnologías de banda estrecha que podrían hacer frente a las demandas de los servicios de IoT, dentro de las más relevantes encontramos: *Narrow Band for Internet of Things* (NB-LTE), *Enhancements for Machine Type Communications* (eMTC) y *EGPRS enhancements for Internet of Things* (EC-GSM-IoT). Todas estas tecnologías cumplen con todos los requisitos exigidos para IoT, aunque sus parámetros técnicos de transmisión usados en el balance del enlace (potencia máxima transmitida, ciclos de trabajo de los nodos y dispositivos IoT, entre otros), son aún debatidos y no están claramente definidos teniendo en cuenta la diversidad de aplicaciones y servicios que deberá hacer frente [3].

Otro aspecto necesario que aún no está definido, son las bandas de frecuencias que serán atribuidas para el despliegue de los servicios IoT. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT) junto con los fabricantes Cisco y Nokia, han realizado estudios que estiman un número masivo de dispositivos conectados a internet del orden de 25 a 50 billones para el 2020 [4][5]. La Figura 1 muestra la evolución de los dispositivos conectados a internet desde el año 1992 según Cisco, con la aparición de los primeros ordenadores personales, hasta la proyección que se espera para el año 2020. Como se puede observar, desde la última década ha habido un incremento importante en los dispositivos conectados a internet, tendiendo a un crecimiento exponencial para los próximos años. El elevado número de conexiones estimadas, pone de manifiesto la necesidad de buscar y definir bandas de frecuencia que permitan soportar todo el espectro que conllevará el despliegue de IoT. Ofcom propone que la alta demanda de espectro para IoT podría ser abordada mediante la asignación de espectro compartido y espectro dedicado, en función de los diferentes modos de operación y requerimiento de los dispositivos [6]. Entre las propuestas realizadas hasta la fecha, se ha sugerido, por un lado, el uso de bandas milimétricas a frecuencias del orden de los 30GHz o superiores, al ser frecuencias poco utilizadas, y, por otro lado, bandas bajas de frecuencias, como podrían ser VHF (Very High Frequency) o UHF (Ultra High Frequency) [7].

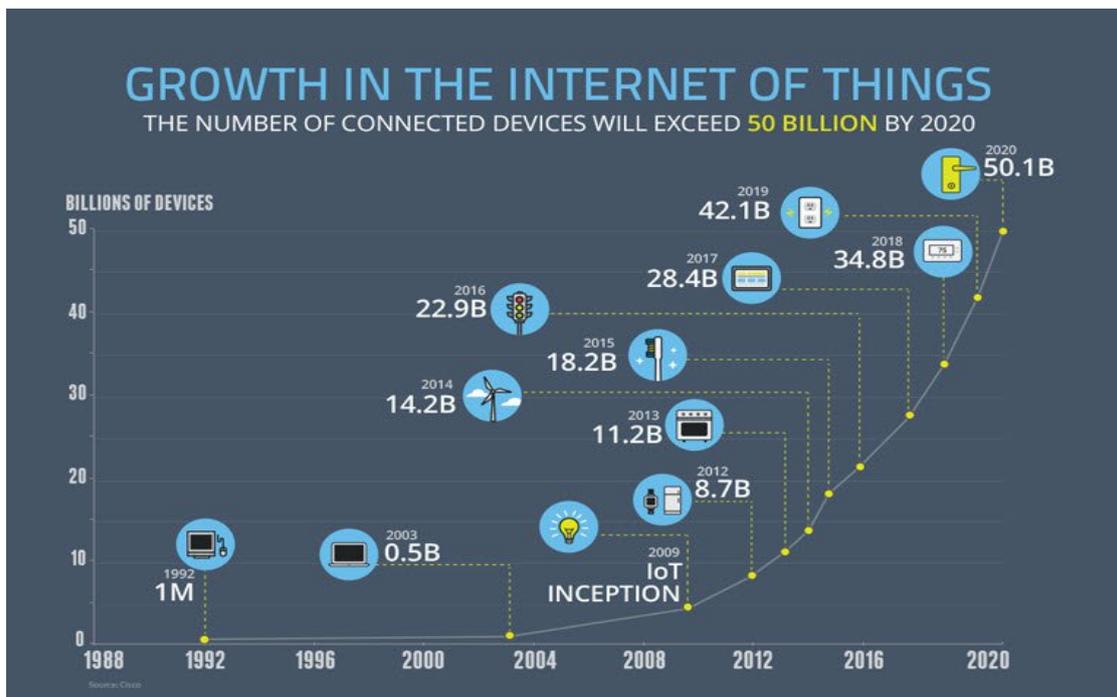


Figura 1. Crecimiento en el tiempo del número de dispositivos conectados (Fuente: Cisco).

El posible uso de la banda de UHF, destinada actualmente la TDT, se vislumbra como una solución muy interesante a tener en cuenta para el despliegue de la tecnología IoT. Esta banda, presenta numerosas ventajas por sus características de propagación y por el bajo coste de implementación que supone, lo que la convierte en la banda que más interés suscita a los operadores de televisión y telefonía móvil actualmente.

En los años recientes, la introducción de la televisión digital terrestre ha originado que la banda de TDT presente algunas modificaciones, debido a que permite un mejor aprovechamiento del espectro radioeléctrico. En consecuencia, y teniendo en cuenta las necesidades de espectro en un futuro para las tecnologías IMT (*International Mobile Telecommunications*), en el 2007, en la *World Radiocommunication Conference (WRC-07)*, se decidió asignar la parte alta de la banda de TDT de 800 MHz (790 a 862 MHz, Región 1) para las tecnologías móviles de cuarta generación (4G), en lo que se conoce como el primer Dividendo Digital (DD1) [8]. Tras esto, en la WRC de 2015 [9], se llevó a cabo otra reestructuración de esta banda asignando más espectro a las tecnologías IMT, para 2020 con un margen de dos años, en lo que es conocido como el segundo DD (694 a 790 MHz, Región 1) de la banda de 700 MHz.

Con lo que respecta a las bandas inferiores (470-694 MHz, Región 1), se ratificó a título primario para los servicios de TDT y se determinó que podrían ser empleadas a título secundario, para servicios de banda ancha únicamente en downlink (unidireccional), siempre que se garantice la calidad del servicio primario. Por último, se acordó que en 2025 se realizarían revisiones de la banda para discutir su uso futuro [10][11]. En otros estudios, como el realizado por el *Electronic Communications Committee (ECC)* en 2014, se planteaban cuatro escenarios potenciales para el uso futuro de la banda de TDT: uso primario para los servicios presentes y futuros de DVB; uso híbrido por parte de servicios DVB y/o redes terrestres LTE en downlink; uso híbrido por parte de servicios DVB y/o redes terrestres LTE incluyendo además el uplink; o para tecnologías de comunicaciones futuras [12]. Las siguientes figuras, muestran los dividendos digitales llevados a cabo en la banda de TDT para la región 1 (Europa y África).

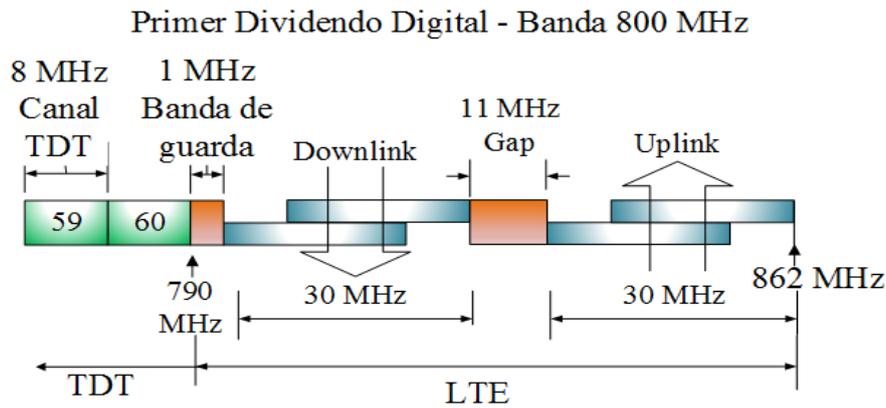


Figura 2. Primer dividendo digital en la Región 1 de la UIT.

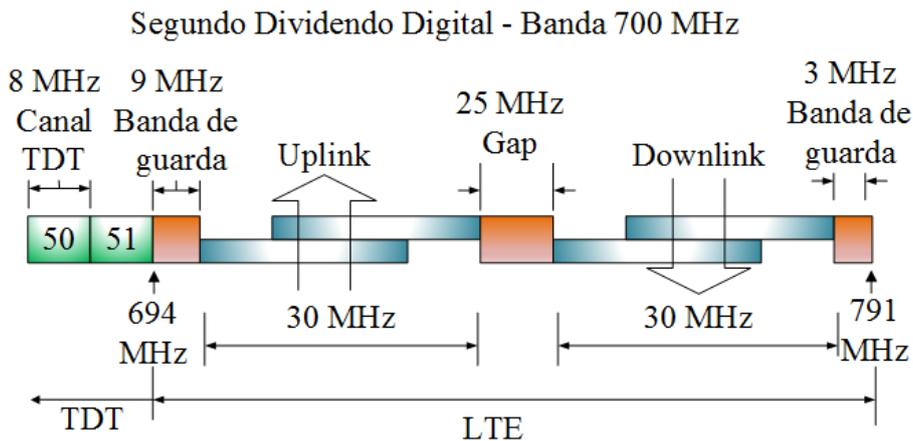


Figura 3. Segundo dividendo digital en la Región 1 de la UIT.

Otra consideración que permite proponer el posible uso de la banda de TDT para los servicios IoT en espectro compartido, son los estudios que demuestran una baja ocupación en tiempo y localización de dicha banda. Un estudio llevado a cabo en 11 países de Europa en la banda de 470 a 790 MHz, concluyó que aproximadamente el 56% de los canales de televisión estaban siendo inutilizados [13]. Este espectro disponible o no utilizado es lo que se conoce como espacios en blanco en la banda de televisión (*TV-White Spaces*).

Hasta la fecha, no existen estudios realizados que evalúen tecnologías candidatas para IoT en coexistencia haciendo uso de espectro compartido con servicios de TDT, lo cual constituye una oportunidad para la optimización de la banda de UHF y ofrecer espectro a servicios de Internet of Things.

1.1 Motivación

Internet of Things es un “*hot-topic*” de investigación por organismos de estandarización, universidades y empresas desde un ámbito local, nacional e internacional. Internet of Things no sólo destacará por ser la próxima evolución de internet, sino porque creará un nuevo paradigma de gestión eficiente de recursos, tanto físicos como humanos, ocasionando un gran impacto económico, social y ambiental en el desarrollo de la humanidad.

Este proyecto final de carrera pretende dar solución a las necesidades que demanda Internet of Things respecto a las bandas de frecuencias donde podrá ser desplegado y la tecnología que podría soportarlo. Por un lado, se definirá una banda de frecuencias para el uso

de los servicios de IoT y, por otro lado, se determinarán los requerimientos técnicos de transmisión de una de las principales tecnologías candidatas propuestas por el 3GPP para soportar IoT en espectro compartido.

Por lo tanto, estas investigaciones proponen la compartición de espectro mediante una red de TDT ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado (Caso Europeo) como servicio primario y los servicios de IoT haciendo uso eficiente de los espacios en blanco, como servicio secundario. Para el servicio de TDT se considera el estándar de DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial 2*) por ser el más adoptado y desplegado globalmente, y para IoT se ha escogido como tecnología propuesta la de *Narrow Band for Internet of Things* (NB-LTE) por ser la más destacada actualmente, ya que permite distintos modos de operación pudiendo implantarse en la banda de LTE, formando parte de bandas de guarda o de forma autónoma. Dicha tecnología se basa en el estándar de LTE (*Long Term Evolution*), con naturaleza de banda estrecha, lo que permite un fácil despliegue sobre las redes móviles actuales, además de tener menores costes de implementación que otras tecnologías basadas en este estándar.

Para garantizar la coexistencia de estos sistemas se realizarán estudios que definan los parámetros técnicos en transmisión y recepción. Estos estudios se desarrollan mediante cálculos teóricos y pruebas de laboratorio. Los cálculos teóricos permiten delimitar los parámetros técnicos que deben cumplir los transmisores y receptores a través de balance de enlaces. Las pruebas de laboratorio permiten emular el comportamiento real de los sistemas mediante equipos profesionales en un entorno controlado. Las pruebas que se llevarán a cabo consisten en generar el espectro de las señales teniendo en cuenta que cumplan el estándar de las tecnologías implicadas. Posteriormente en función del escenario y caso de estudio, se combinarán como señal útil e interferente, permitiendo así evaluar parámetros de calidad que garanticen la coexistencia entre tecnologías. Los resultados que se podrán determinar mediante estas pruebas son: márgenes de protección que deben satisfacer DVB-T2 interferido por NB-LTE para garantizar su correcto funcionamiento y parámetros técnicos en transmisión para NB-LTE (máximo potencia que podría transmitir, separación en frecuencia entre las dos tecnologías, etc.).

Este proyecto ha sido realizado en el Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) de la Universidad Politècnica de València (UPV). Los resultados de este proyecto final de carrera han dado lugar a un artículo que ha sido presentado en dos congresos internacionales: *European Cooperation in Science and Technology* (COST-2016, Action CA15104) y el *IEEE PIMRIC'16 Conference*.

1.2 Estructura de la memoria

El contenido de este documento está organizado y distribuido como se detalla a continuación en los siguientes puntos:

En el capítulo dos, se describe en primer lugar el objetivo principal que se persigue con este proyecto, y posteriormente se presentan los diferentes objetivos específicos que se deben seguir para cumplir con ello.

En el capítulo tres, se presenta y describe, en primer lugar, la atribución actual del espectro radioeléctrico en las bandas de interés, profundizando en los distintos modos de adjudicación: exclusiva o compartido. Asimismo, se aborda el concepto de los *White Spaces* en la banda de televisión. En segundo lugar, se hace una revisión general acerca del concepto e historia de Internet of Things (IoT), los requerimientos necesarios que debe satisfacer la tecnología que lo soportará y una descripción de las tecnologías candidatas. Para finalizar este apartado, se hace una breve descripción del estándar DVB-T2, como tecnología propuesta para hacer uso de espectro compartido con IoT.

En el capítulo cuatro, se describen los escenarios considerados para Internet of Things. Estos escenarios se han considerado como los casos más representativos del ecosistema IoT con aplicaciones concretas para proyectos de ciudades inteligentes, agricultura y ganadería inteligente, e interiores.

En el capítulo cinco, se describe detalladamente toda la metodología empleada en el estudio para la evaluación de coexistencia entre las tecnologías escogidas, desde la generación de las señales hasta las medidas de los parámetros de interferencia para evaluar el comportamiento de ambos servicios.

En el capítulo seis, se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los escenarios considerados, tales como, medidas de los márgenes de protección, caracterización del enlace desde los nodos y dispositivos IoT hasta la antena receptora de TDT, máxima potencia isotrópica radiada equivalente y tasas de transmisión en función de los ciclos de trabajo, que deberían cumplir los nodos y dispositivos IoT para garantizar el correcto funcionamiento de los servicios de TDT. Además, se presenta un estudio económico sobre el ahorro en licencias de espectro que se consigue con la compartición de espectro.

Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones para garantizar el uso adecuado de la banda de televisión digital terrestre para los servicios de IoT como servicio secundario, sin interferir los servicios de TDT bajo el estándar DVB-T2, como servicio primario. Además, se propone el trabajo futuro para esta línea de investigación.

2. Objetivos

Este proyecto de final de carrera, tiene como objetivo principal definir una banda de frecuencias para la prestación de los servicios de Internet of Things. En consecuencia, se evalúa la compartición de espectro entre los servicios de televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T2 como servicio primario, y los servicios de IoT bajo la tecnología candidata NB-LTE como servicio secundario, haciendo uso eficiente de los espacios en blanco en la banda de TDT. Para lograr dicho objetivo, se han planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Generar el espectro real de las señales DVB-T2 y NB-LTE que cumplan con el estándar, para la utilización como señal útil e interferencia en las medidas de laboratorio.
2. Evaluar la coexistencia entre las tecnologías DVB-T2 y NB-LTE midiendo los márgenes de protección (potencia interferente permitida de NB-LTE sobre un receptor de televisión) que garantizan el correcto funcionamiento de los sistemas.
3. Caracterizar el enlace entre los nodos y dispositivos IoT respecto a la antena receptora de TDT mediante el balance de enlace, con el fin de determinar la máxima PIRE que podría transmitir los equipos de IoT.
4. Definir la máxima PIRE que podrían transmitir los nodos y dispositivos de IoT en función del espaciado en frecuencia y el escenario considerado.
5. Elaborar recomendaciones respecto a la potencia transmitida en banda y fuera de banda de los nodos y dispositivos IoT. Asimismo, definir el espaciado en frecuencia necesario para los servicios IoT respecto a un canal DVB-T2 que permitan garantizar el uso correcto de esta banda.

3. Estado del Arte

3.1 Espectro Radioeléctrico

Se entiende por espectro radioeléctrico, al conjunto de frecuencias de radio que van desde 3 kHz hasta 300 GHz, siendo éste un recurso limitado y preciado para el conjunto de servicios y aplicaciones inalámbricas que hacen uso de él. La gestión y regulación del espectro ha tenido siempre como uno de sus objetivos principales el evitar la aparición de interferencias para posibilitar el correcto funcionamiento de los servicios radio. Es por ello, por lo que tradicionalmente se ha recurrido a la asignación de frecuencias siguiendo un modelo de banda dedicada con los siguientes modos de adjudicación:

- Dedicada de forma exclusiva cuando existe un vínculo entre servicio y tecnología, como es el caso de la radiodifusión de televisión, la cual tiene asignada un rango de frecuencias concreta para dicho servicio en la banda de UHF.
- Asignada de forma privada a un operador utilizando la banda como él considere, tanto para escoger el servicio como la tecnología.
- Sin licencia de uso libre y común, para todo aquel que desee utilizarla como el caso de WiFi. No se garantiza la ausencia de interferencias en este caso.

Ésta forma de estructurar el espectro no permite un aprovechamiento óptimo de los recursos radio al poder existir bandas adjudicadas cuyos operadores no explotan completamente. Además, la evolución reciente de las tecnologías de telecomunicación y la aparición de nuevas aplicaciones y servicios inalámbricos, ponen de manifiesto la necesidad de más espectro y de una mejor gestión de éste para dar cabida a la demanda de frecuencias de una forma eficiente.

En la búsqueda de nuevas frecuencias para futuros servicios, han sido llevado a cabo números estudios para evaluar la posibilidad de aprovechamiento de banda cada vez más altas, llegando actualmente a considerar el uso de frecuencias de decenas de gigahercios. Sin embargo, este tipo de soluciones plantean problemas de implantación y despliegue a causa de los altos precios de los equipos al no existir economía de mercado para ello todavía. Como alternativa, ante la dificultad económica y tecnológica de subir en frecuencia, se ha optado en multitud de ocasiones por emplear bandas, ya destinadas a servicios concretos, para espectro compartido. En la coexistencia entre tecnologías se puede hacer de uso de bandas de guarda o canales sin utilizar, permitiendo así optimizar el uso del espectro con una gestión más eficiente de las distintas bandas [6][7].

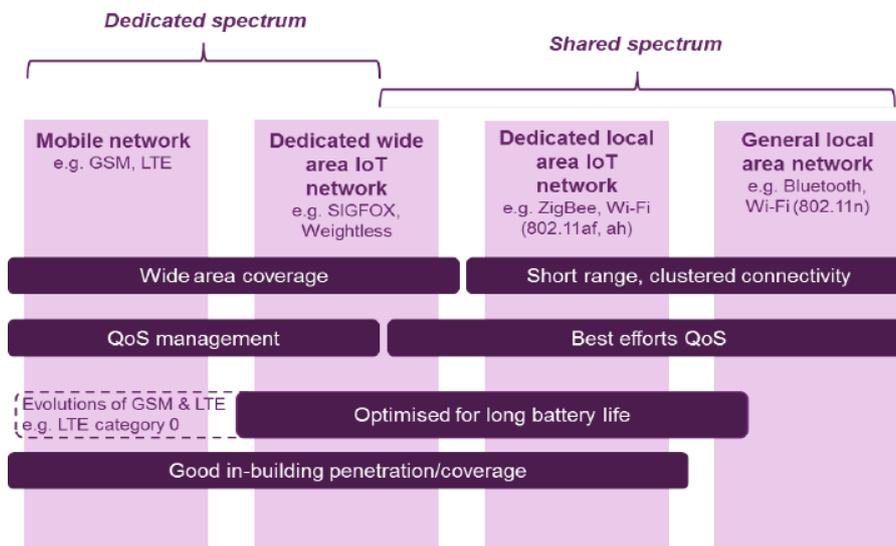


Figura 4. Ejemplos y características de espectro dedicado y compartido (Fuente: Ofcom [6]).

Si se comparan las ventajas y desventajas que posee cada modo de asignación, el modo de espectro dedicado permite un control de los parámetros de transmisión y funcionamiento de una tecnología radio con gran flexibilidad y control sobre el área de cobertura debido a que no existen interferencias en la misma banda. Sin embargo, en espectro compartido es necesario determinar unos límites técnicos que permitan garantizar el funcionamiento de ambas tecnologías con una calidad suficiente y siempre priorizando al servicio primario implantado con anterioridad. Tal y como se observa en la Figura 4, las aplicaciones con requerimientos de trabajo no demasiado estrictos (ej. QoS Best Effort, cobertura a corta distancia, etc...) son las más adecuadas para aprovechar los huecos que se presten a espectro compartido, como es el caso de WiFi o Bluetooth, mientras que tecnologías de comunicaciones móviles como LTE requieren espectro dedicado para prestar un servicio con garantías y calidad controlada.

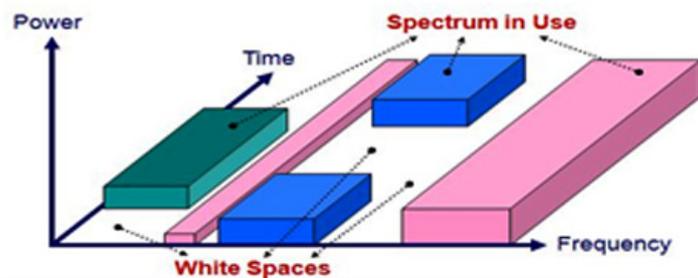


Figura 5. Ejemplo de White Spaces de tipo temporal/frecuencial.

Para optimizar el espectro radioeléctrico existe la posibilidad de hacer un mejor uso de bandas de frecuencias que no estén siendo utilizadas eficientemente. Estos huecos en el espectro radioeléctrico, tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia, que no son usados por los servicios o tecnologías que tienen asignada dichas frecuencias, son conocidos como espacios en blanco o *White Spaces*. La Figura 5 muestra claramente el concepto de *white space*, aprovechando espacios en el eje de la frecuencia o intervalos temporales en los que no se transmite en un canal concreto. En el caso concreto de la televisión digital terrestre (TDT), la variable asignación geográfica de canales produce que existan ubicaciones en las que un canal esté sin utilizar proporcionando un hueco de 8 MHz libre. Este fenómeno se representa en la Figura 6 donde se observa un ejemplo para un caso del Reino Unido (UK).

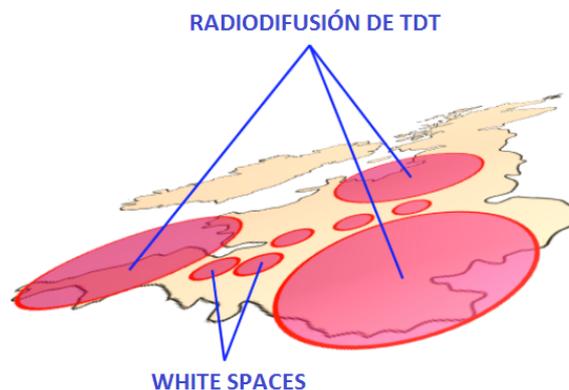


Figura 6. Ejemplo de White Spaces de tipo espacial en UK.

La banda de UHF, destinada a televisión digital, posee un gran porcentaje de espectro considerado como espacios en blanco, según apuntan diversos estudios realizados en Europa [13], que puede ser explotado de forma eficiente por nuevas tecnologías y servicios. Sin embargo, esta banda ha sufrido en los últimos años diversas modificaciones y cambios en su diseño y naturaleza debido al gran interés que los operadores de banda ancha móvil han puesto en ella, que requieren tenerse en cuenta para considerarla como opción para espectro compartido.

