



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Compartición del Espectro Radio Eléctrico entre Tecnologías Inalámbricas de Última Generación en la Banda de la Televisión Digital Terrestre

Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
Universitat Politècnica de València

Tesis para el título de
Doctor en Telecomunicaciones
Valencia, Abril 2018

Autor:

Gerardo Martínez Pinzón

Director:

Prof. Narcís Cardona Marcet

Director

Prof. Narcís Cardona Marcet

Director del Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
Universitat Politècnica de València, España

Revisores

Dr. David Eduardo Vargas Paredero

Project R&D Engineer
British Broadcasting Corporation (BBC), United Kingdom

Dr. Paolo Grazioso

Senior Researcher and serves as Project Manager
Fondazione Ugo Bordoni, Italy

Dr. Manuel Maria Velez Elordi

Profesor Asociado
Universidad del País Vasco, España

Tribunales

Dr. Pablo Angueira Buceta

Profesor Catedrático
Universidad del País Vasco, España

Dr. José Francisco Monserrat del Río

Profesor Catedrático
Universitat Politècnica de València, España

Dr. David Eduardo Vargas Paredero

Project R&D Engineer
British Broadcasting Corporation (BBC), United Kingdom

Abstract

The frequency band assigned to television services has suffered significant attribution and reorganization changes, due to introduction of digital technologies and new data compressing systems, which allowed reduction of the required number of frequencies for transmitting digital television services compared to the analogical ones. Accordingly, a part of the frequency bands was released, the so-called digital dividend bands. First digital dividend is related to the frequency bands from 790 MHz to 862 MHz (also known as 800 MHz band) in Regions 1 (Europe and Africa), and 3 (Asia and Oceania), and the band from 698 MHz to 806 MHz (known as the 700 MHz band as well) in Region 2 (Americas). The second digital dividend (DD2) comprises the frequency range from 694 MHz to 790 MHz in Regions 1 and 3, and the band from 614 MHz to 698 MHz in Region 2 (known as the 600 MHz band). **These bands were primary allocated to International Mobile Services 2000-2020 (IMT-2000-2020), with the purpose of meeting additional requirements of spectrum that are being demanded nowadays and the exponential growth which has been projected for the next decade.** One of the main reasons which motivate the high spectrum demand of last generation mobile technologies is the new technological revolution which is supposed to connect a massive number of devices or objects to the internet (in the order of billions of devices). **Thus, implementation of mobile services in the band of the digital dividends involves important challenges in the harmonization of the use of the spectrum between television and fourth generation mobile networks.**

In this thesis, we propose that harmonization and efficient use of the television band can be addressed through three approaches: The first one, is the migration from analogical to digital television, and thus the release of the digital dividend band for further implementation of last generation mobile networks. The second one, is to ensure compatibility or coexistence between television and mobile networks in the digital dividend. And the last one, is the future usage of the television band after the digital dividends.

Migration process from analogue switch-off to digital is a technological change that has been addressed at least for two decades. The United Kingdom and USA were the first countries to start the transition process of the analogue switch-off in the year 1998. **In Europe, the European Commission suggested May of 2005 as recommended date, and 2012 as due date for the analogue switch-off in every member state.** Currently, the number of worldwide countries which have completed the process is 54, being the Netherlands the first one to broadcast every television service with digital technology in 2006. **In South America, analogue switch-off is still in progress, with period differences among the belonging countries. In Central America, Mexico became the first country in completing the switch-off in 2015, whereas in South America no country has achieved completely the analogue switch-off, spending at least one decade (Brazil) in this process.** In particular, analogue switch-off has been conceived for these dates: Ecuador in 2018 (it is expected to be put off due to problems in network deployment); Colombia, Argentina and Bolivia in 2019; Chile and Venezuela in 2020; Brazil in 2023 (considering the fact that they must cover a national population coverage ≥ 90 %); Paraguay in 2024; Peru in 2025; and Uruguay yet to be defined.

Coexistence or compatibility of television and mobile networks within the bands of the digital dividends involves the definition of operation technical requirements for each of the adjacent working networks, which must ensure proper operation of every primary service without quality degradation. In Europe, clearing the band of the first digital dividend and implementation of networks operating within the 800 MHz band have been carried out during the last years. **In addition, it was planned that deployment of mobile networks in the second dividend band (700 MHz band), is performed by the year 2020 with a period difference of ± 2 years. In South America, no country has cleared completely the 700 MHz band (first dividend for America and second for Europe), taking into account the delays they have suffered with the analogue cut-off.**

In 2015, the International Telecommunication Union in the World Radiocommunication Conference established that in 2023 there will be a review about the future usage of the television band (remaining band once the digital dividends

finish), i.e., it will be discussed if this band will remain for television as primary service, or it can be assigned to other radiocommunication services as co-primary or secondary service, considering three perspectives: **First, there are the additional spectrum requirements of mobile technologies**, due to the high transmission speeds which are required for new services, and because of the massive interconnection of devices to the internet. **The second one, because of the inefficient usage of the unused frequencies from the DTT band or TV-White-Space.** The USA and United Kingdom were the first countries to regulate the usage of the TV-White-Spaces. **The third one, is due to the market share diversity in the linear television content, which varies depending on the country, e.g., in Belgium the television market share ranges around a 4% whereas in Italy reaches the 89%.** Nowadays, there is a revolution and growing acceptance about watching audio-visual contents through online on-demand video platforms (non-linear television), such as Netflix, HBO, etc. For these reasons, the ITU requested comparison and compatibility studies which define possible usage cases for the television band, which comprises the technical requirements of the candidate systems, as well as the possible technologies.

This thesis deals with the issue about coexistence between television and fourth generation mobile networks within the band of the first digital dividend (700 MHz band), in South America. Moreover, two potential cases of sharing spectrum for future use of the television band after the digital dividends are suggested as an efficient and flexible way for usage of the radio spectrum.

In order to ensure the coexistence between the television and mobile technologies within the band of the first digital dividend in South America, the impact of the mobile networks as well as the opposite situation are assessed, taking into account the technical operation parameters for each of the involved networks, which are defined by standardizing organisms or real parameters from implemented networks in each country. Among the technical parameters that were defined for the networks we can mention: protection ratio between television and mobile signals (maximum interfering power allowed in the receiver input without degradation of quality from the useful service, depending in the frequency gap); protection distances between the interfering transmitter and the victim receiver; required guard bands between both technologies; maximum power of the interfering out-of-band emissions in adjacent channels; additional attenuation levels in the spectrum emission mask in transmission and reception; assessing of interference mitigation techniques, among others. It is important to highlight that the main differences between the coexistence studies for South America and Europe are: the guard bands in South America are 5 MHz whereas in Europe are 9 MHz; bandwidth for a channel in South America is 6 MHz in contrast with the 8 MHz of Europe; the television standard adopted in almost all South America is ISDB-Tb, except Colombia and the French Guiana, which

adopted DVB-T2. In Europe, almost every country adopted the first and second generation of the DVB-T standard. The significance of this contribution remains in the fact that no country in South America has deployed mobile networks in the 700 MHz band, and thus the technical operation requirements defined in the scope of this thesis, will be useful for standardization organizations as well as companies.

Additionally, within the scope of this thesis, two potential study cases for future usage of the TV band are proposed, promoting sharing spectrum as an efficient access way: **The first study we go a step beyond coexistence, since the aim is to exploit the unused radio spectrum in those geographical zones that are not covered because the useful signal is obstructed by the environment or it has a limited coverage by the network design. Those areas can be called “micro-TVWS” (μ -TV-White-Space).** The most representative cases of our definition of μ -TV-White-Space are those indoor environments in areas where DTT received power is below the required sensitivity because a TV channel is broadcasted to rooftop reception. The proposed scenario considers a DTT network offering fixed rooftop reception as a primary service, and a LTE-A femtocell giving coverage within the interior of a home or office as a secondary service. Our results provide the technical restrictions of the LTE-A Femtocell, mainly on the maximum allowable Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) that could transmit on the DTT band in terms of carrier separation, from co-channel to adjacent band. **The second study case, suggests the use of white spaces for spectrum sharing among the Internet of Things (IoT) services, under the NB-LTE-IoT standard, as secondary service, and digital terrestrial television services under the DVB-T2 standard, as primary service.** The maximum transmissible power by the nodes and IoT devices without interfering the primary service is defined. Besides, the impact of the duty cycle of the devices is assessed considering that there will be a great diversity of applications, and thus, a great diversity of operation requirements. **The significance of this proposal is due to two contributions: on the one hand, the usage of the television band is optimized through secondary access of low power devices within the white spaces, always ensuring television services as primary service. On the other hand, new frequencies for last generation mobile technologies are given, with the aim of increasing the network capacity, which will bear mobile services as well as IoT, regarding the high challenge of offering connectivity to millions of devices during the next decade.**

Resumen

La banda de frecuencias atribuida a los servicios de televisión ha tenido importantes cambios de atribución y reordenación en la última década. Esto es debido a la introducción de las tecnologías digitales y sistemas de compresión de información más eficientes en el campo de la televisión, los cuáles permitieron reducir el número de frecuencias necesarias para la transmisión de los servicios de televisión con tecnología digital respecto a la analógica. En consecuencia, se permitió liberar un conjunto de bandas de frecuencias, conocidas como las bandas del dividendo digital. El primer dividendo digital, corresponde a la banda de frecuencias de 790 MHz a 862 MHz (conocida también como la banda de 800 MHz) en las Regiones 1 (Europa y África), y 3 (Asía y Oceanía), y la banda de 698 MHz a 806 MHz (conocida también como la banda de 700 MHz) en la Región 2 (América). El segundo Dividendo Digital (DD2), comprende el rango de frecuencias de 694 MHz a 790 MHz en las Regiones 1 y 3, y la banda de 614 MHz a 698 MHz en la Región 2 (conocida también como la banda de 600 MHz). **Estas bandas fueron atribuidas a título primario a los Servicios Móviles Internacionales 2000-2020 (IMT-2000-2020, en inglés), con el objetivo de satisfacer los requerimientos adicionales de espectro que demandan en la actualidad y el crecimiento exponencial que se proyecta para la próxima década.** Una de las principales razones que motiva la alta demanda de espectro de las tecnologías móviles de última generación se debe a la nueva revolución tecnológica que pretende la interconexión masiva de dispositivos u objetos a internet (del orden de billones de dispositivos). **Por lo tanto, la implementación de los servicios móviles en la banda de los dividendos digitales provoca retos importantes en la armonización del uso de la banda entre las redes de televisión y móviles de cuarta generación.**

En la presente tesis proponemos que la armonización y uso eficiente de la banda de televisión puede afrontarse a través de tres enfoques: El primero de ellos, es la migración de la televisión analógica a la digital, y, por ende, la liberación de la banda de los dividendos digitales para la posterior implementación de las redes móviles de última generación. El segundo de ellos, es garantizar la compatibilidad o convivencia entre las redes de televisión y las móviles en las bandas de los dividendos digitales, y el tercero de ellos, es el uso futuro de la banda de televisión después de los dividendos digitales.

El proceso de migración del apagón analógico a la digital es un cambio tecnológico que se viene abordando al menos hace dos décadas, Reino Unido y Estados Unidos fueron los primeros países en iniciar el proceso de transición del apagón analógico en el año 1998. **En Europa, la Comisión Europea propuso como fecha recomendada mayo de 2005, y como fecha límite para el apagón analógico en todos los países que la conforman en el año 2012.** En la actualidad, el número de países a nivel mundial son 54, los que han llevado a cabo completamente el proceso, convirtiéndose Holanda en el primer país en emitir todos los servicios de televisión con tecnología digital en el año 2006. **En Sudamérica, el proceso de apagón analógico a nivel nacional está aún en proceso, con diferencias temporales entre los países que la conforman. En América central, México se convirtió en el primer país en llevar a cabo el apagón en el año 2015, mientras que en Sudamérica ningún país hasta la fecha ha culminado el apagón analógico en su totalidad, cumpliendo al menos una década (Brasil) en este proceso.** Concretamente, se proyecta el apagón analógico para las siguientes fechas: Ecuador para el año 2018 (se espera que esta fecha se extienda temporalmente debido a los inconvenientes de los despliegues de las redes); Colombia, Argentina y Bolivia para el año 2019; Chile y Venezuela para el año 2020; Brasil para el año 2023 (para alcanzar una cobertura poblacional a nivel nacional $\geq 90\%$); Paraguay para el año 2024; Perú para el año 2025; y Uruguay aún por definir

La convivencia o compatibilidad de las redes de televisión y móviles en las bandas de los dividendos digitales aborda la definición de los requerimientos técnicos de operación de cada una de las redes operando en adyacencia, los cuales garanticen el correcto funcionamiento de cada uno de los servicios primarios sin que exista ninguna degradación de la calidad. En Europa, la limpieza de la banda del primer dividendo digital y la implementación de las redes operando en la banda de 800 MHz ha sido llevada a cabo en los últimos años. **Asimismo, se proyectó que el despliegue de las redes móviles en la banda del segundo dividendo digital (banda de 700 MHz), sea realizado para el año 2020 con una diferencia temporal de ± 2 años.** En Sudamérica, ningún país ha llevado a cabo en su totalidad la limpieza de la banda de 700 MHz (primer dividendo para América y segundo para Europa), teniendo en cuenta los retrasos que han tenido con el apagón analógico.

En el año 2015, la Unión Internacional de Telecomunicaciones en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones determinó que en el año 2023, se realizarán revisiones acerca del uso futuro de la banda de televisión (banda restante una vez llevados a cabo los dividendos digitales), es decir, se discutirá si seguirá atribuida a título primario a los servicios de televisión, o podría ser atribuida a otros servicios de radiocomunicaciones a título co-primario o secundario, teniendo en cuenta principalmente tres perspectivas: **La primera de ellas, son los requerimientos adicionales de espectro de las tecnologías móviles**, debido a las altas velocidades de transmisión que se requieren por los nuevos servicios, y a la interconexión masiva de dispositivos a internet. **La segunda de ellas, por el uso ineficiente de las frecuencias libres de la banda de TDT o TV-White-Space**. Estados Unidos y Reino Unido fueron los primeros países en regular el uso de los TV-White-Spaces para dispositivos de baja potencia a modo de acceso compartido horizontal secundario. Otros países como Canadá y Colombia también han regulado el uso de los TV-White-Spaces. **La tercera de ellas, por la diversidad de cuotas de mercado en la difusión lineal de contenidos televisivos, que varía en función del país, por ejemplo, en Bélgica el mercado de televisión oscila en el 4% mientras en Italia alcanza hasta el 89%**. En la actualidad, hay una revolución y creciente aceptación de ver los contenidos audiovisuales por plataformas de video bajo demanda a través de internet (televisión no-lineal), tales como Netflix, HBO, entre otros. Por todas estas razones, la ITU, solicitó estudios de compatibilidad que definan posibles casos de uso para la banda de televisión, que comprenden desde la definición de los requerimientos técnicos, así como también, las posibles tecnologías.

La presente tesis aborda la problemática de la convivencia entre las redes de la televisión digital terrestre y móvil de cuarta generación en la banda del primer dividendo digital (banda de 700 MHz), en Sudamérica. Además, se proponen dos potenciales casos de uso de compartición de espectro para el uso futuro de la banda de televisión después de los dividendos digitales, como modo de acceso eficiente y flexible para el uso del espectro radioeléctrico.

Para garantizar la convivencia entre las tecnologías de televisión y móviles en la banda del primer dividendo digital en Sudamérica, se evalúa tanto el impacto de las redes móviles sobre las de televisión, así como el caso contrario, las redes de televisión sobre las móviles, teniendo en cuenta los parámetros técnicos de operación de cada una de las redes implicadas, los cuales son definidos por organismos de estandarización o parámetros reales de redes implementadas por cada país. Dentro de los parámetros técnicos de operación que se definieron para las redes podemos citar: márgenes de protección entre las señales de televisión y móviles (máxima potencia interferente permitida a la entrada del receptor víctima sin que la calidad del servicio útil sea degradada, en función de la separación en frecuencia); distancias de protección entre el transmisor interferente y el receptor víctima; banda de guarda requeridas entre

las dos tecnologías; límites de emisiones interferentes fuera de banda; niveles de atenuación adicionales en las máscaras espectrales; evaluación de técnicas de mitigación de interferencias, entre otros. **Es importante resaltar, que las principales diferencias entre los estudios de convivencia en Sudamérica respecto a Europa son: la banda de guarda en Sudamérica son 5 MHz mientras en Europa son 9 MHz; el ancho de banda de un canal de televisión en Sudamérica es 6 MHz respecto a 8 MHz en Europa; el estándar de televisión adoptados en casi toda Sudamérica es ISDB-Tb, a excepción de Colombia que adopto DVB-T2. En Europa casi todos países tienen adoptados los estándares DVB-T de primera y segunda generación. La importancia de esta contribución se fundamenta en que en Sudamérica ningún país ha desplegado a nivel nacional redes móviles en la banda de 700 MHz, y, por ende, los requerimientos técnicos de operación definidos en el ámbito de esta tesis, podrán ser útiles tanto para organismos de estandarización como empresas.**

Asimismo, en el ámbito de esta tesis, se proponen dos potenciales casos de estudio para el uso futuro de la banda de TV, promoviendo la compartición de espectro como un modo de acceso eficiente: **El primer caso de estudio, propone un nuevo concepto de espacios en blanco llamado μ -TV-White-Space, los cuales son aquellas zonas geográficas en los interiores de una vivienda y/o oficina que no son cubiertas por el servicio de televisión digital terrestre, ya sea por la ausencia de cobertura o por obstáculos. El escenario propuesto es una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado, como servicio primario, y, femtoceldas LTE-A en interiores de un hogar u oficina, como servicio secundario.** Los resultados obtenidos proporcionan restricciones técnicas para que las femtoceldas LTE-A puedan operar correctamente en espectro compartido con los servicios de televisión. Específicamente, se define la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima que podrían transmitir las femtoceldas, en función de la separación en frecuencia con los servicios de televisión. **El segundo caso de estudio, propone el uso de los espacios en blanco para la compartición de espectro entre los servicios de internet de las cosas bajo el estándar NB-LTE-IoT, como servicio secundario, y servicios de televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T2, como servicio primario.** Se define la máxima potencia transmisible por los nodos y dispositivos IoT sin interferir al servicio primario. Además, se evalúa el impacto del ciclo de trabajo de los dispositivos considerando que existirá diversidad de aplicaciones. **La importancia de esta propuesta se fundamenta en dos contribuciones: por un lado, se optimiza el uso de la banda de televisión mediante el acceso secundario de dispositivos de baja potencia en los espacios en blanco, siempre garantizando los servicios de televisión, como servicio primario, por otro lado, se contribuye con nuevas frecuencias para las tecnologías móviles de última generación, con el objetivo de aumentar la capacidad de las redes que soportarán tanto los servicios móviles como IoT.**

Resum

La banda de freqüències atribuïda als serveis de televisió ha patit importants canvis d'atribució i reordenació en l'última dècada, a causa de la introducció de les tecnologies digitals i nous sistemes de compressió d'informació, que van permetre reduir el nombre de freqüències necessàries que es requerien per a la transmissió dels serveis de televisió amb tecnologia analògica respecte de la digital. Conseqüentment, es va permetre alliberar un conjunt de bandes de freqüències, conegudes com les bandes del dividend digital. El primer dividend digital, correspon a la banda de freqüències de 790 MHz a 862 MHz (coneguda també com la banda de 800 MHz) en les Regions 1 (Europa i Àfrica), i 3 (Àsia i Oceania), i la banda de 698 MHz a 806 MHz (coneguda també com la banda de 700 MHz) en la Regió 2 (Amèrica). El segon Dividend Digital (DD2), comprèn el rang de freqüències de 694 MHz a 790 MHz en les Regions 1 i 3, i la banda de 614 MHz a 698 MHz en la Regió 2 (coneguda també com la banda de 600 MHz). **Aquestes bandes van ser atribuïdes a títol primer als Serveis Mòbils Internacionals 2000-2020 (IMT-2000-2020, en anglès), amb l'objectiu de satisfer els requeriments addicionals d'espectre que demanden en l'actualitat i el creixement exponencial que se'n projecta per a la pròxima dècada.** Una de les principals raons que motiva l'alta demanda d'espectre de les tecnologies mòbils d'última generació es deu a la nova revolució tecnològica que pretén la interconnexió massiva de dispositius o objectes a internet (de l'orde de bilions de dispositius). **Per tant, la implementació dels serveis mòbils en la banda dels dividends digitals provoca reptes importants en l'harmonització de l'ús de la banda entre les xarxes de televisió i mòbils de quarta generació.**

En la present tesi proposem que l'harmonització i ús eficient de la banda de televisió pugui afrontar-se a través de tres enfocaments: El primer d'ells, és la migració de la televisió analògica a la digital, i per tant, l'alliberament de la banda dels dividends digitals per a la posterior implementació de les xarxes mòbils d'última generació. El segon d'ells, és garantir la compatibilitat o convivència entre les xarxes de televisió i les mòbils en les bandes dels dividends digitals, i el tercer d'ells, és l'ús futur de la banda de televisió després dels dividends digitals.

El procés de migració de l'apagada analògica al digital és un canvi tecnològic que s'ha vingut abordant almenys de fa dues dècades. **El Regne Unit i els Estats Units van ser els primers països en iniciar el procés de transició de l'apagada analògica l'any 1998. A Europa, la Comissió Europea va proposar com a data recomanada maig del 2005, i com a data límit per a l'apagada analògica a tots els països que la formen l'any 2012.** En l'actualitat, el nombre de països a nivell mundial són 54, els quals han portat a terme completament el procés, dels quals Holanda s'ha convertit en el primer país en emetre tots els serveis de televisió amb tecnologia digital l'any 2006. **A Sud-Amèrica, el procés d'apagada analògica a nivell nacional encara està en procés, amb diferències temporals entre els països que en formen part. A l'Amèrica central, Mèxic es va convertir en el primer país en portar a terme l'apagada l'any 2015, mentre que a Sud-Amèrica cap país a data de hui ha culminat l'apagada analògica totalment, i alguns fins i tot compleixen una dècada (Brasil) en aquest procés.** Concretament, es projecta l'apagada analògica per a les següents dates: Equador per a l'any 2018 (s'espera que aquesta data s'ajorne temporalment pels inconvenients dels desplegaments de les xarxes); Colòmbia, Argentina i l' Bolívia per a l'any 2019; Xile i Veneçuela per a l'any 2020; Brasil per a l'any 2023 (tenint en compte que deuen complir una cobertura poblacional a nivell nacional $\geq 90\%$); Paraguai per a l'any 2024; Perú per a l'any 2025; i l'Uruguai encara per definir.

La convivència o compatibilitat de les xarxes de televisió i mòbils en les bandes dels dividends digitals aborda la definició dels requeriments tècnics d'operació de cadascuna de les xarxes operant en adjacència, els quals garantisquen el correcte funcionament de cadascun dels serveis primaris sense que existisca cap degradació de qualitat. A Europa, la neteja de la banda del primer dividend digital i la implementació de les xarxes operant en la banda de 800 MHz s'ha portat a terme en els últims anys. **Així mateix, es va projectar que el desplegament de les xarxes mòbils en la banda del segon dividend digital (banda de 700 MHz), siga realitzat per a l'any 2020 amb una diferència temporal de ± 2 anys.** A Sud-Amèrica, cap país ha portat a terme totalment la neteja de la banda de 700 MHz (primer dividend per a Amèrica i segon per a Europa), tenint en compte els retards que han tingut amb l'apagada analògica.

L'any 2015, la Unió Internacional de Telecomunicacions en la Conferència Mundial de Radiocomunicacions va determinar que l'any 2023, es realitzaran revisions al voltant de l'ús futur de la banda de televisió (banda restant una volta portats a terme els dividends digitals), és a dir, es discutirà si seguirà atribuïda a títol primer als serveis de televisió, o podria ser atribuïda a altres serveis de radiocomunicacions a títol coprimari o secundari, tenint en compte principalment tres perspectives: **La primera d'elles, són els requeriments addicionals d'espectre de les tecnologies mòbils**, a causa de les altes velocitats de transmissió que es requereixen per als nous serveis, i a la interconnexió massiva de dispositius a internet. **La segona d'elles, per l'ús ineficient de les freqüències lliures de la banda de TDT o TV-White-Space**. Els Estats Units i el Regne Unit van ser els primers països en regular l'ús dels TV-White-Spaces per a dispositius de baixa potència a mode d'accés compartit horitzontal secundari. Uns altres països com Canadà i Colòmbia també han regulat l'ús dels TV-White-Spaces. **La tercera d'elles, per la diversitat de quotes de mercat en la difusió lineal de continguts televisius, que varia en funció del país, per exemple, a Bèlgica el mercat de televisió oscil·la entorn el 4% mentre que a Itàlia arriba fins al 89%**. Actualment, hi ha una revolució i creixent acceptació de veure els continguts audiovisuals per plataformes de vídeo sota demanda a través d'internet (televisió no lineal), com ara Netflix, HBO, entre d'altres. Per totes aquestes raons, la ITU, va sol·licitar estudis de compartició que definisquen possibles casos d'ús per a la banda de televisió, que abasten des de la definició dels requeriments tècnics, així com també, les possibles tecnologies.

La present tesi aborda la problemàtica de la convivència entre les xarxes de la televisió digital terrestre i mòbil de quarta generació en la banda del primer dividend digital (banda de 700 MHz), en Sud-Amèrica. A més, es proposen dos potencials casos d'ús compartit d'espectre per a l'ús futur de la banda de televisió després dels dividends digitals, com a mode d'accés eficient i flexible per a l'ús de l'espectre radioelèctric.

Per tal de garantir la convivència entre les tecnologies de televisió i mòbils en la banda del primer dividend digital en Sud-Amèrica, s'avalua tant l'impacte de les xarxes mòbils sobre les de televisió, com el cas contrari, les xarxes de televisió sobre les mòbils, tenint en compte els paràmetres tècnics d'operació de cadascuna de les xarxes implicades, els quals són definits per organismes d'estandardització o paràmetres reals de xarxes implementades per cada país. Dins dels paràmetres tècnics d'operació que es van definir per a les xarxes podem citar: marges de protecció entre els senyals de televisió i mòbils (màxima potència interferent permesa a l'entrada del receptor víctima sense que la qualitat del servei útil siga degradada, en funció de la separació en freqüència); distàncies de protecció entre el transistor interferent i el receptor víctima; banda de guarda entre ambdós tecnologies;

límits de les emissions interferents fora de banda; nivells d'atenuació addicionals en les màscares espectrals; avaluació de tècniques de mitigació d'interferències, entre d'altres. **És important destacar, que les principals diferències entre els estudis de convivència en Sud-Amèrica respecte d'Europa són: la banda de guarda en Sud-Amèrica són 5 MHz mentre que a Europa són 9 MHz; l'amplària de banda d'un canal de televisió en Sud-Amèrica és de 6 MHz respecte dels 8 MHz a Europa; l'estàndard de televisió adoptat en quasi tota Sud-Amèrica és ISDB-Tb, excepte Colòmbia i la Guaiana Francesa que van adoptar DVB-T2. A Europa quasi tots els països tenen adoptats els estàndards DVB-T de primera i segona generació. La importància d'aquesta contribució es fonamenta en que a Sud-Amèrica cap país ha desplegat a nivell nacional xarxes mòbils en la banda de 700 MHz, i per tant, els requeriments tècnics d'operació definits en l'àmbit d'aquesta tesi, podran ser útils tant per als organismes d'estandardització com empreses.**

Així mateix, en l'àmbit de la tesi, es proposen dos potencials casos d'estudi per a l'ús futur de la banda de TV, de manera que es promoga la compartició d'espectre com un mode d'accés eficient: **El primer cas d'estudi, proposa un nou concepte d'espais en blanc anomenat μ -TV-White-Space**, els quals són aquelles zones geogràfiques que no són cobertes pel servei de televisió digital terrestre, ja siga per l'absència de cobertura o per obstacles. **L'escenari proposat és una xarxa DVB-T2 que ofereix cobertura en recepció fixa sobre terrat, com a servei primari, i femtocel·les LTE-A en interiors d'una llar o oficina, com a servei secundari.** Els resultats obtinguts proporcionen restriccions tècniques per tal que les femtocel·les LTE-A puguin operar correctament en espectre compartit amb els serveis de televisió. Especificament, es defineix la Potència Isotròpica Radiada Equivalent (PIRE) màxima que podrien transmetre les femtocel·les, en funció de la separació en freqüència amb els serveis de televisió. **El segon cas d'estudi, proposa l'ús d'espais en blanc per a la compartició d'espectre entre els serveis d'internet de les coses (*Internet of Things* o *IOT*, en anglès), sota l'estàndard NB-LTE-IoT, com a servei secundari, i serveis de televisió digital terrestre sota l'estàndard DVB-T2, com a servei primari.** Es defineix la màxima potència transmissible pels nodes i dispositius IoT sense interferir al servei primari. A més, s'avalua l'impacte del cicle de treball dels dispositius considerant que existirà diversitat d'aplicacions, i, per tant, diversitat de requeriments d'operació. **La importància d'aquesta proposta es fonamenta en dues contribucions: per una banda, s'optimitza l'ús de la banda de televisió mitjançant l'accés secundari de dispositius de baixa potència als espais en blanc, sempre garantint els serveis de televisió, com a servei primari. Per altra banda, es contribueix amb noves freqüències per a les tecnologies mòbils d'última generació, amb l'objectiu d'augmentar la capacitat de les xarxes que suportaran tant els serveis mòbils com IoT.**

Agradecimientos

La culminación de esta tesis doctoral es el resultado de cuatro años de dedicación e involucra la colaboración de un grandioso grupo de personas. Por tal motivo, quiero agradecerles siempre su disposición por escucharme y ayudarme en el desarrollo de esta tesis, la cual ha contribuido a mi crecimiento tanto profesional como personal. En especial, me gustaría agradecer:

A mi querida familia, mis padres Jorge y Rosa, mis hermanos Claudia P, Jorge E, Mónica, mi abuela Lola, mis cuñados Fabio, Nelsón, Yudy, y mis queridos sobrinos que siempre me han apoyado en mis sueños, y que, aunque se encuentren a la distancia físicamente, su amor siempre nos mantiene unidos.

A mi futura esposa, Andrea Hernández Torres, por escucharme, apoyarme, y alegrar cada día de mi vida con su sonrisa y compañía. Además, a mis suegros Álvaro y Rosa y su hermano Fabián, porque desde el primer momento siempre me hicieron sentir como de su familia.

A mi director de tesis, Prof. Narcís Cardona Marcet, por su visión y guía en el desarrollo de esta doctoral. Asimismo, por ser siempre una persona dispuesta a escuchar y emprender nuevos retos con la convicción de que siempre los resolverá.

Al Prof. Andrés Navarro Cadavid, por invitarme a su grupo de investigación I2T de la Universidad ICESI, con el objetivo de fortalecer una parte del desarrollo de esta tesis doctoral. Además, a la cooperación entre los grupos de Comunicaciones Móviles del iTEAM e I2T para llevar a cabo proyectos de investigación del Organismo Regulador del Espectro de Colombia, ANE.

A mis amigos, Alejandro Fornés, Carlos Andreu, Charlie Barjau, Diego Biagi, Eduardo Garro, Manuel Fuentes, Sergio Castelló, José Luis Cárcel, Edwing Sierra, José Fresneda, Christian Urcuqui, Julio Aguilar, Julio Vargas, Lenin Cuamacas, Jorge Gómez, Andrés García, Iván Mantilla, Sergio Vanegas, Catalina Henao, Elvis C. y Samuel Peña, los cuales siempre han estado apoyándome y contribuyendo en mi crecimiento como persona. Además, a un nuevo integrante del grupo, el hijo de Eduardo, Lucas.

A Jefferson Ribadenería, por encontrar en el más que un amigo, a un hermano.

A mis amigos del Grupo de Comunicaciones Móviles, Irene, Carlos Herranz, Teresa Pardo, David Gómez, Josetxo, Alicia, Conchi, David Roger, Sofía, Martina, Daniel Calabuig, David Sacristán, Sandra Roger, Josué, Cristian y Saúl. Asimismo, quiero agradecer a todas las personas que han pasado por el grupo MCG, y que ahora se encuentran en otros lugares, pero que también me han ayudado en este camino, Jaime López, y Jordi Joan.

Por último, quiero agradecer a los revisores de mi tesis, Paolo Grazioso, Manuel Vélez, y David Vargas, y a los tribunales de esta tesis doctoral, Pablo Angueira, José Francisco Monserrat y David Vargas, por su valoración crítica y constructiva que contribuyó a la finalización de esta tesis doctoral.

Muchas Gracias a todos vosotros y que Dios los continúe Bendiciendo.

*“Qué profundas son las riquezas de la sabiduría y del conocimiento de Dios,
Qué indescifrables sus juicios e impenetrables sus caminos”*

(Romanos 11,33)

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	10
1.3. OBJETIVOS DE LA TESIS	12
1.4. ESTADO DEL ARTE	13
1.4.1. <i>Convivencia en las Bandas del Dividendo Digital.....</i>	<i>13</i>
1.4.2. <i>Compartición de espectro en la banda de TDT.....</i>	<i>17</i>
1.5. DESCRIPCIÓN DE LA TESIS Y PRINCIPALES CONTRIBUCIONES.....	22
1.6. DISEMINACIÓN Y LISTA DE PUBLICACIONES	25

FUNDAMENTOS.....	29
2.1. GENERALIDADES DE LAS TECNOLOGÍAS INALÁMBRICAS	29
2.1.1. DVB-T2 (Digital Video Broadcasting-Terrestrial 2).....	29
2.1.2. ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial).....	31
2.1.3. LTE (Long Term Evolution).....	32
2.1.4. Narrow Band for Internet of Things (NB-IoT).....	35
2.2. PARÁMETROS TÉCNICOS MÁS IMPORTANTES EN TRANSMISIÓN	38
2.2.1. Parámetros de transmisión en DVB-T2	39
2.2.2. Parámetros de transmisión en ISDB-Tb.....	40
2.2.3. Parámetros de transmisión en LTE.....	42
2.3. PARÁMETROS TÉCNICOS MÁS IMPORTANTES EN RECEPCIÓN.....	42
2.4. CANAL DE PROPAGACIÓN	43
2.4.1. Modelos de canal en redes de TDT.....	44
2.4.2. Modelos de canal en redes móviles.....	45
2.5. CRITERIOS DE CALIDAD	47
2.5.1. Criterios de Calidad en Redes de Televisión Digital Terrestre	47
2.5.2. Criterios de Calidad en Redes Móviles.....	47
BANDA DE 700 MHZ EN SUDAMÉRICA.....	51
3.1. ESCENARIOS DE CONVIVENCIA EN LA BANDA 700 MHZ EN SUDAMÉRICA	52
3.1.1. Canalización banda de 700 MHz en Sudamérica	52
3.1.2. Escenarios de convivencia entre las redes DVB-T2 e ISDB-T y 4G-LTE 54	
3.2. METODOLOGÍA.....	55
3.2.1. Medidas de Laboratorio.....	55
3.2.2. Modelado Analítico en función de la Geometría del escenario.....	59
3.3. RESULTADOS	66
3.3.1. Impacto de las redes móviles sobre las de televisión digital	66

3.3.2.	<i>Impacto de la Redes de Televisión sobre las Móviles.....</i>	86
3.4.	CONCLUSIONES	92
COMPARTICIÓN DE ESPECTRO COMO FUTURO USO DE LA BANDA DE TELEVISIÓN		99
.....		
4.1.	PRIMER CASO POTENCIAL DE USO: COMPARTICIÓN DE ESPECTRO ENTRE TDT Y LTE-A 98	
4.1.1.	<i>Escenarios de compartición de espectro entre TDT y LTE-A</i>	100
4.1.2.	<i>Metodología</i>	103
4.1.3.	<i>Resultados</i>	108
4.2.	SEGUNDO CASO POTENCIAL DE USO: COMPARTICIÓN DE ESPECTRO ENTRE TDT Y NB-IOT	121
4.2.1.	<i>Escenarios de compartición de espectro entre TDT y NB-IoT.....</i>	122
4.2.2.	<i>Metodología</i>	125
4.2.3.	<i>Resultados</i>	127
4.3.	CONCLUSIONES	137
4.3.1.	<i>Primer Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y LTE-A.....</i>	138
4.3.2.	<i>Segundo Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y NB-IoT</i>	142
CONCLUSIONES		145
5.1.	CONVIVENCIA EN LA BANDA DE 700 MHz EN SUDAMÉRICA	146
5.2.	CASOS POTENCIALES PARA EL FUTURO USO DE LA BANDA DE TELEVISIÓN	155
5.2.1.	<i>Primer Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y LTE-A</i>	155
5.2.2.	<i>Segundo Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y NB-IoT</i>	160
5.3.	TRABAJO FUTURO	163
CONTRIBUCIONES DE LA TESIS DOCTORAL		165
REFERENCIAS.....		169

Acrónimos

2G	Segunda Generación
3G	Tercera Generación
3G	Cuarta Generación
ACK	Acknowledgement
ACIR	Adjacent Channel Interference Ratio
ACLR	Adjacent Channel Leakage Ratio
ACS	Adjacent channel selectivity
APT	Asia Pacific Telecommunity
ASMG	Arab Spectrum Management Group
ATSC	Advanced Television System Committee
ATU	African Telecommunications Union
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCH	Bose Chadhuri Hocquenghem
BER	Bit Error Rate
CEPT	European Conference of Postal and Telecommunications Administrations
CITEL	Comisión Interamericana de Telecomunicaciones
CDMA	Acceso Múltiple por División de Código
CFI	Indicador de Formato de Control

CQI	Channel Quality Indicator
CMMB	China Mobile Multimedia Broadcasting
CNR	Relación Portadora Ruido
CNT	Consejo Nacional de Telecomunicaciones - Ecuador
CNABF	Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias
COFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
DAB	Digital Audio Broadcasting
DECT	Digital Enhanced Cordless Telecommunications
DD	Dividendo Digital
DD1	Primer Dividendo Digital
DD2	Segundo Dividendo Digital
DL	Downlink
TDT	Televisión Digital Terrestre
DTMB	Digital Terrestrial Multimedia Broadcast
DVB	Digital Video Broadcasting
DVB-T	Digital Video Broadcasting- Terrestrial
DVB-T2	Digital Video Broadcasting- Terrestrial 2nd Generation
EBU	European Broadcasting Union
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
E-UTRA	Evolved Universal Terrestrial Radio Access
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FDD	Duplexación por División de Frecuencia

FDMA	Acceso Múltiple por División de Frecuencia
GI	Intervalo de Guarda
GSM	Global System for Mobile communications
GPRS	General Packet Radio Service
HSPA	High-Speed Packet Access
ICI	Interferencia entre Portadoras
IoT	Internet of Things
IFFT	Transformada Inversa Rápida de Fourier
IMT	International Mobile Telecommunications
ISDB	Integrated Services Digital Broadcasting
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial
ISDB-Tb	Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial Brazilian version
ISI	Inter Symbol Interference
ISM	Industrial, Scientific and Medical
ITU	International Telecommunication Union
ITU-R	Radiocommunication Sector of the ITU
iTEAM	Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia
LDPC	Low Density Parity Check
LTE	Long Term Evolution
LTE-UE	Equipo de Usuario de LTE
LTE-BS	Estacion Base de LTE
LTE-UL	Enlace Ascendente de LTE
LTE-DL	Enlace Descendente de LTE
MIMO	Multiple-Input Multiple-Output

MISO	Multiple-Input Single-Output
MPEG4	Moving Pictures Experts Group version 4
MPEG2	Moving Pictures Experts Group version 2
MBMS	Multimedia Broadcast Multicast Service
NB-IoT	Narrow Band for Internet of Things
NLoS	Non Line Of Sight
NTSC	National Television System Committee
OFDM	Multiplexación por División de Frecuencias Ortogonales
OFDMA	Acceso Múltiple por División Ortogonal de Frecuencia
OOB	Límites de emisiones fuera de banda
PAPR	Peak-to-Average Power Ratio
PER	Packet Error Rate
PDSCH	Physical Downlink Shared Channel
PBCH	Physical Broadcast Channel
PCFICH	Physical Control Format Indicator Channel
PDCCH	Physical Downlink Control Channel
PHICH	Physical Hybrid ARQ Indicator Channel
PUSCH	Physical Uplink Shared Channel
PUCCH	Physical Uplink Control Channel
PRACH	Physical Random Access Channel
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
PLP	Physical Layer Pipes
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
RB	Resource Blocks

RE	Resource Element
RF	Radio Frecuencia
RR	Radio Regulations
RCC	Regional Commonwealth in the Field of Communications
RS	Reed Salomon
RTVC	Radio Televisión de Colombia
SC-FDMA	Single Carrier - Frequency Division Multiple Access
SFN	Single Frequency Network
SIMO	Single-Input Multiple-Output
SISO	Single-Input Single-Output
SNR	Relación Señal a Ruido
SR	Scheduling Request
TDT	Televisión Digital Terrestre
TG	Tiempo de Guarda
TR	Tone Reservation
TU	Typical Urban
TU6	Typical Urban 6 taps
TDD	Duplexación por División de Tiempo
TDMA	Acceso Múltiple por División de Tiempo
TV-White-Space	Espacio en blanco en la banda de televisión
UHF	Ultra High Frequency
UL	Uplink
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System

μ-TV- White-Space	Micro-espacio en blanco en la banda de televisión
VHF	Very High Frequency
WRC	World Radiocommunication Conference

Capítulo 1

Introducción

1.1. Introducción

El espectro radioeléctrico es un recurso natural, escaso, valioso y con un gran impacto en la economía, desarrollo y progreso de una nación. La Unión Internacional de Telecomunicaciones (*International Telecommunications Union, ITU*), específicamente el sector de Radiocomunicaciones (*ITU-R*), es el organismo responsable de regular y coordinar el uso eficiente del espectro radioeléctrico, y que los sistemas de radiocomunicaciones funcionen sin interferencias a través del Reglamento de Radiocomunicaciones (*Radio Regulations, RR*), y los Reglamentos Nacionales. El RR, es actualizado en un periodo de tres o cuatro años en la Conferencia Mundial de Radiocomunicaciones (*World Radio Conference, WRC*) de la ITU. En la WRC participan seis organizaciones regionales que contribuyen con estudios técnicos y propuestas para la gestión y regulación del espectro radioeléctrico. Cada organización está compuesta por todos los países miembros a una región geográfica específica (Europa, América, Asia-Pacífico, Estados Árabes, África y Rusia), siendo su propósito tener una propuesta en común (previamente acordadas por todos los países miembros), respecto a las decisiones que se discutirán y se aprobarán de atribución, gestión y control del espectro. Estas organizaciones regionales son conocidas como: la Conferencia Europea de Administraciones de Correos y Telecomunicaciones (*European Conference of Postal and Telecommunications Administrations, CEPT*); la Comisión Interamericana de Te-

lecomunicaciones (*CITEL*); la Telecomunidad de Asia-Pacífico (*Asia Pacific Telecommunity, APT*); el Grupo de Estados Árabes de Gestión del Espectro (*Arab Spectrum Management Group, ASMG*); la Unión Africana de Telecomunicaciones (*African Telecommunications Union, ATU*); y la Comunidad Regional de Comunicaciones (*Regional Commonwealth in the Field of Communications, RCC*). Asimismo, la ITU reconoce plenamente el derecho soberano que tiene cada Estado para la reglamentación de su propio uso del espectro radioeléctrico [1] [2].

La gestión, control y uso del espectro radioeléctrico constituye una tarea compleja desde los ámbitos técnico, regulatorio, jurídico y económico. Una de sus principales funciones para la gestión eficiente del espectro radioeléctrico es la atribución de frecuencias, la cual se lleva a cabo mediante la inscripción de una banda de frecuencia determinada en el Cuadro Nacional de Atribución de Bandas de Frecuencias (*CNABF*). Desde el punto geográfico de la atribución de las bandas de frecuencias, se ha dividido el mundo en tres regiones: Región 1 (Europa y África), Región 2 (América) y la Región 3 (Asia y Oceanía) [2]. Respecto al uso y el acceso al espectro radioeléctrico puede ser principalmente dados en dos regímenes de autorización: Autorización Individual o Licenciada y Autorización General o Excepto de licencia. La siguiente figura muestra a modo de resumen los diferentes esquemas de acceso al espectro radioeléctrico y regímenes autorizados [3].

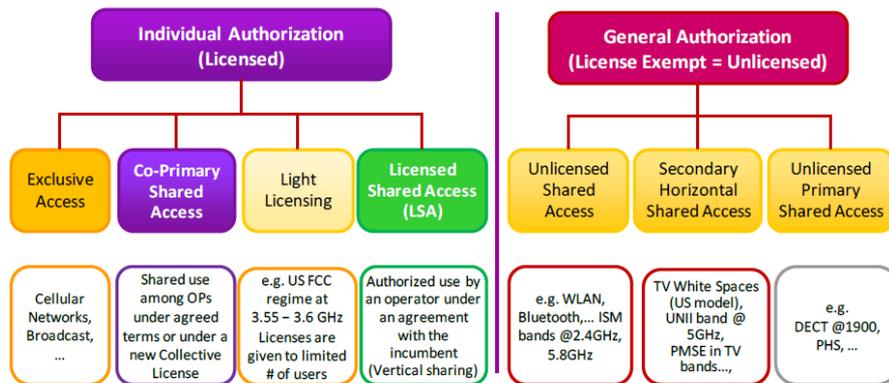


Figura 1. Esquemas de Acceso al espectro y Regímenes Autorizados [3].

Como se muestra en la figura anterior, los dos regímenes de autorización para el uso del espectro radioeléctrico son sub-divididos en diferentes esquemas de acceso. A continuación, se resumen tanto los regímenes y esquemas de acceso al espectro:

1. **Autorización Individual o Licenciada** (*Individual Authorization*, en inglés): En este régimen de autorización, los derechos de uso del espectro son exclusivos en tiempo, frecuencia y ubicación geográfica. A continuación, se presentan los diferentes esquemas de acceso al espectro y los posibles modelos de compartición.
 - **Acceso exclusivo o Licencia exclusiva** (*Exclusive Access*, en inglés): Las licencias son concedidas por la Autoridad Reguladora Nacional (ARN), de conformidad con la legislación y las normas nacionales, ya sea directamente por la solicitud de un operador, o por un concurso, o mediante una subasta, la cual ha sido la forma más común durante la última década. El titular de la licencia tiene el derecho exclusivo de usar este espectro radioeléctrico de acuerdo a las reglas de asignación, ya sea a nivel nacional o sólo dentro de una región determinada
 - **Acceso Compartido Co-Primario** (*Co-Primary Shared Access*, en inglés): Se refiere a un modelo de acceso al espectro donde los titulares de licencias primarias están de acuerdo en un uso compartido de su espectro con licencia. En este modelo, los usuarios tendrían derechos iguales de uso sin ningún tipo de prioridad. Dentro de los esquemas de compartición de espectro que se proyectan para el futuro, los más apropiados en el acceso co-primario son: Reparto de espectro (*Spectrum Pooling*, en inglés) y Alquiler Común (*Mutual Renting*, en inglés).
 - **Acceso Compartido Licenciado** (*Licensed Shared Access*, en inglés): Este es un nuevo modelo de acceso en el cual un usuario primario (*incumbent*, en inglés), podría conceder derechos de uso del espectro a uno o más usuarios diferentes bajo condiciones específicas de servicio. El acceso compartido licenciado propone garantizar un servicio de alta calidad, y es también conocido como acceso compartido vertical.
 - **Licencia-Simplificada** (*Light-Licensing*, en inglés): Se aplica comúnmente en casos de uso donde no existen protecciones o límites de interferencias para sistemas que hagan uso de una banda del espectro radioeléctrico. Sin embargo, si un sistema nuevo que hará uso de este recurso, puede causar problemas de interferencia a otros ya existentes es recomendable verificar sus límites de potencia de emisiones fuera de banda.