La banda de UHF (470-862 MHz), fue destinada al servicio de radiodifusión ya desde el principio de las primeras emisiones de televisión terrestre analógicas, y fue entre 2006 cuando la ITU aprueba en el Plan de Ginebra (GE06) y en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones de 2007 (CMR-2007) cuando se acuerda realizar el cambio al servicio de televisión digital terrestre (TDT) y poner en marcha el conocido “Dividendo Digital”. El proceso de digitalización permitió optimizar el espectro al conseguir transmitir con modulaciones más eficientes y transmitir el mismo número de canales en menor ancho de banda, hecho que provocó la presión de los sectores de servicios de banda ancha móvil para reestructurar la banda de UHF en favor de conseguir parte de la banda de televisión mediante un dividendo. Finalmente, como muestra la Figura 7, la sub-banda de 790-882 MHz (banda de 800 MHz) correspondiente a los canales 61 al 69, fue cedida a servicios de telefonía móvil de cuarta generación (4G) [8].

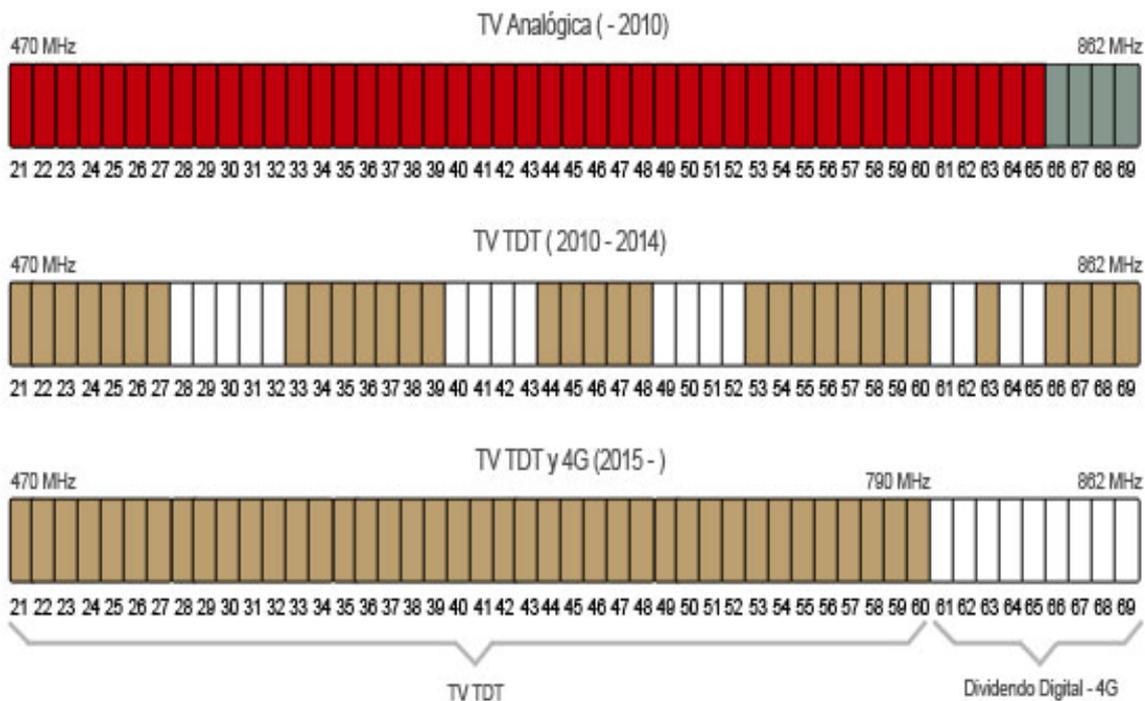


Figura 7. Banda de UHF con difusión analógica y con difusión digital, antes y después del primer dividendo digital.

Tras la reestructuración del primer dividendo digital, ante las nuevas reivindicaciones de los operadores móviles para atribuir en co-primario otro bloque de la banda, se acordó en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones 2012 (CMR-12) la asignación de un segundo dividendo digital de la sub-banda de frecuencias 698-790 MHz (banda de 700 MHz) que incluía los canales del 50 al 60 de UHF. Aunque finalmente, se pospuso la decisión hasta que en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones 2015 (CMR-15) se definió de forma definitiva la estrategia a seguir para ceder la banda de 700 MHz para el 2020, con un margen de dos años, y coincidiendo con la implantación de las tecnologías de 5G [9]. Con respecto a las bandas inferiores (470-694MHz), se determinó que podrían ser empleadas para servicios de banda ancha únicamente en *downlink* (unidireccional) siempre que se mantuviera la calidad del servicio primario de TDT, y se acordó que en 2025 y 2030 se realizarían revisiones de la banda para plantear la situación y futuro de la banda de UHF [10][11]. Estudios como el realizado por el *Electronic Communications Committee (ECC)* en 2014, plantean la posibilidad de destinar la banda inferior a 700MHz a redes LTE bidireccionales o incluso a nuevas tecnologías de comunicación, lo que sitúa a la banda de TDT en el centro de estudios e investigaciones para la búsqueda de futuros usos para dichas frecuencias [12].

los atascos mediante guiado y señalización inteligente, medición meteorológica y de niveles de contaminación para mejorar el compromiso con el medio ambiente o prevenir accidentes laborales o de conducción. En ambientes domésticos, se podrá tener un control remoto de los electrodomésticos del hogar como el aire acondicionado, el frigorífico o la iluminación, que podrán permitir climatizar el hogar para tener una temperatura concreta al llegar, conocer qué debemos comprar o que productos están a punto de caducar, además de permitir un control rápido y cómodo de los elementos básicos de la casa.



Figura 9. Ejemplo de conexión IoT.



Figura 10. Ejemplo wearable de Smartwatch.

En definitiva, una red capaz de soportar todo lo que conlleva el Internet of Things y proporcionar una conexión total y global, mejorará de forma radical muchas áreas de la sociedad como la educación, las comunicaciones, el gobierno, el medio ambiente, la economía o la ciencia, dirigiendo a la humanidad hacia el camino del progreso en todos los ámbitos y niveles. Sin embargo, el IoT trae consigo numerosos desafíos que deben afrontarse seriamente para poder llevar a cabo un despliegue global y operativo, tales como la seguridad y privacidad o la necesidad energética. Deben desarrollarse pues, mecanismos que garanticen la privacidad y la seguridad al hacer uso de los dispositivos y objetos conectados a la red que podrían ser atacados por elementos maliciosos en busca de información. Además, paralelamente al desarrollo de una red que permita conexiones a nivel global, también es necesario la mejora e implantación de redes eléctricas, con nuevas fuentes de energía, que permitan alimentar billones de dispositivos y baterías que pueden tener modos de funcionamiento ininterrumpidos de 24/7 [14].



Figura 11. Importancia de la seguridad y suministro energético en el IoT.

3.2.2 Requerimientos

Actualmente, aunque no se ha escogido una tecnología definitiva para el estándar de IoT, sí que se han definido aquellos requisitos que deberá cumplir según las expectativas que se tiene de las aplicaciones consideradas [1][2]. Dichos requisitos conforman las bases que decidirán finalmente cuál es la mejor opción tecnológica para incluir en el proceso de estandarización. Estos se detallan a continuación:

- **Soporte de un número masivo de dispositivos**

Según estudios realizados por la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT), junto a los fabricantes Cisco y Nokia, pronostican que el crecimiento de dispositivos u objetos conectados está aumentando de forma exponencial en los últimos años, esperándose tener para 2020 entre 25 y 50 billones [4][5]. Se estima que cada hogar dentro de una microcelda IoT tendrá en media 40 dispositivos conectados, por tanto, la tecnología que aspire a ser estándar tendrá que afrontar esta alta densidad de conexiones sobretodo en ambientes urbanos.

- **Baja tasa de transmisión (throughput)**

Debido al tipo de aplicaciones que contempla el Internet of Things, se espera que los dispositivos empleen modos de funcionamiento a ráfagas con reportes periódicos a intervalos regulares, con poca información por reporte, por lo que las tasas de bit que se manejarán serán bajas. Se ha establecido que el valor de *throughput* para dichos objetos oscilará sobre los 250 kbps.

- **Complejidad reducida**

Teniendo en cuenta que se considera una implantación masiva de dispositivos IoT, se busca tener dispositivos baratos cuya complejidad sea lo menor posible con un funcionamiento sencillo y que reduzcan tanto el despliegue (CAPEX) como el mantenimiento (OPEX) de estos.

- **Eficiencia energética**

Dentro del gran abanico de aplicaciones y escenarios que contempla IoT, destaca el uso de sensores remotos o dispositivos aislados como pueden ser alarmas distribuidas por un edificio, sensores meteorológicos en zonas rurales o detectores de presencia en farolas inteligentes entre otros. De esos dispositivos se espera que tengan una vida útil larga, del orden de hasta 10 años, existiendo la posibilidad en algunos casos de pasar largos periodos de tiempo en modo reposo sin transmitir. En tales situaciones la eficiencia y vida de las baterías juegan un papel decisivo.

- **Latencia limitada**

Los requisitos de respuesta deben cumplir con criterios de latencia razonables, siendo más estrictos en aquellas aplicaciones que lo requieran, como es el caso de alarmas cuyo tiempo de respuesta tiene que cumplir un perfil concreto. En general, cuando no sea crítico, se consideran apropiados retardos de hasta 10 segundos en el *uplink*.

- **Cobertura extendida y de interiores**

Muchas aplicaciones y dispositivos IoT tendrán como escenario de funcionamiento zona interiores de viviendas residenciales, edificios o en alturas próximas al nivel de suelo, lo que implica que la cobertura en interiores deba ser posible y robusta frente a errores. Además, la cobertura a cubrir debe ser amplia considerando hasta 20 dB adicionales en las MCL respecto a los sistemas clásicos de conexiones GPRS.

3.2.3 Posibles Tecnologías Propuestas

- **Tecnologías de aplicaciones específicas**

En los últimos años, ha ido emergiendo una gran variedad de tecnologías de comunicación mostrando una gran diversidad de aplicaciones y de requerimientos de comunicación dentro de la visión IoT. Algunas de estas tecnologías, se han establecido en ámbitos de aplicaciones específicas como pueden ser los ejemplos de: *Bluetooth* de bajo consumo para aplicaciones en redes de área personal y *Zigbee* para sistemas de hogar digital. Otras aplicaciones poseen un alcance más amplio abarcando una diversidad de aplicaciones mayor como puede ser el caso de: WiFi, redes de área amplia y bajo consumo o *Low Power Wide Area* (LPWA), y redes de comunicaciones tipo MTC (*Machine Type Communications*) basadas en estándar del 3GPP. Sin embargo, todas ellas han sido descartadas como tecnologías

aptas para acoger el IoT debido a que no cumplen la totalidad de requisitos que se han comentado en el apartado anterior.

- **Tecnologías propuestas por el 3GPP**

Tras años de estudio e investigación, en 2016 el *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) presentó en el Congreso Mundial de Móviles (CMM-2016) [3] las tres tecnologías de banda estrecha candidatas para soportar IoT y formar parte del estándar. Todas ellas son capaces de hacer frente a los problemas y requisitos que demanda IoT, a diferencia que las tecnologías anteriores, además de permitir un despliegue junto a las redes móviles actuales basadas en LTE y GSM. A continuación, se detallan brevemente:

- 1) **Narrow Band LTE for Internet of Things (NB-LTE).** Basada en LTE, con un ancho de banda de 200 kHz y con tres modos de operación: en banda, en banda de guarda y de forma independiente. Permite duplexado en frecuencia del UL y DL (FDD) y tasas de bit hasta 250 kbps en DL y UL (con multitono).
- 2) **Enhancements for Machine Type Communications (eMTC).** Basada en LTE, con un ancho de banda de 1.08 MHz y diseñada para trabajar en banda de LTE. Permite duplexado en tiempo (TDD) y frecuencia (FDD) y tasas de transmisión de hasta 1 Mbps para DL y UL.
- 3) **EGPRS enhancements for Internet of Things (EC-GSM).** Basada en GSM, con un ancho de banda de 200 kHz y diseñada para trabajar en banda de GSM. Permite duplexado en frecuencia (FDD) y tasas de transmisión de hasta 240 kbps con modulación 8PSK.

De las tres tecnologías candidatas, se ha impuesto como opción predominante la de NB-LTE respaldada por el 3GPP y los principales fabricantes del sector de telecomunicaciones. Ésta, presenta ciertas ventajas respecto al resto por permitir distintos modos de operación que facilitan su despliegue y puesta en funcionamiento teniendo más flexibilidad. Además, al basarse en LTE, permite una mejor compatibilidad con los servicios móviles actualmente implantados siendo una opción con menores costes de implementación respecto eMTC. La tabla siguiente realiza una comparativa, a modo de resumen, de todas las tecnologías propuestas mostrando cuales son los requisitos que cumplen o no, en la cual se observa que NB-IoT es la única que permite cumplir todos los requerimientos establecidos [2].

	ZigBee	Bluetooth	Wifi	LPWA	3GPP Rel8	NB-IoT
Escalabilidad	NO	NO	SI	NO	SI	SI
Fiabilidad	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Bajo Consumo	SI	SI	SI	SI	NO	SI
Baja Latencia	NO	SI	SI	NO	SI	SI
Cobertura Amplia	NO	NO	SI	SI	SI	SI
Bajo Coste / Unidad	SI	SI	SI	SI	NO	SI
Permite Movilidad	NO	NO	NO	NO	SI	SI
Permite Roaming	NO	NO	NO	NO	SI	SI

Tabla 1. Comparativa de las distintas tecnologías en relación a los requerimientos IoT.

- **NB-LTE (IoT)**

La tecnología NB-LTE para Internet of Things propuesta por el 3GPP [1], se basa en la utilización de anchos de banda de 200 kHz, con un total de 12 subportadoras por canal y con bandas de guarda a ambos lados de 10 kHz, tal y como se observa en la Figura 12.

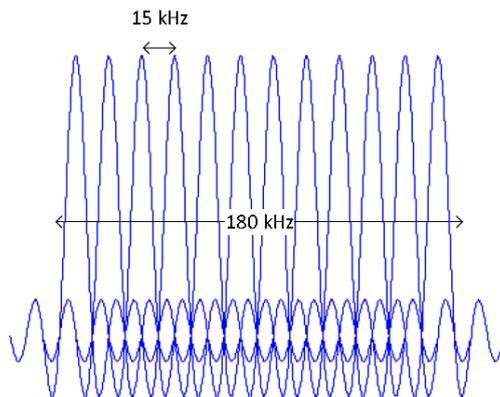


Figura 12. Una portadora NB-LTE consiste en 12 subportadoras con 15 kHz de separación.

El canal descendente o *downlink* está basado en OFDMA (*orthogonal frequency division multiple access*) empleando los mismos parámetros que usa LTE referidos a separación entre subportadoras, tiempo de símbolo, formato de slot, duración de slot y duración de subframe. Sin embargo, NB-LTE introduce una unidad temporal denominada “M-Subframe” de duración 6 ms, que se forma al agrupar 6 subframes, para compensar el hecho de que el ancho de banda es un sexto del ancho de banda mínimo permitido por LTE (1.4 MHz). La siguiente figura permite apreciar cuál es el esquema temporal de NB-LTE para *downlink*.

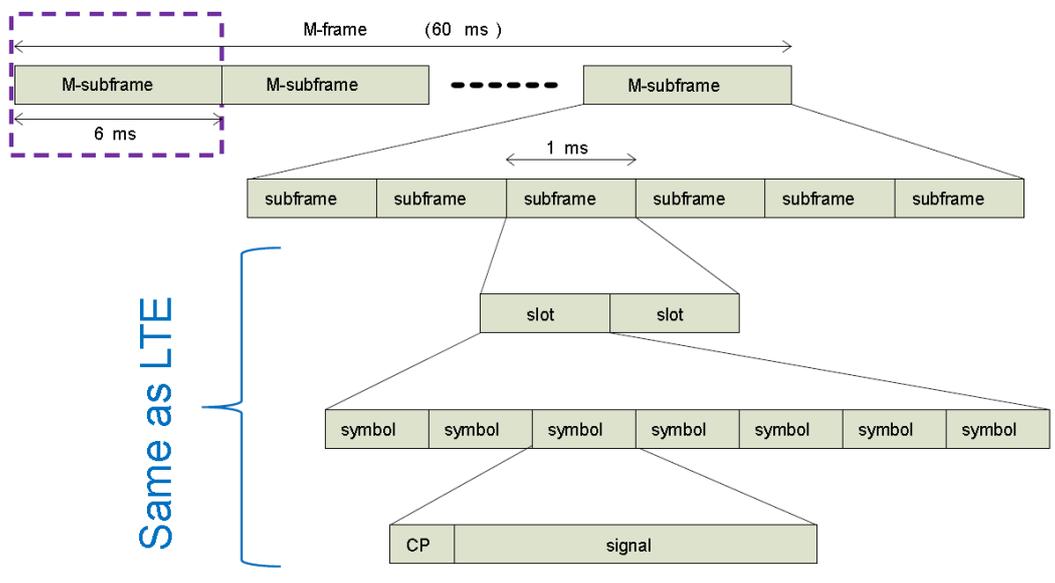


Figura 13. Esquema temporal para el downlink de NB-LTE.

Para crear la señal en transmisión, se parte de la información binaria inicial y se recorre el diagrama de bloque que muestra la Figura 14, en el cual se codifica y modula la señal, además de introducir redundancia y sistemas de protección, y se mapea en el tiempo y la frecuencia antes de entrar en el bloque de IFFT e introducir el prefijo cíclico para proteger la señal frente a la interferencia entre símbolos y el multicamino.

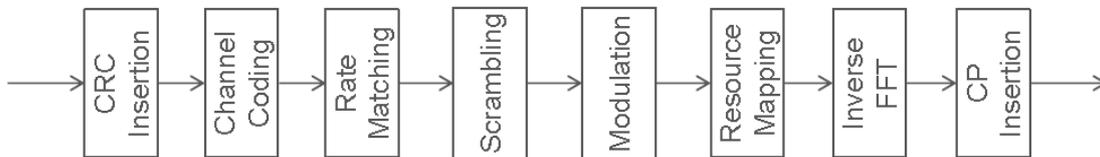


Figura 14. Diagrama de bloques para la transmisión de la señal NB-LTE en downlink.

Por lo que respecta al canal ascendente o *uplink*, la modulación utilizada es SC-FDMA (*Single Carrier - Frequency Division Multiple Access*), además el espaciado entre subportadoras es de 2,5 kHz para permitir mayores CPs y así tener mayor robustez en el borde del área de cobertura, además de permitir un mayor número de usuarios multiplexados en frecuencia y obtener mejores valores de PAPR. En este caso, debido al cambio de espaciado de las subportadoras, se produce un ensanchado temporal por un factor proporcional (x6) consiguiendo así el mismo número de recursos radio que en *downlink* también en 6 ms, como se observa en la Figura 15.

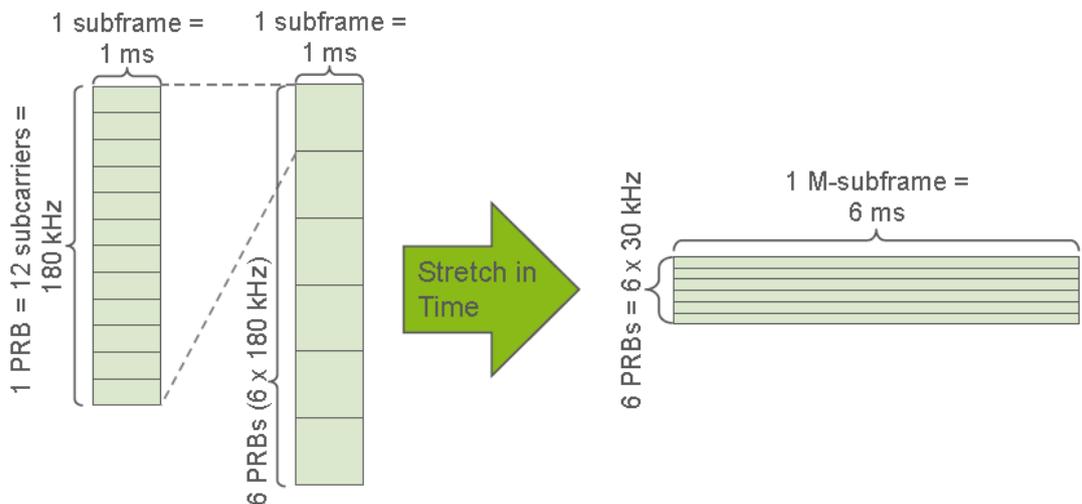


Figura 15. Reestructuración temporal de los recursos radio NB-LTE en uplink.

Por tanto, al extender el subframe en el tiempo, el esquema temporal de NB-LTE para uplink queda como se muestra en la Figura 16, donde dos slots corresponden directamente a un M-subframe.

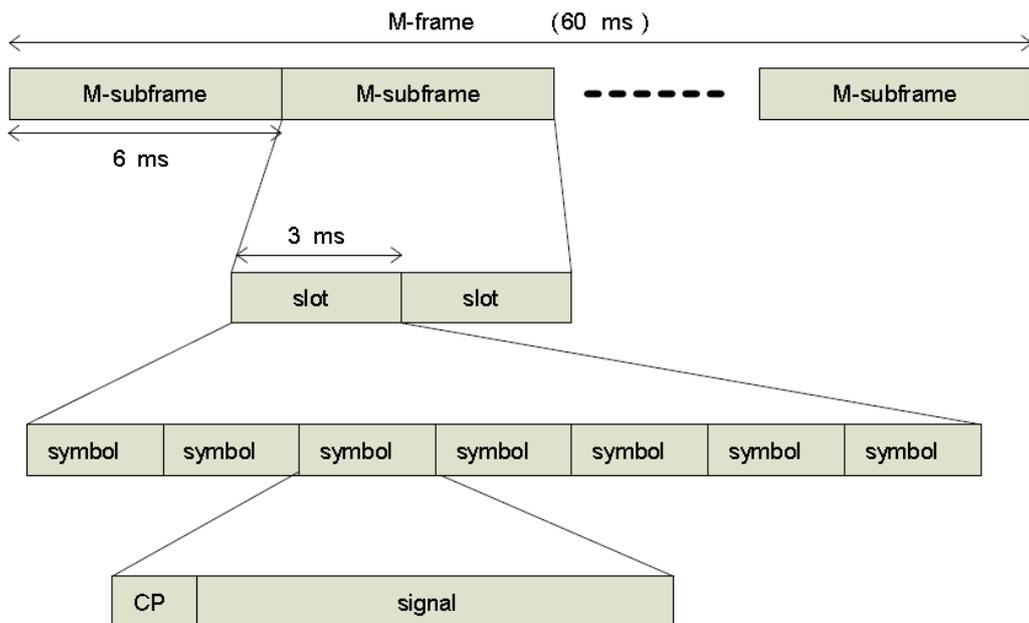


Figura 16. Esquema temporal para el uplink de NB-LTE.

Por último, al igual que en el *downlink*, para crear la señal NB-LTE se debe recorrer el diagrama de bloque que se muestra en la siguiente figura y que varía ligeramente respecto al canal descendente al utilizar otro tipo de modulación.

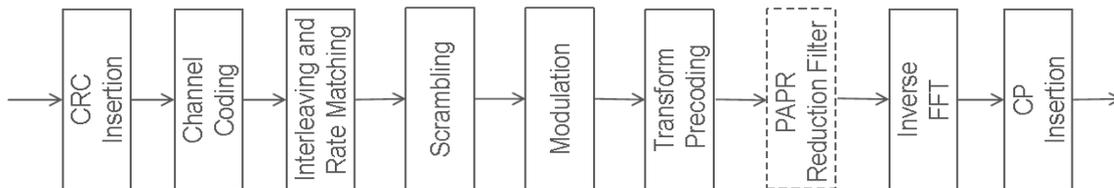


Figura 17. Diagrama de bloques para la transmisión de la señal NB-LTE en uplink.