2. **Autorización General o Excepto de Licencia** (*General Authorization*, en inglés): Los derechos de uso y acceso al espectro radioeléctrico generalmente se otorgan sin ninguna licencia individual, pero están sujetos a ciertas restricciones o condiciones técnicas (por ejemplo, potencia de transmisión limitada, ciclo de trabajo o verificar antes de transmitir, etc.). Es importante señalar que en las bandas exentas de licencia no hay garantía de protección entre los usuarios, cualquier usuario puede ser interferido por otros. El costo para el espectro sin licencia es típicamente cero. Los diferentes esquemas de acceso al espectro bajo este régimen de autorización se describen a continuación.
 - **Acceso Compartido sin Licencia** (*Unlicensed Shared Access*, en inglés): En este esquema de acceso no hay asignado ningún servicio primario. Los usuarios comparten la banda horizontalmente sin derechos de protección unos contra otros. El ejemplo más común es la banda ISM de 2.4 GHz (*Industrial, Scientific and Medical*, en inglés).
 - **Acceso Compartido Horizontal Secundario** (*Secondary Horizontal Shared Access*, en inglés): Este esquema de acceso es similar al anterior, no obstante, a los usuarios se les asignan prioridades. Los usuarios con prioridades más altas deberán ser protegidos de interferencias.
 - **Acceso Compartido Primario sin licencia** (*Unlicensed Primary Shared Access*, en inglés): Este régimen de acceso se aplica a los casos en que en una banda de frecuencias hay una asignación de servicio primario y, en paralelo se autoriza a otros servicios a utilizarla a través de una tecnología específica. Por ejemplo, la banda 1880-1900 MHz donde opera la tecnología inalámbrica de teléfonos digitales DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*, en inglés).

En las últimas décadas, el acceso individual o licenciado ha sido uno de los mecanismos formales más demandado. **No obstante, la atribución a título compartido de una banda de frecuencias comienza a tomar un rol importante en la actualidad, como modo de acceso que garantiza el uso eficiente de este recurso, teniendo en cuenta la alta demanda de espectro radioeléctrico que están originando las aplicaciones de banda ancha.**

Una nueva revolución digital vivimos actualmente y se espera que en la próxima década termine de materializarse, la cual estará identificada por el desarrollo de nuevas aplicaciones, servicios y dispositivos (teléfonos móviles inteligentes, tabletas personales, objetos inteligentes, sensores ambientales, sensores de salud, y ciudades inteligentes), que permitirán la automatización de procesos cotidianos, gestión eficiente de los

recursos tanto naturales como humanos, y nuevos modelos de negocio que contribuirán en un mejor bienestar para la sociedad. **Éste ecosistema es lo que conforma el concepto o idea de “Internet de las Cosas” (*Internet of Things, IoT*).** Por lo tanto, IoT permitirá la interconexión masiva de dispositivos u objetos a internet, y originará un crecimiento del tráfico de datos actual de las redes móviles de última generación. Para el año 2020, la ITU estima necesario entre 1340 MHz y 1960 MHz de espectro radioeléctrico (depende de la densidad de usuarios móviles de cada país), para satisfacer el despliegue apropiado de las Telecomunicaciones Móviles Internacionales 2000 (*IMT-2000*, en inglés). Del mismo modo, considera un número masivo de dispositivos conectados a internet del orden de 25 billones para el 2020, los cuales podrían cursar su mayor parte de tráfico de datos por las redes móviles de última generación [4] [5] [6]. Otros estudios llevados a cabo por consultoras respaldan estos datos: Gartner estimó 8.4 billones de dispositivos conectados a internet a nivel mundial para finales del año 2017, lo que supuso un crecimiento de 31% en comparación con 2016. En 2020, se prevé que el número de dispositivos conectados a internet llegue hasta los 20.4 billones [7]. Cisco Visual Networking Index prevé que el tráfico global de datos móviles mensual alcanzará los 49 Exabytes mensuales (587 Exabytes anuales) en 2021, representando una relación de crecimiento del 47% respecto al año 2016 [8]. La siguiente figura muestra el porcentaje total del tráfico global de datos móviles mensual que se alcanzará en el 2021, discriminado por región geográfica.

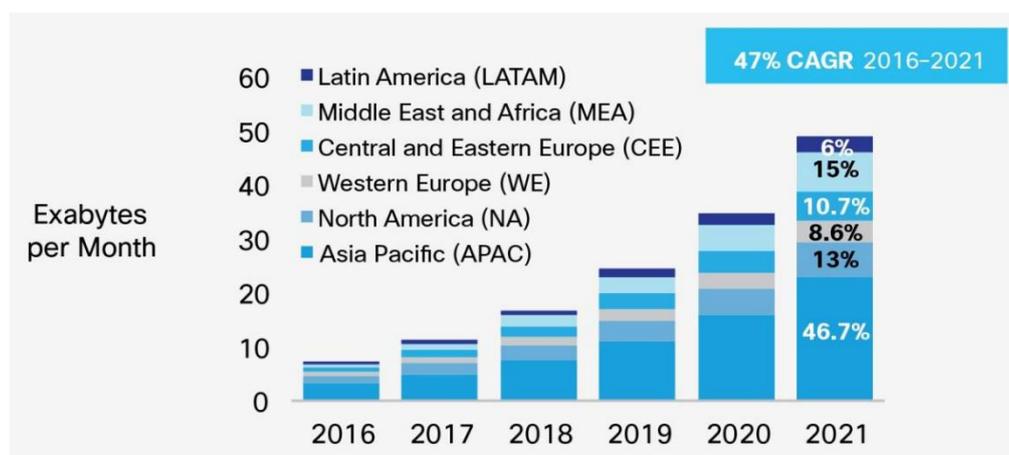


Figura 2. Porcentaje del Tráfico Global de Datos Móviles mensual que se alcanzará en el 2021, discriminado por región geográfica [8].

Como se puede observar en la figura anterior, **la región de Asia Pacífico contribuirá con el 47 % del tráfico global de datos móviles para el año 2021, siendo así la región que cursará el mayor porcentaje de tráfico de datos móviles a nivel mundial.** Norteamérica que tenía la segunda mayor participación de tráfico móvil en el año 2016, se convertirá en la tercera participación en el año 2021. **Latinoamérica contribuirá solo con el 6% del tráfico móvil, llegando a ser la región con menor participación a nivel mundial.** En consecuencia, independientemente del incremento desigual del tráfico de datos móviles de cada región, se plantean nuevos desafíos para hacer frente a los requerimientos de espectro adicional, y, por lo tanto, la búsqueda de nuevas bandas de frecuencias para garantizar el correcto despliegue de las redes móviles de última generación.

Una de las bandas de frecuencias del espectro radioeléctrico que más interés induce en la actualidad es la destinada a los servicios de televisión, la cual ha **tenido importantes cambios respecto a la atribución y reordenación en la última década.** La televisión analógica había operado desde el siglo XX en las bandas de frecuencias VHF (*Very High Frequency*, en inglés), específicamente en el rango de 47 MHz a 230 MHz y parte de la banda UHF (*Ultra High Frequency*, en inglés), de 470 MHz a 862 MHz. Con la introducción de las tecnologías digitales y sistemas de compresión de información más eficiente, permitió reducir el número de frecuencias necesarias para la transmisión de los servicios de televisión. La televisión digital terrestre permite transmitir entre cuatro y seis programas de televisión de calidad estándar en el mismo ancho de banda donde antes se transmitía un programa con tecnología analógica, de calidad equivalente [9]. **En consecuencia, la transición de la televisión analógica a la digital conlleva una gestión más eficiente del espectro radioeléctrico, que es un recurso valioso y escaso, y, además, permitió liberar un conjunto de bandas de frecuencias, conocidas como las bandas del Dividendo Digital (*Digital Dividend or DD*, en inglés).** Dichas bandas fueron atribuidas a título primario a los **Servicios Móviles Internacionales 2000-2020 (IMT-2000-2020)**, con el objetivo de **satisfacer los requerimientos adicionales de espectro que demandan en la actualidad y en los próximos años** [10] [11]. Reino Unido y Estados Unidos fueron los primeros países en iniciar el proceso de transición del apagón analógico en el año 1998, hasta el momento 54 países han terminado completamente el proceso, convirtiéndose Holanda en el primer país en emitir todos los servicios de televisión con tecnología digital en el año 2006 [12]. **En América Latina, la migración de la televisión analógica a la digital está aún en proceso, con diferencias temporales para el apagón analógico. En América central, México se convirtió en el primer país en llevar a cabo el apagón en el año 2015, mientras que en Sudamérica ningún país hasta la fecha ha culminado el apagón analógico, llevando al menos ya una década (Brasil) en este proceso.** Concretamente, se proyecta el apagón analógico para las siguientes fechas: Ecuador

para el año 2018 (se espera que esta fecha se extienda temporalmente debido a los inconvenientes de los despliegues de las redes); Colombia, Argentina y Bolivia para el año 2019; Chile y Venezuela para el año 2020; Brasil para el año 2023; Paraguay para el año 2024; Perú para el año 2025; y Uruguay aún por definir [13]. **Por lo tanto, la liberación de la parte alta de la banda de televisión (migración de canales de TV a frecuencias bajas de la banda de televisión), el despliegue de las redes de comunicación móviles de cuarta generación 4G en las bandas del dividendo digital y el garantizar la armonización entre sistemas es un reto importante al que se han venido enfrentando tantos organismos de regulación, investigadores y fabricantes en los últimos años y que se prorrogará hasta la próxima década.**

Respecto a los estándares de Televisión Digital Terrestre (TDT), hay principalmente cuatro familias de estándares a nivel mundial: DVB (*Digital Video Broadcasting*) desarrollado en Europa; ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial*) desarrollado en Japón, y una versión modificada hecha en Brasil (*ISDB-Tb*); ATSC (*Advanced Television System Committee*) desarrollado en Estados Unidos; DTMB (*Digital Terrestrial Multimedia Broadcast*) desarrollado en China. La mayor parte de estas familias de estos estándares han tenido evoluciones: DVB, cuenta con los estándares de primera y segunda generación (*DVB-T/DVB-T2*); ATSC, en el año 2016 termino la estandarización de ATSC 3.0. La siguiente figura muestra el estándar de televisión digital seleccionado por cada país a nivel mundial [14].

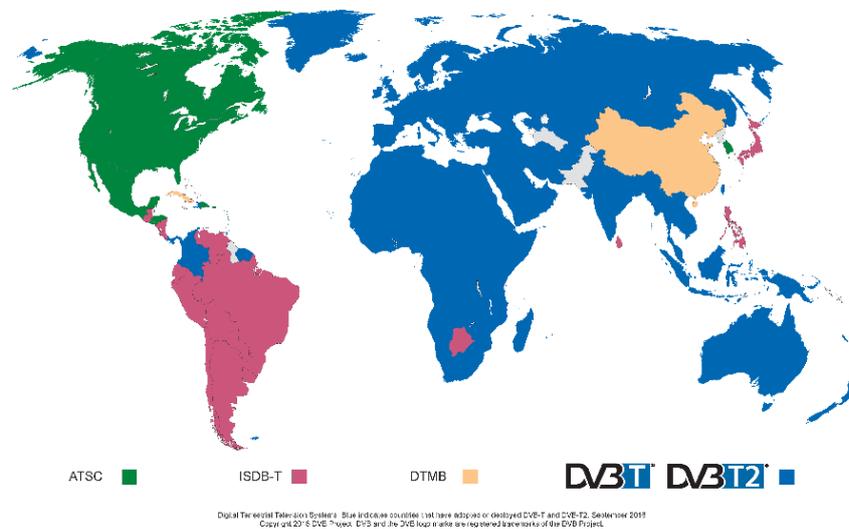


Figura 3. Mapa de adopción de los estándares de TDT a nivel mundial [14].

Como se puede observar en la figura anterior, **en la Región 1 (Europa y África) principalmente ha sido adoptada la familia de estándares DVB-T/T2. En la Región 2 (Américas), convivirán principalmente tres estándares: ISDB-Tb en casi toda Sudamérica a excepción de Colombia y la Guayana Francesa que adoptaron DVB-T/T2; y ATSC en toda Norteamérica. En la Región 3 (Asia y Oceanía) convivirán las familias DVB, DTMB e ISDB-T.** Es de resaltar que la familia de estándar de TDT mayormente adoptada o desplegada es DVB-T/T2, consiguiendo llegar hasta 166 países a nivel mundial [14]. En la actualidad, DVB-T2 se ha convertido en el estándar de radiodifusión de televisión digital más avanzando en el mundo respecto a las otras familias ya desplegadas. DVB-T2 ofrece hasta un 50% más de capacidad y robustez respecto a los estándares de TDT de primera generación, considerando un mismo ancho de banda. Además, posibilita un uso más eficiente del espectro radioeléctrico, y es más robusto frente a ruido e interferencias [9].

El futuro uso de la banda de televisión después de los dividendos digitales es otro tema interesante aún en investigación. La planificación de frecuencias que se lleva a cabo en cada país, consiste en dividir sus áreas geográficas en pequeñas zonas de servicio, en función del número de canales de televisión que se quieran ofrecer, y posteriormente se le asignan un número específico de frecuencias a cada zona de servicio, con la particularidad que en diferentes zonas de servicio se usan diferentes frecuencias, con el objetivo de evitar posibles interferencias de los transmisores pertenecientes a una zona adyacente a otra. **En consecuencia, no se asignan todas las frecuencias en todas las zonas geográficas o estas no son usadas el 100% del tiempo o hay sombras de cobertura en áreas geográficas objetivos, tal y como se muestra en la siguiente figura. Por lo tanto, hay frecuencias libres que podrían ser aprovechadas eficientemente para otros servicios de radiocomunicaciones. Estas frecuencias libres son conocidas como los espacios en blanco en la banda de la televisión (*TV-White-Spaces*, en inglés). Algunos países como Estados Unidos, Reino Unido, Canadá, y Colombia han regulado el uso de los TV-White-Spaces, mediante el uso secundario de dispositivos de baja potencia, siempre y cuando se asegure el correcto funcionamiento de los servicios de televisión (acceso primario).** Para garantizar el acceso a los TV-White-Space de los dispositivos secundarios, se usan bases de datos de geolocalización que contienen información de las frecuencias libres y ocupadas asignadas en cada zona geográfica de cada país (Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias). De esta forma, un dispositivo secundario antes de hacer uso de un TV-White-Space, deberá consultar la base de datos de geolocalización, y en función donde se encuentre el dispositivo secundario, el gestor de la base de datos de localización autorizará su acceso y le definirá los parámetros técnicos de transmisión, tales como, frecuencia de emisión, máxima potencia isotrópica equivalente permitida, límites de potencia de las emisiones fuera de banda, entre otros. El periodo temporal en

que el dispositivo secundario consulta el gestor de la base de geolocalización depende de la regulación de cada país.

Por último, a finales del año 2015, en la WRC-15, se discutió el uso futuro de la banda de la televisión digital terrestre, es decir la banda de frecuencias restantes después de los dividendos digitales (470 MHz a 694 MHz en la Región 1 y 3, y 470 MHz a 606 MHz en la Región 2). **La ITU decidió ratificar a título primario los servicios de televisión en esta banda, y se acordó que en el año 2023 se realizarían revisiones acerca de su uso, es decir, si seguirá atribuida a título primario a los servicios de TDT, o podría ser atribuida a los servicios móviles de última generación a título co-primario o secundario u otros posibles casos de uso.** Por lo tanto, la ITU solicitó estudios donde se evalúen casos posibles de uso de la banda de TDT, y se especifiquen los requerimientos técnicos de operación para la compartición y compatibilidad entre las tecnologías que hicieran uso de ella [15].

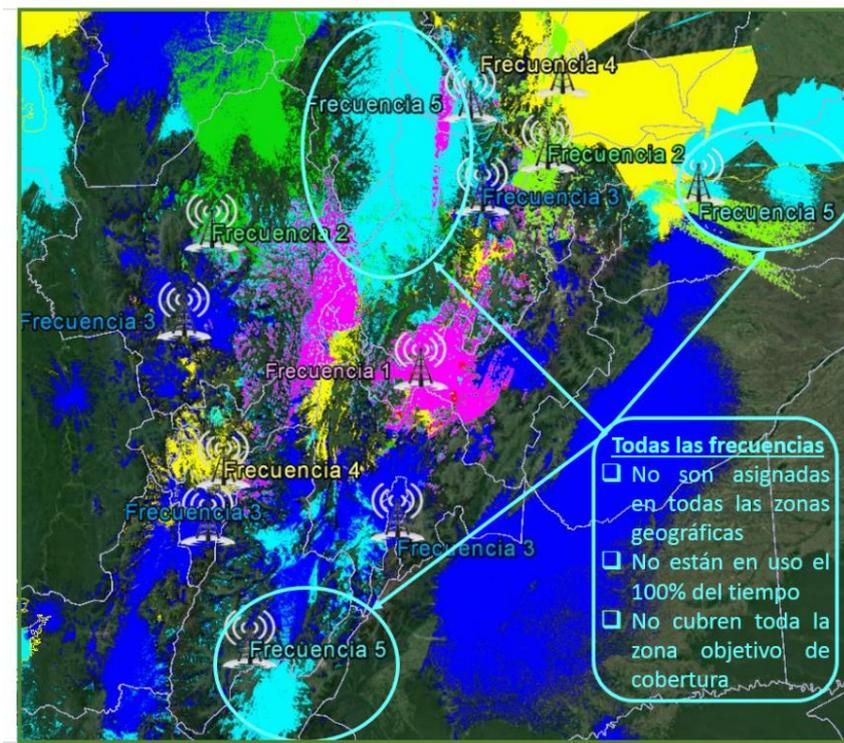


Figura 4. TV-White-Spaces en la Banda de Televisión Digital Terrestre.

1.2. Descripción del problema

La transición de la televisión analógica a digital introdujo ventajas, tales como una mejor eficiencia espectral (requerir menos frecuencias para ofrecer los mismos servicios televisivos), o una mayor robustez frente a interferencias. **No obstante, también requirió enfrentar retos importantes, como garantizar la armonización espectral del uso de la banda. Esta armonización se puede abordar mediante dos enfoques de investigación:**

En primer lugar, **garantizar la convivencia entre los servicios de televisión y los servicios móviles de cuarta generación en las bandas del dividendo digital.** El primer dividendo digital (DD1), corresponde a la banda de frecuencias de 790 MHz a 862 MHz en las Regiones 1 y 3, y la banda de 698 MHz a 806 MHz en la Región 2. El segundo Dividendo Digital (DD2), comprende el rango de frecuencias de 694 MHz a 790 MHz en las Regiones 1 y 3, y la banda de 614 MHz a 698 MHz en la Región 2, tal y como muestra en la siguiente figura.

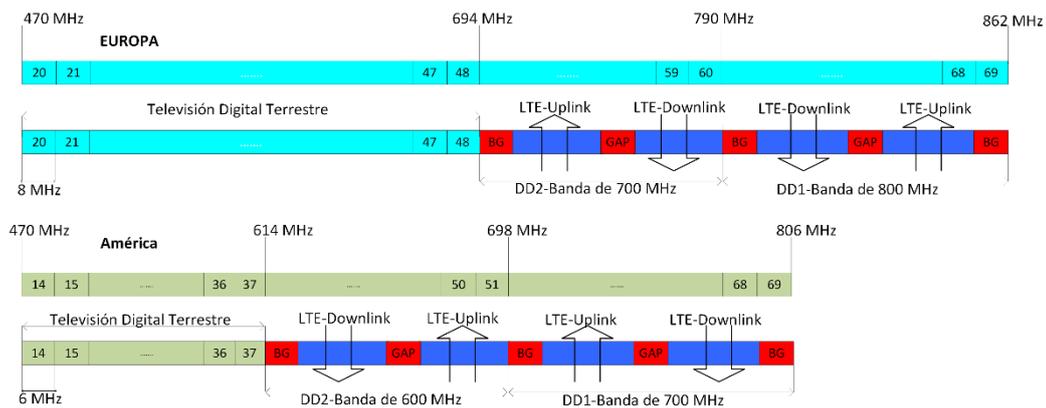


Figura 5. Canalización para 4G-LTE en las Bandas del Dividendo Digital.

Como se puede observar en la figura anterior, las bandas del dividendo digital presentan importantes diferencias de asignación, en función de la región geográfica. Respecto al DD1, este comprende la banda de 800 MHz en Europa, mientras en América es la banda de 700 MHz. El enlace adyacente a los servicios de TDT, es el enlace descendente de LTE (*LTE-DL*) en Europa, respecto al enlace ascendente de LTE (*LTE-UL*) en América. La banda de guarda es tan solo 1 MHz entre los servicios de televisión y móviles en Europa, en relación con los 5 MHz de banda de guarda en América. Respecto al DD2, en Europa se asigna la banda de 700 MHz y en América la banda de 600 MHz. El enlace adyacente a los servicios de TDT,

en la banda de 700 MHz es LTE-UL (Caso de Europa) con una banda de guarda de 9MHz, mientras en la banda de 600 MHz es LTE-DL (Caso de América) con una banda de guarda por lo menos de 6 MHz, teniendo en cuenta que el canal adyacente inferior es el 37 atribuido a los servicios de radioastronomía (608 – 614 MHz). Por último, el ancho de banda de un canal de TV en Europa es de 8 MHz, mientras en América son 6 MHz. Además, de la diversidad de estándares de TDT adoptados por cada país a nivel mundial.

Por lo tanto, la implementación de los servicios móviles en la banda de los dividendos digitales, presenta un desafío para organismos de estandarización tanto a nivel internacional como nacional, teniendo en cuenta que se deben definir los parámetros técnicos de operación que garanticen el correcto funcionamiento de las redes de televisión y telefonía móvil, operando en bandas adyacentes. Dentro de los parámetros técnicos que deben definirse para las redes podemos citar: márgenes de protección entre las señales de televisión y móviles (máxima potencia interferente permitida a la entrada del receptor víctima sin que la calidad del servicio útil sea degradada, en función de la separación en frecuencia); distancias de protección entre el transmisor interferente y el receptor víctima; banda de guarda requerida entre las dos tecnologías; máxima potencia de las emisiones interferentes fuera de banda en canales adyacentes; niveles de atenuación adicionales en las máscaras espectrales tanto en transmisión como en recepción; evaluación de técnicas de mitigación de interferencias, entre otros.

En segundo lugar, garantizar el uso eficiente de la banda de TDT después de la reordenación de los dividendos digitales, teniendo en cuenta que su uso futuro será discutido en la WRC del año 2023. Este debate se fundamenta principalmente en tres perspectivas: **La primera de ellas, son los requerimientos adicionales de espectro de las tecnologías móviles,** debido a las altas velocidades de transmisión que se requieren por los nuevos servicios, y a la interconexión masiva de dispositivos a internet. Además, las bandas del dividendo digital asignadas a los servicios móviles de cuarta generación no están siendo usadas en la actualidad a nivel mundial. En Sudamérica, ningún país ha hecho despliegues a nivel nacional en las bandas de los dividendos digitales, debido a los retrasos de la limpieza de la banda y de reordenamiento de espectro por el apagón analógico. **La segunda de ellas, por el uso ineficiente de las frecuencias libres de la banda de TDT o TV-White-Space en países donde se requieren un número de frecuencias pequeño para dar los servicios televisivos.** Estados Unidos fue el primer país en regular el uso de los TV-White-Spaces para dispositivos de baja potencia a modo de acceso compartido horizontal secundario. La gestión y control de acceso a los TV-White-Spaces por los dispositivos secundarios se lleva a cabo mediante bases de datos de geolocalización, las cuales le transmiten a los dispositivos información de las frecuencias libres y los parámetros técnicos de transmisión.

Otros países como Reino Unido, Canadá y Colombia también han regulado el uso de los TV-White-Spaces. Sin embargo, los progresos que se han llevado a cabo hasta el momento se limitan a identificar áreas geográficas donde un canal de TV está o no en uso. Por lo tanto, solo están explotando una dimensión de las tres posibles (temporal, espectral y espacial) en las que podrían ser usados eficientemente los TV-White-Spaces. **La tercera de ellas, por la diversidad de cuotas de mercado en la difusión lineal de contenidos televisivos, que varía en función del país**, por ejemplo, en Bélgica el mercado de televisión oscila en el 4% mientras en Italia alcanza hasta el 89% [16]. En la actualidad, hay una revolución y creciente aceptación de ver los contenidos audiovisuales por plataformas de video bajo demanda a través de internet (televisión no-lineal), tales como Netflix, HBO, entre otros. **Por todas estas razones, la ITU solicita estudios de compartición y compatibilidad que definan posibles casos de uso para la banda de televisión**, que comprenden desde la definición de los requerimientos técnicos que deberían cumplir los sistemas candidatos, así como también, las posibles tecnologías.

1.3. Objetivos de la Tesis

El objetivo principal de esta tesis doctoral es **definir los parámetros técnicos de operación que garantizan el correcto funcionamiento de las redes de televisión y móviles en la banda del primer dividendo digital en Sudamérica, y proponer dos potenciales casos de uso de compartición de espectro para el uso futuro de la banda de televisión después de los dividendos digitales, como modo de acceso eficiente y flexible para el uso del espectro radioeléctrico**. Este objetivo principal es dividido en los siguientes objetivos específicos.

1. Generar las señales reales de los estándares de televisión digital terrestre (DVB-T2, y ISDB-T), y de telefonía móvil (LTE, LTE-A), tanto para el enlace ascendente como descendente, de acuerdo a las especificaciones técnicas definidas por cada uno de los organismos de estandarización.
2. Implementar la capa física de transmisión del estándar Narrow Band-LTE, de acuerdo a las especificaciones técnicas de la Release 13 del 3GPP, bajo el lenguaje de programación de Matlab, con el objetivo de la generación el espectro de la señal.
3. Modelar y cuantificar analíticamente los problemas de interferencia entre los sistemas de telefonía móviles y de televisión digital terrestre en dos modos de funcionamiento. El primero de ellos, los sistemas operando en bandas adyacentes, y el segundo, en modo compartido desde co-canal hasta adyacente.

4. Determinar los márgenes de protección entre las tecnologías bajo estudio, es decir, la máxima potencia permisible del transmisor interferente sobre el receptor víctima.
5. Establecer los parámetros técnicos de operación para garantizar la convivencia entre los servicios móviles y de televisión en la banda de 700 MHz en Sudamérica, tales como, bandas de guarda necesarias entre sistemas, distancias de protección entre el transmisor interferente y el receptor víctima, entre otros.
6. Evaluar técnicas adicionales de mitigación de interferencias en los escenarios de estudios que se requieran, con el fin de garantizar la coexistencia entre los sistemas.
7. Definir los parámetros técnicos de transmisión en los dos casos de uso futuro de la banda de TDT. Principalmente, la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) que podrían transmitir los dispositivos de baja potencia haciendo uso secundario del espectro de la banda de TDT.
8. Elaborar recomendaciones para la convivencia en las bandas del dividendo digital, y para la compartición de espectro en la banda de la televisión digital terrestre, que sean de interés a organismos de regulación, operadores y fabricantes.

1.4. Estado del arte

1.4.1. Convivencia en las Bandas del Dividendo Digital

Los estudios de convivencia entre los servicios televisión y móviles llevados a cabo hasta el momento, son presentados en función del dividendo digital (primero o segundo), y de la zona geográfica. Para el primer dividendo digital, en el año 2009, el CEPT desarrolló los primeros estudios de convivencia para Europa (banda de 800 MHz: 790 MHz a 862 MHz) [17]. En América, por un lado, en el año 2011, Estados Unidos llevó a cabo estudios de convivencia entre los estándares ATSC y LTE. Por otro lado, en los años 2014, 2015 y 2016 en Sudamérica países como Brasil, Perú y Argentina realizaron estudios de convivencia entre las redes móviles y de televisión bajo los estándares DVB-T2 e ISDB-T [18] [19] [20]. Respecto a las principales diferencias en los estudios de convivencia entre Europa y América podemos citar: el enlace adyacente a los servicios de TDT en el primer DD1, en Europa es el enlace descendente

te de LTE respecto al ascendente de LTE en América; la banda de guarda es tan solo 1 MHz en Europa respecto a 5 MHz en América. Los estándares de televisión son principalmente DVB-T en Europa mientras ATSC, DVB-T2 e ISDB-Tb en América. El ancho de banda de un canal de TV en Europa es de 8 MHz, mientras en América son 6 MHz. Respecto al segundo dividendo digital, En Europa (Banda de 700 MHz: 694 MHz a 790 MHz), el CEPT realizó estudios de convivencia a partir del año 2013. Asimismo, se espera que el despliegue de las redes móviles en esta banda sea llevado a cabo para el año 2020 con una diferencia temporal de ± 2 años. En América, aún no está definido el uso que se le dará a la banda de 600 MHz o segundo dividendo digital (614 MHz a 698 MHz) por la gran mayoría de países a excepción de Estados Unidos, México y Colombia. En el año 2017, Estados Unidos atribuyó y subastó esta banda para servicios móviles de quinta generación. En este mismo año, México y Colombia la atribuyeron también para servicios móviles, sin embargo, aún no ha sido subastada. El resto de países de América no han tomado ninguna decisión acerca del uso de esta banda. Por último, es importante recalcar que la mayor parte de los estudios de convivencia entre los servicios de televisión y móvil en las bandas de los dividendos digitales han sido llevados a cabo para las condiciones de las redes de Europa, mientras que los hechos para las condiciones de las redes de Sudamérica son mínimos. A continuación, se presentan todos los estudios más relevantes en función de banda del dividendo digital (DD1 y DD2), y la Región (Europa y América).

Respecto a los estudios de coexistencia en la banda de 800 MHz (Europa), en [17], se presentan recomendaciones de las restricciones técnicas de operación entre los sistemas LTE y DVB-T para escenarios de recepción fija e interiores. Los resultados son obtenidos a través de análisis teóricos y simulaciones de Monte Carlo. Este informe especifica la Máscara de Bloque de Borde (BEM, por sus siglas en inglés), la cual es definida como la cantidad de potencia máxima permitida que puede transmitir LTE dentro de banda y fuera de banda, para no degradar la calidad de servicio víctima (televisión). En [21], se realizaron medidas de márgenes de protección y umbrales de saturación para que LTE no interfiera a un receptor DVB-T. Se consideran diferentes anchos de banda de la estación base LTE (5-10 MHz), y diferentes condiciones de recepción de la señal de TDT. En [22], se definen los límites de emisiones fuera de banda (OOB) en $-65\text{dBm}/8\text{MHz}$ para que una estación base LTE no interfiriera a un receptor de TDT, considerando los márgenes de protección entre LTE y DVB-T/T2 medidos en estudios anteriores, para un ancho de banda de 10 MHz de LTE. Además, mediante simulaciones computacionales se cuantifica el porcentaje total de usuarios de TDT que podrían verse interferidos en U.K. En [23], se concluyó la necesidad de un filtrado adicional para evitar interferencias provenientes de una estación base LTE sobre un receptor víctima de TV, en condiciones de recepción fija sobre tejado. El filtro debe estar ubicado entre la antena receptora y el decodificador de TV. En el peor de los

casos (usuarios de televisión en el borde de celda), el nivel de atenuación del filtro debe ser tal que, el nivel de atenuación adicional proporcionado por el filtro más el nivel de selectividad en canal adyacente del receptor víctima (ACS), sea por los menos de 80 dB. En [24], se evalúa la coexistencia entre 4G-LTE interfiriendo a DVB-T en el caso de recepción fija sobre tejado con sistemas de antenas colectivas. Específicamente, se estudia el caso cuando una señal de LTE llega con una potencia muy alta a la antena receptora de TV (enlace víctima), y, por lo tanto, podría causar riesgo de saturación en la etapa de amplificación de la señal de TDT (cabecera de distribución a usuarios finales de TV). Los resultados genéricos son basados en simulaciones computacionales (método de Monte Carlo), y determinan una mayor probabilidad de interferencia en los casos de recepción con sistemas de antenas colectivas respecto antenas individuales, siendo el caso más crítico cuando una estación base LTE se encuentra co-ubicada en el mismo emplazamiento de la antena de receptora de TV. En [25], se presentan valores de márgenes de protección entre los sistemas de televisión digital terrenal DVB-T2 con anchos de banda de 6, 7 y 8 MHz y LTE con un ancho de banda de 10 MHz, tanto de la estación base y equipo de usuario. En [26], además de márgenes de protección, se presentan resultados de umbrales de saturación para los sistemas de televisión DVB-T/ATSC respecto a servicios LTE y UMTS.

Respecto a los estudios de coexistencia en la banda de 700 MHz (América), en [27], se presentan estudios de coexistencia entre terminales móviles LTE-UL y receptores víctimas de TDT, en bandas adyacentes (694/698-806 MHz), considerando escenarios en entornos exteriores e interiores. La metodología está basada en estudios determinísticos y probabilísticos. Los resultados limitan las emisiones fuera de banda (OOB) de un terminal LTE a -34dBm/MHz respecto a un receptor de TDT, para una banda de guarda de 5 MHz. En [18], se evalúa la coexistencia entre ISDB-T (estándar adoptado en Brasil) y LTE operando en la banda del primer dividendo digital. La metodología está basada en simulaciones computacionales mediante el uso de un software profesional y para tres ciudades específicas de Brasil (Sao Paulo, Brasilia and Campinas). Los resultados presentados son genéricos y determinan el porcentaje de población interferida (número de usuarios que presentarían problemas en la recepción de televisión) considerando límites de emisiones fuera de banda y emisiones de bloqueo tanto para una estación base como para un terminal LTE.

Respecto a los estudios de coexistencia en la banda de 700 MHz (Europa), en [28], se proporcionan medidas de márgenes de protección y umbrales de saturación para que DVB-T/DVB-T2 no sea interferido por una señal de LTE de 10MHz. En [29], se determinan las distancias de protección para que un terminal móvil LTE no interfiera a un receptor de TDT. La metodología es basada en cálculos teóricos. Para recepción fija sobre tejado, se determinó que un móvil ubicado a 22 metros de separación (distancia plano horizontal) respecto a una antena de TV, es el caso más restrictivo, debido a

que esta distancia se obtiene la menor discriminación angular de la antena receptora de TV (máxima ganancia). Para recepción en un entorno interior, considerando que el móvil se encuentra ubicado en la misma sala donde se encuentra el receptor de televisor con antena integrada o no, debe haber una distancia de separación mayor a 11 metros entre ellos, para que no exista interferencia. En [30] [31], se definió el límite de emisiones fuera de banda para usuarios LTE-UL (ancho de banda de 10 MHz) en -42 dBm/8MHz para proteger los servicios de televisión digital terrestre en recepción fija sobre tejado, considerando una banda de guarda de 9 MHz. Para usuarios LTE-UL con anchos de banda mayores a 10 MHz se deben aplicar medidas adicionales, tales como, aumentar la banda de guarda para no superar el límite definido. Los límites definidos anteriormente reducen el riesgo de interferencia sobre la TDT, sin embargo podría existir interferencia en los siguientes casos: recepción portable de TDT, especialmente en los canales altos de la banda (canal 48); recepción fija sobre tejado, cuando los usuarios de TDT se encuentran ubicados en el borde de cobertura de celda; recepción fija sobre tejado, cuando los usuarios de TDT se encuentran ubicados en la proximidad de un transmisor interferente; recepción fija con sistemas colectivos (sistemas de distribución a usuarios finales, amplificadores). En estos casos, si los problemas de interferencia son detectados, deben implementarse técnicas de mitigación como el uso de filtros. En [32], se realizaron simulaciones computacionales basadas en el método de Monte Carlo, para evaluar la coexistencia entre usuarios LTE-UL con un ancho de banda de 10MHz interfiriendo a un receptor víctima de TDT. Se concluye que es necesaria una selectividad de canal adyacente en el receptor víctima de TDT mayor a 60 dB y límites de emisiones fuera de banda en el terminal de usuario LTE de -33 dBm/8 MHz para evitar interferencias, para una banda de guarda de 9 MHz entre tecnologías. En [33], se determinan márgenes de protección entre LTE y DVB-T2 para la canalización europea. La metodología es basada en medidas de laboratorio y cálculos teóricos. Para recepción portable en interiores, se determina una distancia de protección de 6 metros entre un móvil LTE y la antena receptora de TV, para evitar interferencias. Además, evalúa el impacto de utilizar filtros como técnica para mitigar las interferencias. En [34], se presentan resultados basados en el cálculo de las Mínimas Pérdidas de Propagación (*Minimum Coupling Loss or MCL*, en inglés) y simulaciones computacionales usando el método de Monte Carlo. Por un lado, las MCL entre el transmisor interferente (LTE-UE-UL) y el receptor víctima (DVB-T) se fijan en 8,84 Km. Por otro lado, las simulaciones demuestran que es necesaria una distancia de separación mayor de 150 metros para probabilidades de interferencia inferiores al 5%. En [35], se presentan márgenes de protección entre LTE y DVB-T, para un ancho de banda de 5 MHz y 10 MHz de LTE.

En general, los resultados disponibles en la literatura han sido obtenidos para casos de estudio muy específicos, es decir, para una banda de guarda específica entre tecnologías, para un ancho de banda específico de LTE como señal interferente, para un modo de transmisión, entre otros. Asimismo, la mayor parte de estudios han sido enfocados teniendo en cuenta la canalización asignada a Europa y muy pocos han sido hechos teniendo en cuenta las condiciones específicas de América, tal y como se describieron al principio de la sección. Por último, la mayoría de resultados han sido obtenidos por solo un método de investigación (analíticos, simulaciones computacionales, medidas de laboratorio o en menor medida medidas de campo). Por lo tanto, son necesarios estudios técnicos que garanticen la convivencia entre los servicios móviles y televisivos para la Región 1, específicamente Sudamérica, una discusión con los resultados obtenidos en el caso europeo y resultados que puedan ser extrapolados a diferentes escenarios o condiciones particulares de cada país en la Región 1 (Sudamérica).

1.4.2. Compartición de espectro en la banda de TDT

La compartición de espectro entre diferentes tecnologías de última generación que hagan uso eficiente de esta banda se perfila como una opción interesante. En la actualidad, se está impulsando el uso eficiente de las frecuencias libres de la banda de televisión (TV-White-Spaces). Han sido realizado estudios donde se demuestran la viabilidad de la compartición de espectro entre dispositivos secundarios de baja potencia y los servicios de televisión digital terrestre, como servicio primario (modo de acceso compartido horizontal secundario). El primer país en regular el uso de los TV-White-Spaces por dispositivos secundarios fue Estados Unidos en el año 2010, seguido por Canadá en el año 2012, Reino Unido en el 2015 y Colombia en el 2017. Institutos de investigación y organismos de regulación a nivel internacional, tales como, el Comité de Comunicaciones Electrónicas (*Electronic Communications Committee, ECC*), el Instituto Europeo de Normas de Telecomunicaciones (*European Telecommunications Standards Institute, ETSI*), el Instituto de Ingeniería Eléctrica y Electrónica (*Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE*), han contribuido para la estandarización del uso de los TV-White-Spaces.

Dentro de los estudios propuestos por institutos de investigación, se propone el uso secundario de Femtoceldas-LTE ubicadas en el interior de una vivienda dentro la banda de TDT. Los resultados evaluaban la máxima tasa de transmisión que podría ofrecer la femtocelda en un escenario con interferencias inter-sistema. Los resultados han sido obtenidos a través de simulaciones computacionales. En [36], se determina que una Femtocelda-LTE con un ancho de banda de 6 MHz, podría alcanzar tasas de transmisión de hasta 17 Mbps, si consideramos una fuente de interferencia a 60 metros de distancia. En [37], una Femtocelda LTE con un ancho de banda de 5 MHz podía ofrecer una tasa de transmisión entre 9 Mbps y 12 Mbps, en función del escenario eva-

luado. Para este estudio se consideraron como parámetros técnicos de transmisión para los dispositivos secundarios los definidos por la FCC (*Federal Communications Commission*, en inglés). En [38], se evalúa la coexistencia entre una Femtocelda LTE y un receptor DVB-T2, los dos dispositivos están ubicados en un entorno interior, y operan en co-canal en la banda de 800 MHz. La metodología está basada en medidas y simulaciones computacionales. Los resultados que se presentan son mapas de parámetros de calidad (QEF, EVM), cuando operan las dos tecnologías en coexistencia. Otros estudios han realizado medidas de márgenes de protección entre diferentes servicios de radiocomunicaciones y televisión digital terrestre, haciendo uso de los TV-White-Spaces. En [39], se midieron márgenes de protección que garantizan el correcto funcionamiento de receptores DVB-T, como servicio primario. Se consideró que los dispositivos secundarios operaban bajo las tecnologías Wi-Max, Wi-Fi y LTE. Además, en [40], se realizaron medidas de campo en Cambridge (Reino Unido), para evaluar el uso potencial de los espacios en blanco en la banda de televisión. En [41], se presentan resultados de márgenes de protección entre una señal DVB-T2 (útil) y una señal IEEE 802.22 (interferente), en función de la frecuencia (co-canal y adyacente).

Respecto a los estudios elaborados por organismos de estandarización, el ECC, en [42] [43], define los requerimientos técnicos de operación de los sistemas radio cognitivos, que podrán operar en la banda de frecuencias de 470-790 MHz, haciendo uso oportunista de los TV-White-Spaces, mediante técnicas de base de datos de geolocalización y sensado de espectro. Asimismo, se proponen diferentes escenarios de estudio y diferentes tecnologías que podrían hacer uso de los TV-White-Spaces. Respecto a la protección de los servicios de televisión, se limita el umbral de sensado entre -91 y -155 dBm (umbral de potencia para decidir si un canal de televisión está libre o no), dependiendo del escenario, y tipo de recepción TDT. Sin embargo, en algunos escenarios, estos valores bajos de detección no garantizan la presencia o ausencia de un canal de TV. Por lo tanto, se concluye que la técnica de sensado no es una opción fiable, y se propone la técnica de base de datos de geolocalización como una opción segura para garantizar la protección de los servicios de TDT. En los modelos estudiados de base de datos de geolocalización, estos proporcionan información a los dispositivos de los espacios en blanco (WSD), tales como: disponibilidad de un canal de TV y PIRE permitido en función del tipo de escenario. En [44], son estudios complementarios a los mencionados anteriormente, donde se definen los requerimientos técnicos de operación de los WSD bajo el enfoque de base de datos de geolocalización. La arquitectura propuesta hace referencia entre dos tipos de dispositivos WSD: maestro y esclavo. Respecto a la información de localización, hay tres áreas de incertidumbre que la base de datos de geolocalización tendrá que considerar: incertidumbre en la ubicación del receptor víctima; incertidumbre en la ubicación del maestro WSD; incertidumbre en la ubicación del esclavo WSD. En [45], se presentan guías de implementación para el uso de

los WSD, mediante un enfoque regulatorio. Se recomienda que los WSD puedan operar en los TV-White-Spaces, mediante la coordinación de bases de datos de geolocalización. Se lleva a cabo un análisis de costos y beneficios, respecto a lo que implicaría el uso de los TV-White-Spaces. Además, se identificaron posibles casos de uso y aplicaciones para el uso eficiente de los TV-White-Spaces (basados en medidas de campo realizadas en Reino Unido y Estados Unidos), los cuales son mencionados a continuación: Para el despliegue de las redes de Internet de las cosas y comunicaciones máquina a máquina; Para aumentar la capacidad de las redes móviles de última generación o redes Wi-Fi; Para proporcionar los enlaces Backhaul a puntos de acceso Wi-Fi; Para entregar contenidos informativos o publicitarios en lugares públicos.

El ETSI, desde el año 2011, ha estado activamente estudiando el uso de los TV-White-Spaces. En [46], se proponen diferentes casos de uso para los TV-White-Spaces, tales como: transmitir servicios en modo multicast o broadcast con alta eficiencia en redes LTE-MBSFN (*Multimedia Broadcast multicast service Single Frequency Network*, en inglés); uso de redes inalámbricas para conectividad dispositivo a dispositivo (D2D); para enlaces Backhaul de redes inalámbricas, entre otros. Además, se discuten los posibles requerimientos que deberían tener en cuenta los sistemas que harían uso de los TV-White-Spaces: garantizar la protección de los usuarios primarios; estaciones base que implementen métodos de sensado de espectro; asignación de espectro centralizado; procedimiento para acceso inicial a la red; soportar interoperabilidad entre diferentes tecnologías; gestión de la coexistencia entre las diferentes tecnologías; movilidad; estaciones base gestoras para garantizar el acceso a los TV-White-Spaces. En [47], se especifican procedimientos de medida y los requerimientos técnicos de operación de los dispositivos secundarios que podrán operar en los TV-White-Spaces, tales como: ancho de banda nominal; máxima PIRE permitida; límites de emisiones fuera de banda (OOB); relación de fuga en canal adyacente (ACLR); límites de emisiones espurias, modos de operación, entre otros. En [48] [49], se define la arquitectura y procedimientos de los sistemas que puedan operar en los TV-White-Spaces, considerando información recibida de bases de datos de geolocalización. La arquitectura se basa en dos enfoques: uso no coordinado de los TV-White-Spaces (no hay definida ninguna función de coordinación en la base de datos de geolocalización que garantice la interoperabilidad de un sistema operando en los TV-White-Spaces, con otros sistemas vecinos); uso coordinado de los TV-White-Spaces (hay definida una función de coordinación en la base de datos de geolocalización que garantiza la interoperabilidad entre sistema en los TV-White-Spaces). En [50], se describe la arquitectura de sistema para el intercambio de información entre diferentes bases de datos de geolocalización. Las bases de geolocalización son las entidades encargadas de coordinar el acceso de los dispositivos de baja potencia a los TV-White-Spaces, siempre y cuando se garantice la protección de los servicios primarios de televisión. En [51], se detallan los parámetros y procedi-

mientos para el intercambio de información entre diferentes bases de datos de geolocalización, cuyas funciones son coordinar el acceso a los sistemas que hacen uso de los TV-White-Spaces, teniendo en cuenta la arquitectura definida en [50]. En [52], se proporcionan los parámetros y procedimientos para el intercambio de información entre Sistemas de Radio Cognitivos y Coordinador de Espectro, en el enfoque de uso coordinado de los TV-White-Spaces.

El IEEE, ha desarrollado dos estándares para el uso de los TV-White-Spaces. En [53], se define las especificaciones técnicas del estándar IEEE 802.11 af para la compartición de espectro entre servicios de banda ancha bajo el estándar Wi-Fi, y los servicios de televisión, en los TV-White-Spaces. El estándar especifica la capa Física (*Physical Layer or PHY*, en inglés) y la de Acceso al Medio (*Medium Access Control or MAC*, en inglés), sus principales características son: soporta anchos de banda de 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz; satisface diferentes requerimientos temporales respecto a la frecuencia que un WSD se comunica con la base de datos de geolocalización; y permite la concatenación de hasta cuatro canales de TV, entre otros. En [54], se define la arquitectura del estándar IEEE 802.19.1, las interfaces, los mensajes, y los procedimientos para garantizar la coexistencia de diferentes estándares de radio cognitiva que podrán operar en los TV-White-Spaces.