3.3 Tecnologías propuestas para espectro compartido. TDT bajo el estándar DVB-T2

Como se ha comentado en los puntos anteriores, la banda de UHF atribuida a la televisión digital terrestre (TDT) posee características muy interesantes y la posibilidad de ser aprovechada por otras tecnologías con espectro compartido haciendo un uso eficiente de los espacios en blanco. La tecnología utilizada para la difusión de televisión en todo el mundo varía en función de la zona geográfica, existiendo actualmente cuatro grandes estándares diferentes para televisión digital; (I) DVB-T (*Digital Video Broadcasting Terrestrial*) y su evolución DVB-T2, en Europa, Oceanía, parte de África, Asia, y América; (II) ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*) en Japón, parte de Centro y Suramérica; (III) ATSC (*Advanced Television System Committee*) en Norteamérica y algunos países del Caribe; (IV) DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*) en China, tal y como se observa en la Figura 18:

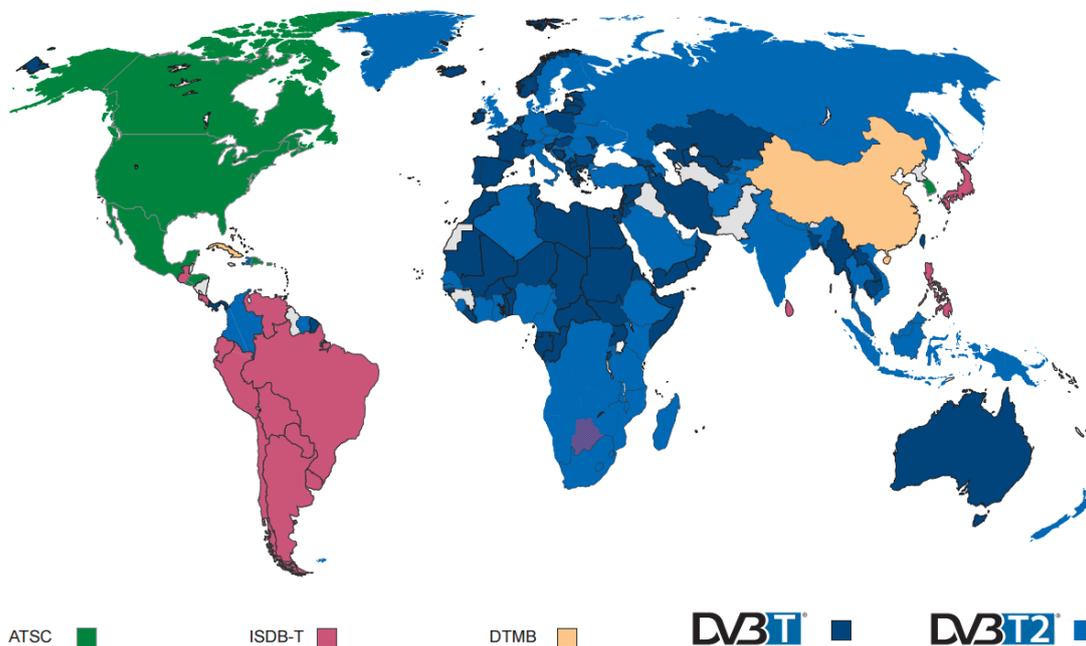


Figura 18. Adopción y despliegue de los estándares de TDT en el mundo. Fuente: www.dvb.org

Este proyecto ha escogido como estándar el de segunda generación de televisión digital DVB-T2 para realizar los estudios de coexistencia al ser el más extendido del mundo, ya sea por estar actualmente implantado en muchos países o por ser la opción natural de evolución de todos aquellos que continúan utilizando la versión anterior de DVB-T. Éste, además, proporciona velocidades de transmisión en un mismo ancho de banda como mínimo un 50% mayor con respecto a cualquier otro estándar de TDT. Sus características técnicas permiten la transmisión de diferentes tipos de servicio (TV en calidad estándar SD, TV en alta definición HD, TV en tres dimensiones 3D, o TV móvil) en un mismo múltiplex (frecuencia) con diferentes parámetros de transmisión, así mismo la configuración de redes con única frecuencia.

El estándar de DVB-T2 se fundamenta en el uso de modulación OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplex*) con diversas opciones de número de portadoras y constelaciones, además de una protección frente a errores basada en LDPC y BCH. Por lo que se refiere a la estructura temporal, en DVB-T2 se tienen tramas de 250 ms denominadas “T2 Frame”, que se combinan para formar las denominadas súper tramas de duración máxima de 64 segundos. En la Figura 19 se puede observar parte del esquema temporal completo que utiliza el estándar.

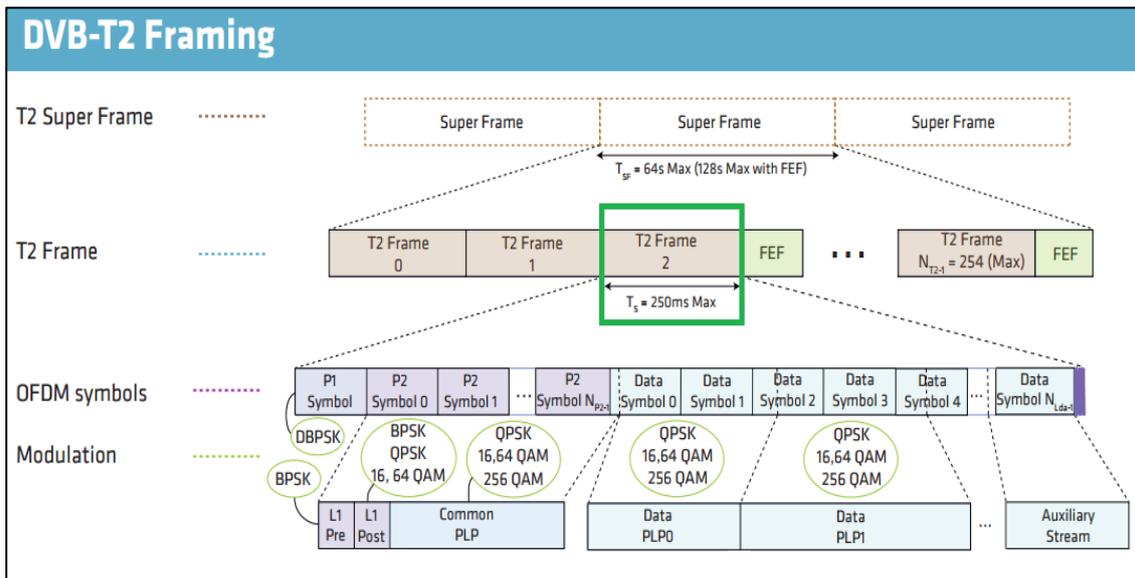


Figura 19. Estructura temporal de DVB-T2.

Por último, en relación a las características espectrales de la señal DVB-T2, esta posee anchos de bandas configurables que van desde 1,7 a 10 MHz, siendo 8 MHz el ancho utilizado en la canalización europea (caso considerado en este estudio). Al emplear modulación OFDM se consigue caídas muy abruptas en los extremos permitiendo así aproximar mucho los distintos canales y aprovechar el espectro disponible que se tiene asignado.

4. Descripción de los Escenarios

En el estudio para evaluar la banda UHF como posible banda de espectro compartido, se considera una red DVB-T2 de televisión digital terrestre (TDT) ofreciendo cobertura para recepción fija sobre tejado, como servicio primario, y una red NB-LTE para servicios IoT haciendo uso de *TV-White Spaces*, como servicio secundario. Los escenarios seleccionados para el estudio de coexistencia, cubren las principales aplicaciones que se consideran para el despliegue del ecosistema IoT, abarcando los principales entornos de despliegue, entre los que se encuentran el medio urbano o suburbano, el medio rural y zonas de interiores. Para conseguir diversidad de resultados, se han escogido una o dos aplicaciones concretas por cada entorno teniendo un total de 5 casos bajo estudio. Los distintos casos considerados se encuentran listados a continuación:

- 1) **Entorno Urbano o Suburbano**, caracterizado por edificios altos, calles amplias y con alto nivel de tránsito, tanto peatonal como de vehículos.
 - Caso A: Aparcamiento Inteligente (*Smart Parking*), basado en detección de vehículos estacionados en la calzada, como aplicación concreta dentro de proyectos de ciudades inteligentes (*Smart Cities*).
 - Caso B: Monitorización de la Congestión del Tráfico (*Traffic Congestion*), basado en monitorización continua del estado del flujo de tráfico, como aplicación concreta dentro de proyectos de ciudades inteligentes.
- 2) **Entorno Rural**, caracterizado por extensiones de terreno amplio y sin obstáculos, típico de zonas de cultivo agrícola o de ganadería.
 - Caso C: Monitorización Agraria Inteligente (*Smart Farming Monitoring*), basado en monitorización de cultivos y centros ganaderos, como aplicación concreta dentro de proyectos de agricultura inteligente (*Smart Agriculture*).
 - Caso D: Control y Seguimiento de Animales y Ganado (*Animal Tracking*), basado en localización continua de rebaños, como aplicación concreta dentro de proyectos de ganadería inteligente.
- 3) **Entorno de interior**, considerando el interior de un hospital de varias alturas, rodeado de edificios de alturas similares con el sistema IoT desplegado en el interior de la infraestructura.
 - Caso E: Vigilancia de Pacientes (*Patients Surveillance*), basada en monitorización de personal hospitalario, como aplicación concreta dentro de proyectos de salud inteligente (*eHealth*).

En cada uno de los casos, se proporcionan las alturas consideradas para posicionar a los dispositivos IoT, que serán utilizadas posteriormente, como se indica en el apartado de metodología, para el cálculo de las pérdidas del canal según la configuración concreta de los elementos.

4.1 Configuración General

Para todos los escenarios propuestos, la señal útil de DVB-T2 trabaja con un ancho de banda de 8 MHz, según la canalización europea, y la señal interferente NB-LTE tiene un ancho de banda de 200 KHz, tanto para el enlace ascendente como descendente, tal y como describe el estándar.

Para contemplar el peor caso y poder obtener resultados concluyentes, se ha asumido que existe línea de visión directa (LOS) y que las pérdidas de propagación son las menores posibles entre los elementos IoT y la antena receptora de TDT, tanto para el enlace descendente (*downlink*) como para el ascendente (*uplink*) de NB-LTE. El considerar las mínimas pérdidas es debido a que éstas se modelan como una ganancia adicional para la PIRE transmitida desde el punto de vista de los dispositivos IoT por los efectos de propagación y la geometría del canal, por tanto, es el caso más restrictivo para el balance de potencias. La altura de la antena de TDT se ha tomado de 10 metros sobre el nivel del suelo, siendo la altura típica recomendada por la EBU [15] para recepción fija sobre tejado, y para los dispositivos y nodos IoT se han tomado distintas alturas en función del escenario y aplicación concretos considerado [16].

Los distintos escenarios y aplicaciones consideradas pueden verse representados de forma conjunta en la Figura 20, donde se muestra: por un lado, la zona urbana y de interiores (parte superior derecha); y, por otro lado, la zona rural (zona central izquierda).

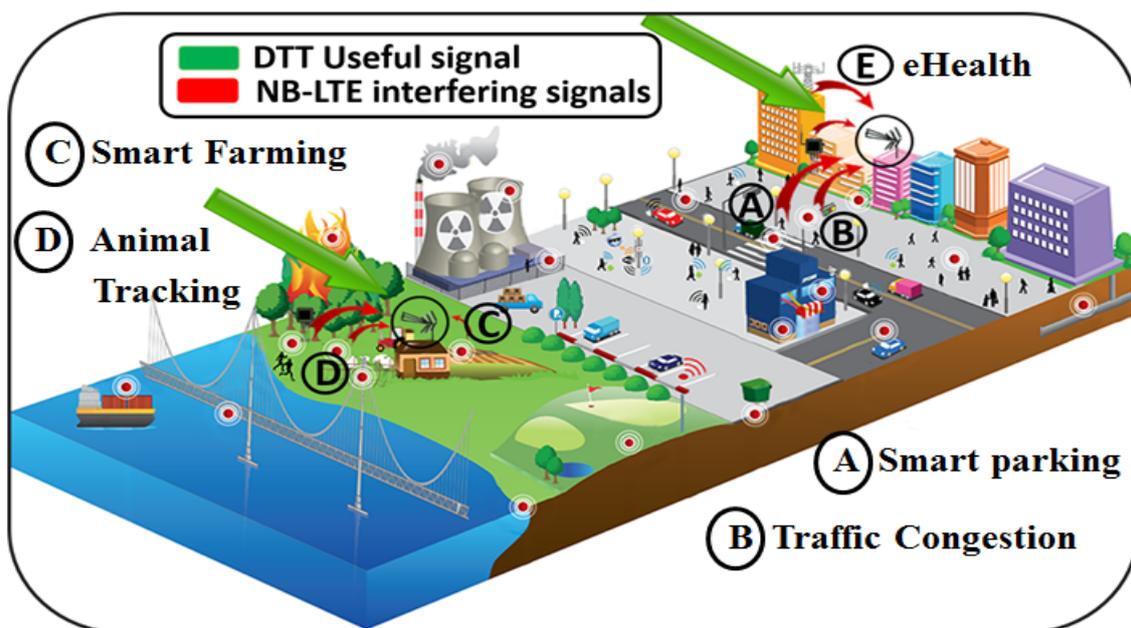


Figura 20. Topología general con todos los escenarios bajo estudio (Fuente: Libelium).

4.2 Escenario 1: Ciudad Inteligente (Smart Cities) - Urbano

Este primer escenario, considera un entorno urbano o suburbano caracterizado por edificios de 2 o 3 plantas, con calles amplias y transitadas, con movimiento constante de vehículos y peatones. Los casos propuestos para este escenario de ciudad inteligente (*Smart Cities*) son “Aparcamiento inteligente” (*Smart Parking*) y “Monitorización de la Congestión del Tráfico” (*Traffic Congestion*), los cuales se detallan a continuación.

4.2.1 Caso A: Aparcamiento inteligente (Smart Parking)

La aplicación de aparcamiento inteligente se basa en detectar la presencia o no de un vehículo estacionado en los distintos puntos de la calzada que están destinados a dicha función. En este escenario se considera la existencia de una red de sensores IoT fijos que se encuentran situados a nivel de suelo y que se encargan de realizar la detección de presencia en las diferentes plazas de aparcamiento. Cada uno de estos dispositivos realiza reportes periódicos a un nodo cercano, el cual tiene varios sensores bajo su control, y que está situado a altura de farola o semáforo (5 metros) [17], tal y como se puede observar en la Figura 21. En este caso, la interferencia se produce por el alcance de parte de la señal IoT, de los reportes entre nodos y dispositivos, con la antena de TDT situada en lo alto del edificio próximo.

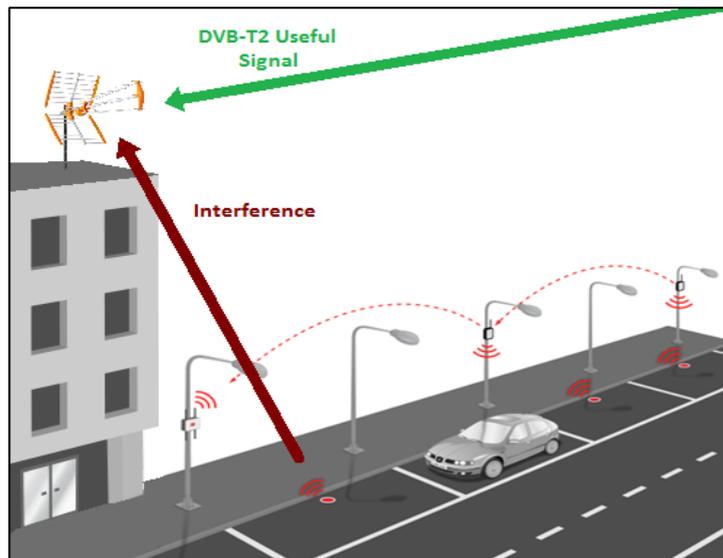


Figura 21. Topología en Smart Parking.

4.2.2 Caso B: Monitorización de la Congestión del Tráfico (Traffic Congestion)

La aplicación de monitorización de la congestión del tráfico se basa en el uso de una red de sensores IoT que están situados a una altura de 4 metros [18], sobre postes o semáforos, los cuales detectan el flujo de tráfico de la carretera de forma continua. Estos sensores realizan reportes de forma periódica, con el resumen del estado del tráfico, al nodo más cercano como se puede observar en la Figura 22. En este caso, la interferencia se produce por el alcance de parte de la señal IoT, de los reportes entre nodos y dispositivos, con la antena de TDT situada en lo alto del edificio próximo.

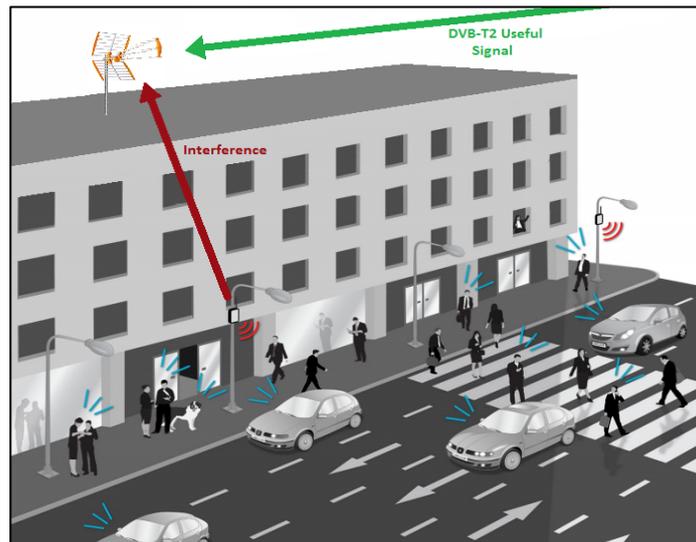


Figura 22. Topología en Traffic Congestion.

4.3 Escenario 2: Agricultura y Ganadería Inteligente - Rural

Como segundo escenario, se supone un entorno rural caracterizado por extensiones de terreno amplio y sin obstáculos en el cual existe una estructura o edificación principal, perteneciente a una granja o centro de cultivo, donde se sitúa la antena receptora de TDT. Los casos propuestos para este escenario de agricultura y ganadería inteligente son “Monitorización Agraria Inteligente” y “Control y Seguimiento de Animales y Ganado”, los cuales se detallan a continuación.

4.3.1 Caso C: Monitorización Agraria Inteligente (Smart Farming Monitoring)

La monitorización agraria inteligente es una aplicación concreta de agricultura inteligente y que se basa en la monitorización de los cultivos y el estado meteorológico de una zona agraria, mediante el uso de una red de sensores distribuidos a lo largo de la zona. Estos se sitúan a una altura de 3 metros [19] y realizan reportes de sus mediciones de forma periódica al nodo principal situado en la estructura central. La Figura 23 muestra la topología que sigue dicha aplicación, en la que la interferencia se produce debido a que la antena de TDT y el nodo IoT se encuentran ambos en la estructura central, donde colisionan ambas señales.

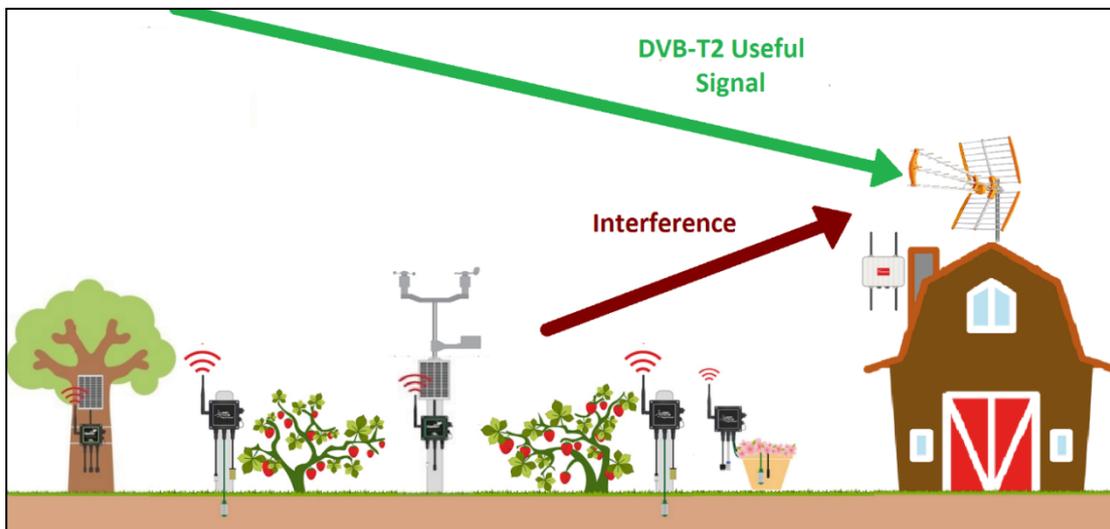


Figura 23. Topología en Smart Farming Monitoring

4.3.2 Caso D: Control y Seguimiento de Animales y Ganado (Animal Tracking)

El control y seguimiento de animales y ganado es una aplicación concreta de ganadería inteligente que se basa en la monitorización y localización continua en tiempo real de los animales de una granja o centro de ganadería. Cada uno de los animales lleva implantado, o sujeto mediante algún soporte, un dispositivo IoT a una altura media de 1.5 metros [19] que realiza reportes periódicos al nodo central, con información sobre la posición del animal siguiendo el esquema de la Figura 24. En este caso, la interferencia se produce debido a que la antena de TDT y el nodo IoT se encuentran ambos en la estructura central, donde colisionan ambas señales.

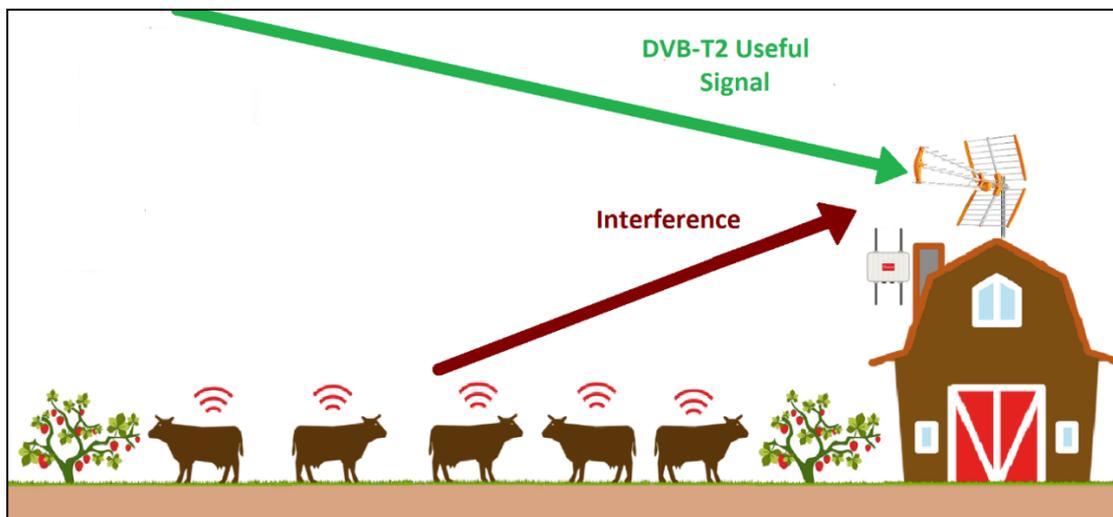


Figura 24. Topología para Animal Tracking.

4.4 Escenario 3: eHealth - Interiores

El último escenario, considera un entorno de interior (*indoor*) de un hospital de diversas alturas, el cual está rodeado de edificios. Para tratar el peor caso, se considera que el hospital es más alto que el edificio próximo donde se encuentra ubicada la antena receptora de TDT. En ésta situación tanto los dispositivos como el nodo IoT se encontrarán a la misma altura que la antena receptora de TDT, con línea de vista directa (LOS) con el único obstáculo que el cristal de las ventanas. La aplicación que se propone para este escenario de eHealth es “Vigilancia de pacientes”, la cual se detalla a continuación.

4.4.1 Caso E: Vigilancia de Pacientes (Patients Surveillance)

La vigilancia de pacientes en un entorno hospitalario se basa en la monitorización y localización continua de todos los pacientes y personal médico, mediante dispositivos IoT que poseen todos los individuos. Los dispositivos realizan reportes periódicos a diversos nodos distribuidos por todo el centro, con información de posición e identificación del individuo concreto. Para esta aplicación, la interferencia se produce debido a que parte de la señal IoT del interior del hospital traspasa el cristal de las ventanas y alcanza directamente a la antena de TDT, como muestra la Figura 25.

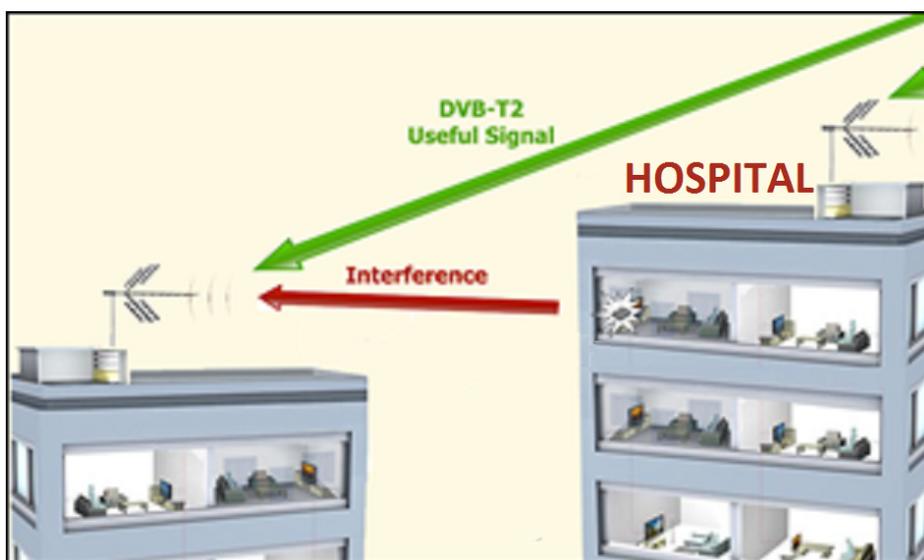


Figura 25. Topología en Patients Surveillance.

4.5 Resumen de alturas consideradas en cada escenario

La siguiente tabla recoge las alturas consideradas para los dispositivos IoT en cada uno de los escenarios considerados a modo de resumen para tener la información más localizada.

Escenarios		Alturas (m)		
		Dispositivos IoT	Nodos IoT	Antena TDT
Ciudad inteligente	Caso A (Smart Parking)	0	6	10
	Caso B (Traffic Congestion)	4		
Agricultura y Ganadería inteligente	Caso C (Smart Farming)	3		
	Caso D (Animal Tracking)	1.5		
eHealth	Caso E (Patients Surveillance)	10		

Tabla 2. Alturas de dispositivos IoT en cada uno de los escenarios considerados [16][17][18][19].

5. Metodología

La metodología que se ha llevado a cabo en este estudio para obtener resultados concluyentes y representativos que permitan decidir si es posible o no la coexistencia entre la televisión digital terrestre, bajo el estándar DVB-T2, e Internet of Things, con el estándar NB-LTE, para cada uno de los escenarios considerados, es descrita a continuación.

Para evaluar la coexistencia es necesario, en primer lugar, disponer de las señales implicadas y crear las condiciones apropiadas de interferencia para así poder realizar las mediciones oportunas. En los siguientes apartados, se presenta toda la instrumentación empleada, tanto para la generación de las señales como para la recreación del escenario de interferencia, englobando todos los equipos hardware o software y demás elementos utilizados.

El parámetro escogido para la evaluación de la coexistencia es el “Margen de Protección”, el cual se calcula considerando una potencia constante de la señal DVB-T2 de TDT de $-60\text{dBm}/8\text{MHz}$. El método de medición elegido para dicho parámetro es el de “Punto de Fallo Subjetivo”, basado en la visualización directa de la señal TDT recibida en una pantalla de televisión. Debido a la distinta naturaleza de los enlaces descendente y ascendente de NB-LTE, se han realizado medidas considerando transmisión continua en el tiempo para el *downlink* y transmisión a ráfagas para el *uplink*. En el caso de estas últimas, se ha recurrido al uso de distintos ciclos de trabajo para comprobar qué consecuencias tiene en los resultados de interferencia, como se explicará más adelante.

Tras el cálculo de los márgenes de protección, es posible calcular la máxima PIRE que pueden transmitir los nodos y dispositivos IoT para cumplir con los requisitos de interferencia a la entrada del receptor de TDT, sumándole a la sensibilidad del receptor de televisión el valor del margen de protección medido. Al valor que se obtiene, es necesario añadirle un factor debido a las pérdidas del canal que pueden considerarse como una ganancia desde el punto de vista de los dispositivos IoT para aumentar su PIRE y seguir cumpliendo los márgenes de protección a la entrada del receptor de TDT.

Por último, se calcula la tasa de bit de pico que es posible alcanzar para cada uno de los modos de funcionamiento de NB-LTE, teniendo en cuenta el ciclo de trabajo utilizado. Además, con las potencias calculadas es posible definir una máscara de borde de bloque (BEM) que deben cumplir los nodos y dispositivos IoT.

5.1 Instrumentación empleada

5.1.1 Generación y 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 (fase y cuadratura) para ser cargados en otros dispositivos, como por ejemplo en el R&S SMU 200A.

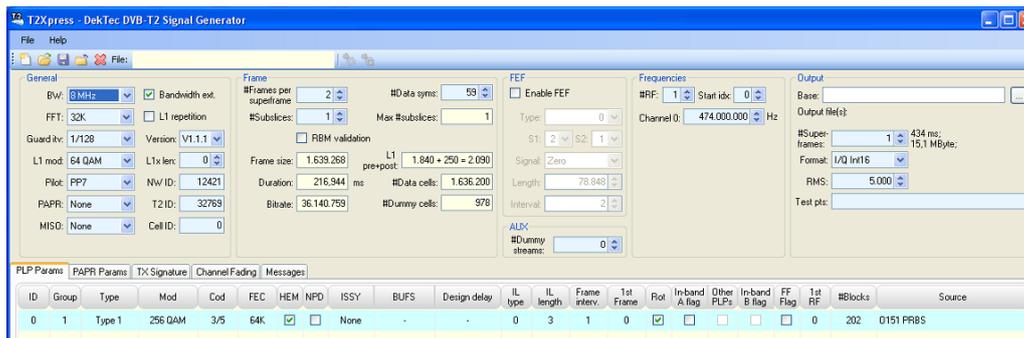


Figura 26. Interfaz del Transmisor DekTec T2Xpress DVB-T2 Signal Generator.

5.1.2 Recepción y Análisis de la señal DVB-T2

- **Set-Top Box Multitech DT2-M007:**

Receptor TDT a 6 y 8 MHz utilizado en este proyecto para obtener resultados sobre los márgenes de protección de señales DVB-T2.

- **Televisión SONY BRAVIA:**

Receptor empleado para medir las márgenes de protección de señales DVB-T2 a 8 MHz, interferidas por la señal NB-LTE en co-canal y adyacencia, de forma subjetiva.



Figura 27. Set-Top Box Multitech DT2-M007.



Figura 28. Televisión DVB-T2: SONY BRAVIA.

5.1.3 Generación y Transmisión NB-LTE (IoT)

- **MathWorks Matlab:**

Herramienta de Software matemático necesaria para la generación de la señal NB-LTE a partir de las especificaciones del estándar, mediante la programación de los algoritmos necesarios.

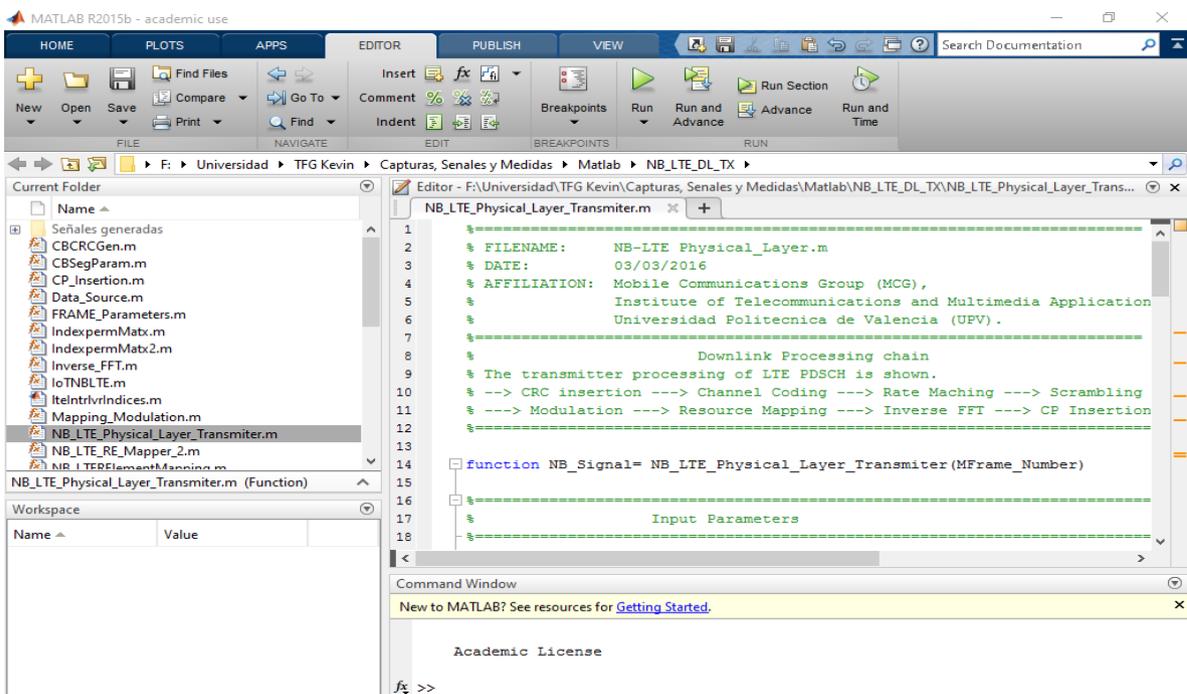


Figura 29. Interfaz de Matlab.

- **R&S ARB Toolbox Plus**

Paquete de software de R&S con multitud de funciones que permiten trabajar con formas de onda de cualquier tipo y que es necesario para importar los datos “.mat” de la señal NB-LTE, generados en Matlab, a un formato propietario “.wave” que pueda leer el SMU 200A.

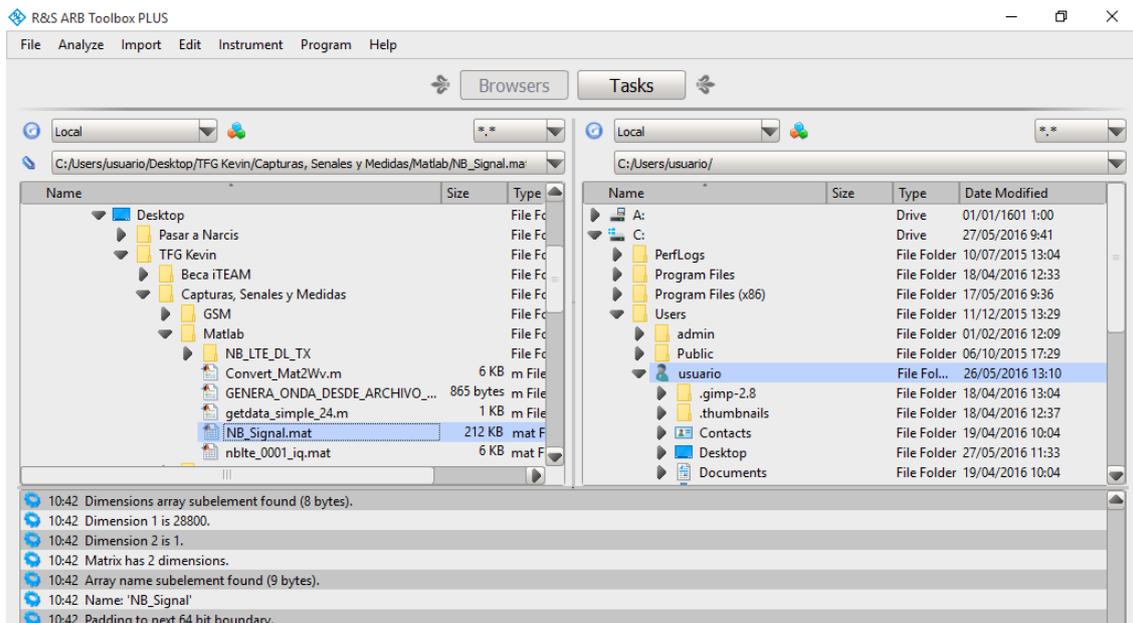


Figura 30. Interfaz del ARB Toolbox Plus de R&S.

- **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 NB-LTE). 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 31. R&S SMU 200A Vector Signal Generator.

5.1.4 Recepción y Análisis de ambas señales

- **Anritsu Spectrum Master MS270T (Spectrum Analyzer):**

Analizador de espectros utilizado para el análisis espectral de las señales implicadas en las medidas (DVB-T2 y NB-LTE) permitiendo observar las señales, medir sus niveles de potencia o realizar promediados, entre otras funciones. Posee una entrada de RF y entradas para trigger o señal de referencia.



Figura 32. Anritsu Spectrum Master MS270T (Spectrum Analyzer).

5.1.5 Otros dispositivos y cableado

- **Atenuador variables de Televés**

Atenuador variable del fabricante Televés, con un margen de atenuación de hasta 20dB, que permite ajustar el nivel de potencia proveniente del generador de la señal DVB-T2, para tener a la entrada del receptor de TDT (y a la entrada del analizador de espectros) un valor concreto de potencia.



Figura 33. Atenuador variable de Televés con un margen de 20dB.

- **Divisor, combinador y conectores pasivos**

Para el montaje de laboratorio, ha sido necesario el uso de un combinador en “T” para unir las dos señales involucradas, y un divisor en “T” para repartir la señal combinada entre el STB de TDT y el analizador de espectros. Además, para las transiciones y conexiones de los diferentes cables utilizados, se ha hecho uso de los conectores correspondientes.

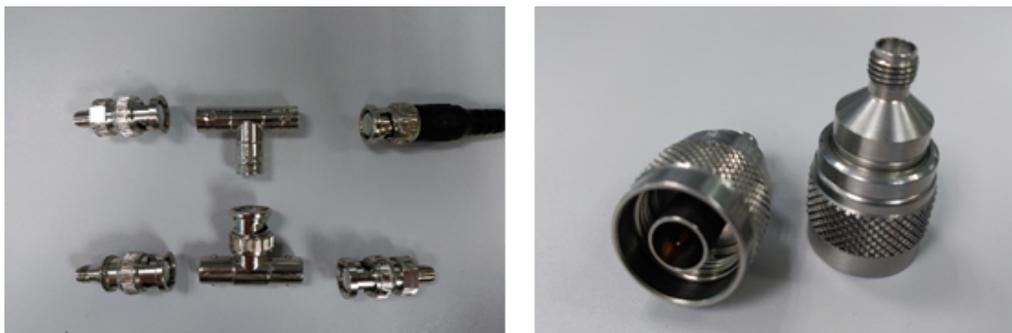


Figura 34. Divisor, combinador y conectores pasivos empleados.

- **Cableado**

En el montaje realizado, se ha hecho uso de tres tipos de cable distinto para la interconexión de los distintos elementos. En primer lugar, se ha utilizado el cable M17/152-00001 para la interconexión de: el SMU 200A con el combinador pasivo, la salida del atenuador variable con el combinador pasivo y una de las salidas del divisor pasivo con la entrada del analizador de espectros. Por otro lado, la conexión de la salida del divisor con el STB de TDT se ha implementado con un cable coaxial RG-59/U de 75 Ohm. Finalmente, la señal decodificada por el STB es transmitida a la televisión mediante un cable HDMI E340033 AWM Style 2027.



Figura 35. Cable M17/152-00001 de Harbour Industries (50 Ohm).



Figura 36. Cable coaxial RG-59/U de 75 Ohm.



Figura 37. HDMI E340033 AWM Style 2027.

- **Otros**

También se ha hecho uso de un algoritmo propio del iTeam, programado en Visual Studio, para conectar con el SMU 200A y controlar la transmisión con el fin de generar ciclos de trabajo. El algoritmo hace uso de instrucciones propias del equipo de R&S para obtener el resultado deseado.

```

public void ApagarFuente(int tiempo_activo, int tiempo_inactivo, int repeticiones, int pot)
{
    for (int i = 1; i < repeticiones; i++)
    {
        if (i % 2 == 0)
        {
            Emu200A.SendTelnetData("OUTP:ALL OFF");
            Thread.Sleep(tiempo_inactivo);
        }
        else
        {
            Emu200A.SendTelnetData("SOUR:POW " + Convert.ToString(pot).Replace(',', '.') + "dBm");
            Emu200A.SendTelnetData("OUTP:ALL ON");
            Thread.Sleep(tiempo_activo);
        }
    }
}

```

Figura 38. Programa en Visual Studio para generar ciclos de trabajo.

5.2 Generación de las señales de DVB-T2 y NB-LTE

5.2.1 Generación de la señal DVB-T2

La señal de TDT considerada para este estudio debe cumplir con el estándar para la región 1 de la ITU, correspondiente a la normativa europea con un ancho de banda de 8 MHz. Para la generación de dicha señal se ha hecho uso de una tarjeta moduladora controlada por el software “*DekTec T2Xpress DVB-T2 Signal Generator*”. Los parámetros de funcionamiento característicos de la señal DVB-T2 son los de un canal de televisión privado de Reino Unido (UK), tal y como se muestra en la Tabla 3:

DTT	
Parameter	Fixed Rx
Standard	DVB-T2
Modulation	256-QAM
Code Rate	2/3
FFT	32K Extended
Guard Interval	1/128 (28 μ s)
CNR (Rice)	20 dB
Pilot Pattern	PP7
Bandwidth	8 MHz

Tabla 3. Parámetros de funcionamiento de la señal DVB-T2 según un modo privado de UK.

En la figura siguiente puede observarse el espectro de la señal DVB-T2 finalmente generada en el laboratorio y capturada con el analizador de espectros, que se ha empleado para el estudio de coexistencia

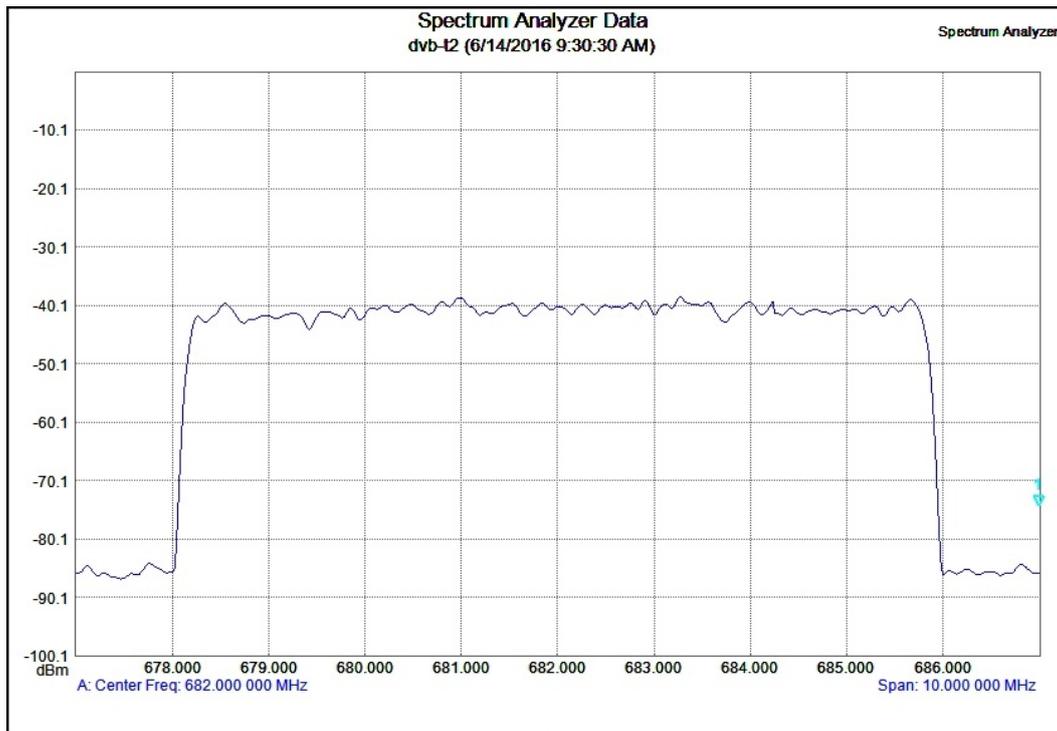


Figura 39. Espectro de la señal DVB-T2 utilizada en el laboratorio para el estudio de coexistencia.

5.2.2 Generación de la señal NB-LTE

Para la generación de la señal NB-LTE se ha hecho uso de estándar especificado en la *Release 13* del 3GPP [1], donde se especifican y describen los sucesivos pasos que hay que seguir para construir la señal a transmitir. El diagrama de bloques es el indicado en el apartado de “Estado del Arte” en la sección correspondiente a la tecnología IoT.

La implementación de la señal se ha realizado mediante su programación manual haciendo uso del software matemático “Matlab” en colaboración con el equipo del Grupo de Comunicaciones Móviles (MCG) del iTeam. Los distintos parámetros de funcionamiento escogidos para la señal NB-LTE son los especificados en el estándar y están recogidos en la Tabla 4.

IoT		
Parameter	Uplink (UL)	Downlink (DL)
Standard	NB-LTE	NB-LTE
Multiplex	SC-FDMA	OFDM
Duplexing	FDD	FDD
Modulation	QPSK	QPSK
FFT	128	16
Guard Interval	Normal	Normal
Peak rate	~ 250 Kbps for multi-tone	~250 Kbps
Bandwidth	200 KHz	200 KHz

Tabla 4. Modo de funcionamiento de NB-LTE siguiendo el estándar.

A continuación, se muestra el proceso seguido para la programación de la señal NB-LTE para el caso concreto del *downlink*, donde se describen brevemente los parámetros y esquemas que utiliza cada uno de los bloques del diagrama mostrado anteriormente en la Figura 14 del “Estado del Arte”.

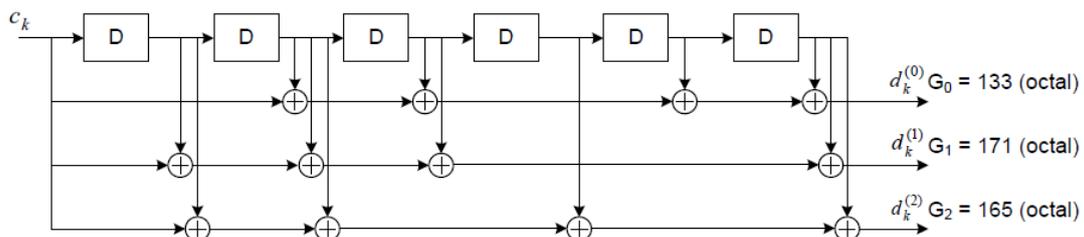
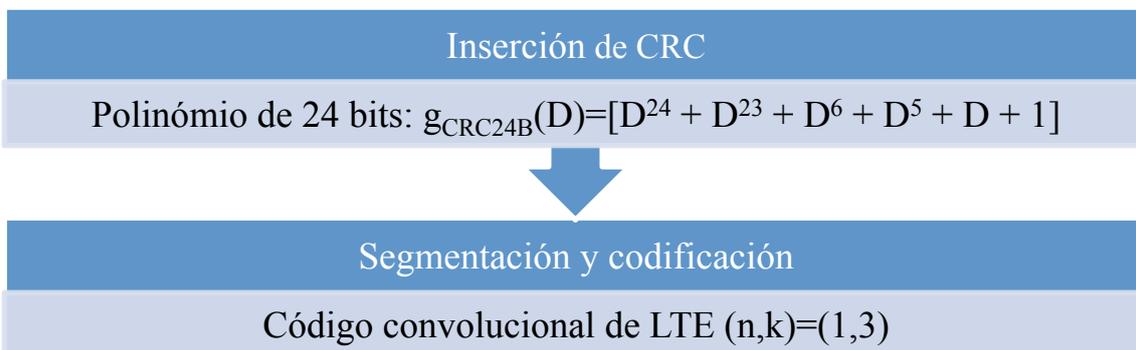


Figura 40. Codificador convolucional de LTE.

Interleaving y Rate Matching

Reordenación y combinación circular de los bits
Adaptación de la tasa

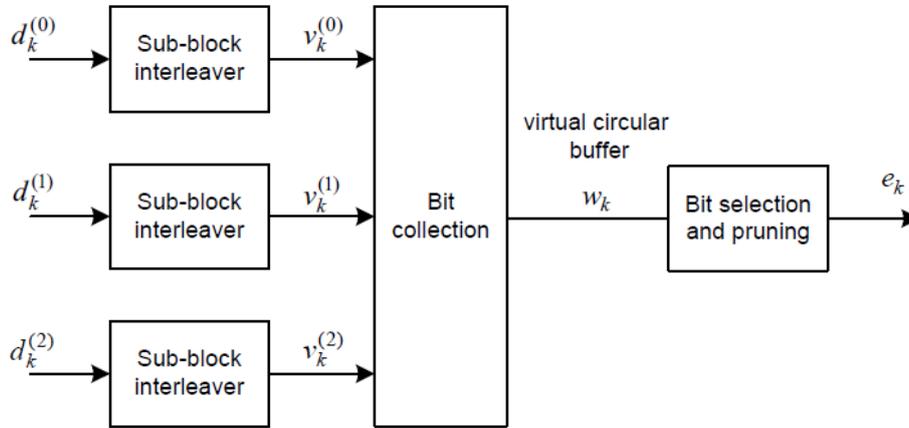


Figura 41. Esquema de Interleaving y Rate Matching basado en el de LTE.