Respecto a los organismos de regulación nacional, los países que lideran las investigaciones para permitir el uso secundario de dispositivos de baja potencia en la banda de televisión son: Estados Unidos, Reino Unido y Colombia. Estados Unidos a través de la FCC, ha permitido el acceso a los TV-White-Spaces mediante la coordinación de bases de datos de geolocalización desde el año 2010. El estándar de televisión digital es ATSC con un ancho de banda de 6 MHz. Se definen dos categorías de WSD: fijos y portátiles de baja potencia. Los WSD se autentican a la base de datos de geolocalización una sola vez al día, y siguen una programación a 48 horas que proporciona para este periodo de tiempo la lista de canales disponibles. Los principales parámetros técnicos de operación son: Los WSD fijos podrían transmitir hasta 1 W (30 dBm) de potencia a la entrada de la antena y una PIRE máxima de 4 W (36 dBm), en un TV-White-Space de 6 MHz; Los WSD portátiles podrán transmitir una PIRE máxima de hasta 100 mW (20 dBm) por cada 6 MHz en canales continuos libres, y solo 40 mW (16 dBm) para el primer canal adyacente a un usuario primario [55] [56]. Existen empresas que ofrecen los servicios de base de datos de geolocalización en la banda de TV, las principales son Google, Microsoft, iconectiv y Spectrum Bridge. En [57], Reino Unido mediante el regulador del espectro (*The Office of Communications or Ofcom*, en inglés), propone una consulta pública para la reglamentación de los requerimientos y parámetros técnicos de operación de los WSD esclavo y maestro, categorías de terminales de los WSD y principales casos de uso. En [58], se define hasta cinco (5) límites de emisiones dentro y fuera de la banda tanto de los WSD esclavo y maestro para la

operación en los TV-White-Spaces. Asimismo, se describe los requerimientos de los WSD y las bases de datos de geolocalización para el cálculo de estos parámetros. En febrero del año 2015, en Reino Unido se aprobó el uso de los TV-White-Spaces por dispositivos de baja potencia a título secundario (exentos de licencia), bajo el enfoque de bases de datos de geolocalización en lazo cerrado. El ancho de banda de un TV-White-Space es de 8 MHz, equivalente al ancho de banda de un canal de TV. Se definen diferentes clases de WSD. La frecuencia de comunicación o reporte entre un WSD y la base de datos de geolocalización son comúnmente de 2 horas. Una vez establecida la comunicación, la base de datos de geolocalización le envía sus parámetros técnicos de operación que dependen de la localización, con la restricción que, si el WSD se aleja 50 metros de su última posición reportada o finaliza el tiempo de operación, debe solicitar nuevos parámetros. Por último, en diciembre del 2015, Ofcom incluyó regulaciones referentes a los WSD en las actas de “*Wireless Telegraphy*”. Las bases de datos de geolocalización son gestionadas por siete operadores autorizados, los cuales son: *The Council for Scientific and Industrial Research (CSIR)*; *Fairspectrum Oy*; *Google UK Limited*; *Microsoft Ireland Operations Limited*; *Nominet UK*; *Sony Europe Limited*; *Spectrum Bridge Incorporated* [59] [60]. En el año 2016, Colombia a través de la Agencia Nacional del Espectro (ANE), realizó diferentes estudios sobre las condiciones técnicas del uso de los espacios en blanco y las experiencias internacionales relacionadas. Como resultado de dichos estudios, la ANE publicó la Resolución 461 de 2017 mediante la cual se establecen las condiciones de operación de los dispositivos de radiocomunicaciones que hagan uso de los espacios en blanco (dispositivos de espacios en blanco) en Colombia en el marco del espectro de libre utilización [61]. En dichas condiciones se incluyó el requerimiento de que cada dispositivo de espacios en blanco debe solicitar a una plataforma de software (conocida como base de datos de espacios en blanco) las frecuencias disponibles que puede emplear para efectuar comunicaciones inalámbricas. Adicionalmente, la plataforma guardará un histórico de las interacciones con dichos dispositivos, almacenará los datos de contacto del responsable de cada dispositivo en caso de ocurrir interferencias y permitirá a cualquier usuario conocer las frecuencias disponibles para un dispositivo en una zona determinada a través de una interfaz gráfica en línea. En los considerandos se señala que “actualmente en el 99% de los municipios se usan menos de 10 canales de los 36 disponibles en la banda de frecuencias ultra altas, en adelante UHF, lo que permite la utilización de esas frecuencias disponibles para otros servicios aprovechando sus ventajas de propagación”. Otros países como Italia, Botsuana, Bután, Filipinas, Ghana, Jamaica, Japón, Kenia, Malawi, Mozambique, Namibia, Sudáfrica, Taiwán, Uruguay y Vietnam han hecho pruebas piloto sobre el uso de los TV-White-Spaces [62] [63] [64].

Respecto al uso futuro de la banda de TDT, en [16], se recomendó a la Comisión Europea, que la banda restante de TDT siguiera adjudicada a título primario para los

servicios de TDT, con la posibilidad de ser usada para servicios móviles LTE solo en el enlace descendente (*Supplemental Downlink or SDL*, en inglés), siempre y cuando se garantice la calidad del servicio de televisión. En [65], se propone el caso que la banda inferior de TDT, se adjudique a título co-primario a los servicios LTE. Por ejemplo, un caso donde un país tiene adjudicada la banda a los servicios de TDT, y en el país vecino a los servicios de LTE, se requieren distancias de separación entre una estación base LTE y un receptor víctima de TDT entre 200 Km y 300 Km, para una señal interferente (LTE-BS) que se propaga en tierra. Para una señal interferente que se propaga sobre el mar, sería necesario distancias superiores de 1000 Km. En el caso de proteger un receptor de una estación base de LTE de emisiones indeseadas de una señal de TDT, se requiere distancias de protección sobre tierra entre 200 y 600 Km, dependiendo de la potencia del transmisor de TDT. En [66], se plantean tres casos concretos de aplicaciones para la compartición de espectro de la banda de frecuencias UHF: para aumentar la capacidad de las redes Wi-Fi en entornos interiores; para contrarrestar la demanda de espectro en servicios móviles, a través de “*Small-Cell*” en entornos exteriores; para soportar el crecimiento exponencial de dispositivos que estarán conectados a internet, es decir, para la idea emergente de Internet de las Cosas (IoT). El ECC [67], propuso cuatro escenarios potenciales para el uso futuro de la banda de TDT: Caso A: uso primario de la banda de TDT para redes existentes y futuras de DVB; Caso B: uso híbrido de la banda de TDT por parte de las redes DVB y/o redes para servicios móviles de cuarta generación en el enlace descendente; Caso C: uso híbrido de la banda de TDT por parte de las redes DVB y/o redes LTE incluyendo tanto el enlace descendente como ascendente; Caso D: uso de la banda de TDT para redes de tecnologías de comunicaciones inalámbricas de última generación.

1.5. Descripción de la Tesis y Principales Contribuciones

La tesis está estructurada en 5 capítulos, cada uno de ellos es descrito brevemente a continuación: El capítulo 1 presenta la identificación del problema, los objetivos trazados en el desarrollo de esta tesis doctoral, y el estado del arte más relevante respecto al uso presente y futuro de la banda de la televisión digital terrestre, con dos principales enfoques: el primero de ellos, la coexistencia en la banda del dividendo digital entre los servicios móviles de cuarta generación y de televisión digital terrestre; y el segundo de ellos, posibles casos futuros de uso de la banda de televisión después de los dividendos digitales.

El capítulo 2, describe los principales estándares inalámbricos de televisión digital adoptados en Sudamérica (DVB-T2 y ISDB-T), y los de comunicaciones móviles de cuarta generación (4G-LTE). Así mismo, se especifican los parámetros técnicos de operación tanto en transmisión como en recepción de cada una de las tecnologías involucradas en la convivencia de las bandas del primer dividendo digital en Sudamérica,

los cuales garantizan el correcto funcionamiento de dos sistemas distintos operando en bandas adyacentes.

En el capítulo 3 y 4, se detalla la metodología llevada a cabo en esta tesis doctoral, la cual es un proceso iterativo de pruebas de laboratorio, estudios teóricos, y medidas de campo. Las medidas de laboratorio son llevadas a cabo con equipos profesionales y comerciales que nos permiten emular los escenarios de estudios en un entorno controlado. Posteriormente, se modela analíticamente la geometría de cada escenario, y se tienen en cuenta tanto las medidas de laboratorio como los requerimientos técnicos de operación de cada una de las redes implicadas, para definir recomendaciones que garanticen el correcto funcionamiento de los sistemas. Finalmente, todos los resultados podrán ser validados mediante medidas de campo (solo para un caso de estudio en el capítulo 4). Los principales resultados de los capítulos 3 y 4 son:

En el capítulo 3, se definen los requerimientos técnicos de operación que deberán cumplir tanto los sistemas de comunicaciones móviles como los de la televisión digital terrestre para que operen correctamente en la banda de 700 MHz en Sudamérica. Para tal fin, se obtienen los márgenes de protección medidos en laboratorio. El margen de protección es definido como el valor mínimo requerido entre la diferencia de la señal deseada e interferente, expresado en dB, medidos en la entrada del receptor víctima para garantizar un criterio de calidad. Las medidas son hechas en función de la separación en frecuencia o banda de guarda entre tecnologías, y considerando para los servicios de televisión un ancho de banda de 6 MHz (canalización América). Además, se calculan las mínimas pérdidas de propagación (MCL), que deben cumplir un transmisor interferente y un receptor víctima, y son obtenidas teniendo en cuenta los márgenes de protecciones medidos en laboratorio y los parámetros técnicos de transmisión definidos por los organismos de estandarización para cada una de las tecnologías bajo estudio. Una vez obtenidas las mínimas pérdidas de propagación, se obtienen recomendaciones de distancias de protección que debe cumplir entre un transmisor interferente y un receptor víctima, aplicando un modelo de propagación específico para cada tecnología en función del tipo de entorno.

El capítulo 4, propone dos casos de uso compartido para el futuro uso de la banda de televisión después de los dividendos digitales. El primer caso, propone un nuevo concepto de espacios en blanco llamados micro-TV-White-Spaces, los cuales son aquellas zonas geográficas que no son cubiertas por el servicio de televisión digital terrestre, ya sea por la ausencia de cobertura de la red o por obstáculos que debilitan la señal recibida de TDT. El escenario propuesto es una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado y Femtoceldas LTE-A en interiores haciendo uso de los micro-TV-White-Spaces como servicio secundario. Los resultados proporcionan restricciones técnicas de las Femtoceldas LTE-A, principalmente la máxima potencia

radiada equivalente isotrópica que podrían transmitir en función de la separación de las portadoras centrales. El segundo caso, se propone el uso de los espacios en blanco en la banda de la televisión digital terrestre para la compartición de espectro entre los servicios de internet de las cosas bajo el estándar NB-LTE, como servicio secundario y servicios de televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T2 como servicio primario. Se definen la máxima potencia transmisible por los nodos y dispositivos IoT sin interferir al servicio primario. Asimismo, se presentan recomendaciones de las bandas de guarda necesaria entre las dos tecnologías para garantizar el correcto funcionamiento, y los ciclos de trabajo óptimo de los dispositivos IoT que minimizan la interferencia sobre DVB-T2.

En el capítulo 5, se resumen las principales conclusiones y recomendaciones obtenidas en los capítulos anteriores, tanto para el correcto despliegue de las redes móviles de cuarta generación en la banda del primer dividendo digital en Sudamérica, como para los potenciales casos propuestos de uso futuro de la banda de televisión.

Finalmente, las principales contribuciones en esta tesis doctoral son reflejadas en los capítulos 3 y 4, y son resumidas a continuación: En el capítulo 3, se contribuyó con dos artículos: En el primero de ellos, se estudia la problemática completa de Colombia desde la transición de la televisión analógica a la digital, la convivencia entre las redes móviles, televisión analógica y digital, y redes de protección pública y seguridad en las bandas de 700 MHz y 450 MHz, y el plan técnico de televisión. Los resultados son fundamentados con estudios teóricos, medidas de laboratorio y simulaciones computacionales. Este trabajo fue realizado en cooperación con la Agencia Nacional del Espectro de Colombia (ANE). En el segundo de ellos, se aborda la problemática de la convivencia entre los servicios móviles y de televisión en la banda de 800 MHz y 700 MHz tanto en Europa como en América, proporcionando recomendaciones para el correcto funcionamiento de las redes en función de la banda de guarda, el tipo de enlace y la tecnología bajo estudio. En el capítulo 4, se contribuyó con dos artículos: El primero de ellos, propone una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado y Femtoceldas LTE-A en interiores haciendo uso de los micro-TV-White-Spaces como servicio secundario, por ejemplo, para ofrecer conectividad de banda ancha en zonas rurales. En el segundo de ellos, se propone el uso de los espacios en blanco en la banda de la televisión digital terrestre para la compartición de espectro entre los servicios de Internet of Things bajo el estándar NB-LTE-IoT como servicio secundario y servicios de televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T2 como servicio primario. Se definen la máxima potencia transmisible por los nodos y dispositivos IoT sin interferir al servicio primario. Asimismo, se presentan recomendaciones de las bandas de guarda necesaria entre las dos tecnologías para garantizar el correcto funcionamiento, y los ciclos de trabajo óptimo de los dispositivos IoT que minimizan la interferencia sobre DVB-T2.

1.6. Diseminación y Lista de Publicaciones

- Revistas Internacionales

[RI1] **G. Martínez-Pinzón**, N. Cardona, C. Garcia-Pardo, A. Fornés-Leal and J. Ribadeneira-Ramírez, "*Spectrum Sharing for LTE-A and DTT: Field Trials of an Indoor LTE-A Femtocell in DVB-T2 Service Area*," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 62, no. 3, pp. 552-561, Sept. 2016.

[RI2] J. Ribadeneira-Ramírez, **G. Martínez**, D. Gómez-Barquero and N. Cardona, "*Interference Analysis Between Digital Terrestrial Television (DTT) and 4G LTE Mobile Networks in the Digital Dividend Bands*," in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 62, no. 1, pp. 24-34, March 2016.

[RI3] **G. Martínez**, J. Sanchez, D. Barquero and N. Cardona, "*Optimization of the Digital Terrestrial Television Transmission Mode of DVB-T2 in Colombia*," in IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 7, pp. 2144-2151, July 2015.

- Revistas Nacionales

[RN1] D. Gómez-Barquero; J. López-Sánchez; **G. Martínez-Pinzón**; J. Ribadeneira-Ramírez; E. Garro; C. García-Pardo; M. Fuentes; N. Cardona, "*Frequency and Network Planning and Optimization of the Digital Terrestrial Television DVB-T2 Networks in Colombia*," WAVES, vol.6, pp.35-49, 2014.

- Congresos Internacionales

[CI1] **G. Martínez-Pinzón**, K. Llamas and N. Cardona, "*Potential Sharing between DTT and IoT services in the UHF band*," 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, September 2016, pp. 1-6.

[CI2] **G. Martínez-Pinzón**, Manuel Fuentes, Concepción Garcia-Pardo and Narcís Cardona, "*Spectrum Sharing for LTE and DTT: Study case: Indoor LTE-A Femtocell in DVB-T2 service area*," 12th MC and Scientific Meeting, European COST IC1004 action, Dublin, Ireland, 2015.

- Contribuciones a Recomendaciones de la ITU

[CR1] "*Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands*," International Telecommunication Union (ITU), ITU-R WP6A contribución 403, presentada a través del gobierno de Colombia, 2014.

Descripción: Se contribuyó con márgenes de protección entre sistemas de televisión digital terrestre y analógica con canalización de 6 MHz. Las tecnologías evaluadas fueron DVB-T2, ISDB-T y ATSC. Asimismo, se cuantificó el efecto de mecanismos adicionales para evitar interferencias.

- Proyectos Co-Dirigidos

[PD1] “Definición de los parámetros técnicos de operación para los sistemas de voz convencional, los sistemas LTE y los sistemas DVB-T2 en la banda de 450 MHz que permitan la convivencia entre ellos,” Agencia Nacional del Espectro en Colombia (ANE), **Grupo de Comunicaciones Móviles- iTEAM-UPV**, Universidad ICESI, 2017.

Descripción: Se presentan recomendaciones que garantizan la correcta compatibilidad entre los sistemas móviles de cuarta generación LTE para servicios de banda ancha en zonas rurales, los servicios de comunicaciones de banda estrecha bajos los estándares FM y P25, y los servicios de la televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T2. Estos sistemas podrían ser desplegados en la banda de 450 MHz en Colombia.

[PD2] “Definición de los parámetros técnicos para operación de los sistemas LTE en la banda 850 MHz extendida, para el caso Colombiano, a través de la evaluación y análisis de la compatibilidad y convivencia entre los sistemas de acceso troncalizado, los sistemas de LTE para las comunicaciones de Protección pública y atención de desastres (PPDR por sus siglas en inglés) de banda ancha y las tecnologías de Telecomunicaciones Móviles Internacionales (IMT),” Agencia Nacional del Espectro en Colombia (ANE), **Grupo de Comunicaciones Móviles- iTEAM-UPV**, Universidad ICESI, 2016.

Descripción: Se formularon recomendaciones que garantizan la correcta compatibilidad entre los sistemas que serán desplegados en la banda de 850 MHz en Colombia. Para tal fin, se realizaron medidas de laboratorio en un entorno controlado con equipos profesionales y comerciales de LTE, P25 y FM, obteniendo resultados de márgenes de protección (MP); posteriormente, se han calculado las mínimas pérdidas de propagación (MCL) correspondientes a dichos márgenes de protección, considerando las sensibilidades para los receptores de cada tecnología definidas en los estándares, y las potencias máximas para los transmisores interferentes.

▪ Proyectos Participados

[P1] “Coexistencia entre Servicios de Radiodifusión de Televisión y Servicios 4G-LTE en la banda de 700 MHz en Argentina,” Backhaul Advisory SAS, Grupo de Comunicaciones Móviles- iTEAM-UPV, 2016.

Descripción: Se realizaron recomendaciones para garantizar la convivencia en la banda de 700 MHz en Argentina. Concretamente, se estudió la convivencia entre redes analógicas bajo el estándar PAL-N y digitales bajo el estándar ISDB-Tb de televisión con las redes móviles de cuarta generación.

[P2] “Elaboración del Plan Técnico de Televisión considerando la transición de la televisión analógica a la digital, el apagón analógico y la proyección de uso de espectro por parte de los operadores del servicio de televisión radiodifundida en Colombia hasta el año 2022,” *Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia*, **Grupo de Comunicaciones Móviles- iTEAM-UPV**, 2014.

Descripción: Se elaboró el Plan Técnico Televisión (PTTV) en Colombia. La planificación del PTTV incluye la transición del estándar analógico (NTSC-M) a la digital (DVB-T2), el apagón analógico y la proyección de uso del espectro por los operadores de televisión (canales nacionales, regionales, y locales). Asimismo, se determinó las zonas y distancias de coordinación con todos los países fronterizos de Colombia. Por último, se diseñó una base de datos centralizada para el manejo de la asignación de espectro de TDT.

[P3] “Estudios de Convivencia de Servicios de TDT con otros Servicios de Telecomunicaciones en Bandas de Frecuencias Adyacentes para Colombia,” *Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia*, **Grupo de Comunicaciones Móviles- iTEAM-UPV**, 2013.

Descripción: Se realizaron recomendaciones sobre bandas de guarda entre tecnologías, canalizaciones, límites de potencia en bandas adyacentes y evaluación de técnicas de mitigación de interferencia que garanticen el correcto funcionamiento entre DVB-T2, LTE y P25 conviviendo en bandas adyacentes.

[P4] “Estudios de compatibilidad electromagnética que permitan establecer las condiciones técnicas para el despliegue de las redes DVB-T2 en Colombia identificando las medidas de mayor relevancia que atañen al uso eficiente del espectro para TDT,” *Agencia Nacional del Espectro (ANE) de Colombia*, **Grupo de Comunicaciones Móviles- iTEAM-UPV**, 2012.

Descripción Se definieron los márgenes de protección entre DVB-T2, ISDB-T y NTSC-M, para un ancho de banda de 6 MHz. Los resultados fueron obtenidos a través de medidas de laboratorio en un entorno controlado y validadas mediante simulaciones computacionales.

- Trabajos Final de Grado Dirigidos

[TFG1] Saúl Fuster Navarro, **Gerardo Martínez-Pinzón**, Narcís Cardona-Marcet, “Evaluación de sistemas inalámbricos IoT para aplicaciones de Smart Farming,” UPV, Septiembre 2017.

[TFG2] Kevin Llamas Muñoz, **Gerardo Martínez-Pinzón**, Narcís Cardona-Marcet, “Uso Potencial de la Banda UHF Para Internet of Things: Espectro Compartido entre Servicios de TDT e IoT,” UPV, Julio 2016.

- Contribuciones a Especificaciones Técnicas Regulatorias

[CRC1] Contribución a la resolución 4337 de 2013 de la Comisión de Regulación de Comunicaciones (CRC) de Colombia, “Por la cual se actualizan y complementan las especificaciones técnicas aplicables a la red del servicio de Televisión Digital Terrestre (TDT) establecidas en la resolución CRC 4047 de 2012”

Descripción: Se establecieron las condiciones de convivencia entre los sistemas televisión digitales e ISDB-T, y sistemas de televisión digitales DVB-T2 y analógicos NTSC con canalización a 6 MHz, que comprenden tanto relaciones de protección entre las tecnologías, como estudios de convivencia en escenarios realistas.

[CRC2] Contribución a la resolución 419-2014 de 2014 de la Agencia Nacional del espectro (ANE) de Colombia, “Por la cual se adopta el Plan Técnico de Televisión para la planeación de las frecuencias del espectro atribuido al servicio de televisión radiodifundida en tecnología digital,”

Descripción: Se desarrolló el plan de frecuencias a nivel nacional y la distribución de frecuencias en fronteras, tanto para la etapa de simulcast como de post-apagón analógico. Se priorizó la liberación de la banda de 700 MHz que corresponde al primer dividendo digital en América. Además, se elaboró el cronograma de apagón analógico en todo el territorio nacional y la base de datos centralizada para la gestión del espectro de TDT.

Capítulo 2

Fundamentos

2.1. Generalidades de las tecnologías inalámbricas

2.1.1. DVB-T2 (*Digital Video Broadcasting-Terrestrial 2*)

DVB-T2 es el estándar de segunda generación más avanzado y desplegado a nivel mundial para la radiodifusión de servicios de televisión digital terrestre. Este sistema transmite audio digital comprimido, video y otros datos a través de un flujo usando compresión MPEG-4, y una modulación COFDM (*Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, en inglés). DVB-T2 ofrece un uso eficiente del espectro radioeléctrico, un alto grado de eficiencia, flexibilidad y robustez frente ruido e interferencias. Las principales funcionalidades de DVB-T2 son: altos órdenes de modulación (hasta 256-QAM); tamaños grandes de FFT e intervalos de guarda (hasta FFT = 32K, GI = 19/128); hasta ocho opciones de configuración de patrones de portadoras piloto (*Pilot Patterns o PP*, en inglés), optimizados en función del intervalo de guarda; mecanismos de corrección de errores (*Forward Error Correction o FEC*, en inglés); uso de constelaciones rotadas y entrelazado temporal, para permitir mayor robustez (disminución del error de símbolo), y eficiencia en la transmisión; uso de tuberías de capa física (*Physical layer Pipe o PLP*, en inglés), para ofrecer de manera eficiente con la misma infraestructura y el mismo canal, diferentes tipos de servicios con diferentes configuraciones; uso de T2-Lite para transmitir nuevos servicios (recepción en movilidad), en un modo

de configuración totalmente independiente sobre las tramas base DVB-T2 [9] [68]. A continuación, se discuten los principales parámetros técnicos de configuración en transmisión:

- DVB-T2 permite utilizar los siguientes esquemas de modulación QPSK, 16QAM, 64QAM y 256QAM, y tasas de codificación 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5 y 5/6. Dependiendo de la combinación de esquema de modulación y tasa de codificación seleccionados el sistema puede ofrecer una mayor o menor capacidad de transmisión útil. Altos órdenes de modulación (64QAM, 256QAM), transmiten mayor cantidad de información en un mismo símbolo (6 y 8 bits respectivamente), comparados con los esquemas de menor orden (QPSK y 16QAM), pero exigen un nivel mayor de relación entre la señal útil y e interferente más ruido (*Carrier to Noise plus Interference Ratio or CNIR*, en inglés), para decodificar correctamente el servicio en recepción. Un aumento en la CNIR, podría ser interpretado como un menor grado de tolerancia a interferencias provenientes de la misma red u otras. Por otra parte, las tasas de codificación más robustas (1/2, 3/5 y 2/3), protegen con mayor cantidad de bits de paridad la información, si lo comparados con tasas menos robustas (3/4, 4/5 y 5/6), sin embargo, penalizan la capacidad útil de transmisión.
- La combinación del tamaño de la FFT y del intervalo de guarda son los principales parámetros que definen la máxima separación entre transmisores de una red de TDT. El estándar DVB-T2 contempla nueve modos de tamaños de FFT (1k, 2k, 4k, 8k, 8k extendido, 16k, 16k extendido, 32k, 32k extendido), y las siguientes fracciones de intervalo de guarda 1/4, 19/256, 1/8, 19/128, 1/16 o 1/32, 1/128. Tamaños grandes de FFT (16K y 32K), tienen una densidad de portadoras mayores y, por tanto, una disminución en la separación entre las mismas para un mismo ancho de banda del canal. Una menor separación entre portadoras permite un mayor tiempo útil de símbolo e intervalo de guarda, permitiendo una mayor distancia entre transmisores. Sin embargo, una menor separación entre estas aumenta la probabilidad de interferencia co-canal entre portadoras (*Inter Carrier Interference or ICI*, en inglés), causada por el efecto Doppler, lo que significa un peor rendimiento en recepción móvil comparada con el obtenido con tamaños bajos de FFT (2 k, 4 k). El intervalo de guarda es un periodo de tiempo sin información útil que es insertado al inicio de cada símbolo OFDM, para reducir el efecto de interferencia entre símbolos que se produce debido al efecto multitrayecto o a los propios ecos de una red de frecuencia única (*Single Frequency Network or SFN*, en inglés).

- Las portadoras piloto son símbolos con amplitud y fase conocida por los receptores que son usadas para estimar/ecualizar las características del canal en tiempo y frecuencia. En DVB-T2 existen 8 patrones de portadoras pilotos adaptados a distintos escenarios (espaciados en tiempo y frecuencia). A mayor número de portadoras piloto, menor tasa de transmisión, pero se consigue una mayor exactitud en la ecualización del canal radio.

2.1.2. ISDB-T (*Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial*)

ISDB-Tb es el estándar de televisión digital terrestre desarrollado en Brasil, el cual es basado en una modificación del estándar japonés ISDB-T. Las principales mejoras del estándar brasileño respecto al japonés son: uso de H.264/MPEG-4 como estándar de compresión de vídeo, una velocidad de presentación de 30 imágenes por segundo, aún en dispositivos portátiles (mientras que ISDB-T, usa 15 imágenes por segundo) e interacción con el usuario final mediante el uso de la plataforma Ginga. El middleware Ginga es una capa de software intermediaria que permite el desarrollo de aplicaciones interactivas para televisión digital terrestre independientemente de la plataforma hardware de los fabricantes y terminales de acceso.

La principal novedad de ISDB-T es la codificación de canal, que es realizada en unidades de segmento OFDM. El espectro de la señal está compuesto en 13 bloques OFDM sucesivos, con cada segmento ocupando 1/14 del ancho de canal de televisión. Un único canal de televisión debe ser obligatoriamente usado simultáneamente para servicio de recepción fija, recepción móvil y recepción portátil (transmisión jerárquica). La información a transmitir puede ser organizada en una o hasta tres capas jerárquicas diferentes, denominadas A, B y C. Cada capa jerárquica se conforma con uno o más segmentos OFDM, tantos como requiera la anchura de banda del servicio. El conjunto de parámetros de codificación de cada capa es independiente, y pueden ser configurados por el radiodifusor, siendo posible especificar parámetros como esquema de modulación de portadoras, codificación interna y entrelazado temporal. El segmento central puede ser utilizado para recepción parcial “*One-Seg*”, y en ese caso, se le considera como una capa jerárquica. Este servicio apunta principalmente a ofrecer televisión de baja definición a teléfonos móviles y otros dispositivos con pantallas de tamaño reducido. Otro importante parámetro a resaltar es el offset en frecuencia que se añade a la señal ISDB-Tb. La frecuencia de la señal de transmisión terrestre debe ser obligatoriamente desplazada positivamente en 1/7 MHz (142,857 kHz) con relación a la frecuencia central del canal utilizado [69].

Una vez discutido las principales ventajas del estándar brasileño, vamos a resumir los principales parámetros de configuración: los esquemas de modulación que se pueden usar son: DQPSK, QPSK, 16-QAM y 64-QAM. La modulación DQPSK fun-

ción igual que QPSK, pero en lugar de enviar la fase de cada símbolo, se envía la diferencia de fase existente entre dicho símbolo y el anterior; las tasas de codificación son: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8, es decir una menos que en DVB-T2.

2.1.3. LTE (Long Term Evolution)

LTE es el estándar de comunicación inalámbrico de cuarta generación (4G) para la telefonía móvil, que mejora muy significativamente las prestaciones de capacidad, eficiencia espectral, latencia y tasas de transmisión con respecto a las tecnologías móviles precedentes de segunda generación 2G-GSM/EDGE y tercera generación 3G-UMTS/HSPA. A continuación, se presentan las características más relevantes de LTE [70]:

- Esquema de transmisión multiportadora OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, en inglés).
- Alta eficiencia espectral con utilización de sistemas basados en múltiples antenas MIMO (*Multiple Input-Multiple Output*, en inglés).
- Anchos de bandas de operación flexibles: 1.4, 3, 5, 10, 15 y 20 MHz.
- Modulaciones utilizadas en el enlace ascendente: QPSK, 16-QAM y 64-QAM.
- Modulaciones utilizadas en el enlace descendente: QPSK, 16-QAM, 64-QAM y 256 QAM.
- Diferentes modos de operación o bandas de frecuencia.
- Posibilidad de formar redes de frecuencia única.
- Velocidades de pico:
 - Bajada: 326.5 Mbps para MIMO 4x4 y 172.8 Mbps para MIMO 2x2.
 - Subida: 86.5 Mbps para MIMO 2x2.
- Soporta más de 200 usuarios por celda para 5 MHz.
- Traspasos transparentes para los usuarios entre las tecnologías 2G, 3G y LTE.
- Mejora la flexibilidad del uso del espectro radioeléctrico al usar Duplexación por División de frecuencia (*Frequency Division Duplex*, en inglés), y Duplexación por División de tiempo (*Time Division Duplex*, en inglés).

2.1.3.1 Enlace Descendente LTE (Downlink)

El mecanismo de acceso al medio en el enlace descendente de LTE es OFDM, debido a su gran eficiencia espectral y a su reducción del tiempo de latencia. En OFDM, los usuarios tienen asignados un número específico de sub-portadoras durante una cantidad de tiempo predeterminada [71]. Los canales físicos pueden clasificarse principalmente en canales de transporte de información y canales de control. Además, tenemos las señales de referencia y sincronismo.

- Canales de transporte:
 - **Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)**: es un canal compartido que transporta los datos de todos los usuarios de la celda, así como la información de aviso (*paging*, en inglés).
 - **Physical Broadcast Channel (PBCH)**: es el primer canal que el usuario debe demodular para acceder al sistema, ya que contiene información básica como el ancho de banda, la estructura del PHICH (*Physical Hybrid-ARQ Indicator Channel*, en inglés), y el número de trama actual.
 - **Physical Multicast Channel (PMCH)**: es un canal principalmente usado para transmitir servicios y archivos multimedia broadcast y/o multicast.
- Canales de control:
 - **Physical Downlink Control Channel (PDCCH)**: el mensaje transportado por este canal se llama control de información en el enlace descendente, y se utiliza básicamente para informar a los terminales de la asignación de recursos en DL y UL, así como para otros datos de control.
 - **Physical Control Format Indicator Channel (PCFICH)**: informa al usuario el número de símbolos OFDM ocupados por el PDCCH al principio de cada subtrama. El PCFICH transporta un mensaje llamado Indicador de Formato de Control.
 - **Physical Hybrid ARQ Indicator Channel (PHICH)**: si el paquete de datos recibido contiene errores, el receptor almacena el dato en vez de eliminarlo y solicita una retransmisión al transmisor. Cuando el receptor recibe el dato retransmitido, lo combina con el dato almacenado anteriormente.

- **Señales de Referencia:** las señales de referencia (símbolos pilotos), se utilizan en LTE-DL básicamente para realizar la estimación de canal necesaria para la demodulación coherente.
- **Señales de sincronismo:** el primer paso para al acceder al sistema LTE es llevar a cabo el proceso de búsqueda de celda. Esto requiere adquirir los sincronismos necesarios para poder demodular el canal de broadcast (PBCH), y así obtener la información crítica del sistema. En LTE-DL se utilizan dos tipos de señales: señales de sincronismo primario (PSS) y señales de sincronismo secundario (SSS).

2.1.3.2 Enlace Ascendente LTE (Uplink)

LTE para el enlace ascendente utiliza la técnica de acceso al medio SC-FDMA (*Single Carrier-Frequency Division Multiple Access*, en inglés), es un esquema de acceso múltiple que utiliza modulación de portadora única, multiplexación en frecuencia ortogonal y ecualización en el dominio de la frecuencia. Los principales canales físicos en LTE para el enlace ascendente son descritos a continuación:

- **Physical Uplink Shared Channel (PUSCH):** soporta el canal de transporte UL-SCH (*Uplink Shared Channel*, en inglés), y multiplexa todos los canales lógicos en UL. La asignación de recursos en el PUSCH se realiza de forma centralizada, bajo el control del e-NodeB y señalizada mediante el PDCCH.
- **Physical Uplink Control Channel (PUCCH):** su objetivo principal es la señalización de ACK/NACK relativa a los bloques de transporte recibidos del enlace descendente. También se utiliza para enviar al e-NodeB los CQI, que permiten a éste realizar la adaptación del enlace en DL, y los mensajes de petición de asignación de recursos. El mensaje transmitido por un UE en el PUCCH se denomina en inglés *Uplink Control Information (UCI*, en inglés).
- **Physical Random Access Channel (PRACH):** es usado por el terminal para acceso al medio. El eNodeB no puede asignar recursos al usuario si éste no se sincroniza previamente, ya que para poder transmitir es necesario que el usuario conozca el adelanto temporal que debe aplicar a la señal para que llegue sincronizada.

- **Las señales de referencia en LTE-UL:** se dividen en dos categorías: señales DM-RS, utilizadas en el PUSCH y PUCCH para estimar el canal y realizar la demodulación coherente; señales SRS (*Sounding Reference Signal*, en inglés), las cuales no van asociadas a ninguna transmisión de datos y se usan para estimar el canal para poder realizar el scheduling en frecuencia.

2.1.4. *Narrow Band for Internet of Things (NB-IoT)*

En los años 2016 y 2017, el 3GPP estandarizó tres tecnologías para para hacer frente a la alta demanda de servicios y aplicaciones de Internet de las Cosas o IoT: Narrow Band for Internet of Things (NB-IoT), Long Term Evolution Machine Type Communications Category M1 (eMTC) y Extended Coverage GSM IoT (EC-GSM-IoT). NB-IoT es la única tecnología de las tres propuestas que podrá ser implementada en tres modos de operación: asignando recursos para IoT dentro de las mismas bandas de LTE (*In-band operation*, en inglés), dentro de la banda de guarda entre el enlace ascendente y descendente de LTE (*Guard-Band operation*, en inglés), y dentro de su propio espectro atribuido, por ejemplo, portadoras que estén inutilizadas de la red GSM (*Stand-Alone operation*, en inglés). Las especificaciones de NB-IoT se han integrado en los estándares de LTE, y en consecuencia puede coexistir con los despliegues actuales de GSM, UMTS y LTE. Por lo tanto, la ventaja de esta solución son los bajos costes de despliegue, ya que podrán reutilizar gran parte de la infraestructura de red de las antiguas y actuales generaciones de redes móviles, y en la mayor parte de despliegues solo se requiere una actualización software de la red. Las funcionalidades proporcionadas por NB-IoT son: cobertura extendida, soporte de un número masivo de dispositivos de baja tasa de transmisión, alta latencia permitida, dispositivos de bajo coste, bajo consumo de batería y arquitectura de red optimizada. A continuación, se presentan las características más relevantes de NB-IoT-LTE [71] [72] [73] [74] [75].

- El enlace descendente de NB-IoT se basa en OFDM y el esquema de transmisión usa un único bloque de recursos físicos. El enlace ascendente se basa en single-carrier FDMA.
- El ancho de banda de un canal es de 180 kHz que corresponde a un bloque de recursos en la transmisión de LTE.
- El esquema de modulación más alto es QPSK.
- La separación entre subportadoras puede ser de 15 kHz tanto para el enlace ascendente y descendente, y de 3.75 kHz solo para el enlace ascendente.

- Para la transmisión ascendente, hay dos modos de operación posibles, transmisión de tono único y multi-tono. En tono único, está permitido tanto 3.75 kHz como 15 kHz de espaciado entre subportadoras, mientras que en multi-tono solamente se puede usar espaciado de 15 kHz. La transmisión multi-tono permite agrupar conjuntos de 3, 6 o 12 subportadoras. Además, la duración mínima de las unidades de recursos usadas en la planificación depende del número de subportadoras asignadas y del modo de operación, permitiendo desde 1 ms en transmisión multi-tono con 12 subportadoras hasta 32 ms en transmisión de tono único de 3.75 kHz.

- Se introducen cinco nuevos canales:
 1. **Narrowband Physical Broadcast Channel (NPBCH)**: este canal transporta el bloque de información maestro de NB-IoT (MIB-NB). El MIB-NB contiene 34 bits y se transmite a lo largo de un período de tiempo de 640 ms.
 2. **Narrowband Physical Downlink Shared Channel (NPDSCH)**: este canal transporta el DL-SCH y el PCH para usuarios de NB-IoT.
 3. **Narrowband Physical Downlink Control Channel (NPDCCH)**: su principal función es informar al usuario NB-IoT de la asignación de recursos del PCH y del DL-SCH, y transporta el 'scheduling grant' asignado al usuario NB-IoT para la transmisión en el enlace ascendente.
 4. **Narrowband Physical Uplink Shared Channel (NPUSCH)**: este canal transporta el UL-SCH y la confirmación ACK/NACKs Hybrid ARQ en respuesta a la transmisión descendente hacia el usuario NB-IoT.
 5. **Narrowband Physical Random Access Channel (NPRACH)**: este canal transporta el preámbulo de acceso aleatorio enviado por el usuario NB-IoT.

Tabla 1. Comparativa de los principales parámetros de configuración de DVB-T2, ISDB-T y LTE.

	DVB-T2	ISDB-T	LTE
FEC	LDPC+BCH	Código Convolutacional + RS	Código Convolutacional / Turbo códigos
Modulaciones	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM	DQPSK QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM
Tasa de codificación	1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6	1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	1/3, 1/2, 2/3, 3/4, 4/5
Tamaño FFT	1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K	2K, 4K, 8K	128/ 256/ 512/ 1024/ 1536/ 2048
Anchos de banda (MHz)	1.7/ 5/ 6/ 7/ 8	6 / 7 / 8	1.4/ 3/ 5/ 10/ 15/ 20
Ancho de banda útil (MHz)	5.71 (6 MHz) ; 7.61 (8 MHz)	5.575 (modo 1, 2K) 5.573 (modo 2, 4K) 5.572 (modo 3, 8K)	1.08 (6RB) / 2.7 (15RB)/ 4.5 (25RB)/ 9 (50RB) / 13.5 (75RB) / 18 (100RB)
Periodo elemental (μs)	$\frac{7}{48}$ (6MHz) ; $\frac{7}{64}$ (8MHz)	$\frac{63}{512}$ (6MHz)	$\frac{1}{\Delta f * FFT} = \frac{1}{1.92} ; \frac{1}{3.84} ; \frac{1}{7.68} ; \frac{1}{15.36} ; \frac{1}{23.04} ; \frac{1}{30.72}$
Tiempo símbolo útil, Tu (μs)¹	149, 298, 596, 1192, 2384, 4768 (6 MHz) 112, 224, 448, 896, 1792, 3584 (8 MHz)	252 (modo 1, 2K) 504 (modo 2, 4K) 1008 (modo 3, 8K)	66.67 ($\Delta f = 15$ KHz) 133.33 ($\Delta f = 7,5$ KHz)
Intervalo de Guarda (μs)	Max:709(FFT32K, GI19/128, 6 MHz) Max:532(FFT32K, GI19/128, 8 MHz)	Max:63 (modo 1, FFT2K, GI 1/4) Max:126(modos 2, FFT4K, GI 1/4) Max:252(modos 3, 8K, GI 1/4)	CP NORMAL ($\Delta f = 15$ KHz) = 5.208 / 4.688 CP EXTENDIDO ($\Delta f = 15$ KHz) = 16.67 CP EXTENDIDO ($\Delta f = 7.5$ KHz) = 33.33
Duración trama	250 ms	53-64 ms, (modo 1, GI 1/4, 1/32) 106-129 ms, (modo 2, GI 1/4, 1/32) 212-257 ms, (modo 3, GI 1/4, 1/32)	10 ms (1 trama= 20 slot * 0.5 ms) 1 ms (sub-trama= 2 slot)
(1) El tiempo de símbolo útil depende del tamaño de la FFT en las tecnologías de TDT			

2.2. Parámetros técnicos más importantes en transmisión

El espectro de la señal en transmisión está compuesto por tres zonas o dominios diferentes en los cuales se aplican distintas limitaciones de potencia en función de la tecnología, los cuales son: **dominio de emisiones en banda**, corresponde a la zona del espectro dentro del ancho de banda útil del canal; **dominio de emisiones fuera de banda** (*Out Of Band or OOB*, en inglés), es la zona del espectro de la señal que es adyacente a la zona en banda; **dominio no esencial**, es la zona adyacente posterior al dominio fuera de banda; estas dos últimas emisiones (fuera de banda y 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%, es decir aplicando un desplazamiento en frecuencia del 250% del ancho de banda útil del canal con respecto a la frecuencia central de trabajo [76]. Sin embargo, esta regla no aplica estrictamente para todas las tecnologías. A continuación, se muestra la figura donde se diferencian los tres dominios en el espectro de una señal.

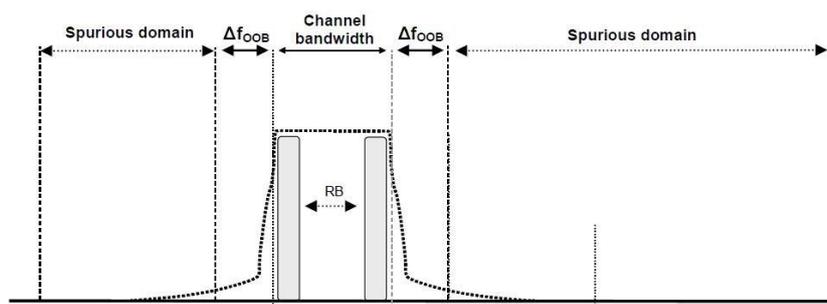


Figura 6. Espectro de la señal en transmisión [75].

Para comprobar que la señal transmitida de cada tecnología cumple con los requerimientos definidos por cada uno de los organismos de estandarización, se podrán llevar a cabo las siguientes medidas espectrales de la señal:

1. **Ancho de banda ocupado:** definido como el ancho de banda que contiene el 99% de la potencia media total integrada del espectro de transmisión del canal asignado.
2. **Emisión fuera de banda (OOB):** son emisiones indeseadas situadas inmediatamente adyacentes al ancho de banda del canal asignado, resultantes del proceso de modulación y no-linealidades del transmisor, excluyendo emisiones espurias. Las emisiones fuera de banda pueden ser caracterizadas por dos medidas: máscara de emisión espectral y relación de potencia de fuga en canal adyacente.

- **La máscara de emisión espectral (*Spectrum Emission Mask, SEM*):** se define como la máxima potencia transmisible permitida en función del ancho de banda del sistema y la separación en frecuencia desde la portadora central del canal.
 - **Relación de fuga en canal adyacente (*Adjacent Channel Leakage Ratio, ACLR*):** se define como la diferencia entre la potencia de señal, generalmente en la banda de paso, y la potencia de señal medida a la salida del filtro del transmisor (nominalmente rectangular), centrado en la frecuencia del canal adyacente.
3. **Emisiones espurias:** las emisiones espurias son emisiones indeseadas adyacentes al ancho de banda del canal asignado, excluyendo la zona de emisiones fuera de banda. Estas emisiones indeseadas son causadas por emisiones armónicas, parásitas, productos de intermodulación y productos de conversión en frecuencia.

2.2.1. Parámetros de transmisión en DVB-T2

En los sistemas de televisión digital terrestre DVB-T2, se definen dos tipos de máscaras espectrales, “máscara no crítica” y “máscara crítica”, las cuales son definidas en función de la potencia transmitida [77]. Los límites de las máscaras espectrales para anchos de banda de 6 MHz (canalización América), y 8 MHz (canalización europea), son presentados a continuación. Las máscaras espectrales en TDT, cumplen con la regla del 250% [78].

Tabla 2. Máscara de emisión espectral en transmisión para DVB-T2.

Frecuencia con respecto al centro del canal de		Nivel relativo en una anchura de banda de medición de 4 kHz (dB)			
6 MHz	8 MHz	Máscara no crítica		Máscara crítica	
-2.92	-3.9	-31.6	-32.8	-31.6	-32.8
+2.92	+3.9	(6MHz)	(8 MHz)	(6MHz)	(8 MHz)
± 3.15	± 4.2	-73		-83	
± 4.5	± 6	-85		-95	
± 9.0	± 12	-110		-120	
± 15.0	± 20	-110		-120	

2.2.2. Parámetros de transmisión en ISDB-Tb

En la tecnología ISDB-Tb, se definen tres tipos de máscaras espectrales: “máscara no crítica”, “máscara sub-crítica” y “máscara crítica”, el uso de una u otra, depende de la potencia de emisión de los transmisores, si existe canal adyacente o no, y de la distancia respecto a la estación del canal adyacente. Si comparamos la máscara espectral crítica de un canal de 6 MHz de ISDB-T respecto a DVB-T2, esta es ligeramente más restrictiva. La siguiente tabla indica las atenuaciones mínimas de las emisiones fuera de la banda con relación al transmisor, especificadas en función de la separación en frecuencia respecto a la portadora central de la señal digital [78].

Tabla 3. Máscara de emisión espectral en transmisión para ISDB-Tb.

Frecuencia con respecto al centro del canal de 6 MHz	Nivel relativo en una anchura de banda de medición de 4 kHz (dB)		
	Máscara no crítica	Máscara sub-crítica	Máscara crítica
-2.79	-31.4	-31.4	-31.4
2.79	-31.4	-31.4	-31.4
± 2.86	± 51.4	-51.4	-51.4
± 3	± 58.4	-65.4	-65.4
± 3.15	± 67.4	-74.4	-81.4
± 4.5	± 84.4	-91.4	-98.4
± 9	± 114.4	-121.4	-128.4
± 15	± 114.4	-121.4	-128.4

2.2.3. Parámetros de transmisión en LTE

En el caso de 4G-LTE, el límite entre las emisiones fuera de banda y emisiones espurias depende del ancho del canal. Para anchos de banda menores a 5 MHz se cumple la regla del 250%. Sin embargo, para anchos de bandas mayores no se cumple, siendo el límite que las separa menor a esta regla [79]. Los límites de las máscaras de emisión espectral y relación de fuga en canal adyacente, tanto para el terminal de usuario como la estación base son presentados a continuación [75] [80] [81]:

Tabla 4. Máscara de emisión espectral en transmisión para un móvil LTE.

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

Tabla 5. Máscara de emisión espectral para un e-NodeB de LTE (área amplia).

Frequency offset of measurement filter -3dB point, Δf	Frequency offset of measurement filter centre frequency, f_{offset}	Mínimos Requerimientos	BW de medida
$0 \text{ MHz} \leq \Delta f < 3 \text{ MHz}$	$0.05 \text{ MHz} \leq f_{\text{offset}} < 3.05 \text{ MHz}$	$-7 \text{ dBm} - \frac{7}{5} * (A)$ $A = \left(\frac{f_{\text{Offset}}}{\text{MHz}} - 0.05 \right) \text{ dB}$	100 kHz
$3 \text{ MHz} \leq \Delta f < 6 \text{ MHz}$	$3.05 \text{ MHz} \leq f_{\text{offset}} < 6.05 \text{ MHz}$	-14 dBm	100 kHz
$6 \text{ MHz} \leq \Delta f \leq \Delta f_{\text{max}}$	$6.05 \text{ MHz} \leq f_{\text{offset}} < f_{\text{offsetmax}}$	-16 dBm	100 kHz

Tabla 6. ACLR para un terminal móvil y un e-NodeB de LTE.

Parámetro en Recepción	Ancho de banda (MHz)					
	1.4	3	5	10	15	20
E-UTRAACLR1 (dB), móvil	33	33	33	33	30	27
BW de medida E-UTRA (MHz)	1.08	2.7	4.5	9	13.5	18
E-UTRAACLR1 (dB), e-NodeB	45					

2.3. Parámetros técnicos más importantes en Recepción

Los parámetros técnicos que se tendrán en cuenta para evaluar la compatibilidad entre las redes móviles y de televisión son:

1. **Nivel de sensibilidad de referencia ($P_{REFSENS}$):** es el nivel de potencia mínima recibida en el conector de la antena, el cual cumple con un requerimiento de calidad de servicio.
2. **Selectividad en Canal Adyacente (*Adjacent Channel Selectivity, ACS*):** es una medida de la capacidad de un receptor para discriminar su señal deseada en presencia de una señal interferente operando en canal adyacente.

2.3.1.1 Parámetros de Recepción en LTE

Los valores de sensibilidad mínima para el terminal de usuario en función del ancho de banda del sistema son resumidos en la siguiente tabla. Este valor debe garantizar una tasa de transmisión mínima del 95% respecto a su valor máximo. La siguiente tabla muestra los umbrales de sensibilidad para un móvil 4G-LTE:

Tabla 7. Sensibilidad para el terminal móvil LTE.

Parámetro en Recepción	Ancho de banda (MHz)					
	1.4	3	5	10	15	20
$P_{REFSENS}$ (dBm)	-103	-100	-98	-95	-93	-91

Respecto a la estación base (e-NodeB), los valores de sensibilidad mínima son resumidos en la siguiente tabla en función del ancho de banda y el alcance del e-NodeB. El e-NodeB de área grande está definido para escenarios de tipo de celda macro-celular con un valor de mínimas pérdidas de acoplo (MCL, en inglés) de 70 dB, en entornos urbanos. El e-NodeB de área mediana es definido para escenarios de tipo de celda micro-celular con unas MCL de 53 dB. Por último, el e-NodeB de área local es caracterizado para tipos de celda pico-celular con unas MCL de 45 dB.

El valor de ACS en LTE tiene que cumplir un requerimiento de calidad mínimo del 95% de tasa de transmisión. Asimismo, este valor depende del ancho de banda del sistema, del tipo de enlace, es decir, si es medido en la recepción de la estación base (enlace ascendente) o en la recepción del terminal móvil (enlace descendente), siendo menos restrictivos en los terminales de usuario. El 3GPP define los valores de ACS que deben cumplir tanto los terminales de usuario y el e-NodeB LTE.

Tabla 8. Sensibilidad para un e-NodeB de LTE.

Ancho de banda (MHz)	$P_{REFSENS}$ (dBm)		
	BS Área grande	BS Área Mediana	BS Área Local
1.4	-106	-101	-98
3	-103	-98	-95
5	-101	-96	-93
10	-101	-96	-93
15	-101	-96	-93
20	-101	-96	-93

Tabla 9. Valores de ACS de los móviles y e-NodeB 4G-LTE.

Parámetro en Recepción	Ancho de banda (MHz)					
	1.4	3	5	10	15	20
ACS (dB), LTE-UE	33	33	33	33	30	27
ACS (dB), e-NodeB	-43,5					

2.4. Canal de propagación

La calidad de la comunicación inalámbrica entre un transmisor y receptor depende del canal en el cual se propaga la señal. Una señal electromagnética que se propaga por el aire hasta un receptor es susceptible a cambios de amplitud, fase, y polarización, debido a diferentes elementos influyentes o difusores que aparecen de forma aleatoria en el camino, tales como el clima, los obstáculos, y así como a diferentes fenómenos como difracción, reflexión, absorción, entre otros. En consecuencia, en el receptor se producen múltiples contribuciones o réplicas de la señal transmitida (ecos), cada una de ellas con una atenuación, fase, retardo de propagación, y ángulos de llegada diferentes, conociéndose este efecto como multicamino (*multipath*, en inglés). Por otra parte, si consideramos que cada una de las contribuciones llega al receptor con un retardo distinto, la señal se verá afectada por la dispersión o ensanchamiento temporal (*delay spread*, en inglés). Además, si el receptor y/o los dispersores se encuentran en movimiento, cada una de las componentes en frecuencia experimenta dispersión Doppler (*doppler spread*, en inglés).

Si modelamos las múltiples contribuciones de las señales que llegan al receptor como fasores y las sumamos vectorialmente, la amplitud resultante de la señal puede aumentar (interferencia constructiva) o disminuir (interferencia destructiva), dependiendo de si los ángulos eléctricos de las señales están en fase o contrafase, generando un efecto de desvanecimiento de la señal. Los desvanecimientos que experimenta la señal recibida pueden clasificarse en: desvanecimientos a largo plazo (*long-term fading*, en inglés), y desvanecimientos a corto plazo (*short-term fading*, en inglés). El desvanecimiento a corto plazo, también conocido como *fast fading o multi-path* (suele producirse cuando la señal recorre trayectos de pocas decenas de longitudes de onda), produce desvanecimientos rápidos y profundos de la señal recibida, y es debido principalmente al efecto multicamino. El desvanecimiento a largo plazo, también conocido como *shadowing* (suele producirse cuando la señal recorre trayectos de varios centenares de longitudes de onda), caracteriza el efecto de los desvanecimientos producidos por la presencia de obstáculos en el trayecto entre el transmisor y el receptor. Este efecto produce que la potencia media local en el receptor no sea constante y presente un comportamiento aleatorio que suele modelarse con una distribución log-normal (distribución normal en unidades logarítmicas). La desviación típica de esta distribución está relacionada con la diversidad, variación del entorno y define la dispersión de la señal alrededor de su valor medio. En resumen, la propagación de una señal a través de un canal radio se caracteriza principalmente por tres fenómenos: las pérdidas básicas de propagación (*path loss*, en inglés), un término de pérdidas a largo plazo y uno de pérdidas a corto plazo.

Por último, hay diferentes tipos de modelos de propagación que se pueden usar para cuantificar estas pérdidas, y se pueden clasificar en función de la formulación utilizada (empíricos, semi-empíricos, deterministas, semi-deterministas), y en función del tipo de datos empleados (bidimensionales, tridimensionales).

2.4.1. Modelos de canal en redes de TDT

Los principales modelos de canal utilizados en las redes de la televisión digital terrestre son resumidos a continuación [68]:

- **Canal Gaussiano (*Additive White Gaussian Noise, AWGN*):** Este canal se caracteriza por una sola contribución de la señal deseada, sin ninguna degradación del canal, donde solo ruido gaussiano (AWGN) es adicionado a la señal.
- **Canal Rice:** modela un entorno en condiciones de recepción fija sobre tejado, el cual se caracteriza por antenas receptoras directivas, ubicadas a nivel del tejado de los hogares con una altura típica de 10 m sobre el nivel del suelo. El canal Rice contiene 21 contribuciones, de las cuales una es visión directa con el transmisor

(*Line of Sight or LOS*, en inglés), y las restantes son reflexiones. Este canal no tiene en cuenta ningún efecto de Doppler. Las amplitudes, retardo y desfases de las componentes son obtenidas aplicando la siguiente ecuación:

$$Y(t) = \frac{\sqrt{10 \sum_{i=0}^N \rho_i^2} x(t) + \sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\theta_i} x(t-\tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^N \rho_i^2}} \quad (1)$$

Donde, $x(t)$ e $Y(t)$ son las entradas y salidas de la señal respectivamente, N es el número de contribuciones igual a 20, θ_i es el desfase de la contribución i -ésima, ρ_i es la atenuación de la contribución i -ésima, y τ_i es el retardo relativo de la contribución i -ésima. Los valores de desfase, retardo y atenuación se muestran en la Tabla 11 [68].

- **Canal Rayleigh:** usado para recepción en interiores y portable en exteriores, el cual se considera que el usuario no está en movimiento y tan solo recibe la señal en equipos portátiles. El canal Rayleigh tiene 20 contribuciones, y se modela sin visión directa entre el transmisor y receptor, es decir, no hay ninguna contribución directa, y todas las componentes recibidas son de amplitudes similares. Los valores de desfase, retardo y atenuación se muestran en la Tabla 11 [68].

$$Y(t) = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i e^{-j\theta_i} x(t-\tau_i)}{\sqrt{\sum_{i=0}^N \rho_i^2}} \quad (2)$$

2.4.2. Modelos de canal en redes móviles

Para emular el desvanecimiento que experimenta la señal en redes móviles de cuarta generación debido a la propagación multicamino se definen tres modelos de canal [82]: EPA (*Extended Pedestrian A*), EVA (*Extended Vehicular A*), y ETU (*Extended Typical Urban*).

Tabla 10. Modelos de canal para redes móviles.

Modelo	Número de ecos	Máximo Doppler	Retardo máximo (ns)	Potencia Relativa (dB)
EPA	7	5 Hz	[0 30 70 90 110 190 410]	[0 -1 -2 -3 -8 -17.2 -20.8]
EVA	9	70 Hz	[0 30 150 310 370 710 1090 1730 2510]	[0 -1.5 -1.4 -3.6 -0.6 -9.1 -7 -12 -16.9]
ETU	9	300 Hz	[0 50 120 200 230 500 1600 2300 5000]	[-1 -1 -1 0 0 0 -3 -5 -7]

Tabla 11. Valores de atenuación, fase y retardos para los modelos de canal de televisión Rice y Rayleigh [68].

i	ρ_i	τ_i (μs)	θ_i (rad)
1	0.057662	1.003019	4.855121
2	0.176809	5.422091	3.419109
3	0.407163	0.518650	5.864470
4	0.303585	2.751772	2.215894
5	0.258782	0.602895	3.758058
6	0.061831	1.016585	5.430202
7	0.150340	0.143556	3.952093
8	0.051534	0.153832	1.093586
9	0.185074	3.324866	5.775198
10	0.400967	1.935570	0.154459
11	0.295723	0.429948	5.928383
12	0.350825	3.228872	3.053023
13	0.262909	0.848831	0.628578
14	0.225894	0.073883	2.128544
15	0.170996	0.203952	1.099463
16	0.149723	0.194207	3.462951
17	0.240140	0.92445	3.664773
18	0.116587	1.381320	2.833799
19	0.221155	0.640512	3.334290
20	0.259730	1.368671	0.393889

2.5. Criterios de Calidad

2.5.1. Criterios de Calidad en Redes de Televisión Digital Terrestre

Para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas de televisión digital terrestre, se define un parámetro de calidad conocido como margen de protección, y se aplica tanto a la interferencia continua como a la interferencia troposférica. Los márgenes de protección es el valor mínimo de la relación de potencia entre la señal deseada e interferente, a la entrada del receptor, para cumplir un determinado criterio de calidad, medido en unidades de dB. El criterio de calidad para los márgenes de protección consiste en encontrar un límite preciso para que la imagen en una pantalla de televisión se perciba sin errores. Los estudios iniciales para sistemas de televisión de primera generación, midieron las relaciones de protección entre los códigos interno y externo, antes de la decodificación Reed Solomon, para un $BER = 2 \times 10^{-4}$ (*Bit Error Rate*, en inglés), lo que corresponde a una calidad de imagen sin error con una $BER < 1 \times 10^{-11}$ a la entrada del demultiplexor MPEG-2/4. 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 para las mediciones de relación de protección, el cual consiste en asegurar como mínimo 2 de 3 periodos consecutivos en un video real (20 segundos) que estén libres de errores [83].

2.5.2. Criterios de Calidad en Redes Móviles

Las redes LTE se caracterizan por su flexibilidad para operar en diferentes modos de operación o diferentes bandas de frecuencias, anchos de banda flexibles, diferentes esquemas de transmisión basados en MIMO, técnicas para el control de interferencias, esquemas de modulación y codificación adaptativos, control de potencia en el enlace ascendente, coordinación de interferencia intercelular, entre otros. Por lo tanto, LTE posee una serie de características que permiten la explotación de las condiciones instantáneas del canal radio de una forma extremadamente eficiente. Existen varias medidas estandarizadas en LTE para determinar los niveles de potencia recibida, las principales son [84]:

- **Received Signal Strength Indicator (RSSI)**: mide la potencia total recibida en la banda (medida en todos los símbolos) teniendo en cuenta interferencia y ruido. Este parámetro no es reportado por el usuario al e-NodeB.
- **Reference Signal Receiver Power (RSRP)**: mide la potencia promedio de todos los elementos de recursos radio (resource element) que transportan las señales de referencia dentro del ancho de banda considerado. La RSRP se expresa en unida-

des de dBm y está definida en el rango de -140 dBm a -44 dBm en pasos de 1dB. Valores típicos de RSRP se encuentran ente -75 dBm (usuario cerca de la estación base LTE) a -120 dBm (usuario en el borde la celda LTE).

- **Relación señal a ruido e interferencia (SINR):** la relación señal a ruido e interferencia (*Signal to Interference-plus-Noise Ratio*, en inglés) es un parámetro de calidad usado por muchos operadores móviles y se define como la relación entre la señal útil y la interferencia más ruido. Este parámetro no es reportado por el usuario al e-NodeB. No obstante, el móvil mide la SINR o la RSRQ (*Reference Signal Receiver Quality*, en inglés), y la mapea al indicador de calidad de canal CQI (*Channel Quality Indicator*, en inglés) que es reportado por el terminal al e-NodeB. El CQI determina el esquema de modulación y codificación adaptativa que se emplea en la comunicación, que a su vez está relacionado con la tasa de transmisión que podría alcanzarse tanto para el enlace ascendente como descendente. El CQI elegido por el terminal móvil fija un tamaño determinado de bloque en bits para la transmisión (*Transport Block Size or TBS*, en inglés). El TBS fijado debe garantizar que la comunicación cumpla un requisito de tasa de error de bloque (*Block Error Rate or BLER*, en inglés) menor del 10%. Asimismo, el TBS será mayor cuanto mayor sea el CQI (mejor calidad del canal), y por lo tanto determinará la tasa máxima de transmisión (*Throughput*, en inglés) que se podrá alcanzar en el enlace. La siguiente tabla representa una buena clasificación para determinar la calidad del servicio LTE basada en las métricas llevadas a cabo por un operador de Estados Unidos [85]:

Tabla 12. Umbrales de los indicadores de calidad en LTE.

Calidad	Parámetro de Calidad		
	RSRP (dBm)	RSRQ (dB)	SINR (dB)
Excelente	≥ -80	≥ -10	≥ 20
Buena	-80 a -90	-10 a -15	13 a 20
Media	-90 a -100	-15 a -20	0 a 13
Baja (Borde Celda)	≤ -100	< -20	-4 a 0

2.5.2.1 Mapeo entre SNR Vs MCS Vs Throughput

Como se describió en el apartado anterior, la métrica relacionada directamente con la tasa de transmisión que define la calidad de un canal es la SINR, la cual se mapea a un valor de CQI que determina el máximo esquema de modulación y codificación (MCS), para una BLER objetivo. En consecuencia, cuanto mayor sea el esquema el MCS mayor será la eficiencia espectral (bps/Hz) del enlace. Además, conociendo el índice de modulación y codificación (I_{mcs}), el ancho de banda del sistema y el tipo de enlace (ascendente o descendente) podremos obtener la máxima tasa de transmisión que podría soportar el terminal móvil y la estación base [86]. Es importante recalcar que la máxima tasa de transmisión es menor para el enlace ascendente (UL) que para el descendente (DL), debido principalmente porque hay diferentes categorías de terminales [87]. Cada categoría se corresponde con un conjunto de funcionalidades soportadas entre el móvil y el e-NodeB. Las diferencias entre categorías de terminal vienen dadas por el tamaño de bloques de transporte (máximo número de bits) que pueden recibir en un determinado intervalo de tiempo en el enlace ascendente y descendente. Además, dependiendo del tipo de terminal podrá soportar hasta un orden de modulación u otro (16QAM o 64 QAM) y un tipo de esquema de transmisión (SIMO o MIMO), entre otros. La siguiente figura muestra la eficiencia espectral soportada por el terminal móvil (e-NodeB hacia móvil) en función de la SNR y MCS, considerando un modelo de canal AWGN.

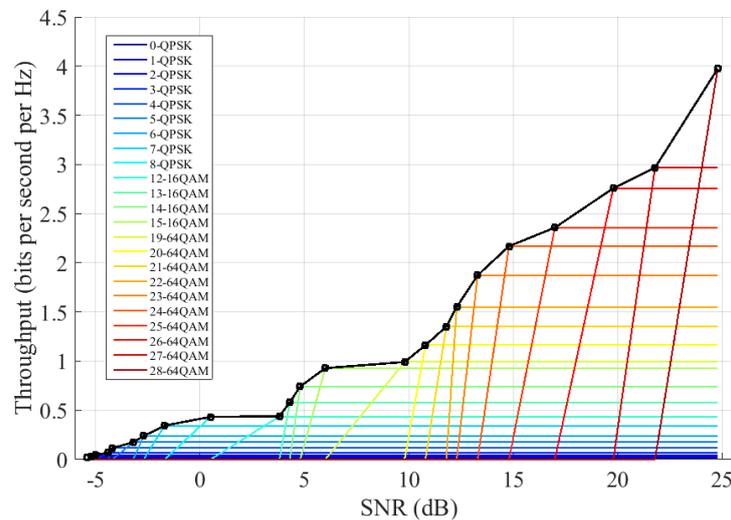


Figura 7. Throughput móvil LTE en función de la SNR y MCS.

Como se puede observar en la figura anterior, la máxima tasa de transmisión (throughput), soportado por el terminal móvil es alrededor de 4 bits/S/Hz, para un índice de esquema de modulación y codificación 27-QAM. La SNR requerida para el terminal móvil se encuentra en un rango de -5 dB a 25 dB en función del esquema de modulación utilizado por el móvil. Los resultados fueron obtenidos para un terminal móvil LTE bajo test (Samsung Galaxy J5), en condiciones normales de funcionamiento (sin interferencia adicional de otra tecnología), en la banda 20 de LTE (banda de 700 MHz). La siguiente tabla especifica la tasa de transmisión máxima para canales LTE de diferentes anchos de banda, en función de la SNR y diferentes índices de esquemas de modulación y codificación para el enlace descendente (transmite el e-NodeB recibe el móvil):

Tabla 13. Tasa máxima de transmisión en LTE -DL para diferentes BW.

Parámetro			Tasa máxima de transmisión de LTE en DL (Mbps)		
MCS Índice	ITBS	SNR (dB)	5 MHz	10 MHz	15 MHz
0-QPSK	0	-5.4	0.08	0.14	0.2
4-QPSK	4	-4.2	0.52	0.96	1.5
5-QPSK	5	-3.2	0.79	1.41	2.3
6-QPSK	6	-2.7	1.08	1.94	3.2
14-QAM	13	4.8	3.34	6.13	10
15-QAM	14	6	4.18	7.27	12.5
20-QAM	18	10.8	5.23	9.57	15.7
21-QAM	19	11.8	6.08	11.10	18.2
22-QAM	20	12.3	6.98	12.77	20.9
26-QAM	24	19.8	12.41	22.69	37.2
27-QAM	25	21.8	13.35	24.41	40.1

Capítulo 3

Banda de 700 MHz en Sudamérica

En este capítulo, se aborda la problemática en Sudamérica que surge de la necesidad de garantizar la convivencia y la armonización entre las redes de televisión digital terrestre que operarán en la banda de 470 a 698 MHz y las redes móviles de cuarta generación (4G-LTE), que operarán en la banda adyacente de 700 MHz (703 a 803 MHz). En Sudamérica, actualmente ningún país ha llevado a cabo el apagón analógico total, ni desplegado redes LTE en la banda de 700 MHz a nivel nacional dado que la banda de 700 MHz no se ha podido limpiar de emisiones de televisión a nivel nacional para que los operadores móviles la puedan usar. Se espera que, de acuerdo a los objetivos declarados en sus planes de desarrollo, los primeros países en llevar a cabo el apagón analógico sean Brasil y Ecuador en el año 2018, incluso se prevé que tanto Brasil como Ecuador podrían extenderse hasta el 2023 para garantizar cobertura poblacional del servicio de televisión > 90%. Las fechas previstas del apagón analógico en otros países son: Colombia, Argentina y Bolivia para el año 2019; Chile y Venezuela para el año 2020; Paraguay para el año 2024; Perú para el año 2025; y Uruguay aún por definir.

Para garantizar la convivencia en la banda de 700 MHz en Sudamérica, se definen los siguientes parámetros técnicos entre las redes de TV y 4G-LTE: márgenes de protección entre las señales de televisión y móviles (máxima potencia interferente permitida a la entrada del receptor víctima sin que la calidad del servicio útil sea degradada, en función de la separación en frecuencia); distancias de protección entre el trans-

misor interferente y el receptor víctima; banda de guarda requerida entre las dos tecnologías; niveles de atenuación adicionales en las máscaras espectrales tanto en transmisión como en recepción; evaluación de técnicas de mitigación de interferencias, entre otros.

3.1. Escenarios de Convivencia en la banda 700 MHz en Sudamérica

3.1.1. Canalización banda de 700 MHz en Sudamérica

En Sudamérica, la mayor parte de países (Colombia, Argentina, Perú, Brasil, Ecuador, Venezuela, Paraguay, Uruguay), han adoptado la canalización de la banda 28 del 3GPP con el enlace ascendente en la banda de 703 MHz – 748 MHz, y enlace descendente en la banda de 758 MHz – 803 MHz, para desplegar los servicios móviles de cuarta generación 4G-LTE en la banda de 700 MHz. El único país de Sudamérica que adoptó la misma canalización de Estados Unidos fue Bolivia, el cual escogió las bandas 13, 14, y 17 del 3GPP. Específicamente, el primer canal adyacente de LTE a los servicios de televisión es el de la banda 17 con el enlace ascendente en la banda de 704 MHz – 716 MHz, y enlace descendente en la banda de 734 MHz – 746 MHz.

Respecto a la subasta de la banda de 700 MHz en Sudamérica, solo Chile, Perú y Uruguay han adjudicado el total del espectro disponible (90 MHz), en los años 2014, 2015, y 2017 respectivamente. En otros casos, Ecuador subastó solo 30 MHz en el año 2012, Bolivia subastó solo 24 MHz en el año 2013. Brasil adjudicó 80 MHz en el año 2014, Argentina y Paraguay entregaron solo 70 MHz en el año 2015 y finales del 2017, respectivamente. Colombia espera realizar la subasta en el año 2018, y Venezuela aún no tiene prevista fecha de subasta. En Brasil, la banda de 700 MHz podrá utilizarse íntegramente a partir de que se concrete el apagón analógico, que tendrá lugar en la mayor parte del país a fin del 2018 aunque el plazo final para el apagón total fue establecido para el 31 de diciembre de 2023 para las ciudades que no tuvieran un apagón previsto anteriormente. En Uruguay, no se podrá operar en la banda de 700 MHz en un plazo de 18 meses tras la adjudicación para prevenir interferencias con señales de televisión. Por lo tanto, se necesita urgentemente contar con una programación adecuada tanto a nivel regional, nacional y en fronteras de la limpieza de la banda de 700 MHz (emisiones de televisión), y para que pueda ser usada por los operadores móviles a nivel nacional. En resumen, el uso de la banda de 700 MHz a nivel nacional en Sudamérica se postergará aún más por unos años, teniendo en cuenta que aún están en procesos de subasta en algunos países y de limpieza de la banda. La siguiente tabla resume las canalizaciones propuestas en Sudamérica en la banda de 700 MHz, teniendo en cuenta los pliegos de subasta de cada uno de los países bajo estudio.

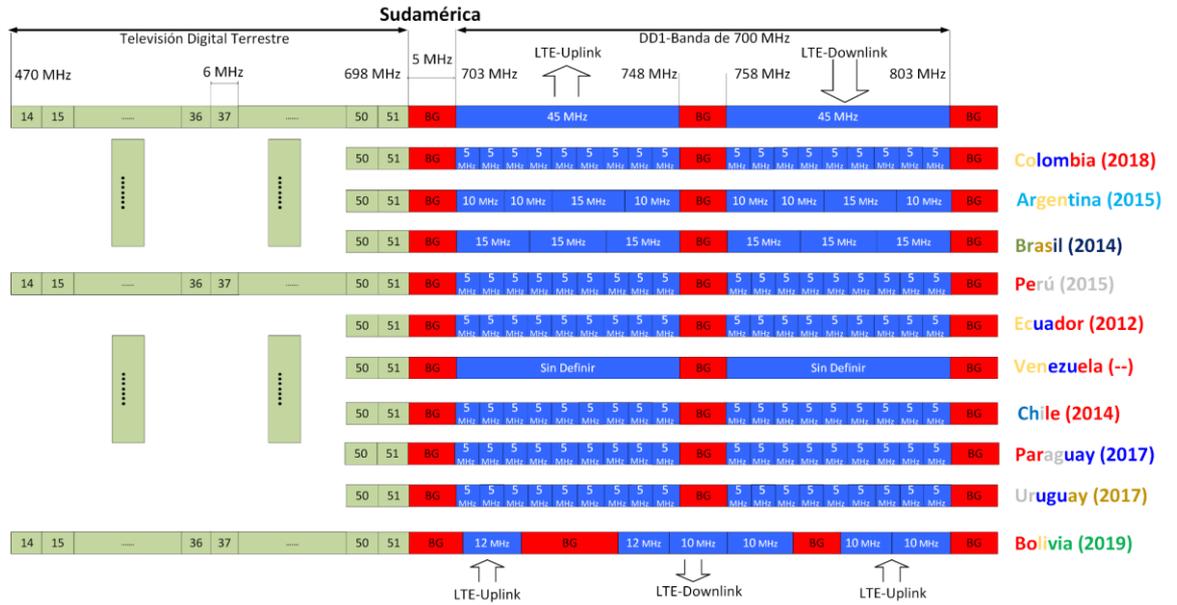


Figura 8. Canalización banda de 700 MHz en Sudamérica.

Como se puede observar en la figura anterior, la convivencia entre los servicios de televisión y móviles tendrán diferentes escenarios, en función de la canalización de 4G-LTE y de la tecnología escogida por cada país de Sudamérica. Las redes de televisión operarán en adyacencia a las de 4G-LTE con las siguientes canalizaciones: Colombia tendrá 9 canales 4G-LTE de 5 MHz de ancho de banda (subastará solo 70 MHz de la banda) [88]; Brasil, Ecuador, Chile, Paraguay y Uruguay han escogido la misma canalización de Colombia [13] [89] [90]; Argentina y Bolivia ha dividido la banda en canales 4G-LTE de 10 MHz, 12 MHz y de 15 MHz; Perú ha dividido la banda en tres canales 4G-LTE de 15 MHz [13]; mientras que el único país del que aún no se conoce la canalización que usará es Venezuela. Es importante recalcar que en Colombia se evaluará la convivencia entre el estándar DVB-T2 y 4G-LTE, mientras en el resto de países (Argentina, Bolivia, Perú, Brasil, Ecuador, Venezuela, Chile, Paraguay, y Uruguay), se evaluará la convivencia entre el estándar ISDB-Tb y 4G-LTE. En todos los casos, el enlace ascendente, es decir, transmite el terminal móvil y recibe el e-NodeB es el que estará adyacente a los servicios de televisión, con una banda de guarda entre servicios de por lo menos 5 MHz.

3.1.2. Escenarios de convivencia entre las redes DVB-T2 e ISDB-T y 4G-LTE

Los escenarios de estudio consideran una red de TDT y una red móvil de cuarta generación operando en adyacencia en la banda de 700 MHz en Sudamérica. Se considera que la red de TDT podrá ofrecer cobertura tanto en recepción fija sobre tejado como en el interior de una vivienda. Para garantizar el correcto funcionamiento entre las redes se evaluará tres casos de estudio. En los dos primeros, se evalúan el impacto de un terminal móvil 4G-LTE operando en adyacencia a los servicios de TV, y en el tercer de ellos, el caso contrario, es decir, el impacto de las redes de TDT sobre la recepción en el e-NodeB. El impacto de una estación base 4G-LTE (e-NodeB) sobre los servicios de televisión queda por fuera del alcance de esta tesis, considerando que no es caso crítico, debido a que la banda de guarda mínima es por lo menos de 60 MHz entre los sistemas, y, por lo tanto, se encuentra fuera de los límites de emisiones adyacentes. A continuación, se detallan los casos de estudio:

1. **Caso 1:** La señal útil es la que reciben los usuarios de televisión con una antena receptora ubicada sobre el tejado de una vivienda, y, la señal interferente es la proveniente de un terminal móvil 4G-LTE en el exterior de una vivienda.
2. **Caso 2:** Una red de TDT donde los usuarios reciben la señal útil en un televisor con antena receptora de TV integrada, y, como señal interferente, un terminal móvil 4G-LTE ubicado también en el interior de la vivienda emitiendo en adyacencia. La siguiente figura representan los dos primeros casos de uso.

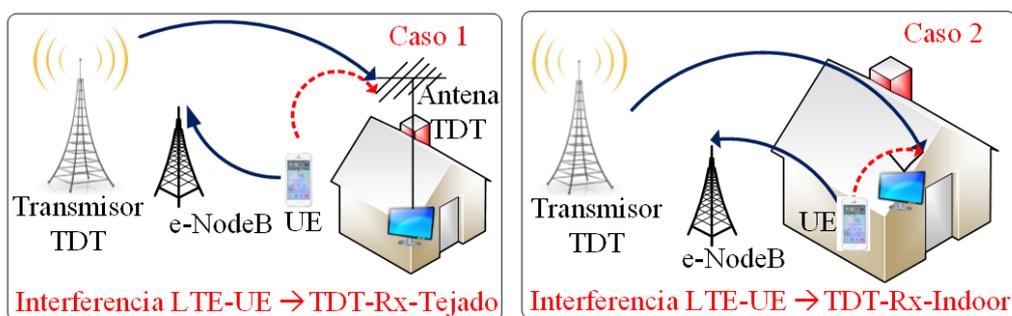


Figura 9. Casos de estudio para evaluar el impacto de las redes móviles sobre las de televisión: (Izquierda) recepción fija sobre tejado. (Derecha) recepción fija en interiores.

3. **Caso 3:** La señal útil es la que recibe un e-NodeB proveniente del terminal 4G-LTE, y la señal interferente es la proveniente de un transmisor de TDT, tal y como se ve en la siguiente figura.

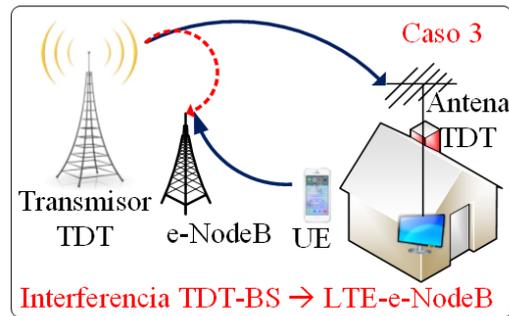


Figura 10. Caso de estudio para evaluar el impacto de las redes de televisión sobre las móviles.

3.2. Metodología

La metodología llevada a cabo para definir los parámetros técnicos de operación que garantizan la convivencia entre las tecnologías DVB-T2 e ISDB-T y 4G-LTE operando en adyacencia en la banda de 700 MHz en Sudamérica, está fundamentada en un proceso iterativo: medidas de laboratorio y modelado analítico en función de la geometría del escenario. A continuación, se detalla cada una de las fases propuestas.

3.2.1. Medidas de Laboratorio

Las medidas de laboratorio nos permiten emular los escenarios de estudio mediante el uso de equipos profesionales y comerciales, para determinar el máximo nivel de potencia interferente que podría tolerar un receptor víctima, sin que el servicio principal sufra ninguna degradación. Por lo tanto, podremos definir un valor de protección obtenido de la relación entre el nivel de potencia de la señal deseada y el nivel máximo de la potencia interferente. El procedimiento llevado a cabo en las medidas de laboratorio depende de la coexistencia entre las tecnologías que se desee evaluar, debido a que cada tecnología tiene parámetros de calidad diferentes. Sin embargo, el set-up es muy similar para cualquiera de los escenarios de estudio. En la siguiente figura se esquematiza el set-up de medidas de laboratorio [35]:

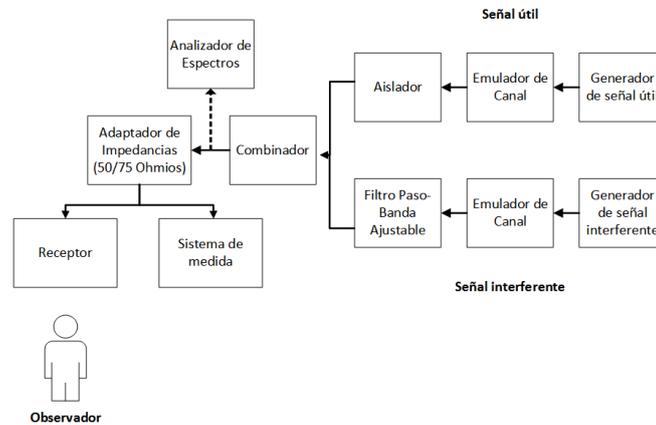


Figura 11. Set-up para evaluar la convivencia entre redes de TDT y 4G-LTE.

Como se puede observar en la figura anterior, en la cadena de montaje se utiliza un aislador a la salida del generador de la señal útil con el objetivo de prevenir que parte de la señal interferente sea reflejada a la salida del generador de la señal útil. Asimismo, se deberá usar un filtro paso banda a la salida de la señal interferente con el objetivo de eliminar el ruido del generador y ajustar el rango de emisiones fuera de banda de la señal interferente en función de su máscara espectral. El set-up de las medidas de laboratorio se resume en cuatro partes principales:

1. Generación de las señales reales tanto de la tecnología interferente como la útil, y transmisión de estas señales a través de equipos profesionales, considerando un modelo de canal en función del escenario y la tecnología.
2. Se fija la potencia de la señal útil teniendo en cuenta que a la entrada del receptor víctima se mida una potencia igual a la sensibilidad, cuyo valor depende del modo de transmisión utilizado.
3. Se combina la señal útil con la señal interferente.
4. La potencia de la señal interferente se va incrementado gradualmente hasta que la señal útil se vea degradada en el receptor víctima y no cumpla un parámetro de calidad. El procedimiento permite encontrar el límite de potencia interferente que podría tolerar un receptor víctima. Además, este procedimiento se repite de forma iterativa cambiando la configuración de los diferentes parámetros en función del escenario (espaciado en frecuencia, fuente interferente, tipo de canal).

3.2.1.1 Medidas DVB-T2 e ISDB-Tb como señal útil

La metodología llevada a cabo en las medidas de laboratorio cuando la señal útil son los sistemas de televisión consiste en medir el parámetro de margen de protección, definido como la relación entre el nivel de potencia de la señal deseada y el nivel máximo de la potencia interferente, y en base al método de punto de fallo subjetivo [26] [35]. El método de punto de fallo subjetivo consiste en fijar el nivel de potencia de la señal útil a la entrada del receptor de televisión en -60 dBm e ir realizando un barrido de potencia de la señal interferente. Este barrido consiste en aumentar el nivel de potencia de la señal interferente, y observar durante 20 segundos un video real en el receptor de televisión, si no se observa ningún error (punto 1 de la figura), se va aumentando la potencia en pasos de 0.1 dB. El procedimiento anterior se realiza iterativamente hasta cuando se observe un error en el video real (punto 2 y 3 de la figura), en este punto de la medida, la potencia interferente anterior, será la máxima que podría tolerar un receptor víctima sin que se degrade la imagen del televisor (punto 4 de la figura). Una vez obtenido este valor podremos deducir el margen de protección aplicando la siguiente ecuación:

$$MP = Prx_{\text{útil}}^{\text{fija}} - Prx_{\text{interf}}^{\text{máxima}} \quad (3)$$

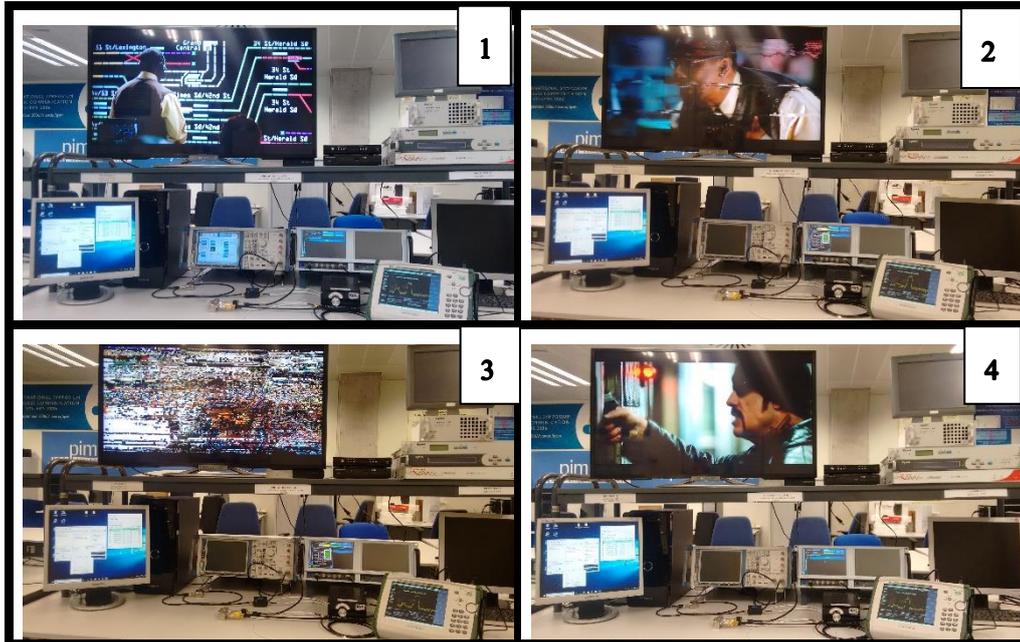


Figura 12. Montaje para las medidas de los márgenes de protección.

Los parámetros de configuración de las señales usadas para llevar a cabo las medidas de laboratorio son:

- **Las señales de LTE:** son formas de onda grabadas de estaciones base y equipos de usuario reales, con diferentes cargas de tráfico. Posteriormente, fueron reproducidas mediante un generador de señal con referencia en el mercado “Aeroflex SGD-06”. En el enlace ascendente, las señales emplean el tipo de multiplexación de usuarios SC-FDMA, la cual no es más que una OFDM con una transformada de Fourier previa para conseguir una mayor variabilidad y flexibilidad para el acceso de los usuarios. Los parámetros técnicos de configuración son:

Tabla 14. Parámetros de configuración de la señal 4G-LTE.

Modulación	FFT	Carga de tráfico	Tipo de Enlace	Ancho de Banda
QPSK	512/1024/1536	idle-50%-100%	Ascendente	5-10-15 MHz

- **Las señales de TDT:** se utilizó un transmisor DekTec DTA-115, y se generaron dos flujos de video, uno para el estándar DVB-T2 (adoptado en Colombia), y el otro para ISDB-Tb (adoptado en Argentina, Bolivia, Perú, Brasil, Ecuador, Venezuela, Chile, Paraguay, Uruguay). Los parámetros técnicos de configuración de los modos de transmisión utilizados son:
 - **Colombia:** las dos principales redes de DVB-T2 que se implementarán en Colombia se basarán en una combinación de topologías multi-frecuencia MFN (*Multiple Frequency Network*, en inglés) y frecuencia única SFN (*Single Frequency Network*, en inglés). Una red estará gestionada por el Consorcio de Canales Nacionales Privados (CCNP) para los canales de TV Caracol y RCN, y la otra red estará gestionada por Radio Televisión de Colombia (RTVC) que transmitirá los canales públicos nacionales y regionales. La separación entre transmisores permitida por el modo de transmisión DVB-T2 seleccionado es de 90 km para evitar auto-interferencias SFN. Los márgenes de protección serán medidos para el modo de transmisión del operador público de RTVC. Los valores para el modo del CCNP se pueden obtener a partir de los obtenidos para RTVC aplicando un factor de corrección igual a la diferencia entre el valor de la relación de portadora a interferencia requerida para RTVC respecto al CCNP. El modo de configuración utilizado por RTVC se resume en la si-

guiente tabla. La capacidad estimada de cada múltiplex de RTVC es de 19.3 Mbps, mientras que su SNR para recepción fija sobre tejado es 16.1 dB y para recepción en interiores 17.9 dB.

Tabla 15. Modo de transmisión DVB-T2 usado por RTVC en Colombia.

Modulación	CR	FFT	GI	Patrón Portadoras	BW
64-QAM	2/3	16 k	1/8	PP3	6 MHz

- **Argentina, Perú, Brasil, Ecuador, Venezuela, Bolivia, Chile, Paraguay, Uruguay:** los países de Sudamérica que adoptaron el estándar ISDB-Tb operarán con el modo de transmisión escogido por Brasil, el cual utiliza una FFT de tamaño 8k, intervalo de guarda 1/16. La separación entre transmisores permitida por el modo de transmisión ISDB-Tb es de 60 km. Si la comparamos con la distancia SFN de Colombia (90 Km), esta es menor debido principalmente a la combinación del intervalo de guarda y el tamaño de la FFT permitido por ISDB-Tb. Este modo permite una tasa binaria de hasta 18,1 Mbps, necesitando una SNR de 19 dB en un canal AWGN, 21 dB en canal Rice (recepción fija) y 23 dB en canal Rayleigh (recepción portable en interiores). La siguiente tabla resume los parámetros técnicos del modo de transmisión:

Tabla 16. Modo de transmisión ISDB-Tb adoptado en Brasil, Ecuador, Venezuela, Bolivia, Chile, Paraguay, Uruguay.

Modulación	CR	FFT	GI	Patrón Portadoras	BW
64-QAM	3/4	8k	1/16	PP1	6 MHz

3.2.2. Modelado Analítico en función de la Geometría del escenario

Los parámetros técnicos para garantizar la convivencia entre las redes de televisión y móviles en la banda de 700 MHz en Sudamérica son: mínimas pérdidas por propagación (*Minimum Coupling Loss or MCL*, en inglés), distancias de protección entre el enlace del transmisor interferente y el receptor deseado, banda de guarda requerida entre redes, niveles adicionales de atenuación, entre otros. Estos parámetros son obtenidos teniendo en cuenta los márgenes de protección definidos en el apartado anterior, y la geometría de cada uno de los escenarios bajo estudio, es decir, considerando los parámetros técnicos de operación de cada una de las redes, los cuales son definidos por organismos de estandarización o valores reales de las redes que operan actualmente en Sudamérica.

3.2.2.1 MCL y Distancias de protección entre el transmisor interferente y el receptor víctima

Las mínimas pérdidas de propagación (MCL) es el parámetro que establece el mínimo valor de las pérdidas que experimenta la señal al propagarse inalámbricamente desde un terminal hasta una estación base, o entre dos terminales, o entre dos estaciones bases. Esta terminología fue definida por el 3GPP para sistemas IMT [86] [91]. En esta tesis, las MCL se definen para dos casos: (1) cuando la ganancia de la antena receptora víctima es 0 dB (MCL), y (2) cuando consideramos la máxima ganancia de la antena del receptor víctima (MCL efectivas).

3.2.2.1.1. DVB-T2 e ISDB-Tb como señal útil

La siguiente figura muestra la geometría del escenario de estudio cuando un móvil 4G-LTE interfiere el servicio de televisión, el cual es ofrecido a través de recepción fija con una antena ubicada sobre el tejado de una vivienda.

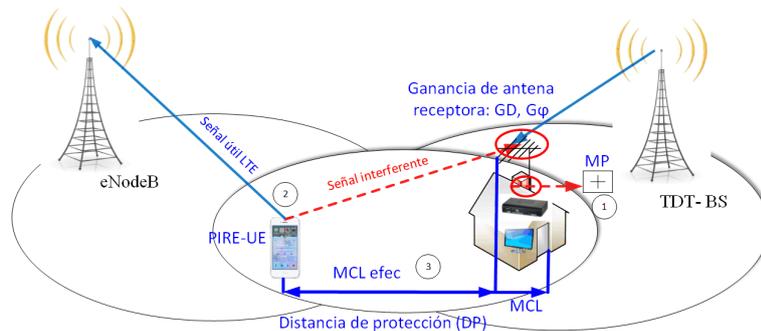


Figura 13. Modelado del escenario de estudio para un móvil 4G-LTE interfiriendo a un usuario de televisión en recepción fija sobre tejado.

La metodología para obtener las MCL que debe cumplir un móvil 4G-LTE para no interferir el servicio de televisión se divide en tres pasos:

1. **Obtener el umbral máximo de potencia interferente que puede tolerar el receptor víctima ($Prx_{interf}^{máxima}$):** teniendo en cuenta los márgenes de protección medidos a la entrada del receptor de TV (ver punto 1 de la figura), podemos calcular la máxima potencia interferente que podría tolerar un receptor víctima ($Prx_{interf}^{máxima}$), recibiendo al nivel de sensibilidad (peor caso), si aplicamos la siguiente ecuación:

$$Prx_{interf}^{m\acute{a}xima} = Prx_{\acute{u}til}^{m\acute{i}nima} - MP \quad (4)$$

Donde, $Prx_{\acute{u}til}^{m\acute{i}nima}$ es el nivel de potencia m\acute{i}nimo requerido para decodificar correctamente el servicio primario o nivel de sensibilidad, y MP es el margen de protecci3n medido en el apartado anterior.

2. **Caracterizar los par\acute{a}metros t\acute{e}cnicos de transmisi3n de la tecnolog\acute{a} interferente:** los par\acute{a}metros t\acute{e}cnicos que se consideraran para evaluar el impacto del transmisor interferente sobre la v\acute{ic}tima son: Potencia Isotr3pica Radiada Equivalente (PIRE), el cual tiene en cuenta la potencia transmitida en banda, p\acute{e}rdidas de cables y conectores, y ganancia de la antena transmisora (ver punto 2 de la figura).
3. **Calcular las m\acute{i}nimas p\acute{e}rdidas por propagaci3n (MCL):** teniendo en cuenta el nivel m\acute{a}ximo de potencia interferente que puede tolerar un receptor v\acute{ic}tima, y la potencia de emisi3n del transmisor interferente, podemos obtener las m\acute{i}nimas p\acute{e}rdidas de propagaci3n que se deben garantizar entre un transmisor interferente y un receptor v\acute{ic}tima para que puedan operar correctamente aplicando las siguientes ecuaciones:

$$MCL = PIRE - Prx_{interf}^{m\acute{a}xima} \quad (5)$$

$$MCL_{efec} = PIRE - Prx_{interf}^{m\acute{a}xima} + Grx_{v\acute{ic}tima}^{m\acute{a}xima} \quad (6)$$

3.2.2.1.2. 4G-LTE como se\~{n}al \acute{u}til

El procedimiento para definir las MCL cuando una estaci3n de televisi3n interfere a un e-NodeB difiere un poco al caso anterior, teniendo en cuenta que no se pudieron realizar medidas de laboratorio con equipos profesionales ni comerciales. Por lo tanto, para obtener la potencia interferente que podr\acute{a} tolerar el e-NodeB se dedujo anal\acute{it}icamente, dado que el instituto iTEAM no contaba en el momento de realizar la tesis con el e-NodeB por sus altos costes de implementaci3n. Para ello, se lleva a cabo la siguiente metodolog\acute{a}:

1. **Cuantificar el nivel de potencia interferente que captura el receptor v\acute{ic}tima ($P_{inter_rx_vic}$):** el nivel de potencia interferente que captura el receptor v\acute{ic}tima es la suma de tres contribuciones que se describen a continuaci3n: la primera de ellas, se debe a las imperfecciones de la m\acute{a}scara del transmisor interferente ($ACLR$), dentro del ancho de banda \acute{u}til del receptor v\acute{ic}tima; la se-

gunda de ellas se debe a las imperfecciones de la máscara del receptor víctima (ACS) dentro del ancho de banda útil del transmisor interferente; y la tercera es consecuencia de las imperfecciones tanto de la máscara del transmisor interferente como la máscara del receptor víctima, en función de la banda de guarda entre tecnologías. La siguiente figura muestra las tres contribuciones que puede capturar un receptor víctima:

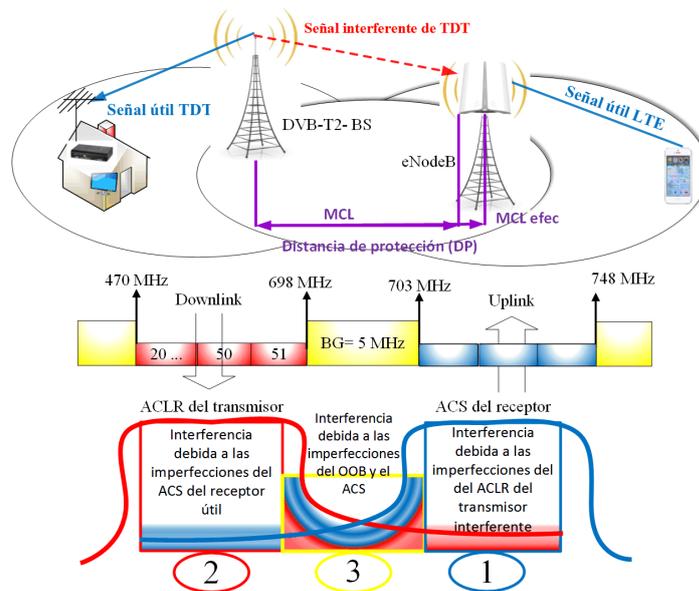


Figura 14. Modelado del escenario de estudio para una estación de TDT interfiriendo a la recepción en el e-NodeB (transmite el móvil 4G-LTE).