Scrambling

Aleatorización de los bits aplicando una máscara de scrambling



Modulación

Modulación QPSK con 2 bits por símbolo

$b(i), b(i+1)$	I	Q
00	$1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
01	$1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$
10	$-1/\sqrt{2}$	$1/\sqrt{2}$
11	$-1/\sqrt{2}$	$-1/\sqrt{2}$

Tabla 5. Mapeado de la modulación QPSK.

Resource Mapping

Se mapean los resource element en una regilla bidimensional (tiempo/frecuencia)

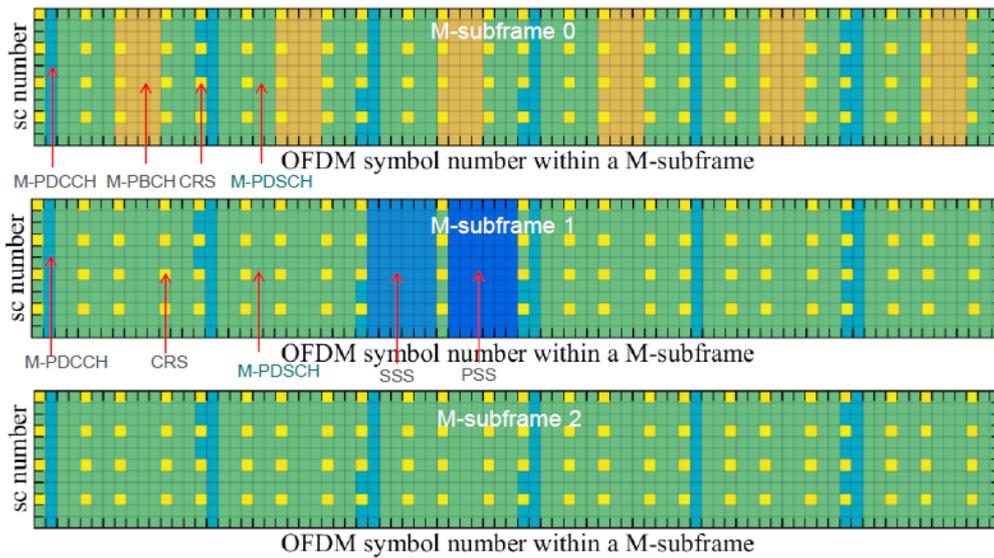
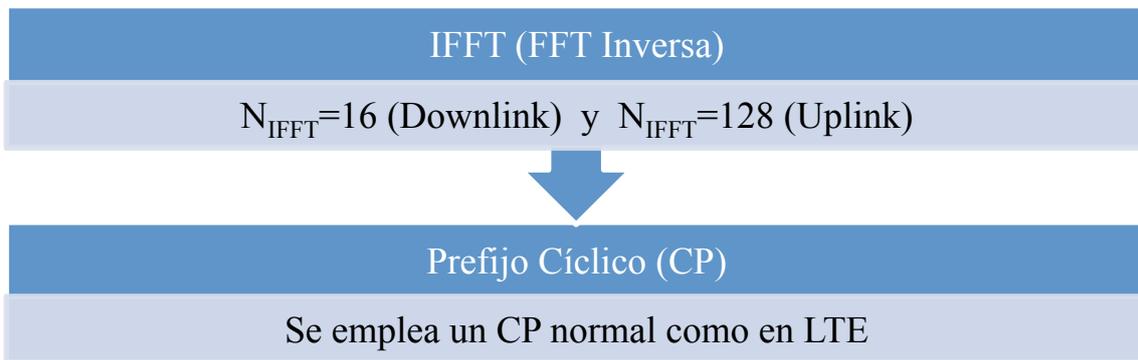


Figura 42. Multiplexación y mapeo de los recursos elementos entre los diferentes canales físicos para el downlink de NB-LTE.



Siguiendo el diagrama de bloques con dichos parámetros, se obtiene la señal NB-LTE de naturaleza estrecha que se observa en la siguiente figura con caídas muy pronunciadas al basarse en modulación OFDM.

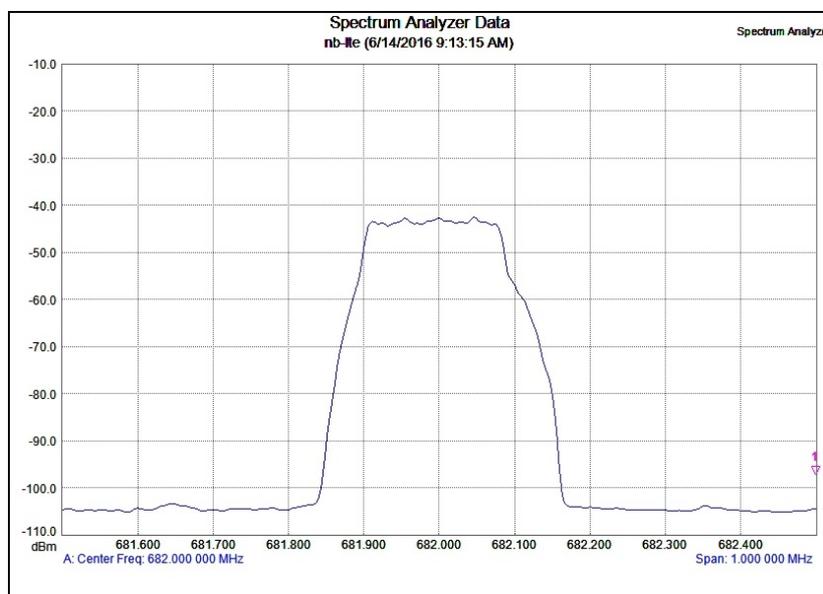


Figura 43. Espectro de la señal NB-LTE generado en laboratorio.

5.2.3 Cálculo de la BEM para NB-LTE

Con el fin de definir los límites de potencia que garanticen un correcto funcionamiento de los dispositivos y nodos IoT, desde el punto de vista de emisiones no deseadas en adyacencia, es necesario diseñar la máscara de borde de bloque adecuada.

La máscara de borde de bloque (BEM, por sus siglas en inglés) es una máscara espectral que se aplica en transmisión que 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 BEM puede dividirse en tres zonas o dominios diferenciados en los cuales se aplican distintas limitaciones de potencia, estos son: zona en banda, que corresponde al ancho de banda útil del canal; el dominio fuera de banda (OOB, por sus siglas en inglés) que corresponde a la zona de adyacencia cercana, cuya anchura puede variar en función de la tecnología y ancho de banda útil; y el dominio no esencial, el cual se encuentra a continuación del dominio fuera de banda y limita la potencia de emisiones espurias diversas (armónicos, productos de intermodulación, parásitos, etc.); estas dos últimas, las emisiones fuera de banda y las no esenciales, conforman conjuntamente el dominio de “emisiones no deseadas”.

El punto donde se delimita el fin del dominio fuera de banda y el comienzo del no esencial se determina aplicando la norma de 250%, la cual marca como fin del primer dominio cuando hay un desplazamiento del 250% del ancho de banda útil con respecto a la frecuencia central de trabajo [29]. Por tanto, en el caso de NB-LTE para IoT, el ancho de banda considerado para definir la máscara en dominio fuera de banda será de ± 500 kHz respecto a la frecuencia central, tal y como se observa en la Figura 44 a continuación.

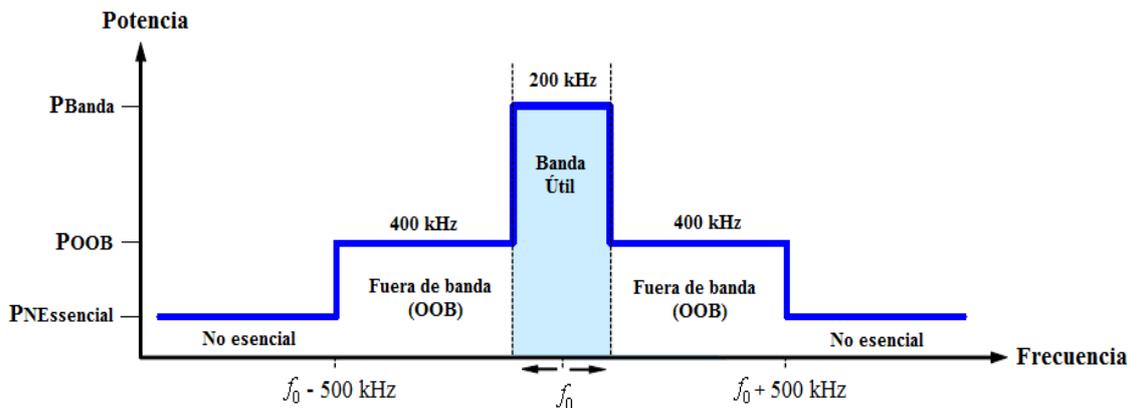


Figura 44. Estructura de dominios de la BEM para NB-LTE con un ancho de banda útil de 200 kHz.

Para definir los valores de potencia máximos en cada región de la máscara se ha recurrido a diversas recomendaciones de la ITU como son la **ITU-R SM.329-12** o **ITU-R SM.1541-6** [28][30] y consultado las máscaras que utiliza LTE en todos sus modos de transmisión para distintos anchos de banda [33]. Para todos los valores se tiene que la medida de la potencia se realiza considerando un ancho de banda de medida de 100 kHz.

La Figura 45 muestra cómo queda las BEM para la tecnología NB-LTE, tanto para los nodos como para los dispositivos, considerando una potencia de referencia en la banda útil de 0dBm/100kHz. Puede observarse que la señal NB-LTE cumple holgadamente los límites impuestos por la BEM para permitir protección de interferencias a canales en adyacencia cercana.

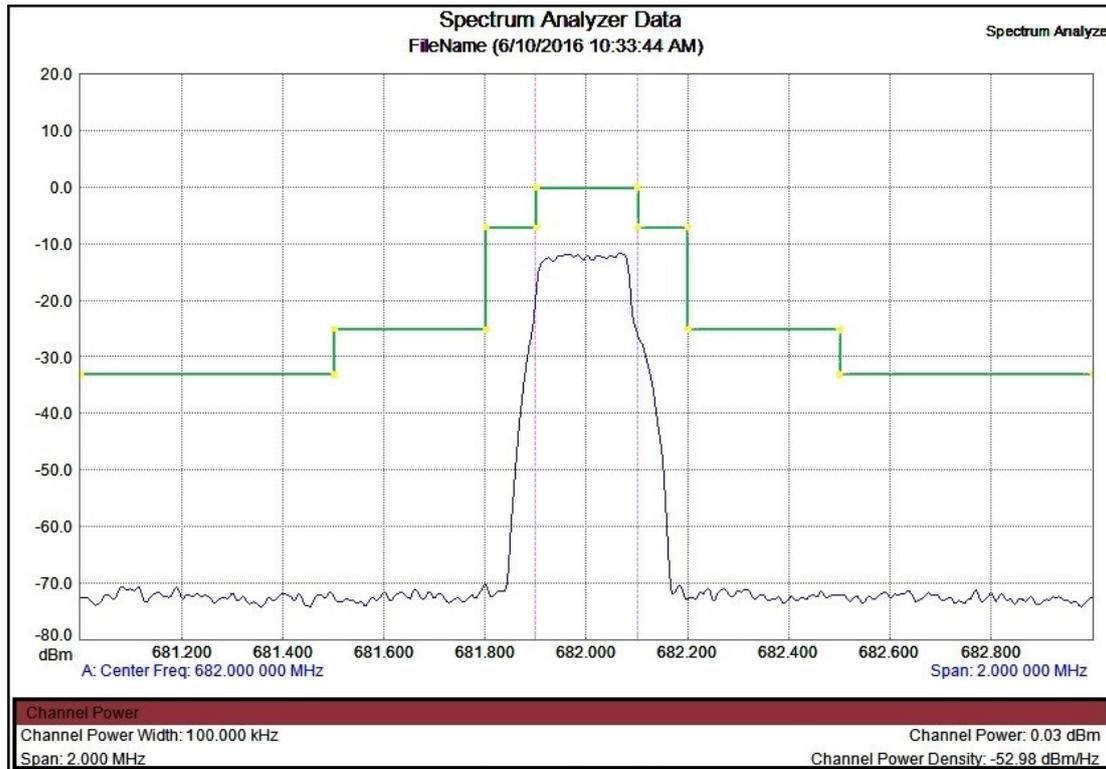


Figura 45. Máscara espectral de borde de bloque (BEM) que deben cumplir los nodos y dispositivos IoT en transmisión.

5.3 Medidas del Margen de protección

El margen de protección se define como la diferencia entre la potencia de la señal útil y la máxima potencia de la señal interferente que podría haber a la entrada de un receptor de TDT, cumpliendo siempre un requisito de calidad determinado. En el caso concreto bajo estudio, el margen de protección viene determinado por la siguiente expresión:

$$MP = P_{min}^{DVB} - P_i^{NB-LTE} \quad (1)$$

Para las medidas del margen de protección, se ha considerado un ancho de banda de 8MHz para el servicio de TDT y de 200kHz para IoT. La señal DVB-T2 útil usa el canal 47 de DTT (678-686 MHz), centrada en la frecuencia de 682 MHz, y la señal NB-LTE transmite tanto en co-canal, solapando espectralmente ambas señales, como en adyacencia en el canal 48 (686-694 MHz).

5.3.1 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 $BER = 2 \times 10^{-4}$, lo que corresponde a un $BER < 1 \times 10^{-11}$ a la entrada del demultiplexor MPEG-2. Este procedimiento viene especificado en la Recomendación ITU-R BT.1368-9 [20].
- 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 [20] e ITU-R

BT.2215 [21]. 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*” [22]. Por ello, será el utilizado en las medidas de este proyecto, y está detallado a continuación.

5.3.2 Método de punto de fallo subjetivo

Para el cálculo del margen de protección, es necesario medir la máxima potencia interferente que no degrada la visualización de la señal DVB-T2 cuando se combinan ambas señales a la entrada del receptor TDT. El proceso de medida comienza fijando la potencia de la señal útil a un nivel determinado y aumentando a pasos de 0.1dB la señal interferente. El período de observación debe ser de 20 segundos, a partir de los cuales se incrementa de nuevo la potencia hasta que se perciba una degradación en la calidad de la imagen de televisión, en ese momento, la potencia máxima interferente será la inmediatamente anterior a la actual.

Con el fin de tener información tanto en co-canal como en adyacencia, se realiza un barrido en frecuencia partiendo desde co-canal con ambas tecnologías trabajando a la misma frecuencia (682 MHz), hasta alcanzar los 12MHz de separación a pasos de 200kHz considerando canales de NB-LTE. Con este barrido se obtiene información de 4MHz en co-canal y se cubre todo el canal 48 de TDT (8MHz) en adyacencia. El siguiente esquema muestra la configuración de los equipos empleados para la medida de los márgenes de protección para el método escogido.

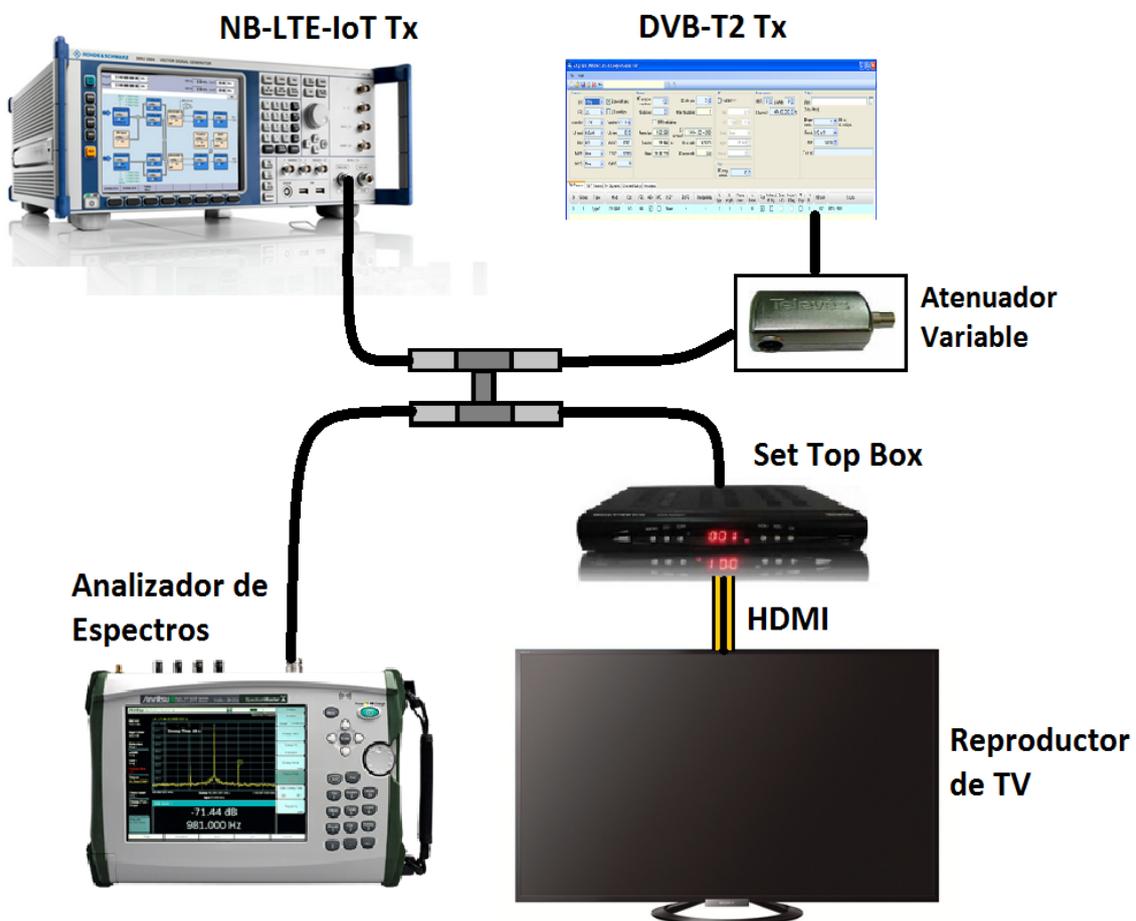


Figura 46. Montaje genérico utilizado en la medida de los márgenes de protección DVB-T2 útil especificado en la Recomendación ITU R BT.1368-9.

Para esta configuración se ha tomado una P_{min}^{DVB} igual a -60dBm, según la recomendación ITU-R BT.2033-1 [23] para medidas de margen de protección utilizando el método de punto de fallo subjetivo. Además, debido al hecho de que existen dispositivos y elementos pasivos que introducen pérdidas en el montaje, es necesario tener en cuenta dichas pérdidas para la correcta medida de la potencia máxima interferente. Considerando que a la entrada del analizador de espectros se tiene la misma potencia que a la entrada del STB, se han caracterizado las pérdidas de los elementos intermedios y se ha obtenido un valor de 10dB. Por tanto, una vez se realicen las medidas de las potencias máximas interferentes, es necesario corregir el efecto de las pérdidas restando 10dB al valor obtenido que muestra el generador de la señal NB-LTE.

5.3.3 Casos considerados en las medidas de Márgenes de Protección

Para el estudio de coexistencia entre televisión digital e Internet of Things, se tratan distintos casos de medidas de márgenes de protección emulando las características de transmisión de los dispositivos IoT tanto para el enlace descendente (DL) como el ascendente (UL).

- Enlace descendente (*Downlink*)

El enlace descendente, es aquel que va desde los nodos de acceso IoT hasta los terminales móviles y/o fijos, y puede caracterizarse como una transmisión continua empleando todos los recursos radio. La medida del margen de protección para Downlink, por tanto, sólo contempla un caso con transmisión temporal continua durante la interferencia.

- Enlace ascendente (*Uplink*)

El enlace ascendente, es aquel que va desde los terminales IoT móviles y/o fijos, hasta los nodos de acceso correspondientes, y se caracteriza por una transmisión a ráfagas debido a la baja cantidad de información a transmitir. El Uplink plantea la cuestión de cuál es la mejor forma de transmitir la baja cantidad de información, ya que al transmitir a ráfagas admite una gran variedad de posibilidades. Para este estudio, se ha considerado el uso de ciclos de trabajo para el enlace ascendente de tal forma que los dispositivos IoT sólo transmiten durante una fracción de tiempo y con un patrón periódico. El ciclo de trabajo, por tanto, se define como el cociente entre el tiempo transmitido y el tiempo transmitido más el tiempo de espera, y se calcula aplicando la ecuación (2).

$$DC(\%) = \frac{T_{tx}}{T_{tx} + T_{esp}} \cdot 100 \quad (2)$$

5.4 Balance de Enlace (Link Budget)

5.4.1 Ganancia por pérdidas del canal

Una vez los márgenes de protección han sido calculados, es necesario realizar un balance del enlace radio entre el receptor TDT y el dispositivo IoT interferente con el objetivo de calcular las pérdidas mínimas debidas al canal. Dichas pérdidas se pueden modelar como una ganancia desde el punto de vista del dispositivo IoT, debido a que permiten incrementar la PIRE transmitida en el mismo factor y seguir cumpliendo con el margen de protección necesario calculado a la entrada del receptor TDT. Ésta ganancia se ha denominado en este documento “Ganancia por pérdidas del canal (G_{PC})” y se define como muestra la siguiente expresión:

$$G_{PC}(dB) = FSL_{IoT} + L_{OBS} - G_{rx}(\phi), \quad \text{con} \quad FSL = 20 \log\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right) \quad (3)$$

Donde; FSL representa las pérdidas por propagación en espacio libre entre el transmisor IoT y la antena receptora de TDT; L_{OBS} hace referencia a las pérdidas debidas a los obstáculos que pueda haber en el terreno intermedio, ya sea por refracción o difracción; y $G_{rx}(\phi)$ hace

referencia a la ganancia de la antena receptora de TDT en función del ángulo de entrada respecto a su lóbulo principal.

5.4.2 Topología general

La topología general del enlace entre el dispositivo IoT y la antena receptora de TDT es la que se muestra en la Figura 47, en la cual se ha considerado el caso recepción fija sobre tejado, con visión directa y sin obstáculos (peor caso). En este caso, la ganancia por pérdidas de canal, únicamente depende de las pérdidas por propagación y por la discriminación de la antena, habiéndose eliminado las pérdidas por obstáculos.

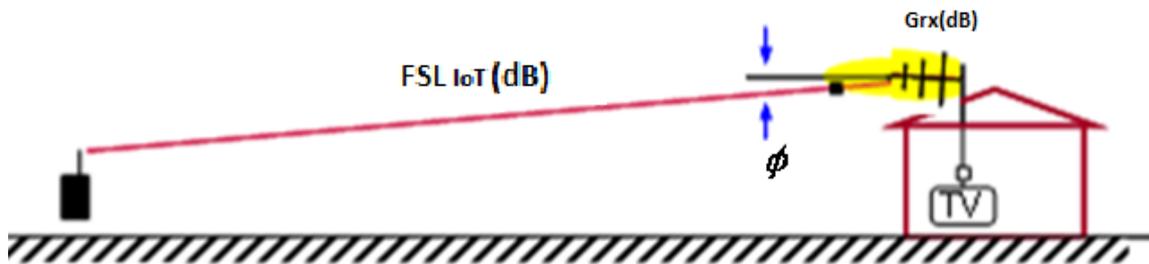


Figura 47. Topología general para el cálculo de la ganancia por pérdidas de canal.

Para trabajar con el peor caso, es preciso calcular cuál es la distancia horizontal, entre el dispositivo IoT y el edificio en cuya azotea está situada la antena de TDT, que minimiza la G_{PC} considerando los dos fenómenos presentes, permitiendo así fijar la distancia radial entre ambos elementos y el ángulo de entrada en el diagrama de radiación de la antena. La discriminación angular de la antena con la que se va a trabajar en este estudio, es la que se representa en la siguiente gráfica [24], teniendo una zona plana de discriminación 0 dB para ángulos comprendidos entre -20 y 20 grados y decreciendo linealmente hasta alcanzar 16 dB para ángulos mayores a ± 60 grados.

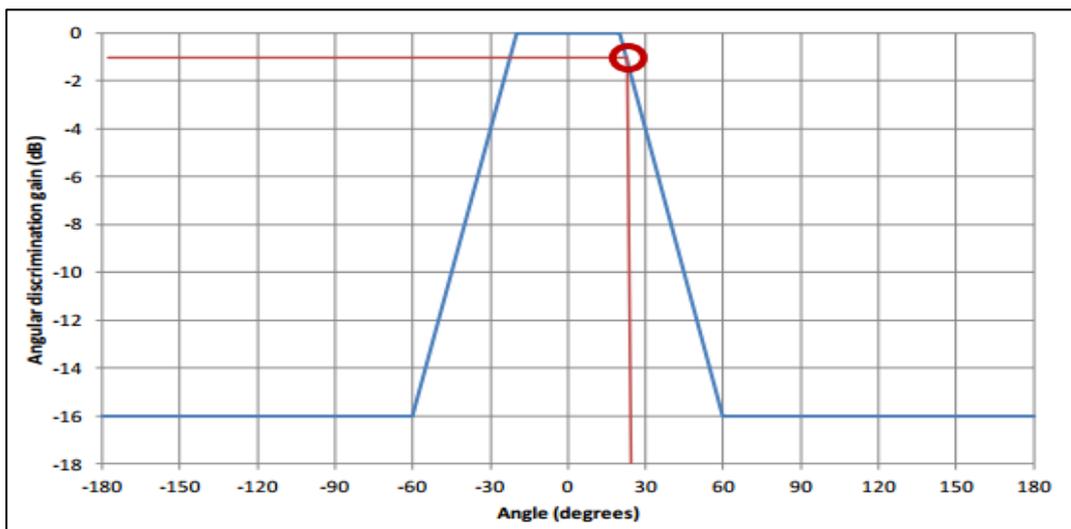


Figura 48. Discriminación angular de la antena de TDT (ITU-R BT.419-3).

Considerando dicha discriminación y tomando como frecuencia de trabajo 682MHz, se calcula la distancia horizontal con menores pérdidas realizando un barrido horizontal, para unas alturas concretas de la antena TDT y el dispositivo IoT (dependiendo del escenario), considerando que el ángulo respecto el lóbulo principal de la antena y la distancia entre ambos se calculan empleando las siguientes expresiones y siguiendo el esquema mostrado en la Figura 49.

$$G_{PL} = 20 \log \left(\frac{A\pi D}{\lambda} \right) + D_{\phi} \quad (4)$$

$$\phi = \arctan \left(\frac{h_{rx} - h_{IoT}}{d_h} \right) \quad (5)$$

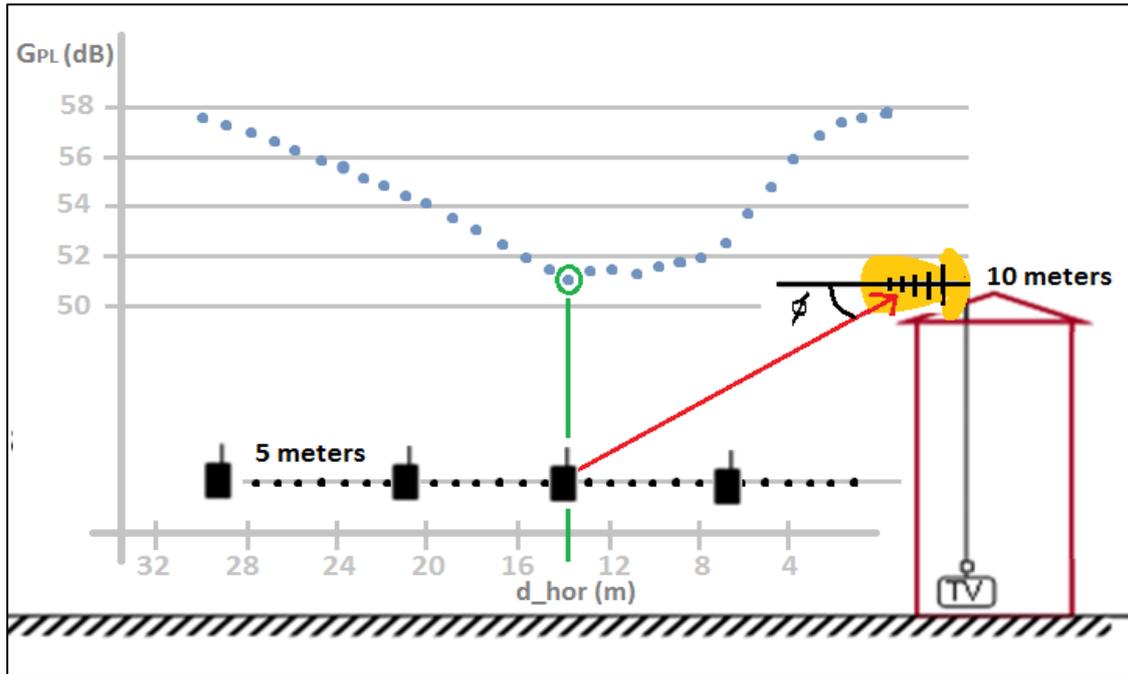


Figura 49. Ganancia por pérdidas de canal frente a distancia horizontal.

5.4.3 Máxima PIRE transmisible por los Nodos y dispositivos IoT

Para determinar finalmente la máxima PIRE disponible para transmitir por los nodos o dispositivos IoT, es necesario combinar la información de las potencias interferentes máximas, a la entrada del receptor de TDT y calculadas a partir del margen de protección, con las ganancias por pérdidas de canal, calculadas para cada escenario considerado, como se muestra en la ecuación (6).

$$PIRE_{max}^{NB-LTE} = (P_{min}^{DVB} - MP) + G_{PL} = P_i^{NB-LTE} + G_{PL} \quad (6)$$

5.5 Tasa binaria de pico de NB-LTE-IoT

La tasa binaria de transmisión se define como el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo mediante un sistema digital, que en el caso de este estudio es NB-LTE. Para calcular la cantidad de bits por segundo que se puede alcanzar con dicha tecnología, se hace uso de la expresión mostrada a continuación, la cual tiene en cuenta los recursos disponibles de LTE y los factores variables de modulación, ciclo de trabajo o tiempo de transmisión.

$$T_{BIN} = \frac{N_{port} \cdot N_{simb} \cdot \frac{bits}{simb} \cdot D_{ms}}{T_{TX} + T_{ESP}} \cdot \left(1 - \frac{OH(\%)}{100} \right) \quad (7)$$

Donde; N_{port} representa el número de portadoras que hay en los 200 kHz y que es igual a 12; N_{simb} representa el número de símbolos OFDM por portadoras en 1 ms; $\frac{bits}{simb}$ representa la eficiencia espectral expresada en bits por símbolo; D_{ms} representa la duración en milisegundo de la trama transmitida; T_{TX} y T_{ESP} representan respectivamente el tiempo de transmisión y de espera; y $OH(\%)$ corresponde al porcentaje de trama que forma parte de la cabecera (*Overhead*).

Para el caso de NB-LTE, siguiendo el esquema tiempo-frecuencia característico de LTE mostrado en la Figura 50, se considera el uso de 12 portadoras, las cuales conforman los 200kHz de ancho de banda, y un total de 14 símbolos OFDM que corresponden a dos Slots de duración total de 1ms. De esta forma, cada milisegundo de transmisión posee 2 *resource blocks* compuestos por 168 *resource elements* disponibles.

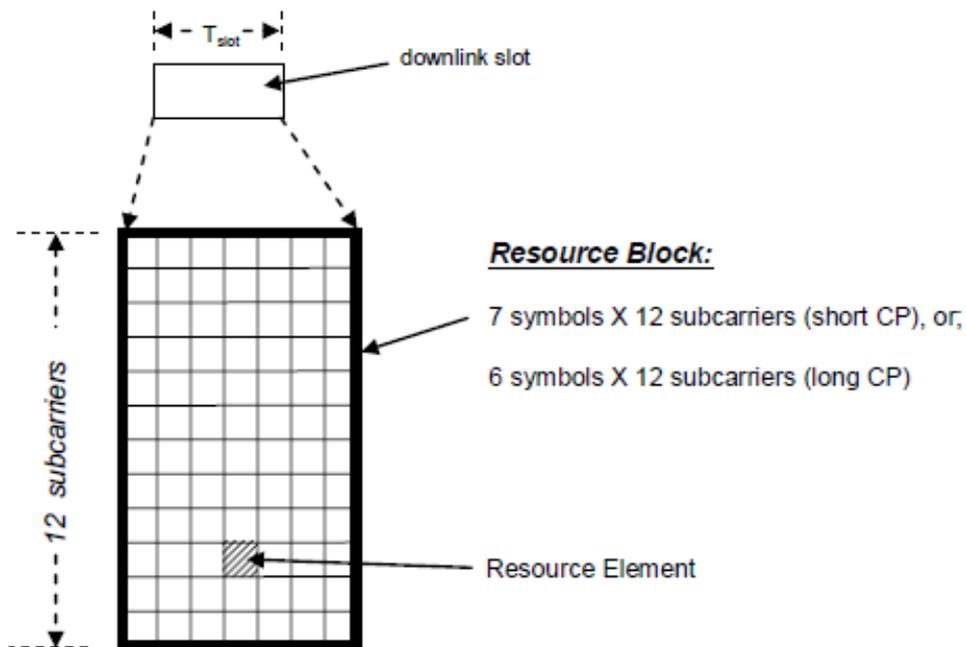


Figura 50. Resource Block LTE correspondiente a 0,5ms.

6. Resultados

Los resultados han sido obtenidos a través de medidas de laboratorio en un entorno controlado. Para las medidas se ha hecho uso de equipos profesionales que permiten emular el comportamiento real de los sistemas de las tecnologías implicadas. Los criterios y procedimientos llevados a cabo para garantizar la compartición de espectro en la banda de TDT entre los sistemas DVB-T2 y NB-LTE han sido descritos en el apartado de “Metodología”. A continuación, se resumen los resultados alcanzados:

En primer lugar, se presentan los márgenes de protección medidos para los distintos casos considerados tratando la influencia de diversos parámetros como el tipo de enlace (*downlink* o *uplink*), el ciclo de trabajo utilizado o el tiempo de transmisión escogido.

En segundo lugar, se calcula la ganancia por pérdidas de canal (G_{PC}) entre los nodos y dispositivos IoT respecto a la antena receptora de televisión. Para el cálculo de este valor se realiza un barrido en distancia horizontal que minimiza la G_{PC} teniendo en cuenta la discriminación angular de la antena receptora de TDT con respecto a su lóbulo principal.

En tercer lugar, se determinan las máximas potencias isotrópicas radiadas equivalentes (PIREs) que son capaces de transmitir los nodos y dispositivos IoT, tomando en consideración los márgenes de protección y las ganancias de pérdidas de canal obtenidas en pasos anteriores para cada uno de los escenarios y aplicaciones consideradas.

En cuarto lugar, se ha calculado la tasa de bit de pico que consiguen los dispositivos IoT en función de los diferentes modos de funcionamiento considerados. Asimismo, se definen máscaras espectrales de máxima PIRE que podrían transmitir los nodos y dispositivos IoT en función de la frecuencia. Estas máscaras se han especificado para fijar unos niveles de emisión máximos de PIRE que sirvan como norma para los dispositivos y los nodos IoT en función del escenario considerado, de tal forma que garantice el correcto funcionamiento en espectro compartido con los servicios de TDT. Por último, se realiza un estudio económico que permite cuantificar el ahorro que implica optimizar la banda de TDT haciendo un uso eficiente de los espacios en blanco, expresándolo en €/MHz.

6.1 Medidas de Márgenes de Protección

Las medidas de márgenes de protección, han sido llevadas a cabo con un video real transmitido bajo el estándar DVB-T2 en presencia de una señal interferente de NB-LTE, siempre garantizando la calidad de la imagen de televisión (basado en el método de punto de fallo subjetivo). Para estas medidas se han evaluado la influencia de dos parámetros fundamentales que caracterizan al sistema, los cuales son:

- Influencia del **tipo de enlace** (Downlink y Uplink).
- Influencia del **Ciclo de Trabajo** para el Uplink en NB-LTE
 - Efecto de la Variación del **Tiempo de espera entre Transmisiones**.
 - Efecto de la Variación del **Tiempo de Transmisión**.

Todos los márgenes de protección se han obtenido realizando medidas desde co-canal (de 0 a 4 MHz) hasta adyacencia (de 4.2 hasta 12 MHz), desplazando la portadora central de NB-LTE a pasos de 200KHz. Para permitir observar con más claridad las medidas, en todas las figuras siguientes se han representado pasos de 600KHz en el eje de frecuencias.

6.1.1 Interferencia de NB-LTE en función del tipo de enlace

El primer parámetro considerado es la influencia del tipo de enlace de NB-LTE. Un receptor de televisión puede verse interferido por un nodo IoT (enlace descendente desde el nodo a los dispositivos IoT) o por un dispositivo IoT (enlace ascendente desde los dispositivos hacia los nodos IoT). La Figura 51 muestra las medidas de margen de protección para una señal NB-LTE interfiriendo de forma continua a la señal DVB-T2, emulando el canal descendente, y una señal NB-LTE transmitiendo con un ciclo de trabajo del 50%, emulando al canal ascendente caracterizado por una transmisión a ráfagas.

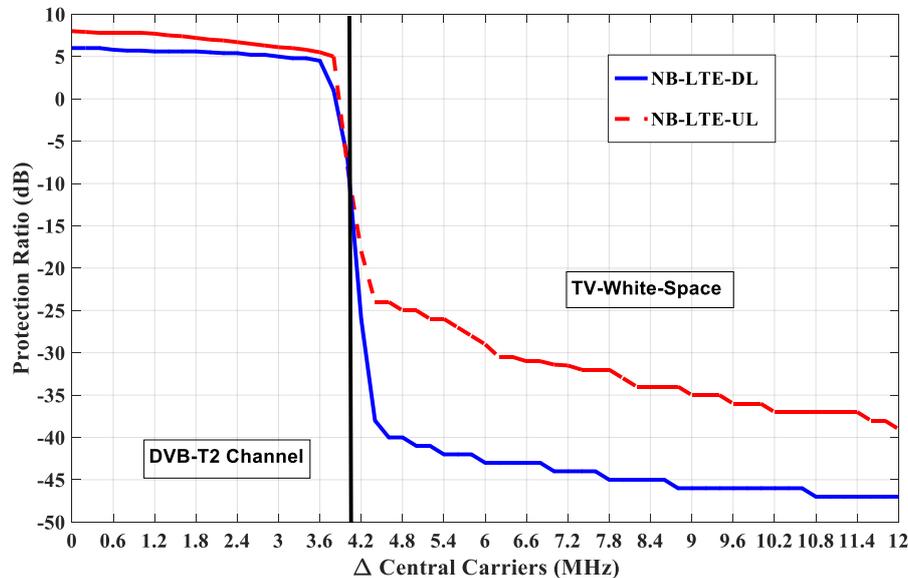


Figura 51. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE para el enlace descendente y ascendente.

A partir de los resultados, puede observarse que el canal ascendente (dispositivos IoT) interfiere más en el receptor de TDT que el descendente (nodos IoT). Respecto a la separación en frecuencia, en co-canal, es decir, cuando la señal de NB-LTE se encuentra a una separación en frecuencia entre 0 a 4 MHz (totalmente solapado) respecto a la frecuencia central del canal DVB-T2, los márgenes de protección son muy restrictivos para ambos tipos de enlace, esto es debido a que todo el espectro de la señal NB-LTE cae dentro del espectro de la señal DVB-T2. Los márgenes de protección se encuentran en un rango de 5 a 8 dB (enlace ascendente) y de 4 a 6 dB (enlace descendente) en función de la separación en frecuencia respecto al canal DVB-T2. En canal adyacente, es decir, cuando la señal de NB-LTE está a una separación en frecuencia entre 4.2 a 12 MHz (no solape) respecto a la frecuencia central del canal DVB-T2, se consiguen mejoras importantes en los márgenes de protección respecto al caso co-canal de alrededor de 30 dB para el enlace ascendente y 42 dB para el enlace descendente, para una separación en frecuencia de 4.6 MHz. Asimismo, se puede observar que los márgenes de protección son para el enlace ascendente (dispositivos IoT) entre 8 y 12 dB más restrictivos que en descendente. Esto conlleva a que los nodos IoT pueden transmitir entre 8 y 12 dB más potencia que los dispositivos IoT a igual de condiciones. Esto es debido principalmente a que un receptor de TDT es más susceptible a interferencias de señales que presentan alta variabilidad temporal.

6.1.2 Influencia del Ciclo de Trabajo para NB-LTE

El segundo parámetro que se ha estudiado es el efecto que tiene un dispositivo IoT al interferir un canal DVB-T2, cuando este utiliza un ciclo de trabajo u otro, es decir, en función de la aplicación y servicio tendrá unos requerimientos de reportes a los nodos IoT que

condicionarán su modo de transmisión. El ciclo de trabajo se define como el cociente entre el tiempo en el cual se transmite y el periodo total de repetición, que engloba el tiempo de espera y el tiempo de transmisión.

6.1.2.1 Efecto de la variación del tiempo de espera entre transmisiones

En este caso de estudio se evalúa la variación de los márgenes de protección cuando el tiempo de transmisión de los dispositivos IoT es fijo y varía el tiempo de espera entre transmisiones. Se ha escogido como unidad mínima de transmisión 6ms, que corresponden a la duración temporal de un M-subframe de NB-LTE para el enlace ascendente. La siguiente tabla muestra los tiempos de transmisión y de espera considerados en las medidas de márgenes de protección en función del ciclo de trabajo.

Ciclo de Trabajo (%)	T transmisión (ms)	T espera entre transmisiones (ms)
50	6	6
20	6	24
10	6	54
5	6	114
2	6	294
1	6	540

Tabla 6. Casos considerados para las medidas de margen de protección para Uplink.

La Figura 52 muestra las medidas de márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE para el enlace ascendente con diferentes ciclos de trabajo.

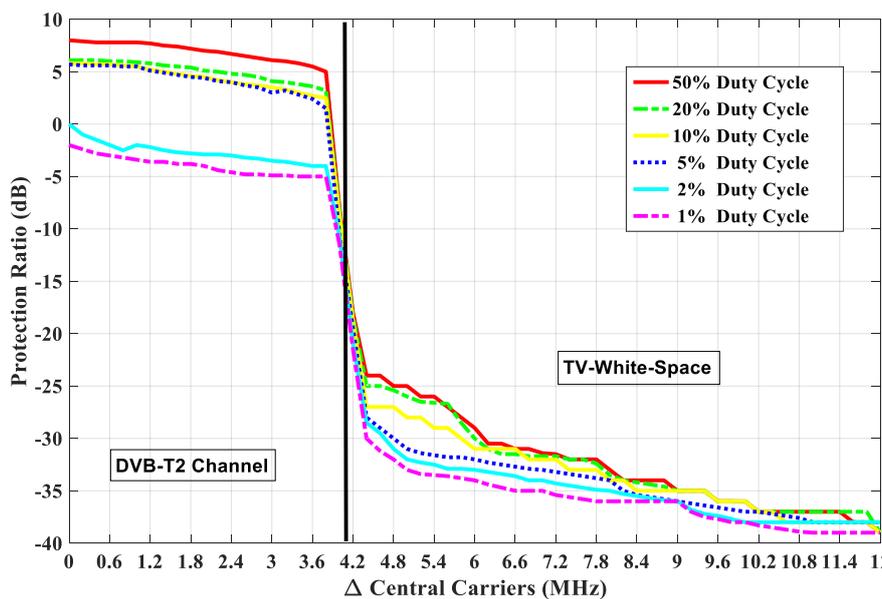


Figura 52. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE para el enlace ascendente en función del ciclo de trabajo.

Como se puede observar, a medida que se reduce el ciclo de trabajo de los dispositivos IoT, los márgenes de protección son menos restrictivos (un receptor de TDT puede tolerar mayor potencia interferente). Si analizamos este comportamiento en función de la separación en frecuencia, cuando la señal NB-LTE se encuentra totalmente solapada a un canal DVB-T2 (caso co-canal), los márgenes de protección son hasta 10 dB más restrictivos para ciclos de trabajo altos cuyo tiempo de espera entre transmisiones es menor a 250ms (50%, 20%, 10% y 5%). Esto es debido porque la duración temporal de una trama de DVB-T2 es de 250ms y, por tanto, la

señal útil se verá interferida todas las tramas. Sin embargo, cuando el tiempo de espera es superior a 250ms (ciclos de trabajo 2% y 1%) no todas las tramas consecutivas (una de cada dos) se ven interferidas y, así pues, el receptor de TDT tiene más tiempo para poder recuperarse (corregir los errores) de la interferencia, comportándose de forma más robusta. A medida que desplazamos en frecuencia la señal NB-LTE, es decir nos alejamos del canal DVB-T2 (canal adyacente), este comportamiento es cada vez más despreciable, consiguiendo diferencias en los márgenes de protección de hasta 4 dB más restrictivos para ciclos de trabajo altos respecto a los bajos. Esto es debido principalmente porque la interferencia en adyacencia proviene principalmente a las emisiones fuera de banda de la señal NB-LTE, siendo en potencia menos restrictivo que el caso co-canal.

De estos resultados, se extrae como conclusión que para reducir la interferencia y obtener mejores márgenes de protección, conviene utilizar ciclos de trabajo bajos para los dispositivos IoT, con los cuales se tengan tiempos de espera iguales o superiores a 250ms, no obstante, este umbral dependerá de la estructura temporal de la tecnología bajo estudio.

6.1.2.2 Efecto de la Variación del Tiempo de Transmisión

Tras los resultados obtenidos a cerca de la influencia que tiene el tiempo de espera entre transmisiones de los dispositivos IoT sobre los márgenes de protección para una señal útil DVB-T2, se procede a evaluar la influencia sobre los márgenes de protección del otro parámetro que depende del ciclo de trabajo, es decir, fijando el tiempo de espera con un valor aproximado de 250ms (mejor caso) se ha variado el tiempo de transmisión de los dispositivos IoT. La Tabla 7 muestra los tiempos de transmisión y de espera considerados en las medidas de márgenes de protección en función del ciclo de trabajo.

Ciclo de Trabajo (%)	T transmisión (ms)	T espera entre transmisiones (ms)
2	6	294
10	30	270
20	60	240

Tabla 7. Parámetros utilizados para el estudio de la variación del tiempo de transmisión

La Figura 53 muestra las medidas de márgenes de protección para diferentes tiempos de transmisión de una señal NB-LTE interfiriendo a DVB-T2.

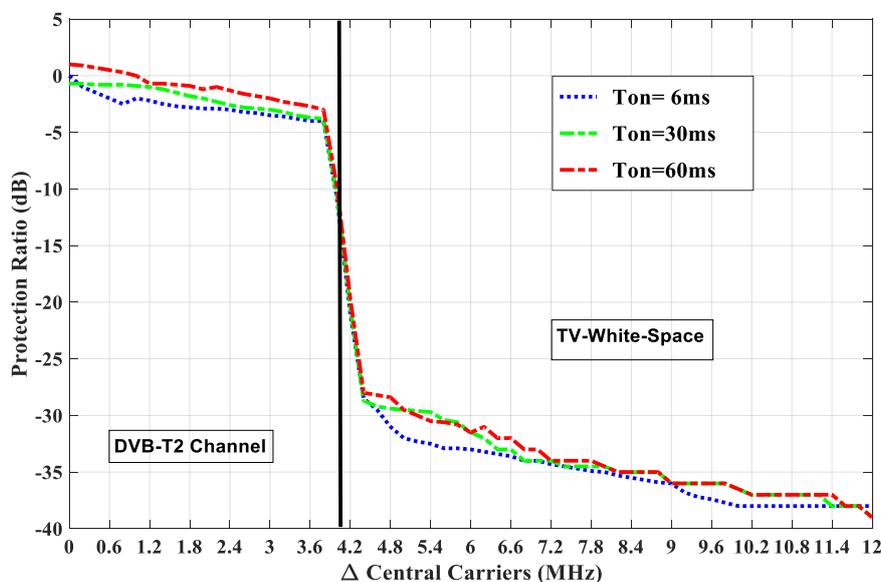


Figura 53. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE para el enlace ascendente con diferentes tiempos de transmisión.

Si se observan los resultados, puede comprobarse que no existen grandes diferencias en los márgenes de protección cuando variamos el tiempo de transmisión de los dispositivos IoT, con variaciones máximas de 2dB tanto en co-canal como en adyacencia. Por tanto, se extrae como conclusión que el tiempo de transmisión, cuando el tiempo de espera es fijo, no condiciona ni limita la interferencia que puede soportar un receptor de televisión.