Las tres contribuciones de potencia interferente son cuantificadas por un parámetro denominado valor de relación de interferencia en canal adyacente ($ACIR_{TDT_LTE}$), el cual tiene en cuenta tanto la relación de fuga en el dominio fuera de banda del transmisor interferente ($ACLR$), como la selectividad en canal adyacente del receptor víctima (ACS). Para calcular el valor de $ACIR$ se aplica la siguiente ecuación:

$$ACIR_{TDT_LTE} = 10 * \log_{10} \left(10^{\frac{ACLR}{10}} + 10^{\frac{ACS}{10}} \right) \quad (7)$$

Por último, calculamos el límite de potencia del transmisor interferente en el dominio fuera de banda ($P_{i_{TDT}}$):

$$P_{i_{TDT}} = PIRE_{TDT} - ACIR_{TDT_LTE} \quad (8)$$

2. **Definir el umbral máximo tolerable de potencia interferente que puede capturar el receptor víctima (P_{inter_objet}):** Para calcular este parámetro se tiene en cuenta la potencia de ruido, y el valor de desensibilización que puede tolerar un receptor. La potencia de ruido del receptor, expresado en dBm, se calcula aplicando la siguiente ecuación:

$$P_N = 10 * \log_{10} (KTB) + NF + 30 \quad (9)$$

Donde, K es la constante de Boltzmann ($1.38 * 10^{-23}$ J/K), T es la temperatura del ruido, B es el ancho de banda equivalente del ruido del receptor, y NF es la figura de ruido del receptor. Posteriormente, calculamos el valor máximo permitido de Relación Interferencia a Ruido objetivo ($\frac{I}{N} obj$), que permite que la señal útil pueda ser decodificada correctamente, expresado en dB, fijando un valor de desensibilización en el receptor. La desensibilización de un receptor (D), corresponde al “incremento de la potencia de ruido tolerable” debido a la presencia de una señal interferente, y sus valores típicos son $D = 0.41$ a 1 dB. Para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, un receptor es diseñado para incluir un margen igual o inferior a D, que permite tolerar un cierto nivel de interferencia al decodificar la señal deseada.

$$\frac{I}{N} obj = 10 * \log_{10} (10^{\frac{D}{10}} - 1) \quad (10)$$

Finalmente, calculamos el umbral máximo tolerable de potencia interferente que puede capturar el receptor víctima (P_{inter_objet}), expresado en unidades de dBm, mediante la siguiente ecuación:

$$P_{inter_objet} = P_N + \frac{I}{N} obj \quad (11)$$

4. **Calcular las mínimas pérdidas por propagación (MCL):** teniendo en cuenta el nivel máximo de potencia interferente que puede tolerar un receptor víctima, y la potencia de emisión del transmisor interferente, podemos obtener las mínimas pérdidas de propagación aplicando las siguientes ecuaciones:

$$MCL = P_{i_{TDT}} - P_{inter_objet} \quad (12)$$

$$MCL_{efec} = P_{i_{TDT}} - P_{inter_objet} + Grx_{Victima}^{máxima} \quad (13)$$

3.2.2.2 *Distancia de protección (DP)*

A partir de los valores de mínimas pérdidas de propagación obtenidos en los puntos anteriores, se pueden obtener las distancias de protección que se deben cumplir entre un transmisor interferente y un receptor víctima, aplicando un modelo de propagación específico en función del tipo de tecnología y del entorno. Para el cálculo de las distancias hemos considerado los modelos de propagación Hata Modificado para redes 4G-LTE, y ITU-R 1546 para las redes de TDT, de acuerdo a estudios realizados en Europa por el ECC sobre convivencia de servicios TV en banda de 700 MHz [92].

3.2.2.3 *Atenuación adicional requerida (AT)*

La atenuación adicional (AT_{adi}), es calculada sustrayendo las MCL obtenidas en el apartado anterior (MCL, MCL_{efec}), con las MCL de referencia (calculadas para el peor caso, es decir, menores pérdidas de propagación), aplicando la siguiente ecuación:

$$\begin{aligned} AT_{adi} &= MCL - MCL_{ref} \\ AT_{adi_{efec}} &= MCL_{efec} - MCL_{ref} \end{aligned} \tag{14}$$

Las MCL de referencia son obtenidas para el caso más restrictivo, el cual se da cuando el valor de pérdidas de propagación es el menor posible, y por lo tanto el receptor víctima puede capturar el mayor nivel de potencia interferente. Esto ocurre cuando el rayo directo proveniente del transmisor interferente llega a la antena receptora víctima con el ángulo de elevación y azimut correcto, que permite que la discriminación angular de la antena sea mínima (máxima ganancia). Para calcular este valor debemos encontrar el valor de la mínima distancia de separación entre el transmisor interferente y el receptor víctima que garantiza la máxima ganancia. La siguiente figura muestra la geometría que se debe tener en cuenta para calcular la mínima distancia de separación entre un móvil y la antena receptora de TV que garantiza la máxima ganancia [17].

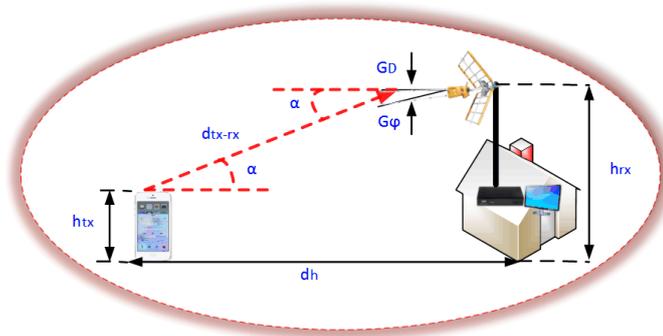


Figura 15. Modelado del escenario para obtener las MCL de referencia.

En primer lugar, debemos fijar el ángulo máximo de elevación de la antena receptora de televisión (α), el cual garantiza que el rayo directo proveniente del móvil obtendrá la máxima ganancia. Este valor se obtiene del diagrama de radiación vertical de la antena de televisión [93]. Posteriormente, teniendo en cuenta este valor, se calcula la mínima distancia horizontal (d_h), que debería existir entre un móvil respecto a una antena receptora de TV, aplicando la siguiente ecuación:

$$d_h = \frac{h_{rx} - h_{tx}}{\tan \alpha} \quad (15)$$

Donde, h_{rx} y h_{tx} son las alturas de la antena receptora víctima y la antena transmisora interferente. Además, se debe cumplir que $h_{rx} > h_{tx}$. En segundo lugar, calculamos de distancia del transmisor interferente al receptor víctima (d_{tx-rx}), que permite obtener las mínimas pérdidas de propagación (caso más restrictivo para garantizar la coexistencia entre dos tecnologías operando en bandas adyacentes).

$$d_{tx-rx} = \sqrt{d_h^2 + (h_{RX} - h_{TX})^2} \quad (16)$$

Por último, calculamos el valor mínimo de pérdidas de propagación desde el transmisor interferente hasta el receptor víctima (L_{tx-rx}), aplicando la siguiente ecuación:

$$L_{tx-rx} = L_{pro}(d_{tx-rx}) - \sum_{i=1}^N n_i * l_i \quad (17)$$

Donde, $L_{pro}(d_{tx-rx})$ son las pérdidas de propagación obtenidas a la distancia mínima de separación entre un transmisor interferente y un receptor víctima (caso más restrictivo). Estas pérdidas se obtienen aplicando el modelo de propagación de espacio libre donde exista visión directa con el transmisor [94]; n_i es el número de obstáculos que atraviesa la contribución directa desde el transmisor interferente hasta el receptor víctima; l_i es la atenuación asociada a cada tipo de obstáculo (pared, tejado, ventana, piso, mobiliario, etc.). Estos dos últimos parámetros son tenidos en cuenta para escenarios de recepción en interiores.

3.3. Resultados

3.3.1. Impacto de las redes móviles sobre las de televisión digital

3.3.1.1 Redes de televisión en recepción fija sobre tejado

3.3.1.1.1 Colombia

En Colombia, la convivencia en la banda de 700 MHz se evalúa para las redes de televisión bajo el estándar DVB-T2 y las redes móviles de cuarta generación 4G-LTE. Se considerará como objeto de estudio los dos últimos canales de TDT: Canal 50 (686-692 MHz) y 51 (692-698 MHz). La siguiente figura muestra la posible distribución de la canalización de la banda de 700 MHz, y, por ende, los posibles casos potenciales de estudio en esta sección.

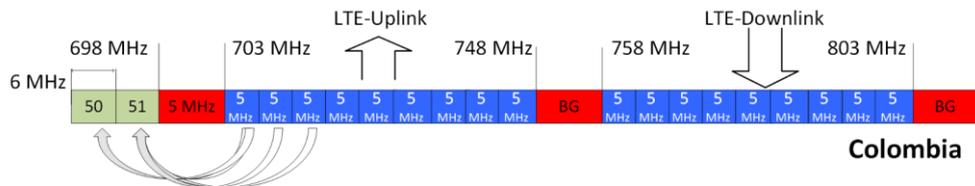


Figura 16. Canalización Banda de 700 MHz en Colombia.

Como se puede observar en la figura anterior, Colombia ha dividido la banda de 700 MHz en canales de 5 MHz de ancho de banda. Por lo tanto, teniendo en cuenta que el límite de emisiones fuera de banda de un canal 4G-LTE de 5 MHz se extiende hasta dos canales más allá del borde inferior o superior de su propio canal, los resultados son presentados para los dos o tres últimos canales de 4G-LTE, en función del canal TV que opere en adyacencia inferior. A continuación, se describe los principales resultados:

- **Efecto de la carga de tráfico de la señal 4G-LTE:** tres diferentes cargas de tráfico de la señal 4G-LTE son evaluadas: 1 Mbit/s, 10 Mbit/s o 20 Mbit/s, con el objetivo de analizar cómo impacta este parámetro sobre los receptores de televisión.
- **Efecto de 4G-LTE en función del tipo de recepción en las redes de televisión:** para recepción fija sobre tejado se considera el canal Rice, y para recepción en interiores se asume un canal Rayleigh, ver capítulo metodología para mayor detalle de los canales de televisión.

- **Efecto del ancho de banda del canal de 4G-LTE:** el objetivo es discutir como influiría sobre el servicio de televisión otros anchos de banda de la señal de 4G-LTE.
- **Recomendaciones para el correcto funcionamiento de las redes:** mínimas pérdidas de propagación, atenuación adicional y distancias de protección entre redes 4G-LTE y DVB-T2, para garantizar el correcto funcionamiento en la banda de 700 MHz en Colombia.

3.3.1.1.1.1. Márgenes de protección entre 4G-LTE y DVB-T2

Los márgenes de protección cuando la señal útil DVB-T2 opera en adyacencia a la señal interferente 4G-LTE fueron medidos para una banda de guarda desde 0 MHz hasta 15 MHz de separación o hasta tres canales adyacentes, en pasos de 1 MHz.

3.3.1.1.1.1.1. Efecto de la carga de tráfico de LTE-UL sobre DVB-T2

La siguiente figura muestra los márgenes de protección que se deben garantizar en los receptores de televisión bajo el estándar DVB-T2 para diferentes cargas de tráfico de la señal 4G-LTE. En color azul, se muestran los márgenes de protección para una señal 4G-LTE en estado idle. En color rojo, fueron medidos para una señal 4G-LTE con media carga de tráfico, y en color verde para una señal al 100 % de carga.

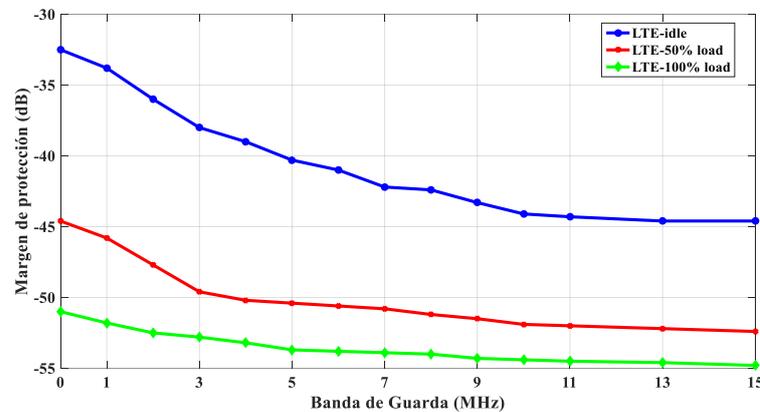


Figura 17. Márgenes de protección entre una señal útil DVB-T2 y una señal interferente 4G-LTE-UL, en función de la carga de tráfico de 4G-LTE.

Como se puede observar en la figura anterior, un receptor DVB-T2 tolera menos potencia interferente para un móvil 4G-LTE con carga de tráfico idle, es decir, el móvil utiliza solo un número reducido de recursos durante pequeños instantes temporales, debido a la alta variabilidad temporal de la señal, y, por ende, a las altas potencias de pico que se producen durante pequeños instantes temporales. Respecto a la separación en frecuencia entre DVB-T2 y 4G-LTE, para una banda de guarda de 5 MHz, la cual es la mínima en Sudamérica en la banda de 700 MHz, los márgenes de protección son -40.3 dB para una señal LTE-idle, -50.4 dB para una señal LTE-50%, y -53.7 dB para una señal LTE 100%, considerando un modelo de canal AWGN. **Por lo tanto, la señal de un móvil LTE con carga al 50% o 100%, es decir, uno o varios móviles están transmitiendo simultáneamente durante todo el tiempo, y ocupando todos los recursos disponibles entre ellos, podría transmitir por lo menos 10 dB más de potencia que un móvil que se encuentre en estado idle.** Conforme aumentamos la banda de guarda, los márgenes de protección para una señal LTE en estado idle mejoran hasta en 4 dB, para una banda de guarda de 15 MHz o diferencia en frecuencia entre el tercer canal adyacente de LTE y el último canal de DVB-T2, canal 51.

3.3.1.1.1.2. Efecto de LTE-UL sobre el tipo de recepción de DVB-T2

A partir de esta sección, los resultados serán presentados para el caso más restrictivo, el cual es una señal LTE en estado idle. La siguiente figura muestra los márgenes de protección que se deben garantizar para que un móvil LTE no interfiriera una señal DVB-T2, en función del tipo de recepción. En color verde para un canal Rayleigh, en negro para canal Rice, y en azul para un canal AWGN.

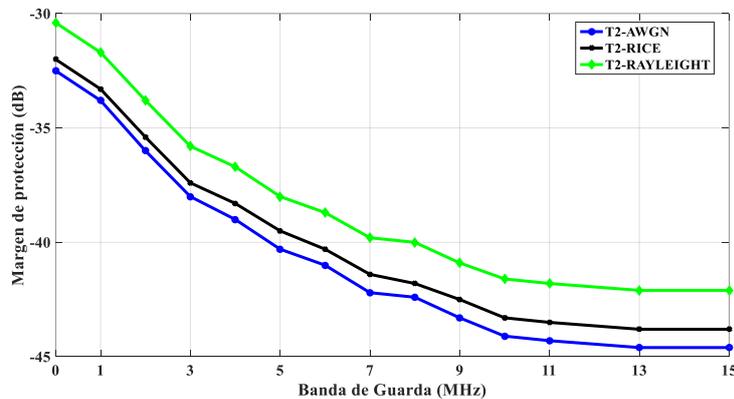


Figura 18. Márgenes de protección entre una señal útil DVB-T2 y una señal interferente 4G-LTE-UL, en función del tipo de recepción de TDT.

Como se puede observar, los márgenes de protección son más restrictivos para canales Rayleigh o recepción en interiores, el cual se modela como un canal sin visión directa entre el transmisor y el receptor. **Concretamente, los márgenes de protección son en media entre 0.9 dB más restrictivos para un canal Rice respecto a un canal AWGN, y 2 dB para un canal Rayleigh.**

3.3.1.1.1.3. Efecto del ancho de banda de LTE-UL sobre DVB-T2

La siguiente figura muestra los márgenes de protección en función del ancho de banda de LTE y el tipo de recepción de TDT.

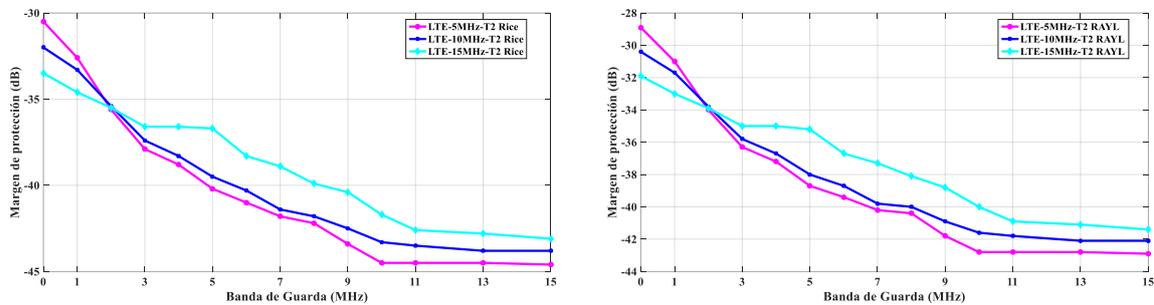


Figura 19. Márgenes de protección entre una señal útil DVB-T2 y 4G-LTE-UL. (Izquierda) Recepción sobre tejado. (Derecha) Recepción en interiores.

Como se puede observar en la figura anterior, para una banda de guarda de 0 MHz, los márgenes de protección son más restrictivos para una señal LTE con un ancho de banda de 5 MHz, debido a que la densidad de potencia es mayor, y, por ende, un receptor DVB-T2 puede tolerar menor potencia interferente. **Conforme aumentamos la banda de guarda el comportamiento se invierte. Por ejemplo, para la banda de guarda mínima en Sudamérica de 5 MHz, los márgenes de protección son más restrictivos para anchos de banda de la señal LTE mayores, en este caso, canales LTE de 15 MHz,** debido a un mayor solape entre las señales, y porque los límites de emisiones fuera de banda de una señal de LTE de 5 MHz son menores. A continuación, se detallan los márgenes de protección para diferentes anchos de banda de 4G-LTE:

Tabla 17. Márgenes de protección entre DVB-T2 y 4G-LTE-UL.

Canal T2	Canal LTE interferente					
	BW: 5 MHz		BW: 10 MHz		BW: 15 MHz	
	Rice	Rayleigh	Rice	Rayleigh	Rice	Rayleigh
50	-44.5	-42.8	-43.5	-41.8	-42.6	-40.9
51	-40.2	-38.7	-39.5	-38	-36.7	-35.2

3.3.1.1.1.2. MCL y Atenuación adicional entre redes LTE y DVB-T2

Una vez obtenidos los márgenes de protección, podemos deducir recomendaciones para garantizar la convivencia entre las redes de televisión y móviles en la banda de 700 MHz en Colombia, las cuales tienen en cuenta la geometría del escenario de estudio, tales como, mínimas pérdidas de propagación, atenuaciones adicionales en el receptor víctima o distancias de protección entre un móvil LTE y la antenna receptora de televisión ubicada en la azotea de un edificio. Los resultados presentados a partir de esta sección son obtenidos para un ancho de banda de la señal interferente de LTE de 5 MHz, el cual es la canalización de la banda de 700 MHz en Colombia.

La siguiente figura muestra las mínimas pérdidas de propagación entre un móvil 4G-LTE y un receptor de televisión DVB-T2, en función del nivel de potencia recibida del receptor T2, y de la banda de guarda entre tecnologías. Las MCL fueron definidas para dos casos: (1) cuando la ganancia de la antenna receptora víctima es 0 dB (MCL); y (2) cuando consideramos la máxima ganancia de la antenna del receptor víctima (MCL efectivas), el cual es considerado el peor de los casos. Asimismo, se definieron unos valores de MCL de referencia, y se compararon con las MCL obtenidas, y se muestran las atenuaciones adicionales (AT) que se deberían conseguir en el receptor víctima, si las pérdidas de propagación mínimas son muy altas. Es importante resaltar, que las MCL de referencia garantizan las mínimas pérdidas de propagación más restrictivas, y son obtenidas para la menor distancia entre el móvil LTE y la antenna de TV, considerando el modelo de propagación de espacio libre (*Free Space path Loss o FSL*, en inglés), y la máxima directividad de la antenna de televisión.

En el peor de los casos, se deberán garantizar mínimas pérdidas de propagación superiores a 60 dB entre un móvil 4G-LTE y una antenna de TV ubicada en la azotea de un edificio, cuando el usuario víctima este recibiendo la señal de televisión al nivel de sensibilidad -78 dBm, este umbral garantiza el 95% de ubicaciones en el modo de transmisión del operador público de Colombia. **Específicamente, si consideramos que la señal interferente de LTE llega a la antenna de televisión con un ángulo inferior a 21° para conseguir la máxima directividad, se deberán garantizar unas MCL efectivas de 66.8 dB y 62.5 dB entre el primer canal de LTE y los canales 51 y 50 de televisión, respectivamente. Para otros niveles de potencia de la señal recibida DVB-T2, un usuario víctima recibiendo con potencias de televisión superiores al nivel de sensibilidad ($P_{recibida}^{DVB-T2} \geq P_{mínima} + 19 \text{ dB}$), se deberán garantizar las MCL de referencia.**

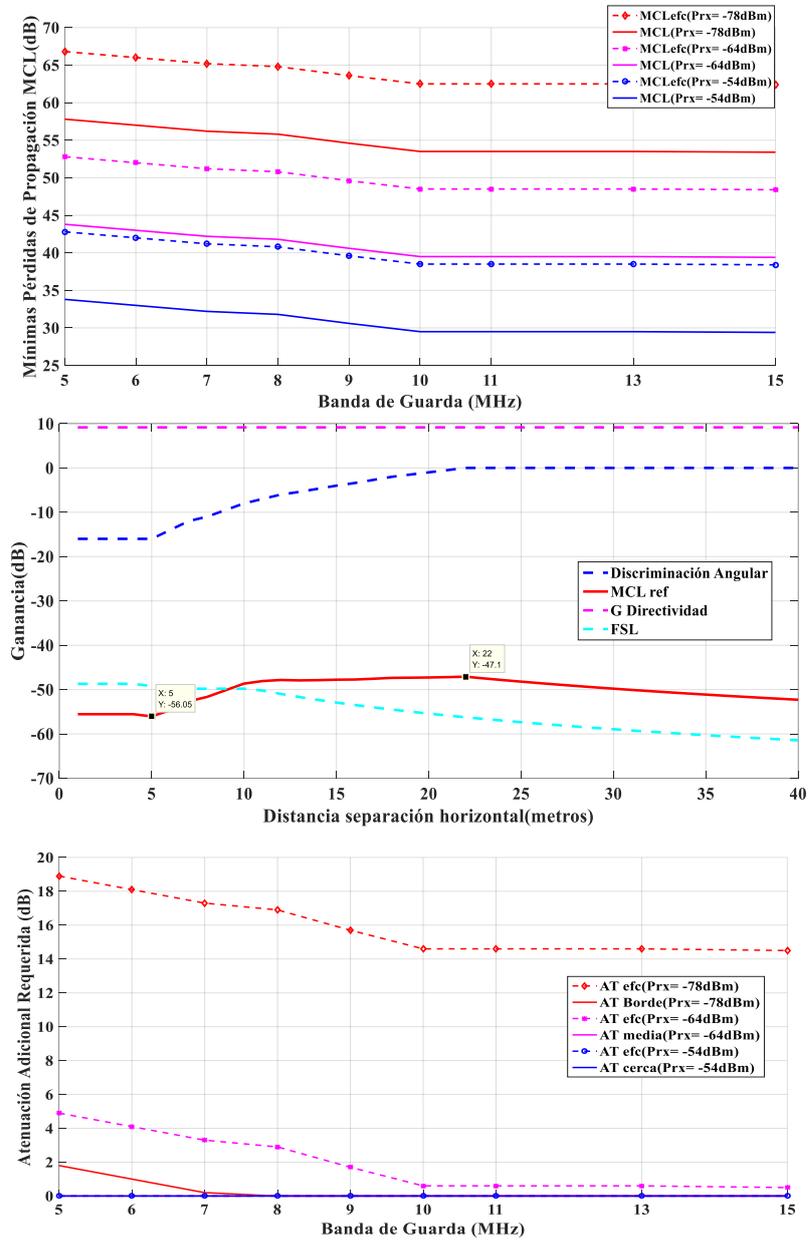


Figura 20. MCL y AT adicional entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV.

Si comparamos los valores de MCL de referencia de 47 dB y 56 dB, considerando discriminación angular nula o máxima, respecto a las MCL obtenidas de los márgenes de protección medidos en laboratorio, podremos definir la atenuación requerida en las antenas de televisión sobre tejado para garantizar la compatibilidad de las redes móviles y televisión en la banda de 700 MHz en Colombia. **En el peor de los casos, es decir, usuario víctima recibiendo al nivel de sensibilidad de televisión y móvil LTE transmitiendo a la máxima potencia, se requieren atenuaciones adicionales de 19 dB para garantizar la emisión del canal 51 de TDT, y de 15 dB para el canal 50 de TDT, respecto al primer canal 4G-LTE adyacente. En otros casos de estudio, donde usuarios víctimas reciban la señal de televisión con un umbral mayor o igual de 11 dB al nivel de sensibilidad, y la señal proveniente del móvil LTE llegue a la antena de televisión con un ángulo mayor a 60°, es decir, máxima discriminación angular de la antena de televisión, no se requiere ninguna atenuación adicional para que las redes de televisión operen en adyacencia a las redes móviles en la banda de 700 MHz, en Colombia.** Por lo tanto, el impacto de interferencia de las redes móviles sobre las redes de televisión para operar en adyacencia en la banda de 700 MHz se podría considerar en general bajo, teniendo los mayores problemas solo en usuarios víctimas que reciban al nivel de sensibilidad de TDT.

3.3.1.1.1.3. Distancia de protección requerida entre redes LTE y DVB-T2

En el caso de que no se puedan garantizar las atenuaciones adicionales para usuarios de televisión recibiendo al umbral de sensibilidad, se tendrán que garantizar distancias de protección entre un móvil LTE y una antena receptora de televisión ubicada en la azotea de un edificio o vivienda. La siguiente figura muestra las distancias de protección que deben garantizarse entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV, en función del tipo de entorno. **Las distancias de protección para garantizar el correcto funcionamiento de los canales de televisión 51 y 50, se encuentran entre 47 metros y 42 metros, para un entorno urbano, y entre 80 metros y 52 metros, para un entorno rural, considerando un usuario víctima recibiendo al nivel de sensibilidad, y móvil LTE operando a la máxima potencia.** Estas distancias se verían reducidas por debajo de los 29 metros, para usuarios en borde de celda, si la señal interferente del móvil LTE llega a la antena de TV con un ángulo $\geq 60^\circ$ o máxima discriminación angular. Es importante recordar, que la mínima distancia que garantiza las menores pérdidas de propagación entre el móvil LTE y la antena de TV son 22 metros, la cual fue la utilizada para obtener las MCL de referencia.

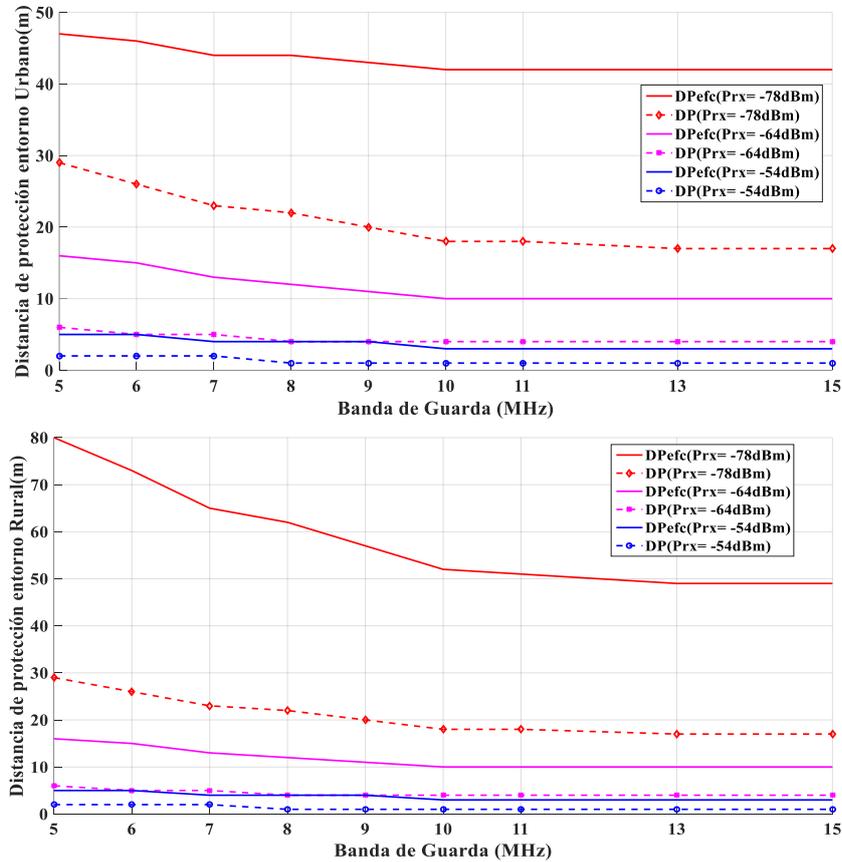


Figura 21. Distancia de protección entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV .

3.3.1.1.2. Otros países de Sudamérica

A excepción de Colombia, el resto de países de Sudamérica adoptaron el estándar ISDB-Tb. Por lo tanto, en esta sección, la convivencia en la banda de 700 MHz se evaluó para redes ISDB-Tb y LTE. No obstante, la banda de 700 MHz en Sudamérica fue subastada con diferentes canalizaciones o anchos de banda de la señal 4G-LTE. Brasil, Ecuador, Chile, Paraguay y Uruguay han escogido la misma canalización de Colombia; Argentina y Bolivia el primer canal adyacente de 4G-LTE es de 10 MHz; Perú ha dividido la banda en tres canales 4G-LTE de 15 MHz; el único país del que no se conoce la canalización que usará es Venezuela.

En los resultados, se consideraron los dos últimos canales de TV: Canal 50 que opera en la frecuencia de 686 MHz a 692 MHz, y el canal 51 que opera en la frecuencia de 692 MHz a 698 MHz. El modo de transmisión escogido por Brasil es: MOD-COD: 64-QAM, FFT: 8k, GI: 1/16. Este modo requiere una SNR mínima de 21 dB en recepción fija o una potencia mínima a la entrada del receptor de TV de -77 dBm. Para recepción en interiores, se requiere una SNR de 23 dB o una potencia mínima a la entrada del receptor de TV de -61 dBm [20] [69]. Por último, este modo de transmisión es con el que también operarán el resto de los países que escogieron el estándar ISDB-Tb

3.3.1.1.2.1. Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay, Venezuela

La siguiente figura muestra la distribución de canales 4G-LTE en la banda de 700 MHz adoptada por Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay. Venezuela es el único país del que no se conoce la canalización que usará, sin embargo, se asumirá que podría tener esta posible distribución.

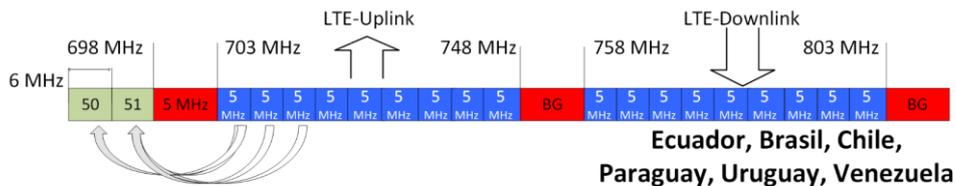


Figura 22. Canalización Banda de 700 MHz en Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela.

Como se puede observar en la figura anterior, en adyacencia a los servicios de televisión operaran los móviles con canales de ancho de banda de 5 MHz. Teniendo en cuenta que los límites de emisiones fuera de banda de un canal 4G-LTE de 5 MHz se extienden hasta 10 MHz más allá del borde superior o inferior del canal, se obtuvieron resultados para los tres primeros canales de 4G-LTE respecto a los dos últimos de televisión de ISDB-Tb. La siguiente tabla presenta los principales resultados para garantizar que las redes móviles no interfieran las redes de televisión: márgenes de protección entre una señal interferente 4G-LTE y una señal útil ISDB-Tb (MP); mínimas pérdidas de propagación entre un móvil LTE y la antenna receptora de televisión, las cuales se definen para dos casos: (1) cuando la ganancia de la antenna receptora víctima es 0 dB (MCL), y (2) para la máxima ganancia de la antenna del receptor víctima ($MCL_{efectivas}$); atenuación adicional requerida (AT), y distancia de protección entre un móvil LTE y la antenna de TV, en función del entorno: urbano ($DP - U$), y rural ($DP - R$).

Tabla 18. MP, MCL y DP entre 4G-LTE e ISDB-Tb, para una señal interferente 4G-LTE de 5 MHz y recepción fija sobre tejado.

Señal útil		ISDB-Tb-Canal 51			ISDB-Tb-Canal 50		
Señal Interferente Canal LTE de 5 MHz		LTE UL-1	LTE UL-2	LTE UL-3	LTE UL-1	LTE UL-2	LTE UL-3
Parámetro	MP(dB)	-33.2	-36.3	-39.5	-38.4	-40.7	-41.5
$P_{rx}^{ISDBT} = -77$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	63.8	60.7	57.5	58.6	56.3	55.5
	AT (dB)	7.8	4.7	1.5	2.6	0.3	0
	DP-U (m)	43	37	25	29	23	20
	DP-R(m)	52	37	27	30	23	22
$P_{rx}^{ISDBT} = -63$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	49.8	46.7	43.5	44.6	42.3	41.5
	AT (dB)	0	0	0	0	0	0
	DP-U (m)	20	7	5	6	4	4
	DP-R(m)	10	7	5	6	4	4
$P_{rx}^{ISDBT} = -53$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	39.8	36.7	33.5	34.6	32.3	31.5
	AT (dB)	0	0	0	0	0	0
	DP-U (m)	3	2	2	2	1	1
	DP-R(m)	3	2	2	2	1	1
$P_{rx}^{ISDBT} = -77$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	72.8	69.7	66.5	67.6	65.3	64.5
	AT (dB)	24.9	21.8	18.6	19.7	17.4	16.6
	DP-U (m)	53	49	45	47	44	43
	DP-R(m)	148	103	72	81	62	57
$P_{rx}^{ISDBT} = -63$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	58.8	55.7	52.5	53.6	51.3	50.5
	AT (dB)	10.9	7.8	4.6	5.7	3.4	2.6
	DP-U (m)	30	29	27	27	26	25
	DP-R(m)	33	30	28	28	27	26
$P_{rx}^{ISDBT} = -53$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	48.8	45.7	42.5	43.6	41.3	40.5
	AT (dB)	0.9	0	0	0	0	0
	DP-U (m)	25	7	5	5	4	4
	DP-R(m)	25	7	5	5	4	4

Como se puede observar en la tabla anterior, considerando el primer canal adyacente de 4G-LTE (LTE-UL-1), y el último de ISDB-Tb (canal 51), **la señal proveniente de un móvil 4G-LTE podría llegar a la entrada de un receptor ISDB-Tb hasta con 33.2 dB más de potencia respecto al nivel de señal útil de ISDB-Tb**, sin interferir la calidad del servicio de TV. En aquellas zonas geográficas donde el canal de televisión 51 no opere, pero si el canal 50, el móvil 4G-LTE podría llegar con un incremento de potencia de hasta 5 dB respecto al caso anterior, es decir el margen de protección es -38.4 dB. **Para el canal LTE-UL-3, el cual opera en las frecuencias de 713 MHz a 718 MHz, y el canal 50 de TV, el móvil podría llegar a la entrada del receptor de TV como máximo con un incremento de potencia de 41.5 dB respecto al nivel de señal útil de ISDB-Tb.**

En función del nivel de potencia recibida de los usuarios de televisión, se requerirán soluciones adicionales para garantizar la convivencia entre las redes móviles y de televisión. Si consideramos máxima potencia del móvil 4G-LTE (23 dBm), y usuarios ISDB-Tb recibiendo en el borde de cobertura de celda (-77 dBm):

- **Para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de TV, se requieren mínimas pérdidas de propagación entre un móvil 4G-LTE y una antena de TV entre 57 dB para el canal LTE-UL-3 y 63 dB para el canal LTE-UL-1, en el mejor de los casos o discriminación angular máxima.** En el caso contrario, se requieren un aumento de las MCL de 9 dB, debido a la ganancia máxima de la antena de TV. **Si comparamos estos valores con las MCL de referencia, podremos concluir que se requiere atenuaciones adicionales para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de TV como mínimo de 1.5 dB para LTE-UL-3, y como máximo de 24.9 dB para el canal LTE-UL-1, considerando en el último caso discriminación angular nula.** Por lo tanto, estas atenuaciones adicionales podrán ser obtenidas mediante el uso de un filtro en la entrada del receptor que permita mejorar el nivel de selectividad de canal adyacente en este valor. **Otra alternativa en lugar de la atenuación es garantizar distancias de protección entre un móvil 4G-LTE y una antena de TV entre 25 metros y 53 metros para un entorno urbano, y entre 27 metros y 148 metros para un entorno rural, en función del caso. En resumen, si se garantiza un umbral de potencia recibida de ISDB-Tb a la entrada del receptor de $P_{recibida}^{ISDB-TB} \geq -52 \text{ dBm}$ no habrá degradación de la calidad del servicio de televisión por operar el servicio móvil en adyacencia aun considerando siempre los casos más restrictivos.**

- Para garantizar el correcto funcionamiento del canal 50 de TV, se deberán garantizar **atenuaciones adicionales para el canal 4G-LTE-UL-1 entre 2.6 dB considerando discriminación angular máxima y 19.7 dB en el caso contrario**. Para otros canales adyacentes de LTE-UL-2 o LTE-UL-3, **solo se requieren atenuaciones adicionales como máximo de 17 dB, para el peor caso o discriminación angular nula**.

Si comparamos estos resultados con los obtenidos para Colombia, teniendo en cuenta que todos estos países han dividido la banda de 700 MHz en canales LTE de 5 MHz, pero con la diferencia que han adoptado diferentes estándares de televisión digital, podremos deducir: **En el peor de los casos, el móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia, usuario víctima recibiendo al umbral de sensibilidad y considerando discriminación angular nula o máxima directividad, Colombia requiere 6 dB menos de atenuación adicional que los países que adoptaron ISDB-Tb para garantizar la convivencia de los servicios móviles en la banda de 700 MHz**. Esta diferencia se puede justificar porque DVB-T2 es más robusto frente a ruido e interferencias que ISDB-Tb (ver capítulo 2), es decir, que DVB-T2 tolera más potencia interferente sin degradar la calidad del servicio primario a igualdad de condiciones de medida. **Además, la diferencia de SNR requerida para cada uno de los modos de transmisión de televisión adoptados es proporcional a esta diferencia. La SNR requerida para el modo de transmisión usado en Colombia es 16 dB para un modelo de canal RICE, mientras la SNR requerida para el modo de transmisión de los países que adoptaron ISDB-Tb es 21 dB**. Por último, el modo de transmisión de Colombia permite ofrecer ligeramente una mejor tasa de transmisión de 19.3 Mbps respecto a 18.1 del modo ISDB-Tb.

3.3.1.1.2.2. Argentina

La siguiente figura muestra las canalizaciones de 4G-LTE en la banda de 700 MHz adoptada por Argentina, en la cual el primer canal de LTE con un ancho de banda de 10 MHz esta adyacente a los servicios de TV con una banda de guarda de 5 MHz.

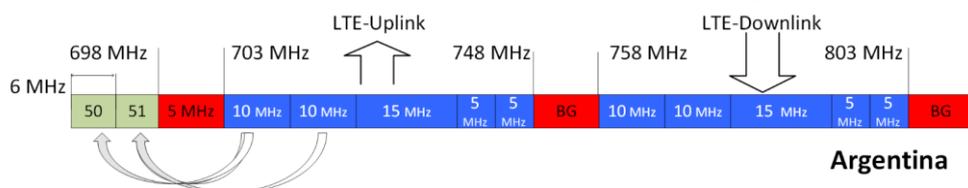


Figura 23. Canalización Banda de 700 MHz en Argentina.

Como se puede observar en la figura anterior, los dos primeros canales de 4G-LTE podrían causar interferencias sobre los últimos canales de televisión de las redes ISDB-Tb, teniendo en cuenta que los canales de TV se encuentran dentro de sus límites de emisiones fuera de banda (15 MHz más allá del borde superior o inferior del canal). La siguiente tabla presenta los resultados para garantizar que las redes móviles con un ancho de banda de 10 MHz no interfieran las redes de televisión bajo el estándar ISDB-Tb con un ancho de banda de 6 MHz: márgenes de protección entre una señal interferente LTE y una señal útil ISDB-Tb (MP); mínimas pérdidas de propagación entre un móvil LTE y la antena receptora de televisión, las cuales se definen para dos casos: (1) cuando la ganancia de la antena receptora víctima es 0 dB (MCL), y (2) para máxima ganancia de la antena del receptor víctima (MCL efectivas); atenuación adicional requerida (AT), y distancia de protección entre un móvil LTE y la antena de TV, en función del entorno: urbano (U), y rural (R).

Los resultados determinan que un móvil 4G-LTE con un ancho de banda de 10 MHz podría transmitir hasta 34.8 dB más de potencia respecto al canal 51 de TV a la entrada del receptor, y no existirá interferencia. Para aquellas zonas geográficas donde solo opera el canal 50, un móvil 4G-LTE podría transmitir hasta 6 dB más de potencia respecto al caso anterior, es decir, el margen de protección entre el canal 50 de TV y el segundo canal adyacente de LTE-UL-2 es -40.8 dB.

Si comparamos estos resultados con la canalización anterior, los márgenes de protección son ligeramente más restrictivos ~ 1 dB entre un canal ISDB-Tb y un canal LTE con un ancho de banda de 10 MHz respecto a un canal de 5 MHz. Por lo tanto, el impacto de las redes móviles 4G-LTE con canalizaciones de 5 MHz y 10 MHz sobre las redes de televisión bajo el estándar ISDB-Tb, se podrá considerar muy parecido y requiriendo soluciones adicionales solo en usuarios cerca del borde de cobertura de celda, tal y como se detalló en la sección anterior.

Tabla 19. MP, MCL, AT y DP entre 4G-LTE e ISDB-Tb, para una señal interferente 4G-LTE de 10 MHz y recepción fija sobre tejado.

Señal útil Canal ISDB-Tb de 6 MHz		ISDB-Tb- Canal 51		ISDB-Tb- Canal 50	
Señal Interferente Canal LTE de 10 MHz		LTE UL-1	LTE UL-2	LTE UL-1	LTE UL-2
Parámetro	MP(dB)	-34.8	-38.4	-36.5	-40.8
$P_{rx}^{ISDBT} = -77$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	62.2	58.6	60.5	56.2
	AT (dB)	6.2	2.6	4.5	0.2
	DP-U (m)	41	29	36	23
	DP-R(m)	44	29	36	24
$P_{rx}^{ISDBT} = -63$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	48.2	44.6	46.5	42.2
	AT (dB)	0	0	0	0
	DP-U (m)	9	6	7	4
	DP-R(m)	9	6	7	4
$P_{rx}^{ISDBT} = -53$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	38.2	34.6	36.5	32.2
	AT (dB)	0	0	0	0
	DP-U (m)	3	2	2	1
	DP-R(m)	3	2	2	1
$P_{rx}^{ISDBT} = -77$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	71.2	67.6	69.5	65.2
	AT (dB)	23.3	19.7	21.6	17.3
	DP-U (m)	51	47	49	44
	DP-R(m)	123	81	101	62
$P_{rx}^{ISDBT} = -63$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	57.2	53.6	55.5	51.2
	AT (dB)	9.3	5.7	7.6	3.3
	DP-U (m)	31	29	30	27
	DP-R(m)	32	29	30	27
$P_{rx}^{ISDBT} = -53$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	47.2	43.6	45.5	41.2
	AT (dB)	0	0	0	0
	DP-U (m)	8	5	6	4
	DP-R(m)	8	5	6	4

3.3.1.1.2.4. Perú

La siguiente figura muestra las canalizaciones de 4G-LTE en la banda de 700 MHz adoptada por Perú, la cual fue dividida en tres canales 4G-LTE de ancho de banda de 15 MHz.



Figura 25. Canalización Banda de 700 MHz en Perú.

Como se puede observar en la figura anterior, los dos primeros canales de 4G-LTE podrían causar interferencias sobre los últimos canales de televisión de las redes ISDB-Tb, teniendo en cuenta que los canales de TV se encuentran dentro de sus límites de emisiones fuera de banda, los cuales son 20 MHz más allá del borde superior o inferior del canal. La siguiente tabla presenta los resultados para garantizar que las redes móviles con un ancho de banda de 15 MHz no interfieran las redes de televisión bajo el estándar ISDB-Tb con un ancho de banda de 6 MHz. **Los resultados demuestran que se requieren atenuaciones adicionales entre 4 dB y 23 dB para garantizar el funcionamiento del canal 50 y 51 de TV de emisiones interferentes del canal LTE-UL-1, en el peor de los casos o discriminación angular nula, y en función del caso de estudio de adyacencia.** Cuando consideramos discriminación angular máxima, solo se requieren atenuaciones adicionales entre 1.5 dB y 6 dB, en función del caso de estudio, para usuarios víctima ISDB-Tb al borde de cobertura de celda ($P_{rx}^{ISDB-Tb} = -77 \text{ dBm}$). **Las atenuaciones adicionales podrán ser conseguidas mediante la implementación de un filtro entre la salida de la antena de TV y antes de la cabecera de distribución que permita mejorar el nivel de selectividad en canal adyacente del receptor por este valor.**

Otra alternativa a la necesidad de filtrado adicional es garantizar distancias de protección entre el móvil LTE y la antena de TV **entre 28 metros y 51 metros para un entorno urbano, y entre 28 metros y 119 metros para un entorno rural, en función del caso de estudio, para mayor detalle ver la siguiente tabla. No obstante, estas distancias son difíciles de garantizar, teniendo en cuenta que es difícil controlar las posiciones de las personas en redes móviles.**

Tabla 20. MP, MCL, AT y DP entre 4G-LTE e ISDB-Tb, para una señal 4G-LTE de 15 MHz y recepción fija sobre tejado.