6.2 Ganancia por pérdida de Canal

Teniendo en cuenta una discriminación angular de 0 dB (peor caso) de la antena receptora de TDT, se calcularon las mínimas ganancia por canal (casos más restrictivos) del enlace entre los nodos y dispositivos IoT respecto a la antena TDT. Dichas pérdidas son consideradas como una ganancia, debido a que permiten incrementar la PIRE transmitida por los nodos y dispositivos IoT en el mismo factor, y seguir cumpliendo con el margen de protección necesario calculado a la entrada del receptor TDT. La siguiente tabla muestra las ganancias por pérdidas de canal para todos los escenarios y casos de estudio.

Escenarios		Ganancia por Pérdidas de Canal (dB)	
		<i>Uplink</i>	<i>Downlink</i>
Ciudad inteligente	Caso A (Smart Parking)	49	41,65
	Caso B (Traffic Congestion)	43.25	
Agricultura y Ganadería inteligente	Caso C (Smart Farming)	45	
	Caso D (Animal Tracking)	46.35	
eHealth	Caso E (Patients Surveillance)	47	

Tabla 8. Ganancia por pérdidas de canal desde los nodos y dispositivos IoT hasta el receptor de TDT, para los distintos escenarios considerados.

Como se puede observar, los nodos IoT tienen una ganancia por canal de 41.65 dB (peor caso). Para calcular este valor se consideró que los nodos IoT se encuentran ubicados a la misma altura para todos los escenarios de estudio. Respecto a los dispositivos IoT, el caso de estudio B (Traffic Congestion) es el más restrictivo, con un valor de ganancia por canal de 43.25 dB. Este escenario se caracteriza porque los dispositivos IoT se encuentran ubicados en semáforos, farolas a una altura de 4 metros sobre el nivel del suelo en un entorno urbano. Si comparamos este escenario con el menos restrictivo, Smart Parking podría transmitir hasta 5 dBm más de PIRE. Este escenario se diferencia principalmente porque los dispositivos IoT se encuentran ubicados a nivel de suelo (altura 0 metros). En resumen, las principales diferencias en los valores obtenidos de ganancia por pérdida del canal radican en la diferencia de altura respecto a la antena de TDT (siendo más restrictivo para diferencias mínimas entre alturas de los dispositivos IoT y antena receptora TDT) y mínima distancia horizontal que garantice una discriminación angular de la antena receptora de TDT nula. Además, considerando que existe línea de vista siempre entre los nodos y dispositivos respecto a la antena de TDT.

6.3 Máxima PIRE transmitida por los nodos y dispositivos de IoT

Tras las medidas de los márgenes de protección y el cómputo de la ganancia por pérdida de canal, se ha calculado la PIRE máxima que pueden transmitir los nodos y dispositivos de IoT. Se ha considerado que la antena de televisión se encuentra en el borde la cobertura de DVB-T2, por lo tanto su sensibilidad, P_{min}^{DVB} , es de -74 dBm para una probabilidad del 95% de las ubicaciones (caso más restrictivo) [15].

6.3.1 Máxima PIRE transmitida por los Nodos IoT

La Figura 54 muestra la máxima PIRE que podrían transmitir los nodos IoT como servicio secundario, haciendo uso de espectro compartido en la banda de TDT, siempre garantizando la calidad del servicio primario de DVB-T2. Los resultados indican que no es posible asignar portadoras NB-LTE en co-canal a DVB-T2 debido a las bajas potencias de transmisión permitidas (entre -38 y -36 dBm), cuando se considera una discriminación angular de 0 dB (peor caso). Sin embargo, conforme aumenta la separación en frecuencia respecto a un canal DVB-T2, con una banda de guarda de 500KHz (separación en frecuencia de 4.6 MHz respecto a la frecuencia central de DVB-T2), es posible que los nodos IoT puedan transmitir con una PIRE de al menos 8 dBm, conforme aumenta la banda de guarda (separación en frecuencia entre un canal NB-LTE y DVB-T2) se podría alcanzar hasta una PIRE de 15 dBm, siempre considerando el peor caso (discriminación angular de 0 dB para la antenna receptora de TDT). Estos valores de PIRE obtenidos para NB-LTE se encuentran dentro del rango de potencias típicas si se comparan con los empleados por otras tecnologías de comunicaciones inalámbricas como son: *XBee900* (17dBm), *LoRaWAN* (14dBm), *LoRa* (14dBm), *SigFox* (14dBm) o *WiFi* (0-12dBm), lo que demuestra que se obtienen valores factibles para la transmisión IoT. Además, en caso de considerar una discriminación angular de 16dB de la antenna receptora de TDT, se podrían transmitir con PIRE entre 23 y 30 dBm para los nodos IoT.

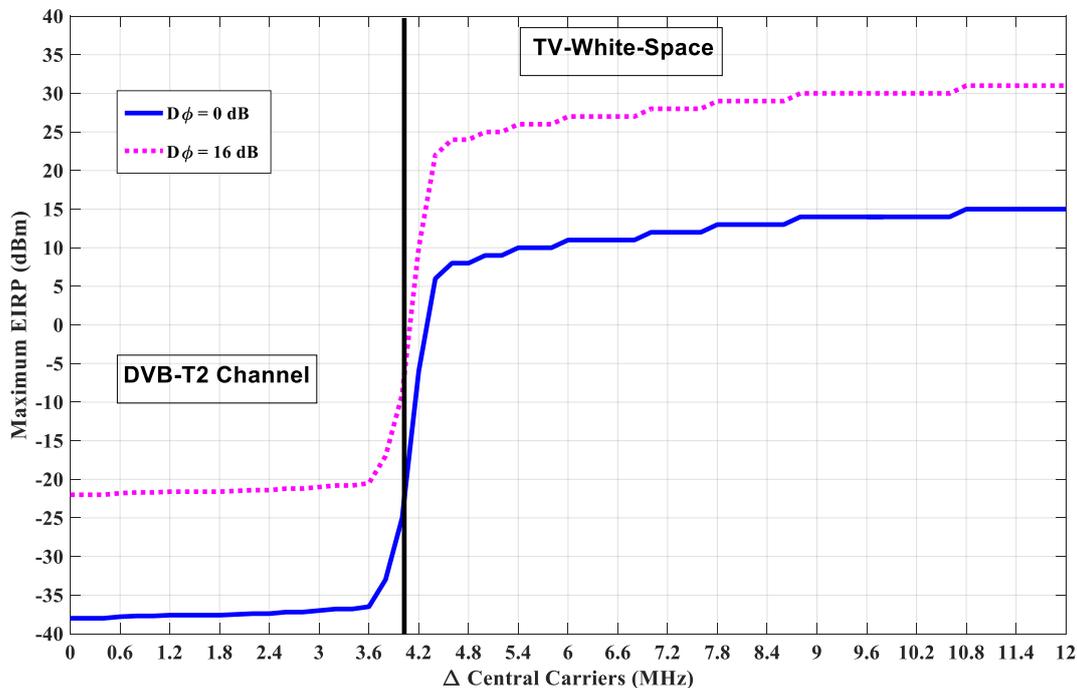


Figura 54. Máxima PIRE que puede transmitir el Nodo NB-LTE para 0 y 16dB de discriminación de la antena.

Se puede extraer como conclusión que, a partir de una banda de guarda de 500 kHz es posible transmitir con potencias considerables de PIRE (entre 8 y 15 dBm, dependiendo de la banda de guarda) para los nodos IoT (enlace descendente) e incluso, si se conoce la topología de la zona donde se van a colocar los nodos, podría buscarse una distribución óptima de estos para aprovechar la ganancia ligada a la discriminación angular de la antenna receptora, pudiendo incrementar las PIRE de los nodos hasta en 16 dBm. Otro aspecto importante a resaltar es la optimización del espectro radioeléctrico que se logra mediante la compartición de espectro en la banda de TDT. Si se considera una banda de guarda de 500 KHz respecto a un canal DVB-T2, se logran optimizar 7 MHz de espectro que podrán ser usados por los nodos IoT mediante la tecnología NB-LTE.

6.3.2 Máxima PIRE transmitida para los dispositivos IoT

Por lo que respecta a los dispositivos IoT, en la Tabla 9 se muestran las PIREs máximas calculadas para cada uno de los escenarios de estudio, considerando tres ciclos de trabajo diferentes de los dispositivos IoT (1%, 2% y 50%, casos más representativos) y separaciones frecuenciales en pasos de 1 MHz en la adyacencia próxima (hasta 2 MHz de separación del canal de TDT) y de 2 MHz de ahí en adelante. Asimismo, se ha asumido una discriminación de la antena receptora de TDT de 0 dB (peor caso).

Banda de Guarda (MHz)		Ciclo de Trabajo (%)	PIRE Máxima (dBm)				
			Smart City		Smart Rural		eHealth
			Caso A: Smart Parking	Caso B: Traffic Congestion	Caso C: Smart Agriculture	Caso D: Animal Tracking	Caso E: Patients Surveillance
Co-Canal	--	1	-23	-28	-27	-25	-24
		2	-25	-30	-29	-27	-26
		50	-33	-38	-37	-35	-34
Canal Adj.	0	1	-3	-9	-7	-6	-5
		2	-4	-9	-8	-6	-5
		50	-7	-12	-11	-9	-8
	1	1	8	2.25	4	5.5	6
		2	7	1.25	3	4.5	5
		50	0	-5.75	-4	-2.5	-2
	2	1	9	3	5	6	7
		2	8	2	4	5	6
		50	5	0	1	2	3
	4	1	11	5	7	8	9
		2	10	4	6	7	8
		50	8	2	4	5	6
	6	1	13	7	9	10	11
		2	13	7	9	10	11
		50	12	6	8	9	10
	8	1	14	8	10	11	12
		2	14	8	10	11	12
		50	14	8	10	11	12

Tabla 9. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT según el escenario.

Según los resultados obtenidos, asignar una frecuencia a los dispositivos IoT co-canal a DVB-T2 no es factible (igual al caso co-canal para los nodos IoT), debido a las bajas PIREs permitidas (entre -25 y -30 dBm, para un ciclo de trabajo del 2%, y dependiendo del escenario de estudio). En adyacencia a un canal DVB-T2, un dispositivo IoT (ciclo de trabajo del 2%), requiere por lo menos una banda de guarda de 1 MHz, pudiendo transmitir una PIRE entre 8 a 14 dBm en función de la separación en frecuencia, para el mejor caso de estudio (Smart Parking). Con respecto al peor caso de estudio, Traffic Congestion podría transmitir una PIRE entre 2 a 8 dBm, bajo las mismas consideraciones que el escenario anterior (banda de guarda y ciclo de trabajo). Para un ciclo de trabajo del 50% y una banda de guarda entre 1 y 4 MHz respecto a un canal DVB-T2, el dispositivo IoT tendría que reducir la máxima PIRE hasta en 3 dBm, respecto a las obtenidas para ciclos de trabajo del 2%.

Se concluye, por tanto, que las máximas PIREs transmitidas (entre 8 y 14 dBm) por los dispositivos IoT (enlace ascendente) son equivalentes a la de los nodos IoT (enlace descendente) para una discriminación angular de la antena receptora de TDT de 0 dB (peor caso). Sin embargo, se requiere aumentar la banda de guarda por lo menos a 1 MHz para los dispositivos IoT. Al igual como ocurre en los nodos IoT, se podría aumentar la PIRE transmitida por los dispositivos hasta en 16 dBm, si consideramos la orientación y ubicación de los dispositivos IoT respecto a la discriminación angular de la antena receptora de TDT. Por último, teniendo en cuenta la banda de guarda de los dispositivos IoT respecto a un canal DVB-T2, se está optimizando el uso de 6 MHz de espectro para la tecnología NB-LTE en el ascendente.

A continuación, a modo de resumen, se presentan las máximas potencias transmitidas por los dispositivos IoT, para todos los escenarios de estudio. Los resultados son presentados como una máscara de máximas PIREs que deberían cumplir los dispositivos IoT para no interferir un canal DVB-T2, en función del espaciado en frecuencia (pasos de 1 MHz) y para un ciclo de trabajo del 2% (tiempo entre transmisiones de 250 ms, recomendado).

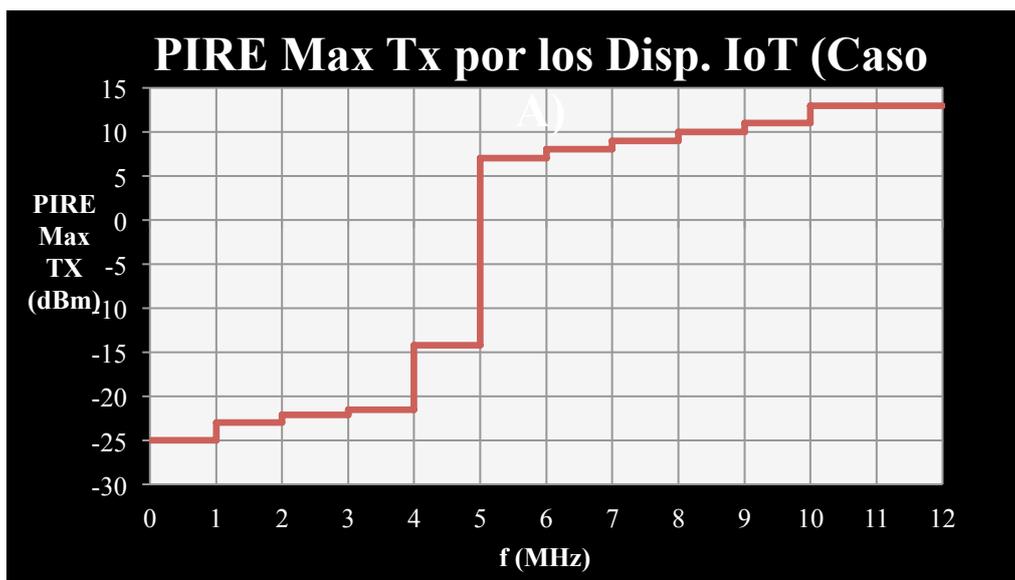


Figura 55. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso A.

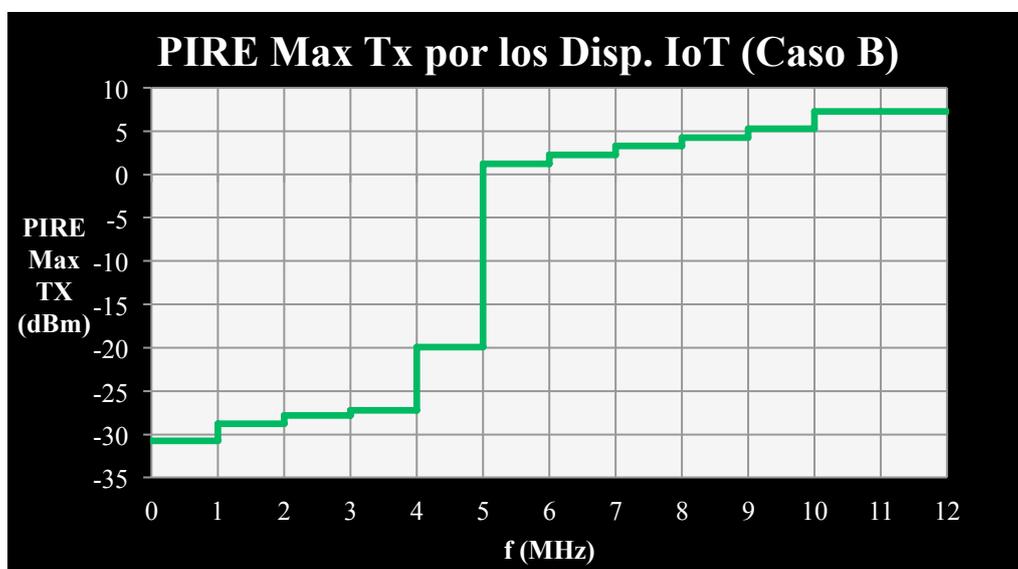


Figura 56. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso B.

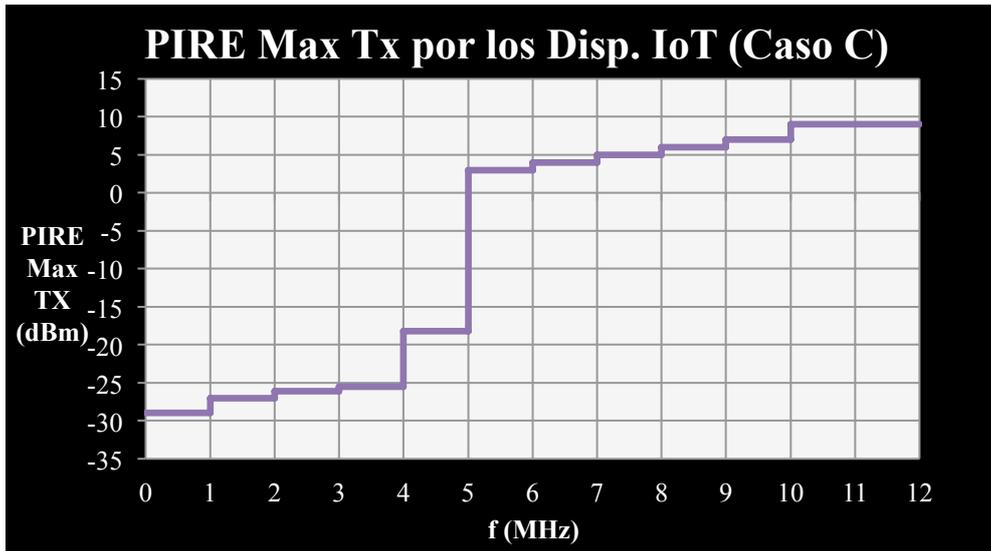


Figura 57. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso C.

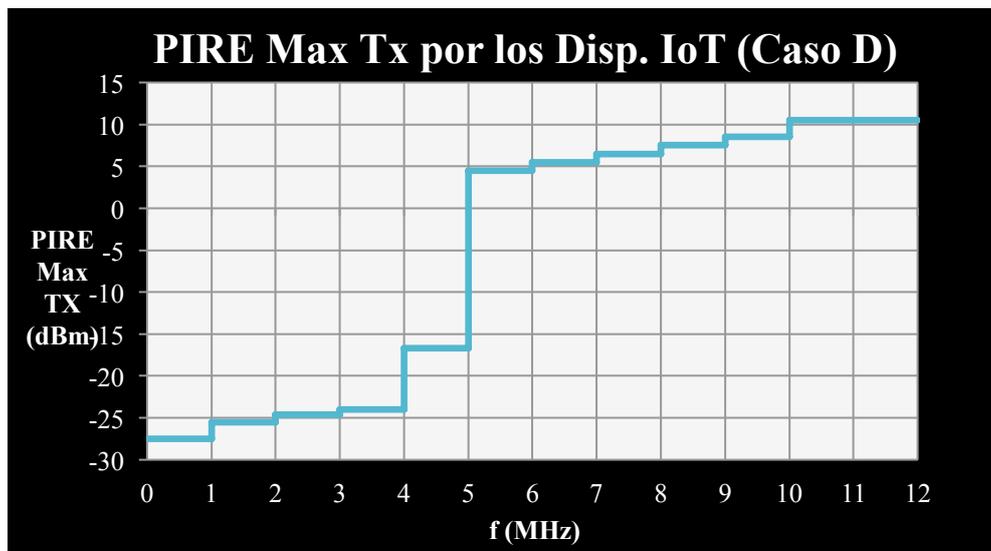


Figura 58. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso D.

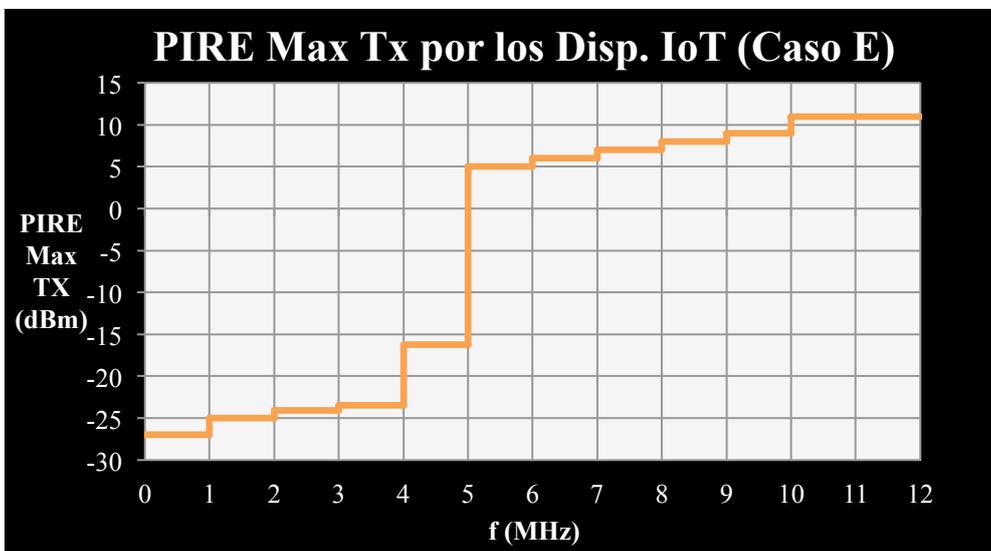


Figura 59. Máxima PIRE que pueden transmitir los dispositivos IoT (por MHz) en el caso E.

6.3.3 Tasas de bit de pico para NB-LTE

La Figura 60 muestra la capacidad que podrá ofrecer NB-LTE, en función del ciclo del trabajo de los dispositivos, es decir, el tiempo de transmisión y tiempo de espera entre transmisiones. Se calculó la tasa de bit de pico, teniendo en cuenta una modulación QPSK con un 25% de overhead debido a los canales de referencia, de sincronización y codificación.

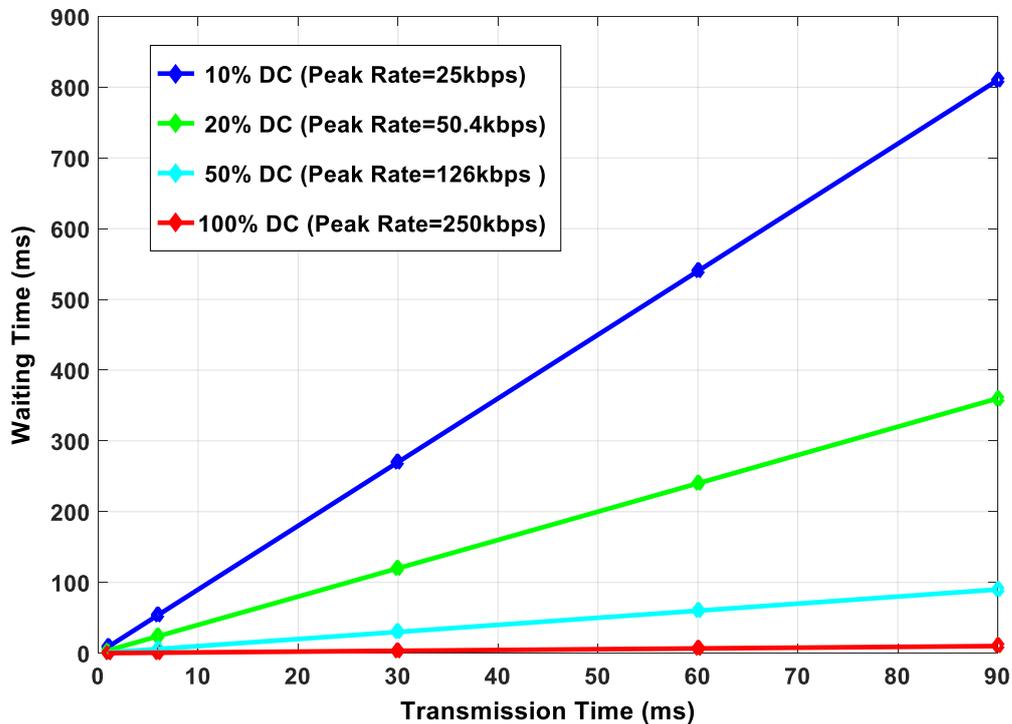


Figura 60. Tasa de pico para el enlace ascendente de NB-LTE, en función del tiempo de transmisión y el tiempo de espera.

Como se puede observar, la máxima tasa de transmisión que puede ofrecer NB-LTE, tanto para el enlace descendente como para ascendente, es de 250 KHz con un ancho de banda de 200KHz, para un ciclo de trabajo del 100% del tiempo transmitiendo, y que corresponde con los requisitos que se establecen para la tecnología IoT.

A medida que desciende el ciclo de trabajo (aumenta el tiempo de espera) se obtienen tasas menores ya que el porcentaje de tiempo en el que se transmite es menor. Se observa que existen diversas combinaciones de tiempo de espera y de transmisión que permiten obtener una misma tasa de bit concreta, lo que permite flexibilidad de operación en función de la aplicación IoT concreta. El uso de un ciclo de trabajo y otro, repercute además en la duración temporal de las baterías, teniendo vidas útiles largas cuando se emplean ciclos de trabajo bajos al estar durante un porcentaje de tiempo mayor en modo “reposo”. Por tanto, se observa que existe un compromiso a tener en cuenta entre la tasa de transmisión y la vida útil de la batería, que dependerá de la aplicación concreta que tenga cada dispositivo IoT.

6.4 Impacto económico debido al uso eficiente de espectro

La optimización de espectro mediante el uso eficiente de los White Spaces de la banda de televisión para la tecnología NB-LTE, conlleva un ahorro económico en el coste de licencias de espectro para las bandas que se proponen en este estudio por debajo de los 700 MHz.

Generalmente, la forma más habitual para cuantificar el precio de una porción discreta de espectro es mediante el precio que se paga por megahercio (€/MHz), aunque en muchas ocasiones se recurre también a otro método de valoración que se basa en la estimación de población potencial a la que se pretende dar servicio en el área de cobertura del operador concreto, expresándose como precio por megahercios por persona (€/MHz/pop). En las subastas de espectro, estos valores representan un valor de referencia para la compra de la licencia de una banda de frecuencias que, sin embargo, pueden variar en función de la situación de cada país individual.

En este estudio, dado que las frecuencias consideradas están todavía atribuidas a los servicios de radiodifusión de televisión, se han tomado valores de coste de espectro correspondientes a la banda 700 MHz (segundo dividendo digital) en base a diversas subastas realizadas en Europa hasta la fecha. La tabla siguiente, muestra los precios del MHz por persona obtenidos en las subastas realizadas en Europa por Alemania y Francia, siendo estos dos países los únicos que han subastado dicha banda hasta la fecha.

País	Operador	Precio de 2x5 MHz	Precio/MHz	Población	Precio/MHz/Pop
Alemania	Vodafone (-)	163,476 M€	16,3476 M€	82.040.000	0.199€/MHz/Pop
Alemania	Telekom (+)	171,649 M€	17,1649 M€	82.040.000	0.209€/MHz/Pop
Francia	Orange	466 M€	46,6 M€	64.614.000	0.721€/MHz/Pop

Tabla 10. Coste económico del espectro expresado en €/MHz/Pop, para los dos países de Europa (Alemania y Francia) que han realizado la subasta de la banda de 700 MHz [36][37].

Puede observarse que, en el caso de Alemania, al tener una mayor población y menores precios de las licencias (€/MHz), se obtienen unos valores de coste de MHz/Pop menores que los obtenidos en Francia, tanto para el operador que pagó más por el espectro (Telekom – 0.2092€/MHz/Pop) como para el que pagó menos por él (Vodafone – 0.1993€/MHz/Pop).

Respecto a los resultados obtenidos, los nodos y dispositivos de IoT bajo la tecnología NB-LTE, podrán hacer un uso eficiente de espectro de 7 y 6 MHz respectivamente. La tabla siguiente muestra el coste por megahercios por persona, que se obtendrían para los 6 y 7 MHz que podrían utilizar los servicios de IoT en la banda de TDT, en función de los costes de las licencias obtenidas (banda de 700 MHz), por los operadores móviles en Alemania y Francia.

Enlace	BW	Precio/MHz	Población considerada	Precio/MHz/Pop considerado	Ahorro Total obtenido
UL	6 MHz	16,3476 M€	82.040.000	0.1993€/MHz/Pop	98,0856 M€
DL	7 MHz	16,3476 M€	82.040.000	0.1993€/MHz/Pop	114,4332 M€
UP	6 MHz	46,6 M€	64.614.000	0.7212€/MHz/Pop	279,6 M€
DL	7 MHz	46,6 M€	64.614.000	0.7212€/MHz/Pop	326,2 M€

Tabla 11. Ahorro económico del espectro aprovechado por IoT en la banda de TDT.

Como se puede observar, si consideramos el caso de Alemania, se podrían obtener como mínimo, ahorros de entre 98 y casi 115 millones de euros para el enlace ascendente y descendente respectivamente. Si se considera, por otro lado, el caso de Francia (caso más optimista, mayor coste por megahercio), donde los niveles de población son más bajos y similares a otros países como Reino Unido (UK), Italia o en menor medida España, se obtiene que el ahorro se encuentra sobre casi los 280 millones de euros para el uplink y de unos 326 millones para el downlink.

Por último, el aprovechamiento total de los espacios en blanco de toda la banda de TDT (470-698 MHz) es alrededor de 72 a 84 MHz de espectro [13]. El impacto económico que se obtendría en toda la banda de TDT es aproximadamente entre 1150 y 1350 M€ (peor caso) o entre 3300 y 3900 M€ (mejor caso). No obstante, se debe tener en cuenta que el porcentaje total de espacios en blanco de la banda de TDT depende del uso del espectro para dicho servicio en cada país.

7. Conclusiones, Recomendaciones y Trabajo Futuro

7.1 Conclusiones

Las investigaciones llevadas a cabo demuestran que es factible el uso de la banda de TDT para la compartición de espectro entre los servicios de Internet of Things y televisión digital terrestre. NB-LTE haciendo uso eficiente de los espacios en blanco (TV-White Spaces) de la banda de TDT, como servicio secundario, podría ser desplegado en canal adyacente a DVB-T2, garantizando el correcto funcionamiento de los servicios primarios de TDT para recepción fija sobre tejado. Los resultados son válidos tanto para los nodos, como para los dispositivos IoT. De los resultados obtenidos en este proyecto se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Con respecto a las medidas de los **márgenes de protección** que garantizan el correcto funcionamiento de los servicios primarios de TDT, cuando NB-LTE interfiere haciendo uso de espectro compartido, se puede extraer que:

- En igualdad de condiciones de propagación y de sensibilidad considerada en el receptor TDT, los márgenes de protección en co-canal son muy restrictivos, tanto para los nodos IoT (entre 4 y 6 dB) como para los dispositivos IoT (entre 5 a 8 dB), siendo más restrictivos para el enlace ascendente.
- En adyacencia, los márgenes de protección son por lo menos entre 30 dB (enlace ascendente) y 42 dB (enlace descendente) menos restrictivos que en co-canal, para una separación en frecuencia de 4.6 MHz o una banda de guarda de 500 KHz respecto al borde del canal DVB-T2. Por tanto, los márgenes de protección son para el enlace ascendente (dispositivos IoT) entre 8 y 12 dB más restrictivos que en el enlace descendente. Esto es debido a que el receptor de TDT es más susceptible a interferencias de señales con alta variación temporal.
- El uso de distintos ciclos de trabajo de los dispositivos IoT, condiciona la interferencia que puede tolerar un receptor de TDT. Si consideramos un tiempo de transmisión fijo de 6ms (duración temporal de un M-Subframe) y variamos el tiempo de espera entre transmisiones, se obtienen mejoras en los márgenes de protección de hasta 10 dB en co-canal y hasta 4 dB en adyacencia, para tiempos de espera iguales o superiores a 250 ms (ciclos de trabajo 2% y 1%), debido a que la duración temporal de una trama DVB-T2 es 250 ms. Por otra parte, si consideramos un tiempo de espera de aproximadamente 250 ms (mejor configuración) y variamos el tiempo de transmisión de los dispositivos IoT, se concluye que los márgenes de protección no presentan importantes mejoras, obteniendo variaciones máximas de hasta 2 dB, tanto en co-canal como en adyacencia. Por tanto, el parámetro crítico a tener en cuenta en el enlace ascendente es el tiempo de espera entre transmisiones o de reposo.

Con lo que respecta a la **PIRE máxima que pueden transmitir los nodos IoT** en el enlace descendente, se concluye que:

- NB-LTE en co-canal a DVB-T2 no es factible, debido a la bajas PIREs (entre -38 y -36 dBm) que podrían transmitir los nodos IoT, cuando se considera una discriminación angular de la antena receptora de TDT de 0 dB (caso más restrictivo).
- En canal adyacente a DVB-T2, a partir de una banda de guarda de 500 KHz, los nodos IoT podrían transmitir con PIREs entre 8 y 15 dBm, dependiendo de la separación en frecuencia y considerando una discriminación angular de 0dB. Si se tiene en cuenta la orientación y ubicación de los nodos IoT respecto a la antena receptora de TDT, se

podría incrementar la PIREs de los nodos hasta en 16dBm (máxima discriminación angular de la antena receptora de TDT).

- La compartición de espectro entre NB-LTE y DVB-T2 haciendo uso de los espacios en blanco en la banda de TDT, permite optimizar 7 MHz de espectro para el despliegue de los servicios de Internet of Things (enlace descendente).

Con lo que respecta a la **PIRE máxima que pueden transmitir los dispositivos IoT** en el enlace ascendente, se concluye que:

- Al igual que ocurre para el enlace descendente, para el enlace ascendente tampoco es factible asignar frecuencias a los dispositivos IoT en co-canal con DVB-T2, debido a las bajas PIREs de transmisión (entre -25 y -30 dBm, para un ciclo de trabajo del 2% y dependiendo del escenario de estudio).
- En canal adyacente a DVB-T2, a partir de una banda de guarda de 1 MHz, los dispositivos IoT podrían transmitir con PIREs entre 8 a 14 dBm para el mejor escenario (Smart parking), considerando un ciclo de trabajo del 2% (tiempo de espera superior a 250ms) y discriminación angular de 0 dB. Con respecto al peor escenario (Traffic Congestion), podría transmitirse con una PIRE de entre 2 y 8 dBm, teniendo en cuenta las mismas consideraciones del escenario anterior. Para un ciclo de trabajo del 50% y banda de guarda entre 1 a 4 MHz respecto al borde de un canal DVB-T2, el dispositivo IoT tendría que reducir la máxima PIREs hasta en 3 dBm, respecto a las obtenidas para un ciclo de trabajo del 2%.
- Para el canal ascendente, se logra optimizar 6 MHz de espectro en la banda de TDT que podrían ser usados para el despliegue de los dispositivos IoT en espectro compartido con los servicios de TDT.

Con lo que respecta a la **tasa binaria en función del ciclo de trabajo**, se extrae lo siguiente:

- Si se reduce el ciclo de trabajo de los dispositivos, el porcentaje de tiempo sin transmitir es mayor y el dispositivo consume menos energía al estar en modo reposo, optimizando de esta forma la vida de la batería. Por lo tanto, existe un compromiso entre la durabilidad de la vida útil de la batería y la tasa de transmisión deseable ligada al ciclo de trabajo. El compromiso óptimo dependerá de la aplicación y caso de estudio.

Con lo que respecta al **ahorro económico en licencias de espectro** debido a la optimización de la banda de TDT, se extrae lo siguiente:

- Si se consideran que los costes de espectro en la banda de TDT son similares a los de la banda de 700 MHz y tomando como referencia las subastas de espectro realizadas en Europa hasta la fecha por países como Alemania y Francia, se obtiene que: por un lado, en el canal ascendente, la optimización de 6 MHz en espectro compartido conlleva un ahorro económico en licencias de espectro de entre 98 y 280 millones de euros, según se considere el caso peor (Alemania) o un caso más optimista (Francia); por otro lado, para el canal descendente el ahorro es todavía mayor al optimizar 7 MHz y obteniendo, en las mismas condiciones que el canal ascendente, valores de entre 114 y 326 millones de euros.

7.2 Recomendaciones

Para el uso compartido de la banda de TDT entre las tecnologías DVB-T2 y NB-LTE, donde los servicios IoT hacen uso eficiente de los espacios en blanco, como servicio secundario, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Respecto a las bandas de guarda entre las tecnologías, deberá existir un espaciado en frecuencia de 500 KHz respecto al borde del canal DVB-T2, para los nodos IoT y una banda de guarda de 1 MHz para los dispositivos IoT.
- Respecto al ciclo de trabajo de los dispositivos IoT, el tiempo de espera entre transmisiones óptimo deberá ser igual o superior a 250 ms (Este valor depende de la duración temporal de la trama de la tecnología que se verá interferida).
- Respecto a las máximas PIREs que podrían transmitir los nodos y dispositivos IoT, deberán cumplir con las máscaras de potencias definidas en la sección 6.3. A modo de resumen, la siguiente tabla muestra el rango mínimo y máximo de PIREs que podrían transmitir los dispositivos y nodos IoT, el cual depende de la banda de guarda respecto al borde del canal DVB-T2.

Separación respecto al borde del canal de TDT (MHz)	PIRE Máxima (dBm)					
	Todos los casos	Smart City		Smart Rural		eHealth
	Downlink	Caso A: Smart Parking	Caso B: Traffic Congestion	Caso C: Smart Agriculture	Caso D: Animal Tracking	Caso E: Patients Surveillance
1 – 8	8 - 15	7 -14	1.25 -8	3 -10	4.5 -11	5 -12

Tabla 12. Márgenes de PIRE transmisibles para los nodos y dispositivos IoT en cada uno de los escenarios bajo estudio para un ciclo de trabajo del 2%.

- Respecto a la topología de la red, se recomienda que los nodos y dispositivos sean ubicados estratégicamente. Las antenas de los dispositivos y nodos deberán estar apuntando en sentido opuesto a la dirección del apuntamiento máximo de la antena receptora de TDT. De esta forma, se estaría aprovechando la discriminación angular de la antena de TDT, permitiendo incrementarse hasta en 16 dBm las potencias definidas en el apartado anterior para los nodos y dispositivos IoT.

7.3 Trabajo Futuro

Como trabajo futuro, que se propone para dar continuidad al proyecto y extraer nuevos resultados, se plantean los siguientes puntos:

- Cuantificar la ganancia por transmitir con una polarización cruzada (nodos y dispositivos IoT) respecto a la utilizada en TDT (típicamente horizontal).
- Validar los requerimientos técnicos en recepción para los nodos y dispositivos IoT que garanticen el correcto funcionamiento en presencia de la TDT en bandas adyacentes.
- Realizar medidas de campo que permitan validar los resultados presentados.
- Evaluar otros modos de operación de la tecnología NB-LTE que permitan definir nuevas potenciales bandas de operación para su implementación. Por ejemplo, haciendo uso eficiente de los Gap que hay entre el enlace ascendente y descendente de LTE en la banda de 700 MHz.
- Elaborar estudios de coexistencia entre TDT con otras tecnologías propuestas por el 3GPP para el estándar de IoT como EC-GSM (*EGPRS enhancements for Internet of Things*)

7.4 Difusión de los resultados

- Artículos en conferencias y eventos internacionales:

- [1] Kevin Llamas, Gerardo Martínez, y Narcís Cardona, “*Spectrum sharing in DTT band for IoT Services provision*”, European COST CA15104 action, Lille, France, 2016.
- [2] Gerardo Martínez, Kevin Llamas y Narcís Cardona, “*Potential Sharing between DTT and IoT Services in the UHF band*”, IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2016.

8. Referencias

- [1] 3GPP TR 45.820, “*Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT)*,” Aug. 2015.
- [2] Maria Rita Palattella *et al.*, “*Internet of Things in the 5G Era - Enablers, Architecture and Business Models*,” White Paper, 2015.
- [3] 3GPP, “*3GPP Standards for the Internet-of-Things*,” GSMA MIoT, Feb. 2016.
- [4] ITU and Cisco Report, “*Harnessing the Internet of Things for Global Development*,” Geneva 2016.
- [5] Nokia, “*LTE-M – Optimizing LTE for the Internet of Things*,” Nokia Networks White Paper, 2015.
- [6] Ofcom, “*Promoting investment and innovation in the Internet of Things*,” Jul. 2014.
- [7] Ofcom, “*More Radio Spectrum for the Internet of Things*,” Sept. 2015.
- [8] J. Ribadeneira, G. Martinez, D. Gomez, N. Cardona, “*Interference Analysis Between Digital Terrestrial Television (DTT) and 4G LTE Mobile Networks in the Digital Dividend Bands*”, IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 62, no.01, pp.1-11, Mar. 2016.
- [9] ITU-R, “*Provisional Final Acts World Radiocommunication Conference (WRC-15)*,” Nov. 2015.
- [10] Pascal Lamy, “*Results of the work of the High Level Group on the use of the UHF band (470-790 MHz)*,” Report to the European Commission, 2013.
- [11] Comisión Europea, “*Propuesta de DECISIÓN DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO sobre el uso de la banda de frecuencias de 470-790 MHz en la Unión*,” Feb. 2016.
- [12] CEPT, “*Long Term Vision for the UHF broadcasting band*,” ECC Report 224, Nov. 2014.
- [13] Janne Riihijarvi, Andreas Achtzehn, Petri Mähönen, “*UHF white space in Europe – a quantitative study into the potential of the 470–790 MHz band*,” White Paper, 2011.
- [14] Peter Corcoran, “*The Internet of things - Why now, and what’s next*,” IEEE Consumer Electronics Magazine, Jan. 2016.
- [15] EBU TECH 3348, “*Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2*,” Report, Version 3.0 2013.
- [16] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., “*Waspmote Plug & Sense! Technical Guide*,” 2016.
- [17] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., “*Smart Parking Technical Guide*,” 2015.
- [18] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., “*Smart Cities Technical Guide*,” 2016.
- [19] GSMA, “*Agricultural machine-to-machine (Agri M2M): a platform for expansion*,” 2015.

- [20] ITU-R, “*Planning criteria, including protection ratios, for digital terrestrial television services in the VHF/UHF bands,*” Recommendation ITU-R BT.1368-12, Feb. 2015.
- [21] ITU-R, “*Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers,*” Recommendation ITU-R BT.2215, May 2011.
- [22] DIGITALEUROPE, “*Standardized DVB-T2 RF specifications,*” White paper, 2012.
- [23] ITU-R, “*Planning Criteria, Including Protection Ratios, for Second Generation of Digital Terrestrial Television Broadcasting Systems in the VHF/UHF Bands,*” Recommendation ITU-R BT.2033, Jan. 2013.
- [24] ITU-R, “*Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting,*” Recommendation ITU-R BT.419, 1992.
- [25] W. Yamada, M Sasaki, Oliver Holland, S. Ping and other, “*Indoor Propagation Model for TV White Space,*” CROWNCOM, Jun. 2014.
- [26] ITU-R, “*Calculation of free-space attenuation,*” Recommendation ITU-R P.525-2, 1994.
- [27] Digi, “*Indoor Path Loss,*” Jun. 2012.
- [28] ITU-R, “*Emisiones no deseadas en el dominio no esencial,*” Recomendación UIT-R SM.329-12, Sept. 2012.
- [29] ITU-R, “*Variación del límite entre los dominios de emisión fuera de banda y no esencial requerida para la aplicación de las Recomendaciones UIT-R SM.1541 y UIT-R SM.329,*” Recomendación UIT-R SM.1539-1, 2002.
- [30] ITU-R, “*Unwanted emissions in the out-of-band domain,*” Recommendation ITU-R SM.1541-6, Aug. 2015.
- [31] ITU-R, “*Generic unwanted emission characteristics of base stations using the terrestrial radio interfaces of IMT-Advanced,*” Recommendation ITU-R M.2070-0, Jan. 2015.
- [32] ITU-R, “*Generic unwanted emission characteristics of mobile stations using the terrestrial radio interfaces of IMT-Advanced,*” Recommendation ITU-R M.2071-0, Jan. 2015.
- [33] 3GPP, “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception,*” TS 36.101 version 10.3.0 Release 10, Jun. 2011.
- [34] CEPT, “*Unwanted emissions of common radio systems: measurements and use in sharing/compatibility studies,*” ECC Report 249, Apr. 2016.
- [35] 4G Americas, “*Cellular Technologies Enabling the IoT,*” White Paper, Nov. 2015.
- [36] Bundesnetzagentur, “*Telecommunications / Frequency Management / Electronic Communications Services / Mobile Broadband – Project 2016,*” spectrum auction for mobile broadband, Jun. 2015.
- [37] FierceWireless (Europe), “*France raises €2.8B from 700 MHz spectrum auction,*” Press article, Nov. 2015.

9. Anexos

Anexo A: Definiciones

A.1. Margen de protección

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, ya sea de tipo objetivo (BER mínimo) o subjetivo (visual u auditivo).

A.2. Ciclo de Trabajo (Duty Cycle)

El ciclo de trabajo se define como el cociente entre el tiempo en el cual se está transmitiendo y el tiempo total del período de repetición, que engloba transmisión y espera. Al tiempo de espera se le conoce también como “Sleep Mode” o modo de reposo, en el cual se considera que el dispositivo únicamente realiza operaciones de mantenimiento básicas. El ciclo de trabajo puede calcularse como:

$$DC(\%) = \frac{T_{tx}}{T_{tx} + T_{esp}} \cdot 100$$

A.3. Ganancia por Pérdidas de Canal

Se entiende por ganancia por pérdidas de canal, al incremento de potencia que puede considerarse en la máxima PIRE de un sistema transmisor, debido a las pérdidas que la señal transmitida sufre a lo largo del canal hasta alcanzar la entrada del receptor. En este estudio, dicha ganancia considera las pérdidas debidas a la propagación por espacio libre (FSL), las pérdidas debidas a los obstáculos intermedios y las pérdidas por la discriminación de la antena receptora en caso de no incidir por el lóbulo principal. La forma de calcular la ganancia por pérdidas de canal es mediante el uso de las siguientes expresiones:

$$G_{PC}(dB) = FSL + L_{OBS} - D(\phi), \quad \text{con} \quad FSL = 20 \log\left(\frac{4\pi D}{\lambda}\right)$$

A.4. Máscara de Borde de Bloque (BEM – Block Edge Mask)

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.

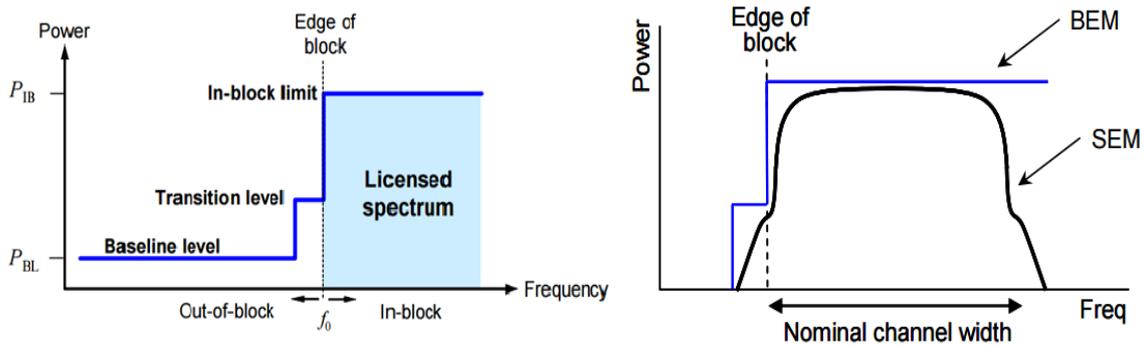


Figura 61. Perfil frecuencial de la BEM.

A.5. 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.

A.6. 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 la señal útil de señales interferentes a frecuencias diferentes. Así pues, por encima del umbral de saturación el receptor se comportará de una forma no lineal, lo que influirá en la calidad de la señal útil detectada pero que no implica un fallo inmediato, dependiendo de las características del receptor y la interferencia.

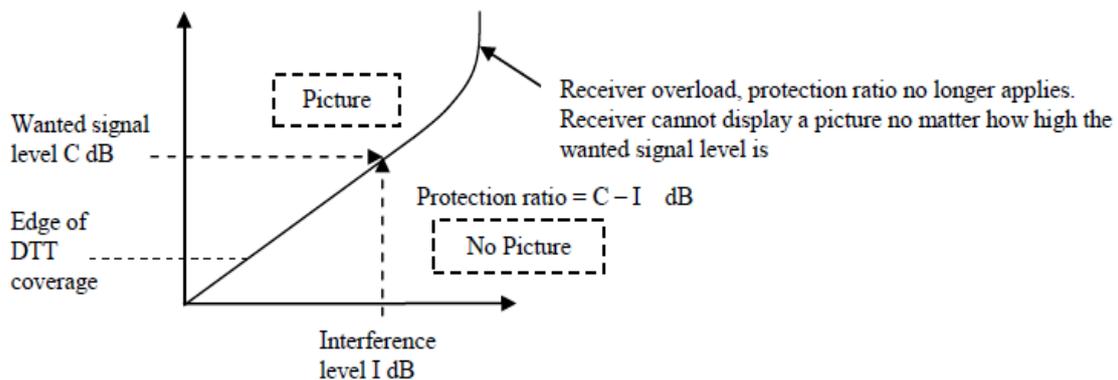


Figura 62. Descripción de margen de protección y umbral de saturación de un receptor de TDT ideal