Señal útil Canal ISDB-Tb de 6 MHz		ISDB-Tb-Canal 51		ISDB-Tb- Canal 50
Señal Interferente Canal LTE de 15 MHz		LTE UL-1	LTE UL-2	LTE UL-1
Parámetro	MP(dB)	-35.1	-35.7	-39.5
$P_{rx}^{ISDBT} = -77$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	61.9	61.3	57.5
	AT (dB)	5.9	5.3	1.5
	DP-U (m)	41	40	25
	DP-R(m)	42	39	25
$P_{rx}^{ISDBT} = -63$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	47.9	47.3	43.5
	AT (dB)	0	0	0
	DP-U (m)	8	8	5
	DP-R(m)	8	8	5
$P_{rx}^{ISDBT} = -53$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 0$ dbi	MCL (dB)	37.9	37.3	33.5
	AT (dB)	0	0	0
	DP-U (m)	3	3	2
	DP-R(m)	3	3	2
$P_{rx}^{ISDBT} = -77$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	70.9	70.3	66.5
	AT (dB)	23	22.4	18.6
	DP-U (m)	51	50	45
	DP-R(m)	119	111	72
$P_{rx}^{ISDBT} = -63$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	56.9	56.3	52.5
	AT (dB)	9	8.4	4.6
	DP-U (m)	31	31	28
	DP-R(m)	32	32	28
$P_{rx}^{ISDBT} = -53$ dBm $G_{rx}^{Antena} = 9$ dbi	MCL (dB)	46.9	46.3	42.5
	AT (dB)	0	0	0
	DP-U (m)	8	7	5
	DP-R(m)	8	7	5

3.3.1.2 Redes de televisión en recepción en interiores

La siguiente tabla muestra los márgenes de protección, las mínimas pérdidas de propagación y las distancias de protección entre un móvil 4G-LTE y un receptor de televisión en el interior de una vivienda. Los resultados fueron obtenidos tanto para el estándar de televisión DVB-T2 como ISDB-Tb, y diferentes anchos de banda de la señal 4G-LTE, en función de la canalización escogida por cada país.

Para garantizar la correcta emisión del canal 51 de TV en adyacencia a un móvil LTE con una banda de guarda de 5 MHz, Colombia que representa el mejor de los casos, deberá garantizar distancias de protección como mínimo de 6.7 metros, y en el peor de los casos para países como Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela, se deberán garantizar distancias como mínimo de 10.3 metros, considerando que el móvil 4G-LTE está transmitiendo a la máxima potencia ($P_{tx}^{LTE-UE} = 23 \text{ dBm}$), y está ubicado en la misma sala donde se encuentra el receptor de TV. Para aquellas zonas geográficas donde solo opere el canal 50 de TV, estas distancias se verían reducidas entre 2.8 metros (como mínimo 3.9 metros, para Colombia) y 2 metros (como mínimo 8.3 metros, para Perú). Por lo tanto, un móvil LTE transmitiendo a la máxima potencia, y ubicado dentro del interior de una vivienda junto a un receptor de televisión es un caso crítico, ya que estas distancias serán difíciles de conseguir sin ninguna solución adicional.

Un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia, y ubicado en diferente sala donde se encuentra el receptor de TV, considerando unas pérdidas adicionales de penetración de 8 dB [17], para la canalización de Colombia se requiere distancias de protección entre el primer canal adyacente de 4G-LTE y el canal 50 de TV de 1.4 metros, y 2.6 metros para el canal 51 de TV. En los países que adoptaron el estándar ISDB-Tb, en el peor de los casos, para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de TV respecto al primer canal adyacente de LTE con 5 MHz de ancho de banda, se requieren distancias de protección de 4.3 metros. Para el canal 50 de TV donde la banda de guarda con el primer canal adyacente es de 11 MHz, el caso más restrictivo es para anchos de banda LTE de 15 MHz, el cual requiere distancias de protección de 3.3 metros.

Por último, en el caso de estudio que el móvil 4G-LTE transmitiera con una potencia menor (valores típicos de 2 dBm), la distancia de protección se vería reducida a distancias ≤ 1 metro para la mayor parte de los casos de estudio, a excepción del caso de estudio del canal ISDB-Tb 51 que alcanzaría una distancia mínima de protección de 1.3 metros en el peor de los casos, canal LTE con 5 MHz de ancho de banda.

Tabla 21. MP, MCL, y DP entre 4G-LTE y DVB-2 e ISDB-Tb, para diferentes anchos de banda 4G-LTE y recepción en interiores.

Señal útil		Canal 51		Canal 50		
Señal Interferente- 4G-LTE		UL1	UL2	UL1	UL2	
LTE 5 MHz DVB-T2		MP (dB)	-37.8	-42.8	-42.9	-43
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Misma Sala	MCL (dB)	46.9	40.9	40.8	40.7
		DP (m)	6.7	3.8	3.9	3.8
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	38.9	32.9	32.8	32.7
		DP (m)	2.6	1.5	1.4	1.3
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 2$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	28.9	22.9	22.8	22.7
DP (m)		0.9	0.5	0.5	0.4	
LTE 5 MHz ISDB-Tb		MP (dB)	-30.9	-34.7	-35.5	-37
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Misma Sala	MCL (dB)	50.1	46.3	45.5	44
		DP (m)	10.3	7	6.2	5.4
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	42.1	38.3	37.5	36
		DP (m)	4.3	2.8	2.5	2.1
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 2$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	32.1	28.3	27.5	26
DP (m)		1.3	0.9	0.8	0.7	
LTE 10 MHz ISDB-Tb		MP (dB)	-32.5	-34.5	-33.9	-37.7
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Misma Sala	MCL (dB)	48.5	46.5	47.1	43.3
		DP (m)	9	7.2	7.7	5.9
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	40.5	38.5	39.1	35.3
		DP (m)	3.6	2.9	3.1	2.3
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 2$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	30.5	28.5	29.1	25.3
DP (m)		1.1	0.9	1	0.7	
LTE 15 MHz ISDB-Tb		MP (dB)	-32.8	-36.4	-33.2	-36
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Misma Sala	MCL (dB)	48.2	44.6	47.8	44
		DP (m)	8.7	5.8	8.3	5.6
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 23$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	40.2	36.6	39.8	36
		DP (m)	3.5	2.3	3.3	2.1
	$P_{tx}^{LTE-UE} = 2$ dBm Diferente Sala	MCL (dB)	30.2	26.6	29.8	26
DP (m)		1,1	0,7	1	0,6	

3.3.1.3 Impacto de filtros paso bajo en el receptor

Teniendo en cuenta que se requieren atenuaciones adicionales entre un móvil 4G-LTE y la antena de TV de como mínimo de 19 dB para DVB-T2, y como máximo 25 dB para ISDB-Tb, para garantizar el funcionamiento del canal 51 de TV, considerando los casos más restrictivos. Se comprobó con filtros la atenuación adicional que proporcionaban estos ubicados a la entrada del receptor de televisión. La siguiente figura muestra la respuesta en frecuencia de tres filtros de diferentes fabricantes diseñados para la canalización de Sudamérica, es decir para la banda de 700 MHz.

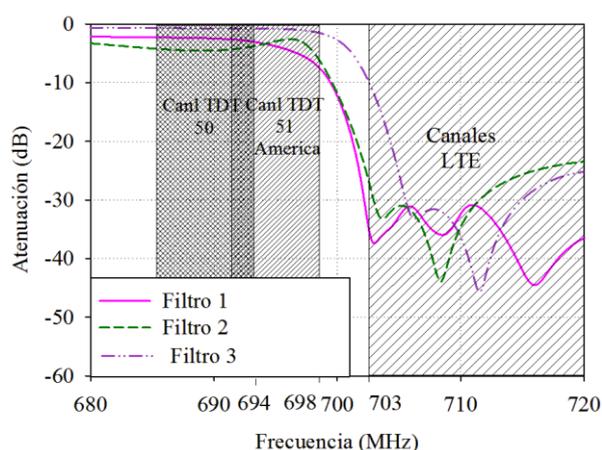


Figura 26. Respuesta en frecuencia de tres filtros paso-bajo para la canalización de Sudamérica (banda de 700 MHz).

A partir de la respuesta en frecuencia de los filtros, la siguiente tabla resume la atenuación total conseguida para cada uno de los filtros para una banda de guarda de 5 MHz, es decir, canal 51 de TV, y LTE-U1, y para una de 11 MHz, banda de guarda entre el canal 50 de TV, y el canal LTE-U1.

Tabla 22. Atenuación filtros paso bajo para la canalización de Sudamérica.

Frecuencia o Canal	Atenuación Filtro Paso Bajo (dB)				
	470 – 686 MHz	Canal 50	Canal 51	BG : 5 MHz	BG : 11 MHz
Filtro 1	2.2	2.7	3.2	23	24
Filtro 2	2.2	3	3.1	25.1	26.1
Filtro 3	3.3	4.8	6.4	29.2	31

Como se puede observar en la tabla anterior, para una banda de guarda de 5 MHz, los filtros consiguen una mayor caída fuera de banda y se pueden conseguir atenuaciones adicionales como mínimo entre 23 dB para el filtro 1, y como máximo 30 dB con el mejor de los filtros. Al aumentar la banda de guarda hasta 11 MHz, solo se consigue mejorar la atenuación en tan solo 1 dB, alcanzándose como máximo una atenuación de 31 dB. **No obstante, las atenuaciones conseguidas son suficientes para poder solventar los posibles problemas de interferencia que podrían ocurrir en Sudamérica en la banda de 700 MHz, los cuales, en el peor de los casos, requieren una atenuación de 25 dB para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de ISDB-Tb.** Por lo tanto, se demuestra el uso de un filtro paso bajo como una solución óptima para garantizar el correcto funcionamiento de las redes de televisión y móvil en la banda de 700 MHz en Sudamérica. Por último, es importante resaltar que también los canales deseados sufrirán las siguientes atenuaciones, debido a las imperfecciones de las respuestas en frecuencia de los filtros: banda de frecuencias de 470 MHz a 686 MHz, atenuación como máximo de 3.3 dB; canal útil 50 de TV, atenuación como máximo de 4.8 dB, y, canal útil 51 de TV, atenuación como mínimo de 3.2 dB y como máximo de 6.4 dB

3.3.2. Impacto de la Redes de Televisión sobre las Móviles

En las secciones anteriores, hemos evaluado el impacto de las redes celulares sobre las de televisión en Sudamérica, y asimismo hemos planteado recomendaciones que garanticen el correcto funcionamiento de las redes. No obstante, se deberá evaluar el caso contrario, es decir, el impacto de las redes de televisión sobre las redes móviles para una banda de guarda entre tecnologías de 5 MHz. Las siguientes consideraciones han sido hechas:

- Tres niveles diferentes de potencias interferentes de las redes de televisión, teniendo en cuenta valores reales de redes de TDT desplegadas en Sudamérica. Los valores de PIRE tenidas en cuenta son: 84 dBm (250 kW), 73 dBm (20 kW) y 67 dBm (5 kW).
- Cuatro alturas típicas de estaciones de televisión desplegadas en Sudamérica: 120 m, 100 m, 80 m y 60 m. Para las redes móviles se consideró que los e-NodeB están ubicados a 30 metros sobre el nivel del suelo [92] [95].
- Se consideraron cuatro niveles típicos de relaciones de interferencia en canal adyacente (*ACIR*, en inglés). Este parámetro tiene en cuenta las imperfecciones de las máscaras espectrales tanto en transmisión como en recepción. Teniendo en cuenta que las máscaras espectrales de los transmisores de televisión tienen niveles altos de atenuación en adyacencia, el valor de *ACIR* dependerá principalmente del valor

de atenuación o selectividad fuera de banda del receptor víctima, el cual es caracterizado por el ACS. Los valores de ACIR considerados son: 50 dB, 60 dB, 70 dB y 80 dB [79] [92].

3.3.2.1 Efecto del ACIR y la altura de la estación de TDT

La siguiente figura muestra la distancia de protección requerida para un entorno urbano y rural entre una estación interferente de TV con potencia de 84 dBm y un e-NodeB víctima (transmite el móvil y recibe la estación base), en función del nivel de ACIR y de la altura de la antena de TV.

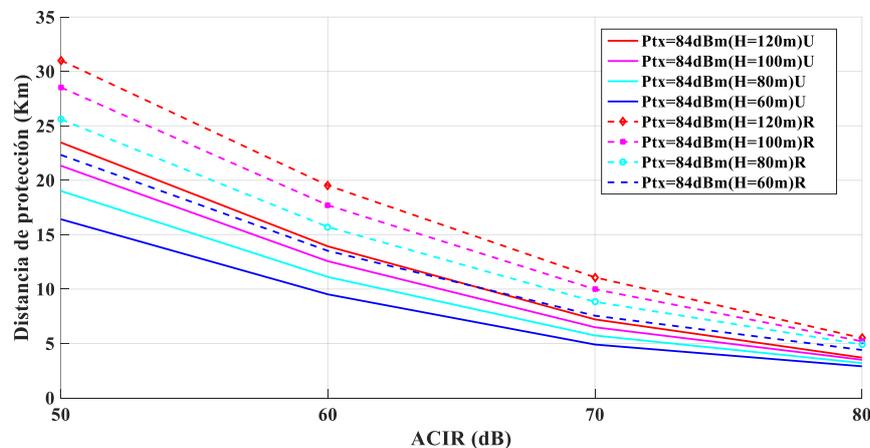


Figura 27. DP entre estación base de TDT y e-NodeB, en función del ACIR y altura del transmisor de TDT, para la banda de 700 MHz en Sudamérica.

Como se puede observar en la figura anterior, en función de la mejora de la relación de interferencia en canal adyacente o ACIR, se podrán conseguir reducciones en las distancias de protección de media 8.2 km para una mejora de 10 dB de ACIR, y hasta de 16.7 km para una mejora de 30 dB de ACIR, es decir, un valor de ACIR de 80 dB en lugar de 50 dB. Por otro lado, a menor altura del transmisor de TDT respecto a la altura de la antena del e-NodeB, las distancias de protección son menores, por ejemplo, las distancias de protección se reducen en media 1.3 km por cada 20 metros de reducción de la altura de la antena transmisora. Específicamente, se tendrán que garantizar las siguientes distancias de protección entre una estación de TDT y un e-NodeB:

- Para un entorno urbano, considerando altura del transmisor de TV de 120 m y un ACIR=50 dB, la distancia de protección entre la estación de TV y el e-NodeB es de 23 km, y de 2.9 km para una altura del transmisor de TV de 60 m y un ACIR=80 dB.
- Para un entorno rural, considerando altura del transmisor de TV de 120 m y un ACIR=50 dB, la distancia de protección entre la estación de TV y el e-NodeB se incrementa hasta los 31 km, y 4.4 km para una altura del transmisor de TV de 60 m y un ACIR=80 dB.

3.3.2.2 Efecto de la PIRE de la estación de TDT

En el apartado anterior, se comprobó que se requieren grandes distancias de protección entre 23 km y 2.9 km, para un entorno urbano, para garantizar que una estación de TV de alta potencia no interferirá a un e-NodeB. No obstante, en función del área de servicio de televisión, las estaciones de TDT podrán emitir con una menor potencia. La siguiente figura muestra la distancia de protección requerida para un entorno urbano y rural entre una estación interferente de televisión y un e-NodeB víctima, considerando tres niveles diferentes de potencia de TDT: 84 dBm, 73 dBm y 67 dBm, y en función del nivel del ACIR y de la altura de la antena de televisión.

Los resultados demuestran que considerar una PIRE de la estación de TDT de 67 dBm en lugar de 84 dBm, la distancia de protección puede mejorar entre 2 km y 14 km, considerando un ACIR de 80 dB y 50 dB, y una altura de la estación de TV 60 metros y 120 metros para un entorno urbano. Si consideramos un ACIR entre 60 dB y 80 dB para estaciones de TV con niveles de potencia menores al máximo, es decir, con potencias de 74 dBm y 67 dBm, el riesgo de interferencia sobre los e-NodeB será bajo. Bajo estas suposiciones, **se tendrán que garantizar distancias de protección entre 1 km y 6 km, en función del ACIR, la potencia y la altura de la estación de TDT.** Estas distancias son viables conseguirlas para el caso de estaciones de TDT en Sudamérica, teniendo en cuenta que las estaciones no se encuentran localizadas en el casco urbano de la zona de servicio debido a la orografía montañosa que caracteriza los países de Sudamérica.

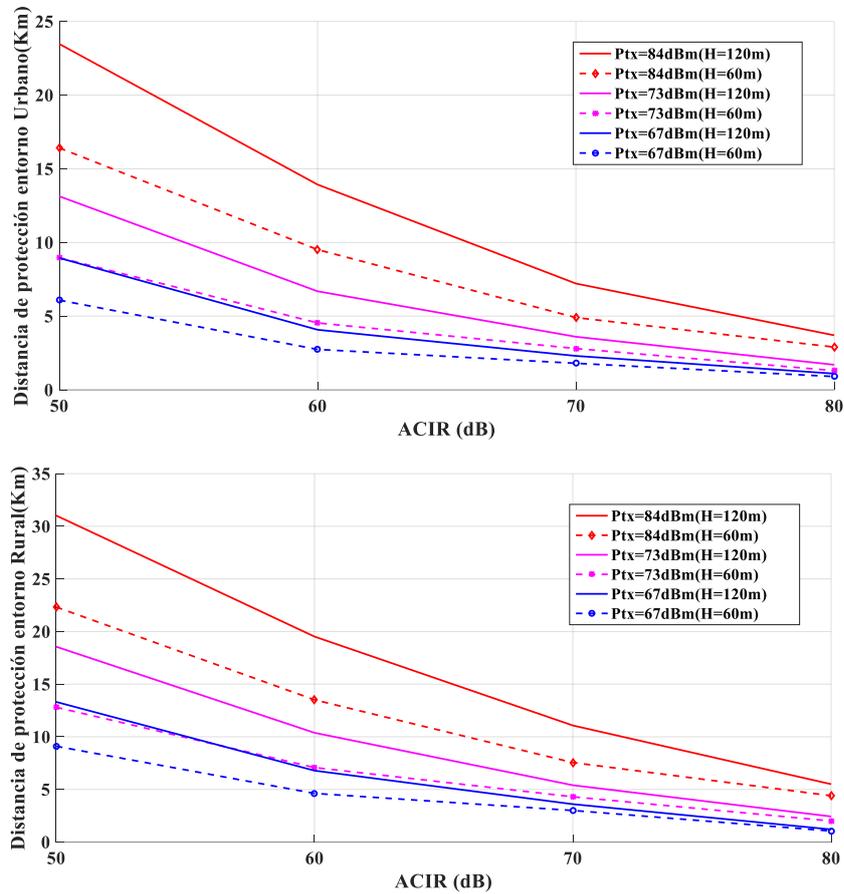


Figura 28. DP entre estación base de TDT y e-NodeB para un entorno urbano y rural, en función del ACIR y potencia del transmisor de TDT.

La siguiente tabla resume las distancias concretas que se deberán cumplir para garantizar la convivencia entre redes de TDT y móviles, en función de los parámetros considerados de las estaciones de TDT:

Tabla 23. MCL y DP entre una estación base de TDT y e-NodeB para un entorno urbano y rural, en función del ACIR y potencia de TDT, para la banda 700 MHz en Sudamérica.

Tipo de Entorno		ACIR (dB)			
Urbano		50.0	60.0	70.0	80.0
PIRE= 84 dBm (250 KW)	MCL (dB)	139.0	129.0	119.0	109.0
	DP, Htx=120 m (km)	23.5	13.9	7.2	3.7
	DP, Htx=60 m (km)	16.4	9.5	4.9	2.9
PIRE= 73 (20 KW)	MCL (dB)	128.0	118.0	108.0	98.0
	DP, Htx=120 m (km)	13.1	6.7	3.6	1.7
	DP, Htx=60 m (km)	9.0	4.5	2.8	1.3
PIRE= 67 (5 KW)	MCL (dB)	122.0	112.0	102.0	92.0
	DP, Htx=120 m (km)	8.9	4.1	2.3	1.1
	DP, Htx=60 m (km)	6.1	2.7	1.8	0.9
Rural		50.0	60.0	70.0	80.0
PIRE= 84 dBm (250 KW)	MCL (dB)	139.0	129.0	119.0	109.0
	DP, Htx=120 m (km)	31.0	19.5	11.1	5.5
	DP, Htx=60 m (km)	22.3	13.5	7.6	4.4
PIRE= 73 (20 KW)	MCL (dB)	128.0	118.0	108.0	98.0
	DP, Htx=120 m (km)	18.6	10.4	5.4	2.4
	DP, Htx=60 m (km)	12.8	7.1	4.3	2.0
PIRE= 67 (5 KW)	MCL (dB)	122.0	112.0	102.0	92.0
	DP, Htx=120 m (km)	13.3	6.8	3.6	1.2
	DP, Htx=60 m (km)	9.1	4.6	3.0	1.1

3.3.2.3 Efecto de la ganancia del e-NodeB

Otro aspecto importante es si la señal interferente proveniente de la estación de televisión llega a la antena receptora víctima del e-NodeB con un ángulo adecuado que garantiza que la discriminación angular sea nula y la directividad máxima. Con estas consideraciones, las distancias de protección serán más restrictivas que las obtenidas en los casos anteriores, las cuales se consideraba discriminación máxima y directividad nula. La siguiente figura muestra las distancias de protección entre una estación de televisión y un e-NodeB, considerando discriminación angular nula y directividad máxima ($MCL_{efectivas}$), y sin considerarla (MCL), para diferentes potencias y alturas de las estaciones de televisión.

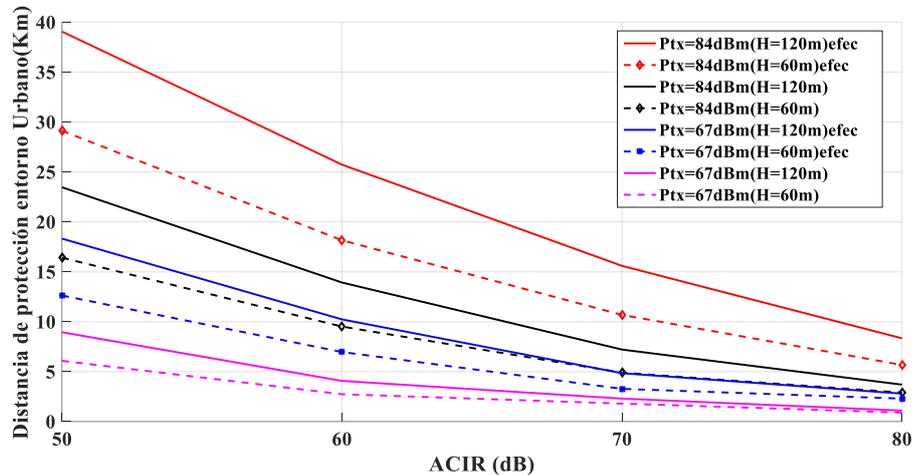


Figura 29. DP entre una estación de TDT y e-NodeB, teniendo en cuenta máxima discriminación angular ($MCL_{efectivas}$), y discriminación angular nula (MCL), en función del nivel de potencia y de la altura de la antena de la estación de TV.

Como se puede observar en la figura anterior, se tendrán que garantizar distancias de protección entre una estación de TV y un e-NodeB de 39 km, considerando un ACIR de 50 dB, altura de 120 metros, potencia de la estación de TV de 84 dBm y discriminación angular nula o directividad máxima del e-NodeB. Si lo comparamos esta distancia con la obtenida para discriminación angular máxima, se requiere un incremento de la distancia de protección de 15 km. Conforme aumenta el nivel de ACIR, y para altura de la antena de televisión de 60 metros, estas diferencias se reducen hasta 2.7 km. Por ejemplo, una estación interferente de TDT con altura de 60 metros, y ACIR de 80 dB, tendrá que garantizar distancias de protección de 5.6 km, consideración discriminación angular nula, o de 2.9 km si la discriminación angular es máxima. Si el nivel de potencia de la estación de TV es menor, para una potencia de 67 dBm, la distancia de protección es 18 km y 2.3 km, considerando un ACIR de 50 dB y 80 dB, y una altura de la estación de TV 120 metros y 60 metros.

Es importante resaltar, que estas distancias de protección deberán ser validadas mediante medidas de campo en cada país de Sudamérica, debido a que en función de la topografía y orografía de cada país estas distancias tendrán una variación.

3.4. Conclusiones

En este capítulo, se abordó la convivencia entre los servicios de televisión digital y móvil de cuarta generación en la banda de 700 MHz en Sudamérica. Las siguientes consideraciones fueron hechas para garantizar la convivencia entre estos dos servicios: banda de guarda de 5 MHz entre los servicios de televisión y móviles; ancho de banda de 6 MHz de un canal de televisión; las redes de televisión se desplegarán principalmente para los estándares DVB-T2 e ISDB-Tb.

Los resultados demuestran que los escenarios de estudio que evidencian un mayor riesgo de interferencia para garantizar la convivencia entre los servicios móviles y de televisión son:

- **Una estación de TV interfiriendo al receptor de un e-NodeB.** Este es el caso más crítico de todos los escenarios de estudio, teniendo en cuenta las altas potencias de las estaciones de TV, y que tanto las estaciones de televisión y móvil están ubicadas a grandes alturas.
- **Un móvil 4G-LTE interfiriendo a un receptor de TV, con la particularidad que tanto el transmisor interferente y el receptor víctima están ubicados en el interior de una vivienda.** Es un caso crítico debido a que ambos se encuentran ubicados en la misma sala del interior de la vivienda, el móvil transmite a la máxima potencia y el usuario víctima decodifica el servicio de televisión en el umbral de cobertura de celda.
- **Un móvil 4G-LTE interfiriendo a un receptor de TV, en el caso específico que el usuario víctima recibe la señal de televisión con una antena ubicada en la azotea de un edificio.** Este caso solo es crítico para usuarios víctima en el borde de cobertura de celda que decodifiquen los canales 50 y 51 de TV, y el móvil transmitiendo a la máxima potencia.

A continuación, se detallan las principales recomendaciones para garantizar el correcto funcionamiento de las redes conviviendo en adyacencia a través de dos enfoques. En primer lugar, presentamos los resultados de los márgenes de protección que se deben cumplir para garantizar la calidad del servicio primario, es decir, la diferencia de potencia que se debe garantizar entre el transmisor interferente y el receptor víctima medido a la entrada del decodificador de TV.

En Colombia, los márgenes de protección que se deben garantizar para que un móvil 4G-LTE con ancho de banda de 5 MHz no interfiera un receptor de televisión DVB-T2 son:

- En función de la carga de tráfico del móvil 4G-LTE, un receptor de televisión DVB-T2 tolera más o menos potencia interferencia, siendo el peor caso para estado de carga idle del móvil 4G-LTE, debido principalmente a la alta variabilidad temporal de la señal y, por ende, a las altas potencias de pico que se producen durante pequeños instantes temporales. Respecto a la separación en frecuencia entre DVB-T2 y 4G-LTE, para una banda de guarda de 5 MHz, la cual es la mínima en Sudamérica, los márgenes de protección son -40.3 dB para una señal 4G-LTE idle, -50.4 dB para una 4G-LTE 50%, y -53.7 dB para una señal 4G-LTE 100%, considerando un modelo de canal AWGN. Por lo tanto, la señal desde un móvil 4G-LTE con carga al 50% o 100%, podría transmitir por lo mínimo 10 dB más de potencia que un móvil que se encuentre en estado idle. Si aumentamos la banda de guarda a 11 MHz, es decir, el impacto del primer canal adyacente 4G-LTE sobre el canal 50 de TV, los márgenes de protección mejoran hasta en 4 dB para una señal 4G-LTE en estado idle.
- En función del tipo de entorno, los márgenes de protección entre una señal útil DVB-T2 y una señal interferente 4G-LTE son en media 0.9 dB más restrictivos para un entorno de recepción fija sobre tejado o modelo de canal Rice para la señal DVB-T2, y 2 dB más restrictivos para un entorno de recepción en interiores o modelo de canal Rayleigh, respecto a los márgenes de protección medidos cuando consideramos un modelo de canal AWGN.

Para los países de Sudamérica que adoptaron el estándar ISDB-Tb, y que también han dividido la banda de 700 MHz en canales 4G-LTE de ancho de banda de 5 MHz al igual que Colombia, en particular para Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay, se puede concluir que:

- El margen de protección entre el canal 51 ISDB-Tb y el primer canal 4G-LTE de ancho de banda de 5 MHz es 33.2 dB. Por lo tanto, un móvil 4G-LTE podría transmitir hasta 33.2 dB más de potencia respecto al nivel de señal útil a la entrada de un receptor ISDB-Tb, sin degradar la calidad del canal de TV. Para aquellas zonas geográficas donde opera el canal 50, el móvil 4G-LTE podría llegar con un incremento de potencia de hasta 5 dB respecto al caso anterior. En el mejor de los casos, para el canal LTE-UL-3 operando en 713 MHz a 718 MHz, el móvil podría llegar a la entrada del receptor de TV como máximo con un incremento de potencia de 41.5 dB respecto al nivel de señal del canal 50 TV.

En segundo lugar, deducimos recomendaciones sobre mínimas pérdidas de propagación entre el transmisor interferente y receptor víctima, distancias de protección, niveles de atenuación adicionales requeridos para la convivencia entre las redes, considerando los parámetros técnicos de operación reales de cada una de las redes desplegadas en Sudamérica. Para el caso de Colombia, es decir, para una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado, y un móvil 4G-LTE con ancho de banda de 5 MHz transmitiendo a la máxima potencia de 23 dBm:

- Para usuarios de TV en el borde de cobertura de celda, es decir, para un umbral de potencia recibida de -78 dBm, el cual garantiza el 95% de ubicaciones en el modo de transmisión del operador RTVC de Colombia, se deberán garantizar mínimas pérdidas de propagación entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV de 57.8 dB para el canal 51, y 53.5 dB para el canal 50, considerando discriminación angular máxima o ganancia por directividad nula, esto ocurre cuando la señal de 4G-LTE llega a la antena de TV con un ángulo superior a 60°. En el caso contrario, el cual sería el peor de los casos, discriminación angular nula o ganancia por directividad máxima, se deberán garantizar las mínimas pérdidas de propagación entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV de 66.8 dB para el canal 51, y 62.5 dB para el canal 50, respectivamente.
- Si comparamos las MCL requeridas entre el móvil y la estación de TV con valores de MCL de referencia, las cuales son obtenidos para mínima distancia entre el móvil y la antena de TV, se requieren atenuaciones adicionales de 18.9 dB considerando una discriminación angular nula, si lo comparamos con una MCL de referencia de 47 dB, y de 2.5 dB considerando una discriminación angular máxima, si lo comparamos con una MCL de referencia de 56 dB. Las atenuaciones requeridas podrían ser obtenidas mediante un filtro externo, es decir, un filtro ubicado entre la salida de la antena de TV y antes de la etapa de amplificación y distribución, con el objetivo de mejorar el nivel de selectividad en canal adyacente del receptor.
- Otra alternativa al filtro externo para usuarios víctima al borde de cobertura de celda, es garantizar distancias de protección entre un móvil 4G-LTE y la antena receptora de TV, las cuales son deducidas directamente de las MCL requeridas. Las distancias para garantizar el correcto funcionamiento de los canales 51 y 50 de TV, se encuentran entre 47 y 42 metros para un entorno urbano, y entre 80 y 52 metros para un entorno rural, considerando ganancia por directividad máxima, es decir, el peor caso. Si esta ganancia es considerada nula, las distancias se reducen hasta en 29 metros para el canal 51.

- En otros casos de estudio, donde usuarios víctimas reciban la señal de televisión con un umbral mayor o igual al nivel de potencia recibida ($P_{rx}^{DVB-T2} \geq -59$ dBm), no se requiere ninguna atenuación adicional o ninguna solución para que las redes de televisión operen en adyacencia a las redes móviles en la banda de 700 MHz en Colombia.

Para Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela, es decir, para los países que desplegaran una red ISDB-Tb ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado, y un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia de 23 dBm:

- Para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de TV, se requieren mínimas pérdidas de propagación entre un móvil 4G-LTE de 5 MHz y la antena de TV entre 57 dB para el canal LTE-UL-3, y 63 dB para el canal LTE-UL-1, en el mejor de los casos o discriminación angular máxima. En el caso contrario o discriminación angular nula, las MCL aumentarían hasta en 9 dB, debido a la ganancia máxima de la antena de TV. En consecuencia, se requieren atenuaciones adicionales como máximo de 24.9 dB entre LTE-UL-1 y el canal 51 ISDB-Tb, si las comparamos con las MCL de referencia. Si esta atenuación adicional no puede ser garantizada, se deberán garantizar distancias de protección entre un móvil 4G-LTE y una antena de TV entre 25 metros y 53 metros para un entorno urbano, y entre 27 metros y 148 metros para un entorno rural, en función del caso de estudio. En resumen, si se garantiza un umbral de potencia recibida de ISDB-Tb a la entrada del receptor de $P_{recibida}^{ISDB-TB} \geq -52$ dBm, no habrá degradación de la calidad del servicio de televisión por operar el servicio móvil en adyacencia.
- Para garantizar el correcto funcionamiento del canal 50 de TV, se deberán garantizar atenuaciones adicionales para el primer canal 4G-LTE-UL-1 de 19.7 dB, en el peor de los casos o discriminación angular nula.

Si comparamos los países de Sudamérica que dividieron la banda de 700 MHz en canales 4G-LTE de 5 MHz, los países que adoptaron el estándar ISDB-Tb requieren 6 dB más de atenuación adicional que los que adoptaron el estándar DVB-T2, para garantizar el correcto funcionamiento de todos los canales de TV. La principal causa es que DVB-T2 es más robusto frente a ruidos e interferencias que ISDB-Tb (ver capítulo 2), es decir, que DVB-T2 tolera más potencia interferente sin degradar la calidad del servicio primario a igualdad de condiciones de medida. Además, la diferencia de SNR requerida para cada uno de los modos de transmisión entre ISDB-Tb y DVB-T2 es proporcional a esta diferencia. Es importante recordar que los modos de transmisión DVB-T2 e ISDB-Tb requerían una SNR de 16 dB y 21 dB, considerando un modelo de canal Rice.

Respecto a todos los países que adoptaron el estándar ISDB-Tb, se compararon los resultados de los países que dividieron la banda de 700 MHz en canales 4G-LTE de 5 MHz respecto a otras canalizaciones:

- Los márgenes de protección entre un canal útil ISDB-Tb de 6 MHz y un canal interferente 4G-LTE-10 MHz, es decir el caso de Argentina y Bolivia, son ligeramente más restrictivos ~ 1 dB que los obtenidos para un canal LTE-UL-5 MHz, como el caso de Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela. Por lo tanto, los resultados de MCL, AT, y DP obtenidos para canales 4G-LTE de 5 MHz son muy parecidos a los obtenidos para canales 4G-LTE de 10 MHz, y se deberán ajustar por este valor. En resumen, el impacto de las redes móviles 4G-LTE con canalizaciones de 10 MHz sobre las redes de TV bajo el estándar ISDB-Tb es perjudicial solo para usuarios víctima al borde de cobertura de celda.
- En el caso de Perú, donde dividió la banda en tres canales 4G-LTE de ancho de banda 15 MHz, los resultados demuestran que se requieren atenuaciones adicionales como máximo de 23 dB para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de TV, en el peor de los casos o discriminación angular nula. Las atenuaciones adicionales podrán ser conseguidas mediante la implementación de un filtro entre la salida de la antena de TV y antes de la cabecera de distribución que permita mejorar el nivel de selectividad en canal adyacente del receptor por este valor. Otra alternativa a la necesidad de filtrado adicional es garantizar distancias de protección entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV las cuales deben ser como mínimo entre 28 metros y 51 metros para un entorno urbano, y entre 28 metros y 119 metros para un entorno rural, en función del caso de estudio.

Es importante resaltar, que es difícil de garantizar las distancias de protección cuando un móvil es la fuente interferente y el usuario víctima recibe el servicio de TV a través de recepción fija sobre tejado, teniendo en cuenta que es difícil controlar las posiciones de las personas que usan los móviles.

En el caso de estudio de recepción en interiores, es decir, cuando el móvil 4G-LTE interfiere al receptor de TV, con la particularidad que ambos están ubicados en el interior de una vivienda, y el móvil 4G-LTE emite a la máxima potencia de 23 dBm, se deben tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Para que un móvil 4G-LTE no interfiera un receptor que decodifica el canal 51 de TV, considerando que ambos están ubicados en la misma sala en el interior de una vivienda, se deberán garantizar distancias de protección como mínimo de 6.7 metros para el caso de Colombia, el cual es el menos restrictivo. En el peor de los casos, como Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela, la distancia se vería incrementada hasta los 10.3 metros. Para aquellas zonas geográficas donde solo opere el canal 50 de TV, estas distancias se verían reducidas hasta 3.9 metros para Colombia, y hasta 8.3 metros para Perú.
- Un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia, y ubicado en diferente sala donde se encuentra el receptor de TV (considerando unas pérdidas adicionales de penetración de 8 dB), en el mejor de los casos, requiere distancias de protección para el primer canal adyacente de 4G-LTE de 1.4 metros para el canal 50 de TV, y de 2.6 metros para el canal 51 de TV, para la canalización colombiana. En el peor de los casos, canalización de Perú LTE-UL-15 MHz, se requiere distancias de protección entre 3.3 metros y 3.6 metros, para el canal 50 y 51 de TV, respectivamente.
- Por último, en el caso de estudio que el móvil 4G-LTE transmitiera con una potencia menor (valores típicos de 2 dBm), la distancia de protección se vería reducida a distancias ≤ 1 metro para la mayor parte de los casos de estudio, a excepción del caso de estudio del canal ISDB-Tb 51 que alcanzaría una distancia mínima de protección de 1.3 metros.

Teniendo en cuenta que se requieren atenuaciones adicionales entre un móvil 4G-LTE y la antena de TV, de como mínimo de 19 dB para DVB-T2, y como máximo 25 dB para ISDB-Tb, en el peor de los casos. Se comprobó con filtros la atenuación adicional que proporcionaban estos ubicados a la entrada del receptor de televisión. Para una banda de guarda de 5 MHz, es decir para garantizar la emisión del canal 51 de TV, los filtros externos consiguen una mayor caída fuera de banda y se pueden conseguir atenuaciones adicionales como mínimo entre 23 dB medidos para el filtro 1, y como máximo 30 dB con el mejor de los filtros. Al aumentar la banda de guarda hasta 11 MHz para garantizar la emisión del canal 50 de TV, solo se consigue mejorar la atenuación en tan solo 1 dB, alcanzándose como máximo una atenuación de 31 dB. No obstante, las atenuaciones conseguidas son suficientes para poder solventar los posibles problemas de interferencia que podrían ocurrir en Sudamérica en la banda de 700 MHz,

los cuales, en el peor de los casos, requieren una atenuación de 25 dB para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de ISDB-Tb. Por lo tanto, se demuestra el uso de un filtro paso bajo como una solución óptima para garantizar el correcto funcionamiento de las redes de televisión y móvil en la banda de 700 MHz en Sudamérica.

Por último, para que estaciones de TV que operen en el último canal de TV no interfieran el primer canal adyacente de los servicios móviles 4G-LTE, en el peor de los casos, se deberán garantizar distancias de protección entre la estación de TV y el receptor del e-NodeB de 23 km para un entorno urbano, considerando una estación de TV de altura de 120 metros con una PIRE de 84 dBm, y una relación de interferencia en canal adyacente o ACIR de 50 dB. A igualdad de consideraciones, para un entorno rural, esta distancia se vería incrementada hasta los 31 km. Si consideramos una altura de la estación de TV de 60 metros, y una mejora en la relación de interferencia en canal adyacente de 30 dB hasta alcanzar los 80 dB de ACIR, la cual depende principalmente del nivel de selectividad en canal adyacente del e-NodeB, se podrían reducir las distancias de protección hasta los 2.9 km y 4.4 km para un entorno urbano y rural, respectivamente. Por lo tanto, las distancias de protección varían en función de la potencia y altura de la estación de TV, y de la relación de interferencia en canal adyacente o ACIR.

- En función de la PIRE de la estación de TV, las distancias de protección entre una estación de TV y un e-NodeB son entre 1 km y 6 km, considerando un ACIR entre 60 dB y 80 dB, y niveles de PIRE de 67 dBm y 74 dBm en lugar de 84 dBm.
- En función de la altura del transmisor de TV respecto a la altura de la antena del e-NodeB, las distancias de protección se deducen en media 1.3 km por cada 20 metros de reducción de la altura de la antena transmisora.
- En función de la directividad del e-NodeB respecto a la estación de TV, se tendrán que garantizar distancias de protección entre una estación de TV y un e-NodeB de 39 km, considerando un ACIR de 50 dB, altura de 120 metros, PIRE de 84 dBm, y discriminación angular nula. Si lo comparamos con los resultados anteriores cuando consideramos discriminación angular máxima, la distancia de protección se incrementó en 15 km.

Capítulo 4

Compartición de espectro como futuro uso de la banda de televisión

En la actualidad, en la banda de televisión no todas las frecuencias atribuidas están ocupadas en todas las zonas geográficas o los usuarios no están viendo la televisión el 100% del tiempo, estas frecuencias libres son conocidas como espacios en blanco en la banda de televisión (*TV-White-Space*, en inglés). En este capítulo, se proponen dos potenciales casos de uso de compartición de espectro en la banda atribuida a los servicios de televisión después de los dividendos digitales, teniendo en cuenta que su uso futuro será discutido en el año 2023. En el primer caso de estudio, se propone la compartición de espectro entre femtoceldas LTE-A en interior de una vivienda operando en un μ -TV-White-Space co-canal o adyacente a una red DVB-T2 que ofrece cobertura en recepción fija sobre tejado. El segundo caso de estudio, propone el uso de los espacios en blanco para la compartición de espectro entre los servicios de internet de las cosas (*Internet of Things or IoT*, en inglés), bajo el estándar NB-LTE-IoT, como servicio secundario, y servicios de televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T2, como servicio primario. Lo que hace esta propuesta interesante es, por un lado, se optimiza eficientemente el uso de la banda de TV, y, por otro lado, se contribuye con nuevas bandas de frecuencias para cursar el tráfico de las tecnologías IMT-A tanto para servicios móviles como los de IoT, y en efecto, disminuir la brecha de espectro requerido para dar conectividad a millones de dispositivos.

4.1. Primer Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y LTE-A

El primer caso de compartición de espectro como uso futuro de la banda de TV propone que femtoceldas LTE-A en interior de una vivienda operen en un μ -TV-White-Space cocanal o adyacente a una red DVB-T2 que ofrece cobertura en recepción fija sobre tejado. Los μ -TV-White-Space son zonas geográficas en el interior de una vivienda u oficina donde dispositivos secundarios podrían reutilizar frecuencias inutilizadas de la banda de TV. La ausencia de la señal DVB-T2 en estas zonas se debe principalmente a dos motivos: frecuencias dentro de la banda de TV que no están siendo usadas en estas zonas geográficas; y frecuencias en uso, pero la señal es obstruida por difusores en el entorno donde se propaga, o hay ausencia de cobertura por el diseño propio de la misma red. Hemos considerado que las femtoceldas operan solo en el enlace descendente en los espacios en blanco, es decir, las femtoceldas transmiten en un TV-White-Space y el móvil operaran en otras bandas de frecuencias. Por ejemplo, podrían cursar su tráfico en las bandas adyacentes de 600 MHz, 700 MHz y 800 MHz. Por lo tanto, proponemos un sistema dúplex en frecuencia para nuestros estudios (*Frequency Division Duplexing or FDD*, en inglés). Asimismo, mediante una gestión eficiente de una de las principales novedades de LTE-A (*Carrier Aggregation*, en inglés), se podrían agregar diferentes portadoras (de bandas de operación diferentes o de la misma banda), hasta un máximo de cinco portadoras, con el objetivo de brindar flexibilidad de operación, y ofrecer mayores tasas de transmisión.

4.1.1. Escenarios de compartición de espectro entre TDT y LTE-A

El escenario de estudio considera una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado, como servicio primario, y una femtocelda LTE-A brindando conectividad en el interior de un piso/casa u oficina, como servicio secundario. Por lo tanto, se deberá garantizar que la señal de la femtocelda LTE-A (enlace descendente desde la femtocelda a móviles LTE-A) no interfiera el servicio de televisión, el cual llega a los usuarios a través de una antena de recepción ubicada en la parte exterior del piso/casa u oficina. Se considerará para los estudios la canalización de la banda de televisión de Europa. Los tres escenarios más restrictivos son descritos a continuación:

1. **Escenario 1:** tanto la femtocelda LTE-A en el interior de una vivienda o edificio como la antena receptora de TV están localizados en el mismo edificio, no obstante, se encuentran ubicados a alturas diferentes, la femtocelda está ubicada en la última planta, y la antena está situada en la azotea, no hay visión directa entre la femtocelda y la antena receptora de televisión. La siguiente figura muestra el escenario de estudio:

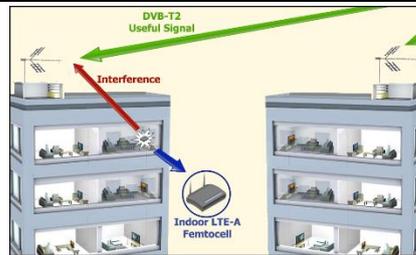


Figura 30. femtocelda y antena de TV ubicados en el mismo edificio.

2. **Escenario 2:** La antena receptora de TV está situada en la azotea de un edificio frontal al que se encuentra ubicada la femtocelda LTE-A, con la particularidad que la femtocelda está en una planta inferior (altura menor de la femtocelda respecto a la antena de TV). Se considera que hay línea de vista entre ellos, y el único obstáculo que las separa es una ventana de vidrio, tal y como se muestra en la siguiente figura.

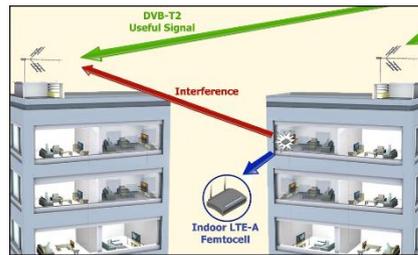


Figura 31. femtocelda y antena de TV ubicados en edificios y alturas diferentes.

3. **Escenario 3:** Este escenario plantea la misma configuración del escenario 2, con la diferencia, que tanto la femtocelda como la antena receptora de TV se encuentran ubicados a la misma altura. La siguiente figura muestra el escenario descrito:

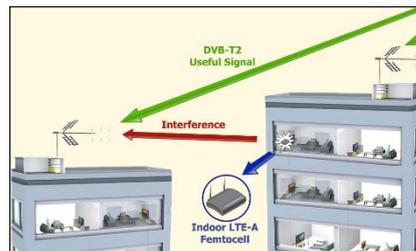


Figura 32. femtocelda y antena TV ubicados en edificios diferentes a la misma altura.

Una vez descritos los escenarios de estudio, y teniendo en cuenta que la femtocelda-LTE-A operará en una frecuencia libre de la banda de televisión, se plantean los dos casos de operación más restrictivos de uso de μ -TV-White-Space.

- A. **Caso A: Co-canal y Canal Adyacente:** la femtocelda LTE-A podrá usar un μ -TV-White-Space co-canal o adyacente a un canal en uso de televisión. La portadora central de LTE-A es desplazada desde co-canal hasta adyacencia respecto a la frecuencia central del canal de televisión, en pasos de 500 kHz, con el objetivo de evaluar las restricciones de potencia que deberán garantizarse en la femtocelda para el correcto funcionamiento de las dos redes. A modo de ejemplo, la siguiente figura muestra el canal 48 de TV con un ancho de banda de 8 MHz operando en la frecuencia de 686 MHz a 694 MHz (canalización europea), y la femtocelda usando un μ -TV-White-Space cocanal o adyacente operando en la frecuencia de 694 MHz a 702 MHz:
- B. **Caso B: Doble Adyacencia:** la femtocelda-LTE-A usa un μ -TV-White-Space en la frecuencia de 694 MHz a 702 MHz que se encuentra ubicado entre dos canales de televisión en uso, tal y como se muestra en la siguiente figura:

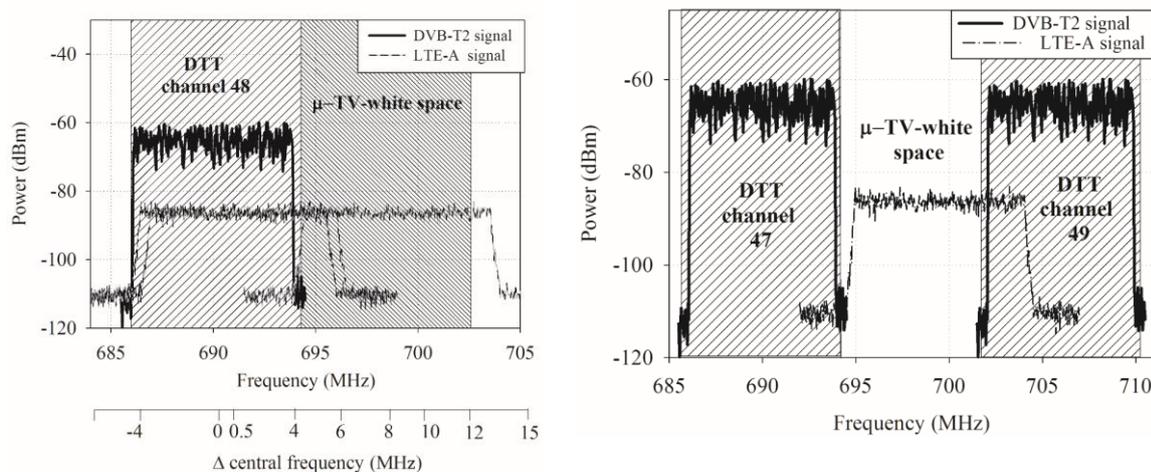


Figura 33. Casos de uso de TV-White-Space:
femtocelda LTE-A usa un μ -TV-White-Space co-canal o adyacente a un canal de TV (izquierda); femtocelda-LTE-A opera en un μ -TV-White-Space entre dos canales de TV (derecha).

4.1.2. Metodología

La metodología llevada a cabo para definir la PIRE máxima que podrían transmitir la femtocelda LTE-A operando en un μ -TV-White-Space en adyacencia o doble adyacencia a canales de televisión es dividida en tres fases: En primer lugar, se realizan medidas de laboratorio con equipos profesionales y comerciales de las tecnologías DVB-T2 y LTE-A en un entorno controlado, con el objetivo de determinar la máxima potencia interferente de una femtocelda que podría tolerar un receptor de televisión, en función de la separación en frecuencia. En segundo lugar, se define la PIRE máxima permitida que podrán transmitir las femtoceldas LTE a través de un modelado analítico que tiene en cuenta la configuración de los escenarios propuestos en el apartado anterior. Por último, se validan los escenarios propuestos mediante medidas de campo en un entorno real de operación. Además, se evalúa el impacto de las redes de televisión sobre las femtoceldas.

4.1.2.1 Medidas de Laboratorio

4.1.2.1.1. DVB-T2 como señal útil

El set-up y la metodología utilizada fueron descritos en la sección 3.2. Los parámetros de configuración de las señales DVB-T2 y LTE-A considerados en las medidas de laboratorio son resumidos a continuación en la siguiente tabla:

Tabla 24. Modos de configuración de DVB-T2 y LTE-A.

TDT		LTE	
Parámetros	Modo	Parámetros	Modo
Tecnología	DVB-T2	Tecnología	LTE-A
Modulación	256-QAM	Modulación	QPSK
Tasa Codificación	2/3	Dúplex	FDD
FFT	32K Extendido	FFT	512, 1024
Intervalo de Guarda	1/128 (28 μ s)	Intervalo de Guarda	Normal (4.7 μ s first symbol, 5.2 μ s rest)
Portadora Piloto	PP7	Carga de tráfico	Idle, 100%
CNR (RICE)	20 dB	Tipo de Enlace	Descendente
Ancho de Banda	8 MHz	Ancho de Banda	5/10 MHz

Como se puede observar en la tabla anterior, el modo de transmisión DVB-T2 es el modo utilizado por un operador de televisión en Reino Unido. Hemos considerado un canal DVB-T2 con ancho de banda de 8 MHz por canalización europea. En las medidas de DVB-T2 se tuvo en cuenta un emulador de canal Rice, el cual es idóneo para escenarios de recepción fija sobre tejado, para mayor detalle ver la sección 2.4. Para la señal LTE-A en el enlace descendente, es decir, enlace desde la femtocelda hasta usuarios LTE-A, hemos considerado diferentes cargas de tráfico de la señal, con el fin de evaluar como la carga del sistema impacta en la interferencia que perciben los receptores de televisión. Además, hemos considerado los anchos de banda de 5 MHz y 10 MHz para la femtocelda LTE-A, teniendo en cuenta que en este estudio proponemos que el ancho de banda para un μ -TV-White-Space es de 8 MHz, al igual que el de un canal de TV. Por lo tanto, los anchos de banda considerados son los más idóneos para ser explotados por las femtoceldas. Respecto a la modulación de la señal LTE-A, hemos asumido QPSK, la misma utilizada en estudios de convivencia realizados por la ITU [25]. Asimismo, la modulación utilizada en la señal LTE no cambia significativamente la forma espectral de la señal, y, por lo tanto, en los casos cuando es interferente, puede considerarse casi despreciable el impacto sobre los receptores de televisión.

4.1.2.1.2. LTE como señal útil

LTE se caracteriza por su flexibilidad de operación mediante el uso de diferentes esquemas de modulación y codificación, los cuales permiten adaptarse a las condiciones del canal radio. La siguiente figura muestra el set-up para las medidas de LTE como señal útil:

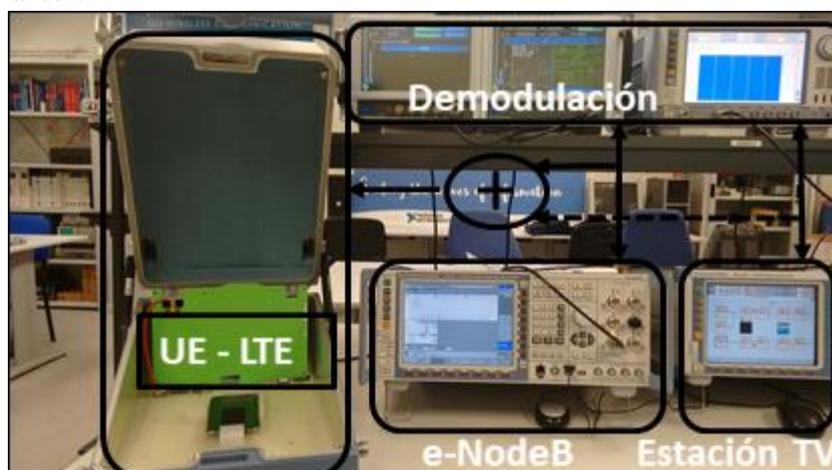


Figura 34. Set-Up de las medidas de laboratorio LTE-A como señal útil.

La metodología llevada a cabo en las medidas de laboratorio cuando la señal útil son los sistemas móviles de cuarta generación LTE, consiste en fijar el nivel de potencia útil que recibe el móvil de LTE e ir haciendo un barrido de potencia de la señal interferente hasta encontrar el límite de potencia interferente que podría tolerar un receptor móvil LTE, sin que se degrade la calidad del servicio primario, con la particularidad, que se deducirán diferentes umbrales de protección en función del esquema de modulación y codificación utilizada. Este límite deberá garantizar una tasa de no error de bit objetiva del 95% [86]. Cuanto mayor sea el esquema de modulación y codificación (MCS), mayor será la eficiencia espectral del enlace, y por lo tanto mayor la tasa de transmisión. La máxima tasa de transmisión es calculada teniendo en cuenta el índice de modulación y codificación, el ancho de banda del sistema y el tipo de enlace.

4.1.2.2 Modelado Analítico en función de la Geometría del escenario

En la etapa anterior, se obtuvieron los márgenes de protección mediante medidas de laboratorio, sin embargo, estos fueron medidos a la entrada del receptor de TV (ver punto de 1 de la siguiente figura). Por lo tanto, para obtener la PIRE máxima que podría transmitir las femtoceldas LTE-A (punto 3), debemos considerar la geometría de los escenarios de estudio para calcular las pérdidas de propagación desde la femtocelda hasta la antena de TV, y las cuales son consideradas como una ganancia de propagación G_{PL} , es decir, ver desde el punto 3 al 2 de la figura [17]. La siguiente figura muestra la geometría del escenario de estudio donde la femtocelda LTE-A opera en un μ -TV-White-Space, y un usuario de TV en borde cobertura decodifica un canal de TV:

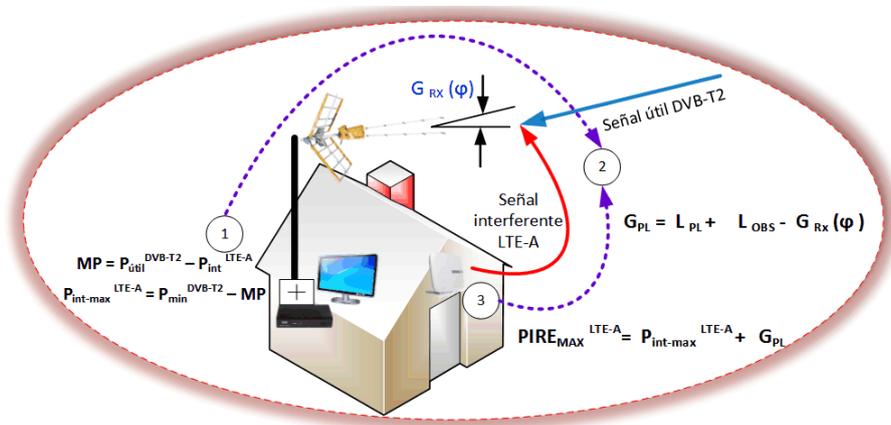


Figura 35. Modelado analítico en función de la geometría de estudio: Femtocelda opera en un μ -TV-White-Space co-canal o adyacente a un canal de TV.

Como se puede observar en la figura anterior, el procedimiento llevado a cabo para definir la PIRE máxima permitida que podría transmitir la femtocelda LTE-A es dividido en tres partes: En primer lugar, podemos calcular la máxima potencia interferente de una femtocelda LTE-A ($P_{inter-max}^{LTE-A}$), que podría tolerar un usuario víctima de televisión recibiendo al nivel de sensibilidad (peor caso), si aplicamos la siguiente ecuación:

$$P_{inter-max}^{LTE-A} = P_{mínima}^{DVB-T2} - MP \quad (18)$$

Donde, $P_{mínima}^{DVB-T2}$ es el nivel de potencia mínimo o sensibilidad requerido a la entrada del receptor de televisión para decodificar correctamente un canal de televisión y MP son los márgenes de protección medidos en la etapa anterior en la entrada del receptor de DVB-T2. En segundo lugar, calculamos las pérdidas por propagación desde la femtocelda LTE-A hasta la entrada de la antena receptora de TV, la cual es considerada como una ganancia G_{PL} (permite que la PIRE de la femtocelda pueda ser mayor, debido a que se encuentra ubicada en el interior vivienda y la antena receptora de TV en el exterior de la misma) [17]. Para calcular este valor se tiene en cuenta tres contribuciones: las pérdidas de propagación desde la femtocelda hasta la antena receptora de televisión, las pérdidas de atenuación debido a los obstáculos que atraviesa la señal al propagarse desde la femtocelda hasta la antena receptora de televisión, y la ganancia de la antena receptora de televisión que depende de la directividad y la discriminación angular de la antena de TV. Por último, calculamos la PIRE máxima que podría transmitir las femtoceldas LTE-A, aplicando la siguiente ecuación:

$$PIRE_{max}^{LTE-A} = P_{inter-max}^{LTE-A} + G_{PL} \quad (19)$$

4.1.2.3 Medidas de Campo

El protocolo de medidas seguido en las medidas de campo es estructurado en cinco pasos, los cuales son descritos a continuación:

1. Fijar el nivel de potencia de señal del canal de televisión (señal útil) a la entrada del receptor de TV, en ausencia de emisiones de la señal interferentes de la femtocelda.
2. Comprobar los niveles de potencia de la señal interferente de la femtocelda a la entrada del receptor de TV, en ausencia de emisiones de la señal de televisión.

3. Caracterizar las pérdidas de propagación desde el interior del edificio donde se encuentra ubicada la femtocelda LTE-A hasta la entrada de la antena de televisión ubicada en la azotea del mismo u otro edificio (ver sección escenarios).
4. Configurar la femtocelda para emitir en diferentes configuraciones de ancho de banda, barrido de potencia, carga de tráfico, entre otros.
5. Realizar medidas para validar los resultados de márgenes de protección, y PIRE máxima que podría transmitir la femtocelda sin interferir el servicio primario de televisión, etc. Este último paso, se lleva a cabo con la emisión simultánea tanto de la señal útil DVB-T2 como la interferente LTE-A.

Respecto al lugar donde se realizaron dichas medidas de campo, fue en el campus de la Universitat Politècnica de València. La antena receptora de TV fue ubicada aproximadamente a 500 metros del transmisor DVB-T2, y la femtocelda LTE-A en el interior del edificio continuo al de la antena receptora de TV, tal y como se muestra en la siguiente figura.



Figura 36. Set-up de las medidas de campo: campus de la UPV.

El transmisor usado para la generación de la señal DVB-T2 es una tarjeta moduladora multi-tecnología con referencia en el mercado “DekTEc DTA-115”. La salida del transmisor fue conectada a una etapa de amplificación y distribución. La etapa de distribución está compuesta por dos antenas sectoriales cada una con una ganancia de 11 dBi, y sus patrones de radiación tienen 28° y 62° de anchos de haz en el plano horizontal y vertical. Las señales de LTE-A fueron grabadas previamente en medidas de campo por un operador móvil, las cuales fueron obtenidas para diferentes cargas de tráfico de la red. Posteriormente, fueron reproducidas mediante un generador de señal con referencia en el mercado “Aeroflex SGD-06”. La salida de la femtocelda-LTE-A fue conectada a una antena omnidireccional que tiene 2 dBi de ganancia en la banda de televisión. La etapa de recepción está compuesta por una antena receptora de TV ubicada en la azotea del edificio, diferentes decodificadores de TV para DVB-T2 y un analizador de espectro, el cual es empleado para verificar los niveles de potencia de las señales recibidas. Es importante resaltar que las pruebas en recepción no evaluaron el efecto de los sistemas de amplificación de cabecera usados en algunas instalaciones para la distribución de la señal TDT a diferentes usuarios en un edificio.

4.1.3. Resultados

4.1.3.1 Medidas de laboratorio

Los márgenes de protección son obtenidos en función de la separación en frecuencia entre las portadoras centrales de DVB-T2 y LTE-A. Específicamente, se dejó fija la portadora central DVB-T2 y se movió la portadora central de LTE-A desde co-canal hasta adyacencia en pasos de 0.5 MHz. El nivel de potencia de la señal útil a la entrada del receptor de televisión se fija en -60 dBm, y se va incrementando el nivel de potencia de la señal interferente hasta que degrade la calidad de un video real (para un mayor detalle de la metodología ver la sección 3.2). Además, se calcula el solape que experimenta el canal DVB-T2 para cada separación en frecuencia del canal de LTE-A. El solape es definido como la cantidad de espectro de la señal no deseada LTE-A, que interfiere o cae dentro del espectro de la señal útil DVB-T2, y es calculado como el porcentaje del ancho de banda de la señal interferente que cae sobre el total del ancho de banda de la señal útil.

4.1.3.1.1. Efecto de la carga de tráfico de LTE-A

En primer lugar, se evalúa el efecto de la carga de tráfico del sistema LTE-A sobre un canal DVB-T2. La siguiente figura muestra los márgenes de protección que se deben garantizar para que un canal DVB-T2 no sea interferido por una femtocelda LTE-A con un ancho de banda de 5 MHz. Los resultados son presentados tanto para una señal LTE al 100% de carga de tráfico como para una señal en estado idle de carga.

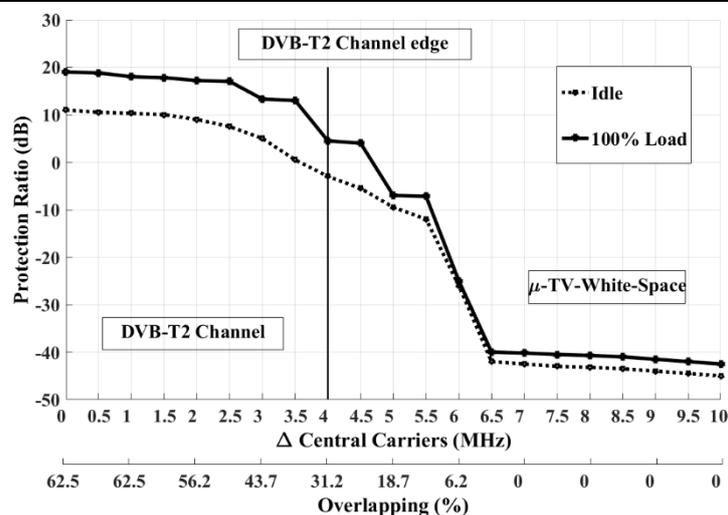


Figura 37. Márgenes de protección entre una señal DVB-T2 y una señal interferente LTE-A con un ancho de banda de 5 MHz, para diferentes cargas de tráfico.

Como se puede observar en la figura anterior, **los márgenes de protección son más restrictivos para una señal LTE-A al 100% de carga de tráfico respecto a una señal en estado idle, debido a que la densidad de potencia interferente es mayor.** La terminología “más restrictivo”, hace referencia a que un receptor de televisión puede tolerar un menor nivel de potencia interferente. Por ejemplo, para el caso cocanal, para una separación de 0 MHz, la señal de una femtocelda LTE-A al 100% de carga debe llegar a la entrada del receptor de TV con una diferencia de potencia de 19 dB menor respecto a la potencia de un canal de televisión, $MP = 19$ dB. **Mientras que una femtocelda LTE-A en estado idle, puede llegar al receptor de TV con un nivel de potencia de 8 dB mayor respecto al estado de carga de tráfico anterior (LTE-100%), es decir, el margen de protección es 11 dB.** Conforme aumentamos la separación entre frecuencias centrales, los márgenes de protección tienen una importante mejora > 45 dB, a partir de una diferencia en frecuencia de 6 MHz entre la frecuencia central de la femtocelda y el canal DVB-T2. Por lo tanto, se podría considerar que la femtocelda LTE-A podría estar operando en esta zona, desde algún solape menor a 6.2% hasta sin solape, sin interferir a un canal de televisión, y esto es posible, porque los anchos de banda efectivos siempre son menores que los anchos de banda de canal tanto para DVB-T2 (aproximadamente 5% menor), como un canal de LTE-A (aproximadamente 10% menor).

4.1.3.1.2. Efecto del ancho de banda de LTE-A

Los resultados que se presentarán a partir de ahora serán obtenidos solo para el caso más restrictivo que se comprobó en el apartado anterior, señal LTE-A al 100% de carga de tráfico.

4.1.3.1.2.1. Caso A: co-canal y canal adyacente

La siguiente figura muestra los márgenes de protección para una femtocelda LTE-A operando en un μ -TV-White-Space desde co-canal hasta adyacencia al de un canal un canal de TV, considerando dos anchos de banda de la señal LTE: 5 MHz y 10 MHz. **Los resultados muestran que los márgenes de protección para una señal LTE-A con un ancho de banda de 10 MHz son más restrictivos que para una señal de 5 MHz, tanto para cocanal como en adyacencia, debido a que el porcentaje de espectro solapado entre el canal de LTE-A y DVB-T2 siempre es mayor.** Sin embargo, si comparamos a igualdad de solape entre los dos anchos de banda de LTE, los márgenes de protección son en media 2 dB menos restrictivos para un canal de 10 MHz respecto a un canal de 5 MHz, debido a que la densidad de potencia es menor.

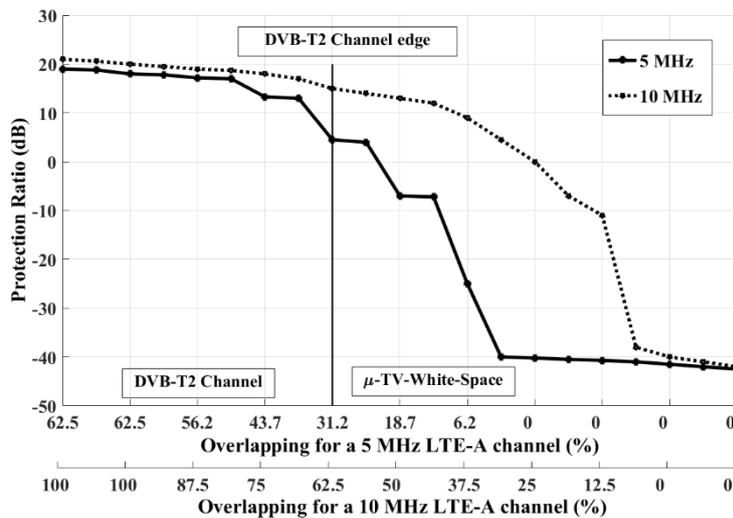


Figura 38. Márgenes de protección para DVB-T2 en recepción fija sobre tejado interferido por LTE-A al 100% de carga, para diferentes anchos de banda.

4.1.3.1.2.2. Caso B: Doble Adyacencia

En este caso de estudio, se presentan los resultados de los márgenes de protección que deben garantizarse cuando una femtocelda LTE-A está operando en un μ -TV-White-Space que se encuentra entre dos canales de TV, tal y como se muestra en la siguiente figura.

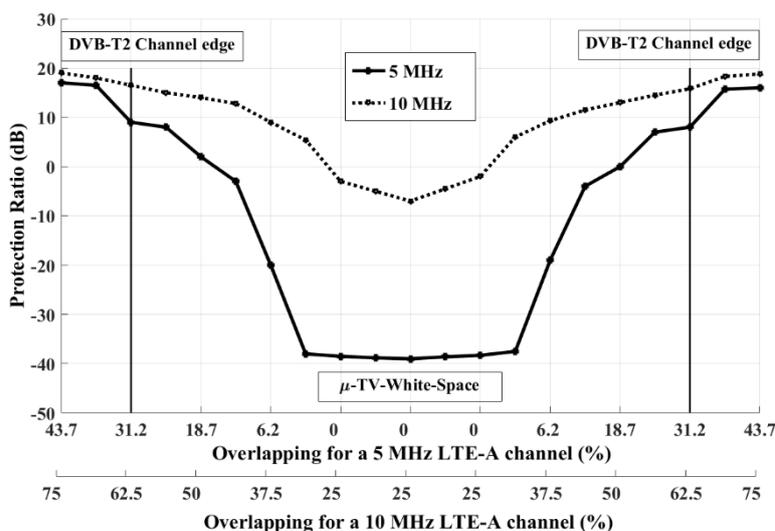


Figura 39. Márgenes de protección para DVB-T2 en recepción fija sobre tejado interferido por LTE-A al 100% de carga, para diferentes anchos de banda.

Como se puede observar en la figura anterior, el peor caso es cuando un canal LTE-A de ancho de banda de 10 MHz está operando entre los dos canales de DVB-T2, debido a que siempre están solapados sus espectros, en el mejor de los casos, hay un solape del 25%. Es importante resaltar que tanto el μ -TV-White-Space como los canales de TV tienen una canalización de 8 MHz. Si la femtocelda operará con un ancho de banda de 10 MHz en la frecuencia central del μ -TV-White-Space o solape del 25% con cada uno de los canales de TV, el margen de protección es 32 dB más restrictivo respecto a un canal LTE-A de 5 MHz, $MP = -39$ dB para un solape del 0%. Por lo tanto, el usar una femtocelda con ancho de banda de 10 MHz en este caso de estudio podría ser no factible. Si comparamos los resultados de este caso de estudio respecto al anterior para un canal LTE-A de 5 MHz, los márgenes de protección son ligeramente más restrictivos ~ 2 dB.

4.1.3.2 Medidas de Campo

En este apartado, validaremos las medidas de laboratorio con las de campo para cada uno de los escenarios propuestos en la sección 4.1.1. En primer lugar, modelaremos cada escenario para obtener la ganancia por propagación, es decir, las pérdidas de propagación desde la femtocelda hasta la antena receptora de TV, la cual incluye la ganancia de la antena receptora que depende tanto de la directividad como de la discriminación angular. Es importante recalcar que siempre se buscó dentro del interior de la oficina la ubicación de la femtocelda que permitía obtener las menores pérdidas de propagación, las cuales son el peor caso. En segundo lugar, se obtuvo la PIRE máxima que podría transmitir la femtocelda sin degradar la calidad de un canal de televisión.

4.1.3.2.1 Ganancia por propagación

La siguiente tabla muestra la ganancia por propagación “indoor to outdoor”, para los escenarios de estudio. El escenario 1 representa la ganancia por propagación desde la femtocelda ubicada en la última planta del interior de un edificio hasta la antena receptora de TV situada en la azotea del mismo edificio. En el escenario 2, la femtocelda está ubicada en una planta inferior a la última, y la antena de TV en la azotea de un edificio que se encuentra en frente donde está la femtocelda. Por último, el escenario 3, es la misma configuración del escenario 2, con la diferencia, que tanto la femtocelda como la antena receptora de TV se encuentran ubicados a la misma altura.

Tabla 25. Ganancia por propagación entre una femtocelda LTE-A y una antena receptora de TV, para los escenarios de estudio.

Parámetro	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3
Ganancia por propagación (dB)	62	54	47

Como se puede observar en la tabla anterior, la ganancia por propagación más restrictiva son 47 dB (menores pérdidas de propagación), correspondiente al escenario 3, debido a que existe línea de vista entre la femtocelda y la antena de TV, además, están ubicados a la misma altura y solo los separa una ventana de vidrio. El escenario 2, tiene unas ganancias por propagación adicionales de 7 dB, $G_{PL}=54$ dB, es decir, que una femtocelda podría emitir hasta 7 dB más de potencia que la femtocelda del escenario 1. Por lo tanto, se podría concluir que una femtocelda ubicada en plantas inferiores obtendrá una ganancia de por lo menos 7 dB más de potencia por cada planta inferior que está ubicada respecto a la antena de TV, siempre y cuando este en edificios continuos. **El escenario 1 es el menos crítico con una ganancia por propagación de 62 dB, debido a que no hay línea de vista entre la femtocelda y la antena de TV, y por el tipo el obstáculo que los separa.**

Estos resultados fueron contrastados con medidas de campo llevadas a cabo por el operador de televisión de Reino Unido, la BBC (*British Broadcasting Corporation, en inglés*) [96]. La BBC evaluó la ganancia por propagación entre un dispositivo de espacios en blanco (*White Space Device or WSD, en inglés*), y la antena de TV, para tres escenarios similares a los propuestos en esta tesis. Las principales diferencias son: nuestros estudios fueron realizados en un escenario urbano, con densidad alta de edificios, mientras los de la BBC, fueron llevados a cabo en un condominio con pocas casas alrededor, es decir, una zona con baja densidad de edificios. Además, el tipo de obstáculo que atraviesa la señal era diferente (mayor atenuación), así como, la distancia y la altura eran inferiores entre las antenas del dispositivo y del receptor de TV, respecto a las tenidas en cuenta en nuestros estudios. **Con todas estas consideraciones, nuestros resultados son entre 2 y 4 dB mayores de ganancia de propagación entre los obtenidos por la BBC, siendo el escenario 2 el que presenta la mayor diferencia. En resumen, podemos decir que nuestros resultados son consistentes a los obtenidos por la BBC, con la salvedad, que las ligeras diferencias se deben a la configuración de los escenarios, y factores que influyen en la propagación de las señales, como el tipo de entorno (urbano, el clima, entre otros).**

4.1.3.2.2 *PIRE máxima para femtoceldas LTE-A en interiores*

Los resultados que definen la PIRE máxima que podría transmitir la femtocelda LTE-A usando un μ -TV-White-Space sin interferir el servicio de TV fueron obtenidos para el peor caso, es decir, usuarios de TV ubicados en el borde de cobertura del transmisor DVB-T2. Para esta consideración, se configuro la potencia recibida a -74 dBm en la entrada del receptor de TV, la cual corresponde al 95% de probabilidad de localización, calculado para el modo de transmisión DVB-T2 escogido [97].

4.1.3.2.2.1. Caso A: co-canal y canal adyacente

4.1.3.2.2.1.1 Femtocelda con ancho de banda de 5 MHz

La siguiente figura muestra la PIRE máxima que podría transmitir la femtocelda LTE-A para los tres escenarios de estudio, en función de la separación en frecuencia entre las portadoras centrales de DVB-T2 y LTE-A. Asimismo, se muestra en la gráfica un segundo eje con el solape, es decir, el porcentaje del ancho de banda de la señal interferente que cae sobre el total del ancho de banda de la señal útil. Por último, se comparan los resultados de las medidas de campo obtenidos de PIRE máxima que podría transmitir la femtocelda en el escenario 3 (caso más restrictivo), con los conseguidos con medidas de laboratorio. Es importante aclarar que para poder realizar la comparativa en esta figura, las medidas de laboratorio han sido complementadas con los análisis geométricos de los escenarios de estudio.

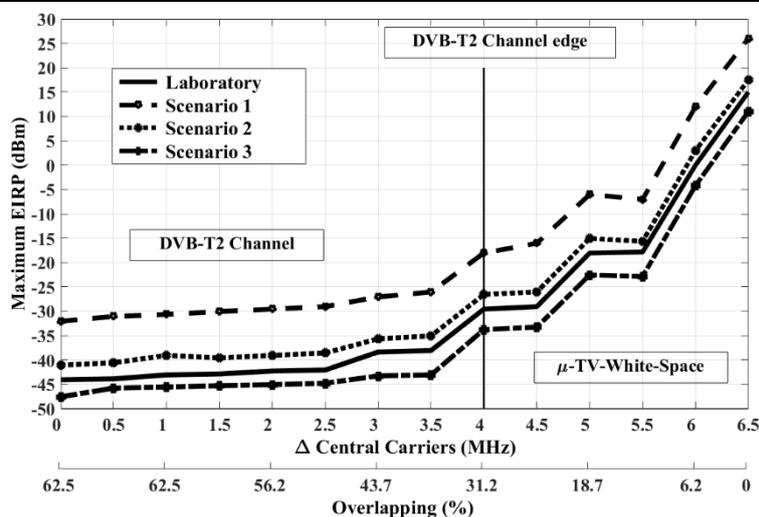


Figura 40. Comparativa entre medidas de campo y laboratorio: PIRE máxima que podría transmitir una femtocelda de 5 MHz al 100% de carga, para el caso de estudio A.

Como se puede observar en la figura anterior, en el escenario 3, los resultados de las medidas de campo demuestran que la PIRE máxima que podría transmitir una femtocelda LTE-A con ancho de banda de 5 MHz es entre 0.3 dB y 3 dB más restrictiva que la conseguida mediante medidas de laboratorio, debido principalmente a los desvanecimientos que experimenta la señal al propagarse en un entorno real, donde la presencia de obstáculos y el clima producen los fenómenos de la difracción y reflexión, entre otros. Respecto a la comparativa de los otros dos escenarios no se representó en la gráfica por motivos de visualización, sin embargo, los resultados demostraron que seguían un comportamiento similar e incluso menor a los obtenidos en la comparativa del escenario 3, es decir, la diferencia de las medidas de campo respecto a las de laboratorio no superaba los 3 dB.

Respecto al operar en cocanal a DVB-T2, las medidas de campo demuestran que es muy crítico para todos los escenarios de estudio, debido a las bajas potencias que podría transmitir una femtocelda LTE-A. Concretamente, en el peor de los casos, una femtocelda podría transmitir una PIRE entre -46 dBm y -34 dBm para el escenario 3, y en el mejor de los casos o escenario 1, podría transmitir entre -31 dBm y -19 dBm. Si comparamos estos valores con valores típicos de potencias de femtoceldas LTE en interiores entre 10 dBm y 20 dBm [98], podemos concluir que el caso cocanal no es factible. No obstante, una femtocelda LTE que

opere en adyacencia a un canal de TV o solape 0%, podría transmitir con una PIRE de hasta 27 dBm en el mejor de los casos o escenario 3, y hasta 11 dBm en el caso más restrictivo. En el escenario 2 podría transmitir hasta 7 dBm más respecto al más crítico. En algunos escenarios, se podría incluso operar con algún solape < 10 %, pudiendo alcanzar potencias superiores a los 0 dBm.

4.1.3.2.2.1.2 Femtocelda con ancho de banda de 10 MHz

La siguiente figura muestra la PIRE máxima que podría transmitir una femtocelda con un ancho de banda de 10 MHz, sin interferir el canal de televisión. Los resultados obtenidos cuando la femtocelda ópera en cocanal a un canal de TV o solape mayor a 62.5%, definen una PIRE alrededor de -29 dBm, en el mejor de los escenarios de estudio, por lo tanto, se considera que no es factible, tal y como se concluyó para el caso anterior. **Respecto a operar la femtocelda en un μ -TV-White-Space adyacente al canal de TV, la PIRE permitida son similares a las obtenidas para un ancho de banda de 5 MHz, sin embargo, se requiere una separación en frecuencia mayor para conseguir un solape del 0%, es decir una diferencia entre portadoras centrales de 9 MHz.** En definitiva, se considera factible que la femtocelda use un μ -TV-White-Space adyacente al canal de TV o solape < 10%, tanto para canales LTE-A de 5 MHz y 10 MHz, consiguiendo PIRE entre 11 y 27 dBm.

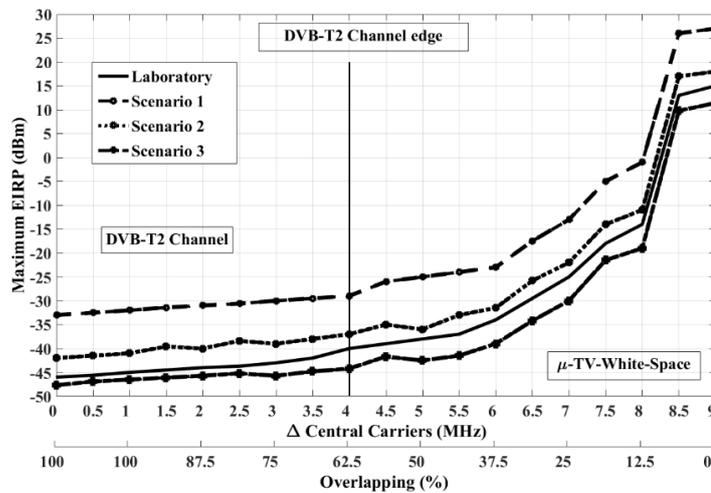


Figura 41. Medidas de campo: PIRE máxima que podría transmitir una femtocelda LTE-A de 10 MHz al 100% de carga, para el caso de estudio B.

4.1.3.2.2.2. Caso B: Doble Adyacencia

4.1.3.2.2.2.1. Femtocelda con ancho de banda de 5 MHz

La siguiente figura muestra la PIRE máxima que podría transmitir una femtocelda LTE-A de ancho de banda 5 MHz usando un μ -TV-White-Space entre dos canales de TV.

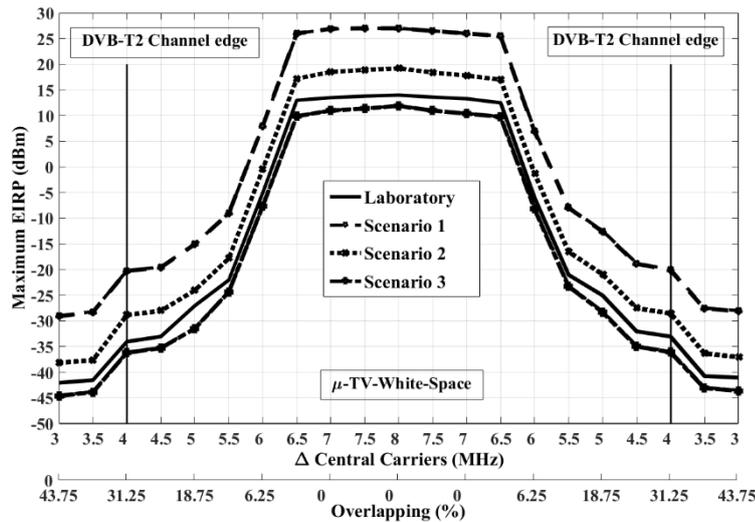


Figura 42. Medidas de campo: PIRE máxima que podría transmitir una femtocelda LTE-A de 5 MHz al 100% de carga, para el caso de estudio B.

Como se puede observar en la figura anterior, la femtocelda podría transmitir con una PIRE superior a 10 dBm, sin importar el escenario de estudio, y para una diferencia en frecuencia mayor a 6.5 MHz entre portadoras centrales, pudiendo lograr transmitir hasta 27 dBm en el mejor de los casos o escenario 3. Si lo comparamos con los resultados obtenidos en el caso de estudio anterior (adyacente a un canal de TV), podemos concluir que los resultados son similares, y por lo tanto usar un μ -TV-White-Space con un canal LTE-A de 5 MHz es factible en la banda de televisión, tanto para los casos de estudio en adyacencia como doble adyacencia, siempre y cuando se cumplan los límites de potencia definidos en esta tesis doctoral.

4.1.3.2.2.2.2. Femtocelda con ancho de banda de 10 MHz

Los resultados para una femtocelda de ancho de banda de 10 MHz usando un μ -TV-White-Space entre dos canales de TV son mostrados en la siguiente figura.

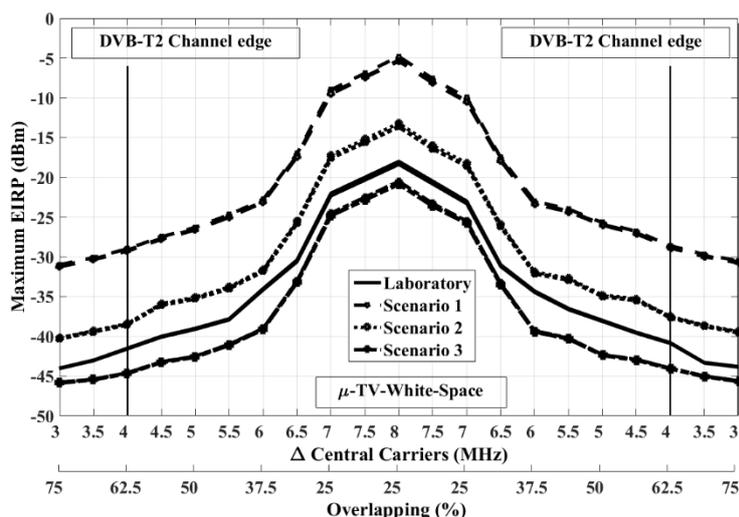


Figura 43. Medidas de campo: PIRE máxima que podría transmitir una femtocelda LTE-A de 10 MHz al 100% de carga, para el caso de estudio B.

Como se puede observar en la figura anterior, este caso de estudio es el más restrictivo de todos los evaluados hasta el momento. **Una femtocelda de 10 MHz entre dos canales de TV, podrá emitir hasta -5 dBm en el mejor de los casos sin interferir a un canal de TV. La principal causa de la limitada potencia que podría transmitir la femtocelda es porque siempre estará solapada con alguno de los canales de televisión adyacentes, el menor solape que se consigue es del 25%. Por lo tanto, debido a las bajas restricciones de potencia que se deberían garantizar para la femtocelda, este caso se considera como no viable, solo se podrá usar una femtocelda LTE-A de 10 MHz de ancho de banda para el caso de estudio de adyacente a dos canales no ocupados consecutivos de televisión.**

4.1.3.3 Impacto de las redes de TV sobre LTE

Las PIRE máximas que podrían transmitir las femtoceldas LTE-A sin interferir el servicio de televisión fueron definidas en la sección anterior. A continuación, se discute el caso contrario, es decir, como impactarían las redes de TDT sobre las femtoceldas LTE-A. Específicamente, la tasa de transmisión que estaría recibiendo el móvil desde la femtocelda LTE-A, podría verse degradada por una señal DVB-T2 proveniente de una estación de TDT que opera en adyacencia. Es importante recordar, que los μ -TV-White-Space fueron definidos como zonas geográficas donde hay ausencia de la señal DVB-T2 o el nivel de la señal recibido es bajo en la antena de recepción, es decir, cerca al umbral de cobertura de una estación DVB-T2. La siguiente figura muestra los márgenes de protección entre una señal útil LTE-A y una señal interferente DVB-T2, para diferentes esquemas de modulación, y por ende diferentes tasas de transmisión.

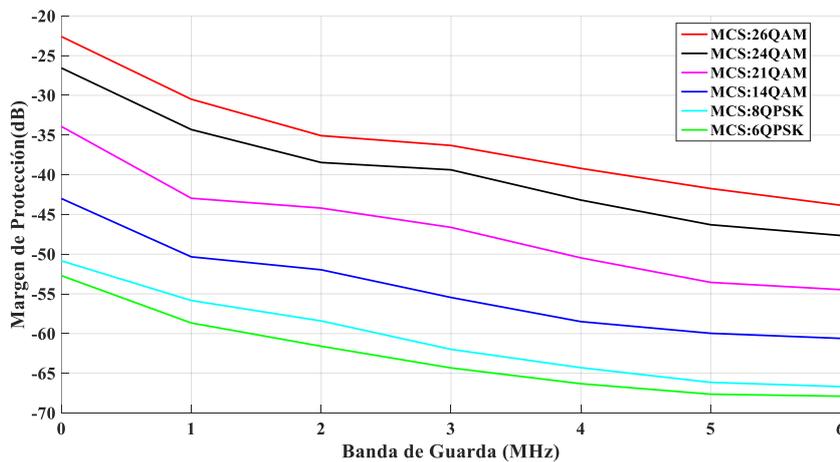


Figura 44. Márgenes de protección entre una señal útil LTE-A y una señal interferente DVB-T2, para diferentes esquemas de modulación LTE.

Como se puede observar en la figura anterior, para garantizar la tasa máxima de transmisión que se da para un MCS índice de 26-QAM, el margen de protección requerido para que un móvil LTE no sea interferido por una señal DVB-T2 es -22.6 dB, es decir, la señal interferente DVB-T2 podría ser como máximo hasta 22.6 dB mayor que la señal LTE-A a la entrada de la antena del móvil, para una banda de guarda de 0 MHz. Este margen podrá ser hasta 30 dB menos restrictivo (-52.7 dB, MCS índice: 6-QPSK), si se requieren tasas de transmisión menores. Por lo tanto, en función de la tasa de transmisión requerida por el móvil se tendrá que garanti-

zar un margen de protección que se encuentre dentro de este rango. **Si aumentamos la banda de guarda de 0 MHz a 1 MHz, los márgenes de protección mejoran en media 7 dB.** Las tasas de transmisión que podrían garantizarse para un móvil, en función del esquema de modulación y codificación, son resumidas en la siguiente tabla:

Tabla 26. Tasa de transmisión en LTE-DL, en función del esquema del MCS índice y SNR.

MCS Índice	SNR	Eficiencia espectral DL (bps/Hz)	Tasa-DL 5 MHz (Mbps)	Tasa-DL 10 MHz (Mbps)
6-QPSK	-2.7	0.24	1.08	1.94
8-QPSK	0.5	0.43	1.95	3.55
14-QAM	4.8	0.91	3.34	6.13
21-QAM	11.8	1.36	6.08	11.10
24-QAM	14.8	2.13	9.76	18.21
26-QAM	19.8	2.75	12.41	22.69

A continuación, se presenta la máxima potencia interferente DVB-T2 que puede tolerar un móvil LTE, si consideramos que el móvil 4G-LTE tiene un ancho de banda de 5 MHz y la potencia mínima que podría recibir es de -98 dBm [75], según el 3GPP (peor caso).

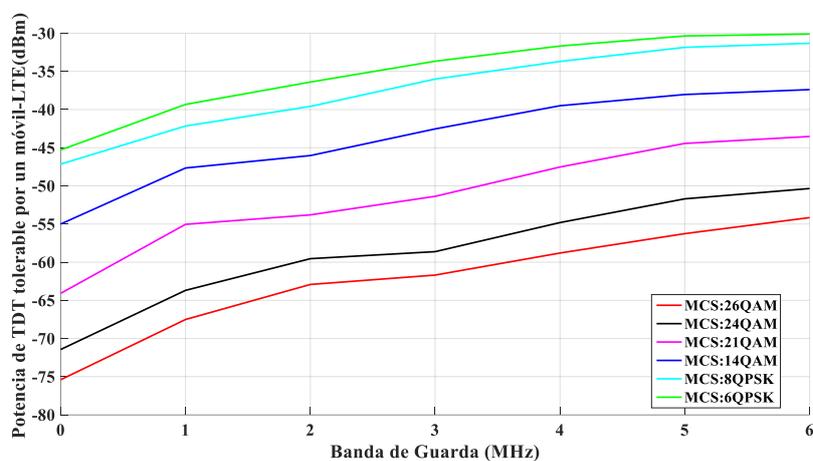


Figura 45. Máxima potencia interferente DVB-T2 que podría tolerar un móvil 4G-LTE.

Como se puede observar en la figura anterior, **el móvil LTE podría tolerar niveles de potencia interferente DVB-T2 como mínimo de -75 dBm y como máximo de -45 dBm para una banda de guarda de 0 MHz, y entre -67 dBm y -39.3 dBm para una banda de guarda de 1 MHz, en función del esquema del modulación y codificación. Por lo tanto, las femtoceldas podrían operar a la máxima tasa de transmisión o sin ninguna degradación en ubicaciones donde los usuarios de TV reciban hasta 10 dB y 18 dB por encima del umbral de sensibilidad de la señal DVB-T2, para una banda de guarda de 0 MHz y 1 MHz.** Esta deducción fue obtenida considerando un valor de -74 dBm de umbral de la señal DVB-T2 en recepción sobre tejado para el 95% de probabilidad de localización, y un valor de 11 dB por las pérdidas adicionales que experimenta la señal por penetración en edificios según la EBU. Además, se podrían tolerar mayores umbrales de potencia interferente de DVB-T2 entre -39 dBm y -45 dBm, no obstante, habría una penalización en la tasa de transmisión que el móvil podría soportar que dependerá del esquema de modulación y codificación utilizado, tal y como se muestra en la figura anterior. Por último, en función de la banda de guarda, se podrá tolerar en media hasta 19 dB más de potencia de DVB-T2, si comparamos una banda de guarda de 0 MHz respecto a 6 MHz.

Si consideramos valores típicos de potencias y alturas de estaciones de TDT podríamos obtener las distancias de protección que deberían garantizarse entre una estación de TDT y una femtocelda LTE-A ubicada en el interior de una vivienda u oficina: Los valores de PIRE tenidas en cuenta de las estaciones de TDT son: 84 dBm (250 kW), 73 dBm (20 kW), y, 67 dBm (5 kW). Los valores de altura de las estaciones son: 200 m, 100 m, y 60m. **Para garantizar máxima tasa de transmisión para el móvil, la femtocelda LTE-A se deberá ubicar a distancias de 17 km, 11 km y 8 km respecto a la estación DVB-T2, para un entorno urbano y considerando una PIRE de 84 dBm, y alturas de la estación de TDT de 200, 100 y 60 metros, respectivamente. Si la PIRE de la estación DVB-T2 se encuentra entre 67 dBm y 73 dBm, se tendrán que garantizar distancias entre 5 km y 8 km para altura de antena de 200 metros, y entre 2 km y 4 km para alturas de la estación de TV de 60 metros. Por último, se podrían ubicar femtoceldas a menor distancia de la estación de TDT, entre 370 metros y 2 km, no obstante, la femtocelda no podría ofrecer la máxima tasa de transmisión y habría una penalización de la tasa, que dependerá de la modulación y codificación que pueda soportar.**

4.2. Segundo Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y NB-IoT

La interconexión masiva de dispositivos u objetos conectados a la red, representa un reto importante en la sociedad actual, y es lo que se conoce con el concepto o idea de IoT, y representará la próxima evolución de internet. En consecuencia, IoT generará un gran flujo de información que mediante una gestión eficiente y segura permitirá crear nuevos modelos de negocio en diferentes áreas que contribuyen al desarrollo de la humanidad, con alcances tanto locales como globales. Los requerimientos que debe satisfacer IoT son: soportar un número masivo de dispositivos; ofrecer bajas tasa de transmisión; niveles de latencia bajos en función de la aplicación; consumo energético reducido; baja complejidad; larga vida de las baterías del orden de hasta 10 años; escalabilidad; fiabilidad; movilidad y ofrecer una cobertura extendida incluyendo escenarios de interiores.

Respecto a la tecnología inalámbrica que se usara para las aplicaciones de IoT, existen varias candidatas, teniendo en cuenta que se esperan multitud de aplicaciones con diferentes requerimientos. Por un lado, hay soluciones de tecnologías ya existentes, tales como, Wi-Fi (*Wireless Fidelity*, en inglés), Bluetooth, ZigBee y LpWA (*Low Power Wide Area Networks*, en inglés). Sin embargo, estas soluciones representan costes elevados de implementación de red para ofrecer una cobertura global, así como también, algunas no satisfacen requerimientos como soporte en movilidad, escalabilidad y fiabilidad [99]. Por otro lado, en junio del 2016, el 3GPP estandarizó tres tecnologías de banda estrecha para IoT, las cuales podrán cursar gran parte de su tráfico por el núcleo de red de las redes de comunicaciones móviles: Narrow Band for Internet of Things (NB-IoT), Long Term Evolution Machine Type Communications Category M1 (eMTC) y Extended Coverage GSM IoT (EC-GSM-IoT). La ventaja de estas soluciones para IoT son los bajos costes de despliegue, ya que podrán reutilizar gran parte de la infraestructura, y en la mayor parte de despliegues se requiere solo una actualización software de la red. Además, dentro de las particularidades de las tecnologías 3GPP podemos resaltar que NB-IoT es la única tecnología que podrá ser implementada en tres modos de operación: asignando recursos para IoT dentro de las mismas bandas de LTE (*In-band operation*, en inglés), dentro de la banda de guarda entre el enlace ascendente y descendente de LTE (*Guard-Band operation*, en inglés), y dentro de su propio espectro atribuido, por ejemplo, portadoras que estén inutilizadas de la red GSM (*Stand-Alone operation*, en inglés). Es importante recalcar que hasta el momento solo se ha propuesto que estos estándares operen en bandas licenciadas atribuidas a los servicios móviles [73].

Las bandas de operación para IoT aún no han sido definidas, no obstante, se proponen diferentes modos de atribución de espectro: acceso en bandas licenciadas, acceso en bandas compartidas, acceso en bandas no licenciadas o libres, entre otros [100] [101]. Por lo tanto, esta tesis promueve la compartición de espectro entre los servicios de TV y los de IoT (servicio secundario), en la banda de la televisión. Hemos considerado los estándares DVB-T2 y NB-IoT, el primero de ellos, por ser el estándar de televisión más adoptado y desplegado a nivel mundial, y el segundo, por ser una de las opciones más prometedoras del abanico de estándares propuestos para IoT, el cual podría ser implementado en diferentes modos de operación, y tendría menores costes de implementación de red. Dentro del alcance de esta tesis, se definen los requerimientos técnicos de operación de los sistemas secundarios NB-IoT para que puedan operar en cocanal o adyacencia a los servicios de TV. Sin embargo, queda fuera del alcance de esta tesis comprobar a través de medidas de laboratorio cómo se verían afectados los servicios secundarios para IoT por los servicios de televisión (servicio primario), debido a que no se disponen de equipos profesionales ni comerciales en un ámbito de investigación para evaluar criterios de calidad tanto de los dispositivos como de los nodos NB-IoT. Además, dentro de los esquemas de compartición de espectro, existen modos de acceso donde no se garantiza criterios de calidad a los servicios secundarios.

4.2.1. Escenarios de compartición de espectro entre TDT y NB-IoT

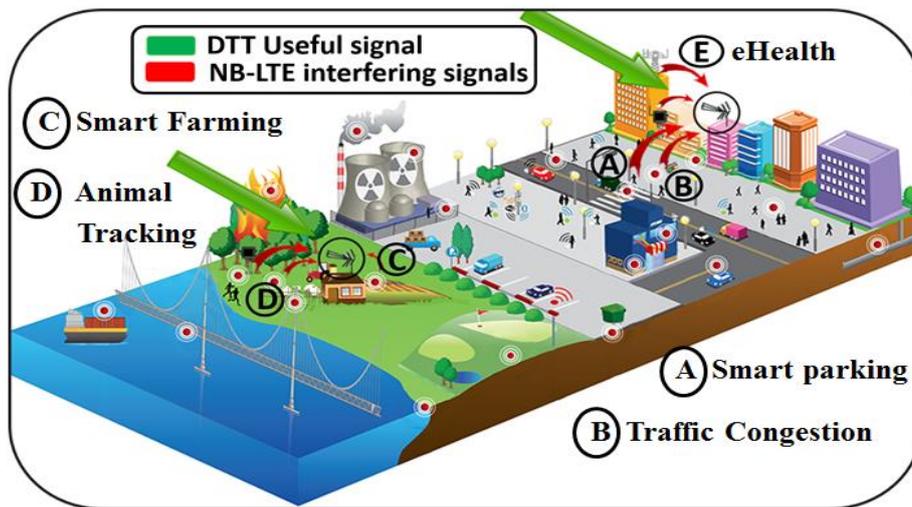


Figura 46. Topología general de los escenarios de estudio: compartición de espectro entre TDT y NB-IoT [102].

Como se muestra en la figura anterior, la configuración general del escenario considera una red DVB-T2 ofreciendo cobertura para recepción fija sobre tejado, como servicio primario, y una red de sensores bajo la tecnología NB-LTE para aplicaciones de IoT usando un TV-White-Space, como servicio secundario. Concretamente, se escogieron 5 escenarios de estudio que cubren las principales aplicaciones del ecosistema IoT, en función del tipo de entorno (urbano, suburbano, rural e interiores), tal y como se detallan a continuación:

1. **Entorno Urbano o Suburbano:** caracterizado por edificios altos, calles amplias y con alto nivel de tránsito, tanto peatonal como de vehículos.
 - A. **Caso A: Aparcamiento Inteligente (*Smart Parking*):** se basa en detectar la presencia o no de un vehículo estacionado en distintos puntos de la calzada. 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 la 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 alrededor de 4 o 5 metros [102].
 - B. **Caso B: Monitorización de la Congestión del Tráfico (*Traffic Congestion*):** basado en monitorización continua del estado del flujo de tráfico de la carretera. La red de sensores IoT están situados a una altura de 4 metros sobre postes o semáforos, y envían reportes periódicos a un nodo central, las señales tanto de los nodos como los sensores podrían interferir a los servicios de TDT por operar en un TV-White-Space adyacente a un canal de TV [103].
2. **Entorno Rural:** caracterizado por extensiones de terreno amplio y sin obstáculos (típico de zonas de cultivo agrícola o de ganadería), en el cual existe una estructura o edificación principal, perteneciente a una granja o centro de cultivo donde está ubicada la antena de TV.
 - C. **Caso C: Monitorización Agraria Inteligente (*Smart Farming*):** se basa en la monitorización de los cultivos y el estado meteorológico de una zona agraria, mediante el uso de una red de sensores IoT distribuidos a lo largo de la zona. Estos se sitúan a una altura entre 1 y 3 metros y realizan reportes de sus mediciones de forma periódica al nodo principal situado en la estructura central [104].

- D. **Caso D: Control y Seguimiento de Animales y Ganado (Animal Tracking):** 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 un dispositivo IoT a una altura media de 1.5 metros que realiza reportes periódicos al nodo central, con información sobre la posición del animal [104].
3. **Entorno en interiores:** considerando el interior de un hospital de varias alturas, rodeado de edificios de alturas similares.
- E. **Caso E: Vigilancia de Pacientes (Patients Surveillance):** basada en la monitorización y localización de instrumentación, pacientes y personal médico, mediante dispositivos IoT. Los dispositivos realizan reportes periódicos a diversos nodos distribuidos por todo el centro, con información de posición e identificación del individuo concreto. El peor caso, considera que el hospital está ubicado más alto que el edificio próximo donde se encuentra ubicada la antena receptora de TV, y, por lo tanto, podrá existir línea de vista entre los dispositivos IoT y la antena de TV con un único obstáculo (cristal de las ventanas), entre ellos.

A continuación, a modo de resumen, la siguiente tabla presenta las alturas que se considerarán para cada uno de los escenarios propuestos:

Tabla 27. Alturas para los escenarios de estudio entre TDT y NB-IoT.

Escenarios		Alturas (m)		
		Dispositivos IoT	Nodos IoT	Antena TV
Ciudad inteligente	Caso A (Smart Parking)	0	6	10
	Caso B (Traffic Congestion)	4 a 5		
Agricultura y Ganadería inteligente	Caso C (Smart Farming)	1 a 3		
	Caso D (Animal Tracking)	1.5		
eHealth	Caso E (Patients Surveillance)	10		

4.2.2. Metodología

La metodología para definir la PIRE máxima que podrían transmitir tanto los dispositivos como los nodos NB-IoT usando un TV-White-Space en adyacencia a un canal de televisión están basados en medidas de laboratorio y un modelado analítico en función de cada uno de los escenarios propuestos en la sección anterior. El procedimiento es similar al detallado para el primer caso de uso propuesto, no obstante, para las medidas de laboratorio se tienen en cuenta otros efectos, tales como, el efecto del tiempo de transmisión y el tiempo de espera de los dispositivos IoT sobre los márgenes de protección, es decir, el ciclo de trabajo, teniendo en cuenta que estos sistemas o aplicaciones transmiten información a ráfagas, y, por lo tanto, admiten una gran variedad de posibilidades. Específicamente, el ciclo de trabajo se define como el cociente entre el tiempo transmitido y el tiempo transmitido más el tiempo de espera, y se calcula aplicando la ecuación.

$$DC(\%) = \frac{T_{tx-IoT}}{T_{tx-IoT} + T_{esp-IoT}} \cdot 100 \quad (20)$$

Por último, se calcula la tasa binaria que es posible alcanzar para cada uno de los modos de funcionamiento de los dispositivos NB-IoT, teniendo en cuenta su ciclo de trabajo. La tasa binaria de transmisión se define como el número de bits que se transmiten por unidad de tiempo mediante un sistema digital. Para calcular la cantidad de bits por segundo que se puede alcanzar con NB-IoT, se hace uso de la expresión mostrada a continuación, la cual tiene en cuenta los recursos radio, modulación, y ciclo de trabajo.

$$T_{BIN} = \frac{N_{port} \cdot N_{simb} \cdot \frac{bits}{simb} \cdot D_{ms}}{T_{TX} + T_{ESP}} \cdot \left(1 - \frac{OH(\%)}{100}\right) \quad (21)$$

Donde; N_{port} representa el número de portadoras que hay dentro del ancho de banda de la señal de banda estrecha de LTE 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 de los dispositivos IoT; y $OH(\%)$ corresponde al porcentaje de trama que forma parte de la señalización, sincronismo, cabecera (Overhead). Respecto a los parámetros técnicos de transmisión, la señal útil de DVB-T2 trabaja con un ancho de banda de 8 MHz, según la canalización europea, y la señal interferente NB-IoT tiene un ancho de banda de 200 kHz, tanto para el enlace ascendente como descendente. La siguiente tabla resume los parámetros específicos de configuración de las señales DVB-T2 y NB-IoT:

Tabla 28. Modos de configuración de DVB-T2 y NB-IoT.

TDT		NB-IoT		
Parámetros		Parámetros		
Tecnología	DVB-T2	Tecnología	NB-LTE	NB-LTE
Modulación	256-QAM	Modulación	QPSK	QPSK
Tasa Codificación	2/3	Dúplex	FDD	FDD
FFT	32K Extendido	Intervalo de Guarda	Normal (4.7 μ s first symbol, 5.2 μ s rest)	Normal (4.7 μ s first symbol, 5.2 μ s rest)
Intervalo de Guarda	1/128 (28 ms)			
Portadora Piloto	PP7	Tasa Binaria	~ 250 Kbps multitono	~250 Kbps
CNR (RICE)	20 dB	Tipo de Enlace	Ascendente	Descendente
Ancho de Banda	8 MHz	Ancho de Banda	200 KHz	200 KHz

Como se puede observar en la tabla anterior, al igual que en el caso propuesto anterior, el modo de transmisión DVB-T2 es el modo utilizado por un operador de televisión en Reino Unido. Respecto a la señal de NB-IoT es una señal de banda estrecha con una tasa binaria aproximada a 250 Kbps [72].

4.2.2.1 Generación de la señal NB-IoT

Teniendo en cuenta que no fue posible adquirir un equipo profesional para la generación del espectro de la señal de NB-IoT, se implementó la capa física del estándar haciendo uso del software “Matlab”. El espectro de la señal cumple con todos los requerimientos técnicos definidos en la Release 13 del 3GPP. La siguiente figura muestra un extracto del código, con los principales bloques que se implementaron: inserción de los bits redundancia cíclica (*CRC insertion*); segmentación y codificación (*channel coding*); reordenación y adaptación de la tasa (*interleaving y rate matching*); aleatorización de los bits (*scrambling*); modulación (*modulation*); mapeo de los recursos radio en una rejilla bidimensional tiempo y frecuencia (*resource mapping*); FFT e inserción del prefijo cíclico (*Inverse FFT and CP insertion*) [71] [72].

```
=====
%
% FILENAME:    NB-IoT-LTE Physical_Layer.m
% DATE:       02/02/2016
% AUTHORS:    Gerardo Martínez Pinzón
% AFFILIATION: Mobile Communications Group (MCG),
%              Institute of Telecommunications and Multimedia Applications (iTEAM)
%              Universidad Politecnica de Valencia (UPV).
%
%=====
%
%              Downlink Processing chain
% The transmitter processing of LTE PDSCH is shown.
% --> CRC insertion --> Channel Coding --> Rate Maching --> Scrambling
% --> Modulation --> Resource Mapping --> Inverse FFT --> CP Insertion
%=====
function BER= NB_LTE_Physical_Layer_Transmitter(CNR)
%=====
%              Cyclic Generator Polynomial (CRC) Insertion
%
% CRCTrBlock= CBCRCGen_OFDMA (TrBlock);
%=====
%              Transport Channel Processing
%
% [PDCCHBits, CB, CBplus, CBSize, CBminus, CBSizeminus, E] = TrblChCod_OFDMA(CRCTrBlock, Msubframe_Index, nS, FP, MOD);
%=====
%              Scrambling
%
% Scramb_PDSCH = NB_Scrambler(PDCCHBits, nS);
%=====
%              Modulation Mapping
%
% The modulation mapper takes binary digits, 0 or 1, as input
% and produces complex-valued modulation symbols, x=I+jQ, as output.
%=====
% [PDSCH_Sym, Constellation] = Mapping_Modulation(Scramb_PDSCH, MOD);
%=====
%              Resource Element Mapping
%
% Mapping is performed essentially by creating indices to the
% resource grid matrix an
% and produces complex-valued modulation symbols, x=I+jQ, as output.
%=====
% [RMap, Index_PDSCH] = NB_LTE_RE_Mapper_2(PDSCH_Sym, MsubFrame_Index, nS, FP, MOD);
%=====
```

Figura 47. Fragmento de código de la capa física del estándar NB-IoT.

4.2.3. Resultados

4.2.3.1 Medidas de laboratorio

En los resultados de medidas de laboratorio evaluamos la influencia de dos parámetros importantes que caracterizan los sistemas IoT (efecto del tipo de enlace y ciclo de trabajo), sobre los márgenes de protección (parámetro de calidad que determina el nivel máximo de potencia interferente de dispositivos NB-IoT que podría tolerar un receptor víctima de televisión). Es importante recalcar que, aunque en las gráficas el eje “x” es representado en pasos de 600 kHz (diferencia en frecuencia entre portadoras centrales), los márgenes de protección se han obtenido realizando medidas en pasos de 200 kHz (ancho de banda de un canal de NB-IoT), desde cocanal (de 0 a 4 MHz), hasta adyacencia (de 4.2 hasta 12 MHz).

4.2.3.1.1 Efecto del tipo de enlace de NB-IoT

La siguiente figura muestra los márgenes de protección medidos en la entrada de un receptor de TV, para una señal NB-IoT interfiriendo a una señal DVB-T2, tanto para el enlace ascendente como el descendente.

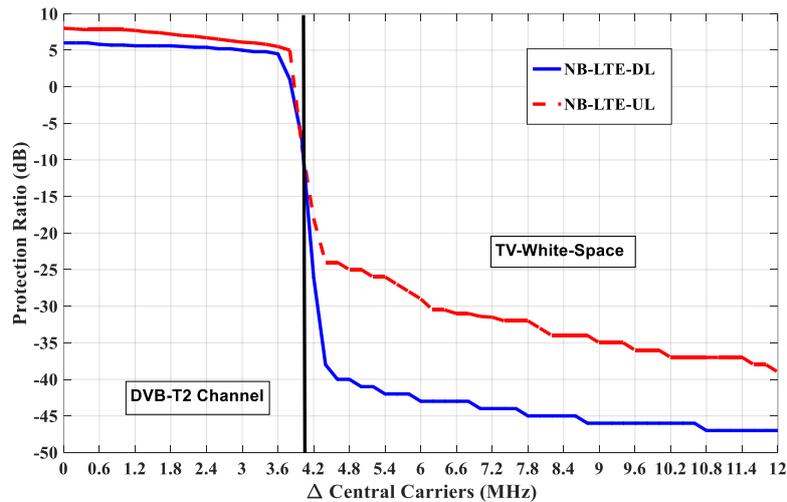


Figura 48. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por una señal NB-LTE, en función del tipo de enlace (descendente y ascendente)

Como se puede observar en la figura anterior, un receptor de TV tolera menos potencia interferente de los dispositivos NB-IoT que de los nodos NB-IoT, debido a la gran variabilidad temporal que tiene la señal en el enlace ascendente, y, por ende, al ciclo de trabajo del dispositivo. Respecto a la separación en frecuencia, las diferencias en los márgenes de protección son más altas en adyacencia respecto a cocanal, logrando alcanzar en adyacencia hasta 12 dB de diferencia entre los márgenes de protección de los dispositivos respecto a los nodos NB-IoT. En consecuencia, los nodos IoT podrían transmitir en adyacencia hasta 12 dB más potencia que los dispositivos IoT a igualdad de condiciones.

Específicamente, cuando las señales DVB-T2 y NB-IoT están operando en cocanal, los márgenes de protección están en un rango desde 8 dB a 5 dB para los dispositivos NB-IoT, y entre 6 dB a 4 dB para los nodos NB-IoT. En canal adyacente, es decir, cuando la señal de NB-IoT está a una separación en frecuencia entre 4 MHz a 12 MHz respecto a la frecuencia central del canal DVB-T2, los márgenes de protección mejoran notablemente respecto al caso cocanal. **Para una separación en**

frecuencia de 4.5 MHz o 500 kHz de banda de guarda en adyacencia, los márgenes de protección mejoran aproximadamente en 30 dB para el enlace ascendente y 42 dB para el enlace descendente.

4.2.3.1.2 Efecto del Ciclo de Trabajo de los dispositivos NB-IoT

Teniendo en cuenta que los dispositivos NB-IoT tendrán diferentes tiempos de transmisión y de espera entre transmisiones, en función de la aplicación, por ejemplo, una aplicación de monitorización de pacientes en un hospital requiere una frecuencia mayor de transmisiones respecto a una aplicación de monitorización de flotas y logística. Por lo tanto, en este apartado se evalúa la influencia del ciclo de trabajo de los dispositivos IoT sobre los márgenes de protección que garantizan el correcto funcionamiento de un canal de TV. 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.

4.2.3.1.2.1 Influencia del tiempo de espera entre transmisiones

En este apartado, se evalúa la influencia del tiempo de espera entre transmisiones sobre los márgenes de protección, es decir, se varía el tiempo de espera entre transmisiones de los dispositivos IoT y se fija el tiempo de transmisión. Consideramos, que el tiempo de transmisión de los dispositivos IoT es 6 ms, el cual equivale a la duración temporal mínima de un M-subtrama en la estructura de trama del enlace ascendente [71] [72]. 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.

Tabla 29. Ciclos de trabajo de los dispositivos NB-IoT, en función del tiempo de espera.

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

La siguiente figura muestra los márgenes de protección para que un canal DVB-T2 no sea interferido por un dispositivo NB-IoT, en función del ciclo de trabajo:

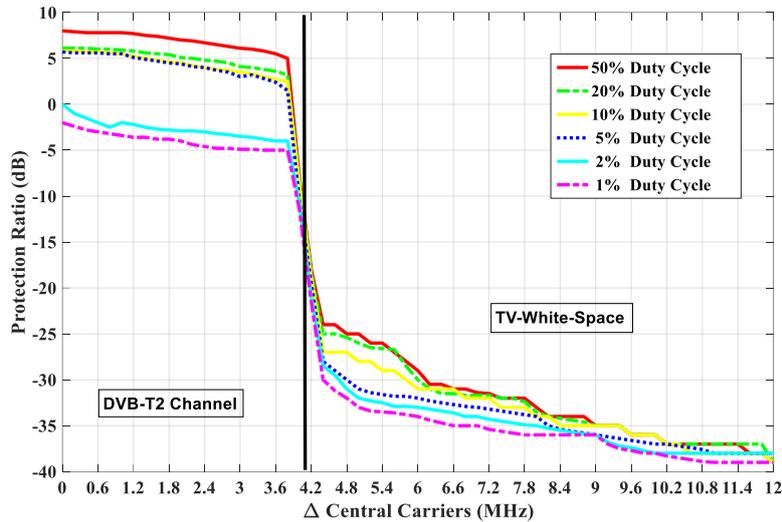


Figura 49. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por dispositivos NB-IoT, en función del tiempo de espera entre transmisiones.

Como se puede observar en la figura anterior, los márgenes de protección son más restrictivos para dispositivos NB-IoT con ciclos de trabajo altos respecto a dispositivos con ciclos de trabajo bajos. Además, en función de la separación en frecuencia entre portadoras centrales tendrá un efecto diferente, obteniéndose una diferencia mayor en el caso cocanal. Específicamente, en cocanal, 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%), debido a que la duración temporal de una trama de DVB-T2 es de 250ms y, por lo 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 o más) se ven interferidas y, así pues, el receptor de TDT tiene más tiempo para poder recuperarse (corregir los errores) de la interferencia, presentando un comportamiento más robusto. Por otro lado, en adyacencia (desde 4 hasta 12 MHz), este comportamiento es cada vez más despreciable, consiguiendo diferencias en los márgenes de protección de hasta 4 dB para ciclos de trabajo altos de los dispositivos NB-IoT.

4.2.3.1.2.2 Influencia del tiempo de transmisión

En este caso de estudio, fijamos el tiempo de espera entre transmisiones con un valor aproximado de 250ms (mejor caso), y variamos el tiempo de transmisión de los dispositivos IoT. 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.

Tabla 30. Ciclos de trabajo de los dispositivos NB-IoT, en función del tiempo de transmisión.

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

La siguiente figura muestra los márgenes de protección para que un canal DVB-T2 no sea interferido por un dispositivo NB-IoT, en función del tiempo de transmisión.

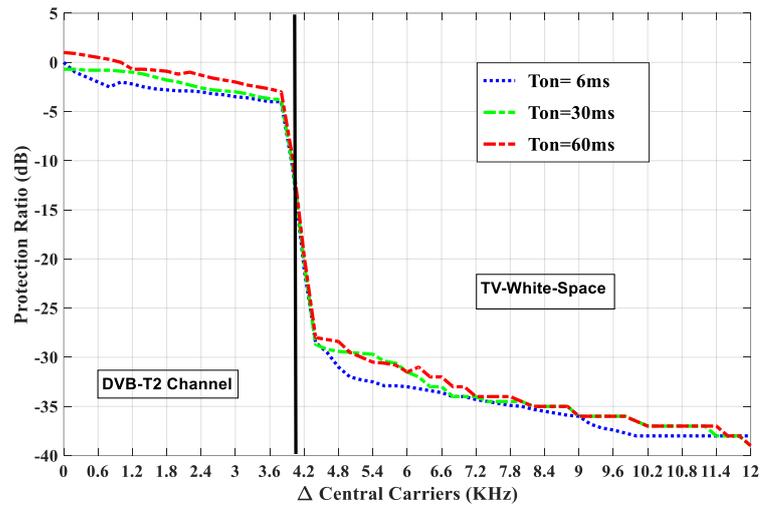


Figura 50. Márgenes de protección para una señal DVB-T2 interferida por dispositivos NB-IoT, en función del tiempo de transmisión.

Como se observa en la figura anterior, los resultados muestran que, aunque los dispositivos NB-IoT transmitan durante una duración temporal mayor o menor, los márgenes de protección que deben garantizarse en la entrada de un receptor de televi-

sión son muy similares, con variaciones máximas de 2dB tanto en co-canal como en adyacencia. **Por tanto, se puede concluir que cuando los dispositivos NB-IoT son la fuente interferente, el tiempo que duren transmitiendo no es un factor limitante para la garantizar la compartición de espectro con el servicio de televisión.**

4.2.3.2 Ganancia por propagación G_{PL}

Una vez obtenidos los márgenes de protección que garantizan la operación de los dispositivos y nodos NB-IoT en un TV-White-Space adyacente al canal de TV, hemos calculado la ganancia por propagación, en función de la geometría de cada uno de los escenarios de estudio, tal y como se muestra en la siguiente tabla. Hemos considerado los casos más restrictivos, usuarios de televisión recibiendo al nivel de sensibilidad, máxima directividad y discriminación angular mínima.

Tabla 31. Ganancia por propagación desde los nodos y dispositivos NB-IoT hasta la antena de TV, para todos los casos de estudio.

Escenarios		Ganancia por propagación (dB)	
		Dispositivos	Nodos
Ciudad inteligente	Caso A (Smart Parking)	51.5	49
	Caso B (Traffic Congestion)	48.7	
Agricultura y Ganadería inteligente	Caso C (Smart Farming)	45	41.4
	Caso D (Animal Tracking)	46.3	
eHealth	Caso E (Patients Surveillance)	47	47

Como se puede observar en la tabla anterior, en general, las ganancias de propagación tanto de los nodos como de los dispositivos NB-IoT son menores a 50 dB. Respecto a los dispositivos NB-IoT, el caso menos restrictivo es Smart Parking, el cual podría transmitir hasta 6 dB más de potencia respecto al caso más restrictivo, Smart Farming. Estas diferencias se fundamentan debido a la ubicación de los dispositivos, altura y tipo de entorno. Por un lado, en un entorno rural la señal que se propaga desde el dispositivo NB-IoT hasta la antena receptora de TV se verá menos atenuada o afectada por el canal (menos difusores que aparecen de forma aleatoria en el camino), respecto a la señal que se propaga en un entorno urbano. Por otro lado, a mayor diferencia de altura entre el dispositivo y la antena receptora de TV, se requiere una mayor distancia de separación horizontal entre ellos (para garantizar el peor caso, mayor directividad), y, por lo tanto, se obtienen valores mayores de ganancias de propagación.

4.2.3.3 PIRE máxima por los nodos y dispositivos NB-IoT

Los resultados que definen la PIRE máxima que podría transmitir los nodos y dispositivos NB-IoT usando un TV-White-Space, sin interferir el servicio de TV, fueron obtenidos para el peor caso, es decir, usuarios de TV ubicados en el borde de cobertura del transmisor DVB-T2. Para esta consideración, se configuró la potencia recibida de la señal DVB-T2 a -74 dBm en la entrada del receptor de TV, la cual corresponde al 95% de probabilidad de localización (al igual que el caso anterior) [97].

4.2.3.3.1 PIRE máxima por los Nodos NB-IoT

La siguiente figura muestra la PIRE máxima que podrían transmitir los nodos NB-IoT usando un TV-White-Space, como servicio secundario, para garantizar la calidad del servicio primario de DVB-T2. **Los resultados muestran que la PIRE máxima que podrían transmitir los nodos NB-IoT operando en cocanal a un canal de TV se encuentra alrededor de los -30 dBm, las cuales son valores muy bajos para poder ofrecer una buena cobertura y nivel de calidad adecuado a los dispositivos NB-IoT, por lo tanto, podríamos considerar que no es viable que los nodos IoT operen en cocanal a un canal de TV.** No obstante, podemos observar unas mejoras importantes de las PIRE máximas permitidas de los nodos NB-IoT conforme aumentamos la separación en frecuencia entre las portadoras centrales. **A partir de 4.5 MHz de separación en frecuencia, es decir, para una banda de guarda > 500 kHz, los nodos podrían transmitir con una PIRE máxima entre 14 dBm y 22 dBm en el mejor de los casos (*Smart Parking* y *Traffic Congestion*), y entre 6 dBm y 14 dBm en el caso más restrictivo (*Patients Surveillance*).**

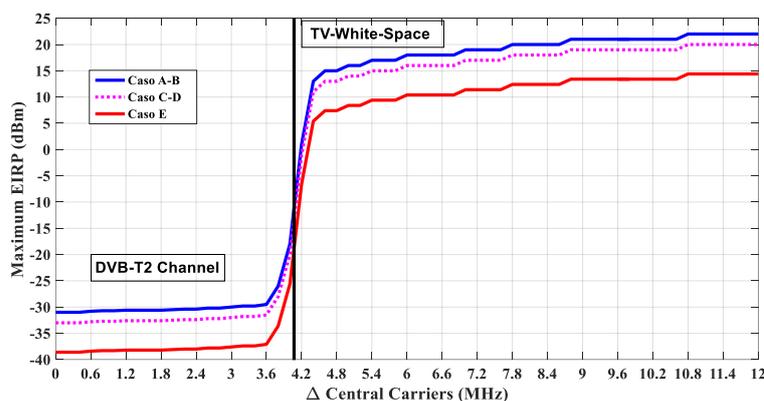


Figura 51. PIRE máxima que puede transmitir el Nodo NB-IoT usando un TV-White-Space cocanal o adyacente a un canal de TV, en función de los casos de estudio.

En resumen, a partir de una banda de guarda de 500 kHz es posible que los nodos NB-IoT puedan transmitir con potencias adecuadas de PIRE de hasta 22 dBm en el mejor de los casos, depende del escenario y de la banda de guarda, e incluso, si se gestiona eficientemente el despliegue de los nodos NB-IoT, se podrán conseguir potencias mayores de transmisión. Por ejemplo, la ubicación adecuada de los nodos NB-IoT respecto a la antena receptora de TV que garantice las mayores pérdidas de propagación (mayor ganancia de propagación), y mayor discriminación angular de la antena de TV, podrá garantizar una mayor PIRE que podrán transmitir los nodos NB-IoT, el incremento dependerá de la diferencia entre los nuevos valores de ganancias de propagación respecto a las consideradas en la Tabla 31 (peor caso).

4.2.3.3.2 PIRE máxima por los dispositivos NB-IoT

La siguiente tabla muestra la PIRE máxima que podrían transmitir los dispositivos NB-IoT usando un TV-White-Space en la banda de televisión, siempre garantizando la calidad del servicio primario de DVB-T2. Los umbrales de máxima potencia que podrían transmitir los dispositivos NB-IoT son obtenidos en función del ciclo de trabajo de los dispositivos (1%, 2% y 50%, casos más representativos), y de la separación frecuencia entre un canal DVB-T2 y NB-IoT, desde cocanal hasta adyacencia. **En cocanal, las máximas PIRE están en un rango desde -17 dBm hasta -23 dBm (en el mejor de los casos, dispositivos NB-IoT con ciclo de trabajo del 1%), los cuales son potencias bajas para poder lograr un buen alcance de cobertura con los nodos NB-IoT.** Por lo tanto, al igual que en el caso anterior (nodos NB-IoT), se considera que no es viable la compartición de espectro en cocanal para DVB-T2 y NB-IoT. **En adyacencia a un canal DVB-T2, un dispositivo NB-IoT podría transmitir con una PIRE entre 8 dBm y 15 dBm en Smart parking (en el mejor de los casos), y entre 1.5 dBm y 9 dBm en Smart Farming (en el caso más restrictivo), considerando un ciclo de trabajo del 1%, y una banda de guarda como mínima de 500 kHz y como máxima de 8 MHz. Aumentar la banda de 500 kHz a 1 MHz, los dispositivos NB-IoT podrían transmitir hasta 2.5 dB más de potencia respecto a la definida a 500 kHz.** Para una banda de guarda de 1 MHz, si aumentamos el ciclo de trabajo, los dispositivos NB-IoT tendrían que reducir la PIRE máxima en 1.5 dB para ciclos de trabajo del 2%, y en 6.5 dB para ciclos de trabajo del 50%, respecto a la definida para ciclos de trabajo del 1%. Si comparamos estos valores con los obtenidos en el caso anterior, los nodos NB-IoT requieren una banda de guarda de 500 kHz para poder transmitir con potencias adecuadas, sin embargo, los dispositivos requieren al menos una banda de guarda de 1 MHz, por lo tanto, se deberá garantizar una banda de guarda de 1 MHz entre servicios IoT y DVB-T2 para el correcto funcionamiento de los sistemas.

Tabla 32. PIRE máxima que pueden transmitir los dispositivos NB-IoT usando un TV-White-Space cocanal o adyacente a un canal de TV, en función de los casos de estudio.

Banda de Guarda (MHz)		Ciclo de Trabajo (%)	PIRE Dispositivos NB-IoT (dBm)				
			Smart Parking	Traffic Congestion	Smart Farming	Animal Tracking	Patients Surveillance
Cocanal	---	1	-17.6	-20.4	-24.1	-22.8	-23.6
		2	-19	-21.8	-25.5	-24.2	-25
		50	-28.6	-31.4	-35.1	-33.8	-34.8
Adyacente	0	1	-11	-13.8	-17.5	-16.2	-15.5
		2	-11.7	-14.5	-18.2	-16.9	-16.2
		50	-14.5	-17.3	-21	-19.7	-19
	0,5	1	8	5.3	1.5	2.8	3.5
		2	6.5	4	0.5	1.3	2
		50	1.5	-1.3	-5	-3.7	-3
	1	1	10.5	7.7	4	5.3	6
		2	9.5	6.7	3	4.3	5
		50	2.5	0	-4	-2.7	-2
	2	1	11.5	8.7	5	6.3	7
		2	10.5	7.7	4	5.3	6
		50	6.5	3.7	0	1.3	2
	3	1	12.5	9.7	6	7.3	8
		2	11.5	8.7	5	6.3	7
		50	8.9	6.1	2.4	3.7	4.4
	4	1	13.5	10.7	7	8.3	9
		2	12.5	9.7	6	7.3	8
		50	10.5	7.7	4	5.3	6
	6	1	15.5	12.7	9	10.3	11
		2	15.5	12.7	9	10.3	11
		50	13.5	10.7	7	8.3	9
	8	1	16.5	13.7	10	11.3	12
		2	15.5	12.7	9	10.3	11
		50	15.5	12.7	9	10.3	11

Si contrastamos los límites de PIRE máxima que podrían transmitir los dispositivos NB-IoT usando un TV-White-Space en adyacencia a un canal DVB-T2 (hasta 15 dBm, en el mejor de los escenarios propuestos), con los definidos por el 3GPP para dispositivos NB-IoT que definen tres límites de PIRE para los dispositivos: clase 6 hasta 14 dBm, clase 5 hasta 20 dBm, clase 3 hasta 23 dBm [75], podemos considerar que es factible la compartición de espectro entre NB-IoT y DVB-T2 en la banda de televisión. Además, se encuentran dentro del rango de potencias típicas de otras tecnologías propuestas para IoT: LoRaWAN (14dBm), LoRa (14dBm), SigFox (14dBm) o Wi-Fi (0-12dBm). Por último, es importante recalcar que las máximas PIRE de los dispositivos NB-IoT fueron obtenidas considerando los casos más restrictivos. Por lo tanto, si se gestiona eficientemente el despliegue de los dispositivos NB-IoT, se podrán conseguir potencias mayores de transmisión. El incremento de PIRE en los dispositivos dependerá tanto de la ubicación de los dispositivos NB-IoT respecto a la antena de TV y de la asignación de recursos por parte del nodo NB-IoT. **Por ejemplo, los dispositivos que se encuentren más ceca respecto a la antena de TV o tengan menores ganancias de propagación podrán operar a un espaciado en frecuencia o banda de guarda mayor a un canal de TV, mientras aquellos que presenten unas mayores ganancias de propagación podrán más transmitir a una frecuencia más cerca del canal DVB-T2, siempre y cuando se garantice una banda de guarda de por lo menos 500 kHz o 1 MHz en función del escenario.** Por último, es importante resaltar la importancia de esta propuesta, por un lado se contribuye a aumentar la capacidad de las redes móviles respecto al gran desafío que pretenden abordar al querer ofrecer conectividad a los servicios IoT, donde se esperan millones de dispositivos conectados a internet, y por otro lado, el uso eficiente del espectro radioeléctrico mediante la compartición de espectro de los dispositivos secundarios NB-IoT usando TV-White-Spaces (frecuencias atribuidas pero que no están siendo utilizadas) en la banda de televisión, específicamente, se lograrían optimizar hasta 7 MHz de espectro que antes no se utilizaba de un canal de TV de 8 MHz

4.2.3.3.3 Tasa de transmisión para NB-IoT en función del Ciclo de Trabajo

La siguiente figura muestra la capacidad que podrá ofrecer NB-IoT, en función del ciclo del trabajo de los dispositivos. La tasa de transmisión se calculó teniendo en cuenta modulación QPSK, y se consideró hasta un 25% de overhead, debido a los canales de referencia, de sincronización y codificación. La máxima tasa de transmisión que puede ofrecer NB-IoT es de 250 kbps, considerando un ancho de banda efectivo de 180 kHz, y un ciclo de trabajo del 100% del tiempo transmitiendo. Conforme el ciclo de trabajo es menor (aumenta el tiempo de espera), la tasa se reduce por un factor proporcional a la reducción del tiempo de transmisión. Además, 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 el mayor porcentaje de tiempo en modo “reposo”.**

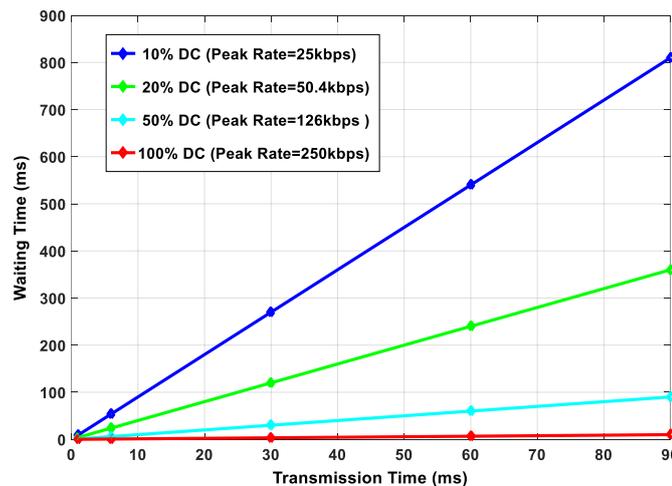


Figura 52. Tasa de pico para NB-IoT en función del ciclo de trabajo.

4.3. Conclusiones

El futuro uso de la banda de televisión digital terrestre después de los dividendos digitales será discutido en el año 2023, y, por lo tanto, estudios que validen la atribución a título primario para los servicios de televisión u otros potenciales casos de uso son requeridos para su decisión final del uso de la banda. En este capítulo, se demostró viable la compartición de espectro en la banda de televisión como un caso potencial de uso. Específicamente, se validaron dos casos de uso de compartición: el primero de ellos, propone una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado, como servicio primario y femtoceldas LTE-A en interiores de un hogar u oficina, como servicio secundario: el segundo caso de estudio, es la misma red DVB-T2 como servicio primario, pero como servicio secundario, se proponen los servicios de IoT bajo el estándar NB-LTE. La importancia de esta propuesta se fundamenta en dos contribuciones: por un lado, se optimiza el uso de la banda de televisión mediante el acceso secundario de dispositivos de baja potencia en los TV-White-Space, siempre garantizando los servicios de televisión, como servicio primario; por otro lado, se contribuye con nuevas frecuencias para las tecnologías IMT-A, con el objetivo de aumentar la capaci-

dad de las redes que soportarán tanto los servicios móviles como IoT, respecto al gran desafío de ofrecer conectividad a millones de dispositivos en la próxima década.

4.3.1. Primer Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y LTE-A

Se demostró en tres escenarios reales la viabilidad de la compartición de espectro entre femtoceldas LTE-A en el interior de una vivienda usando un μ -TV-White-Space y una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado. Los resultados son basados en medidas de laboratorio realizadas con equipos profesionales y comerciales, y validados mediante una campaña de medidas de campo llevadas a cabo en la Universitat Politècnica de València.

Respecto a las medidas de laboratorio, se midieron los márgenes de protección para dos casos de espacios en blanco: en el primero de ellos, la femtocelda LTE-A opera en un μ -TV-White-Space cocanal o adyacente a un canal DVB-T2; en el segundo de ellos, la femtocelda LTE-A opera en un μ -TV-White-Space que se encuentra entre dos canales de TV en uso. Las principales conclusiones son:

- Un receptor de televisión tolera menos potencia interferente para una señal LTE-A al 100% de carga de tráfico respecto a una señal en estado idle, debido a que la densidad de potencia interferente es mayor. Por consiguiente, una femtocelda LTE-A al 100% de carga en cocanal a un canal DVB-T2 debe transmitir con una diferencia de potencia de 19 dB menor respecto a un canal de TV, mientras que una femtocelda LTE-A en estado idle, puede transmitir con un nivel de potencia de 8 dB mayor respecto al estado 100% de carga, es decir, el margen de protección entre una señal útil DVB-T2 y una señal interferente LTE-A con carga idle es 11 dB. Conforme aumentamos la separación entre frecuencias centrales, los márgenes de protección tienen una importante mejora > 45 dB, cuando hay una separación en frecuencia de 5 MHz a 7 MHz entre las frecuencias centrales de DVB-T2 y LTE-A.
- Los márgenes de protección que deben garantizarse para decodificar correctamente un canal de DVB-T2 son más restrictivos para una señal LTE-A con un ancho de banda de 10 MHz que, para una de 5 MHz, tanto para cocanal como en adyacencia, debido a que el porcentaje de espectro solapado entre el canal de LTE-A y DVB-T2 siempre es mayor. Sin embargo, si comparamos a igualdad de solape entre los dos anchos de banda de LTE, los márgenes de protección son en media 2 dB menos restrictivos para un canal de 10 MHz respecto a un canal de 5 MHz, debido a que la densidad de potencia es menor.

- Se comprobó que los márgenes de protección son más restrictivos para el segundo caso descrito, es decir, cuando la femtocelda opera entre dos canales de TV. En concreto, si la femtocelda operará en la frecuencia central del μ -TV-White-Space con un ancho de banda de 10 MHz, es decir, con un solape del 25% con cada uno de los canales de TV, el margen de protección es - 7 dB, siendo este muy restrictivo. Por lo tanto, este caso de estudio, limita que el ancho de banda que se podría aprovechar para la compartición de espectro es menor al ancho de banda de la frecuencia libre.

Teniendo en cuenta la geometría de cada uno de los escenarios de estudio, y considerando el caso más restrictivo, usuario de TV en el borde de cobertura de celda, se llevaron a cabo medidas de campo dentro de la Universitat Politècnica de València para validar las medidas de laboratorio, los principales resultados son:

- Al comparar los márgenes de protección medidos en campo, se comprobó que eran entre 0.3 dB y 3 dB más restrictivos respecto a los medidos en laboratorio. Esta diferencia se debe a que la señal al propagarse en un entorno real sufre desvanecimientos debidos a la presencia de obstáculos y el clima. Por lo tanto, es más susceptible a degradarse más rápido frente a un incremento del ruido debido a las interferencias de señales externas.
- Se midieron los valores de ganancia por propagación para todos los escenarios de estudio, y se comprobó que el escenario 3 es el más restrictivo de todos, con un valor de ganancia de propagación de 47 dB, debido a la geometría del escenario, tanto la femtocelda LTE-A y la antena de TV están ubicadas a la misma altura con línea de vista, y solo una ventana de vidrio como obstáculo entre ellos. Respecto al menos crítico, se comprobó que era el escenario 1, con una ganancia por propagación de 62 dB, puesto que no hay línea de vista entre la femtocelda y la antena de TV, y el tipo de obstáculo que los separaba presentaba mayor atenuación. El escenario 2, tiene una ganancia por propagación adicional de 7 dB respecto al escenario 1 $G_{PL} = 54$ dB, es decir, que una femtocelda podría emitir hasta 7 dB más de potencia bajo las mismas consideraciones. Nuestros resultados se contrastaron con medidas de campo llevadas a cabo por la BBC en Reino Unido, de las cuales se puede extraer que nuestros resultados son entre 2 y 4 dB mayores de ganancia de propagación entre los obtenidos por la BBC, siendo el escenario 2 el que presenta la mayor diferencia. Las principales razones de los resultados se deben a la geometría de los escenarios: nuestros estudios fueron realizados en un escenario urbano, con densidad media de edificios, mientras los de la BBC, fueron llevados a cabo en un entorno abierto con pocas casas alrededor. Además, existían diferencias en

las distancias y las alturas de las antenas de la femtocelda y del receptor de TV, las cuales eran inferiores en sus estudios respecto a las tenidas en cuenta en nuestras medidas de campo.

- Se concluye que no es viable la compartición de espectro entre una femtocelda LTE-A operando en cocanal a un canal de TV, debido a las bajas potencias que podría transmitir la femtocelda. Concretamente, una femtocelda podría transmitir una PIRE entre -46 dBm y -34 dBm para el escenario 3, y entre -31 dBm y -19 dBm para el escenario 1. Por ende, con estas potencias no se podría garantizar un nivel adecuado de cobertura y calidad de señal a los dispositivos.
- Se comprobó que es factible la compartición de espectro entre una femtocelda LTE-A operando en adyacencia a un canal de TV. Una femtocelda con un ancho de banda de 5 MHz podría transmitir con una PIRE de hasta 27 dBm en el mejor de los casos (escenario 1), y hasta 11 dBm en el más restrictivo (escenario 3), considerando una banda de guarda de 0 MHz o solape del 0%. En el escenario 2, se podría transmitir hasta 7 dBm más de potencia respecto al escenario 1, con una PIRE de 18 dBm. En algunos escenarios, se podría incluso operar con algún solape $< 10\%$, pudiendo alcanzar potencias superiores a los 0 dBm. Además, estos resultados son consistentes tanto para el caso A como el caso B de estudio. Si la femtocelda LTE-A tiene un ancho de banda de 10 MHz, esta solo podría operar para el caso de estudio A, con una PIRE similar a los límites definidos para un ancho de banda de 5 MHz, sin embargo, se requiere una separación en frecuencia mayor para conseguir un solape del 0%, es decir una diferencia de 9 MHz entre la portadora central de la femtocelda y el canal de TV. La razón de que una femtocelda de 10 MHz no puede operar en el caso B es porque su espectro siempre estará solapado con algún canal de TV (menor solape conseguido es del 25%), y, por ende, solo se podría operar con PIRE máxima muy baja de hasta -5 dBm. Asimismo, nuestros resultados de PIRE máxima fueron contrastados con valores típicos máximos de femtoceldas 4G-LTE en interiores que están en un rango de 10 a 20 dBm, definidos para las bandas 1900 MHz, 2600 MHz, 3400 MHz [105] [106] [107]. Se puede concluir que nuestros resultados son consistentes para los escenarios propuestos a excepción del escenario 3, el cual permite una PIRE máxima de 11 dBm. Nuestros resultados definen una PIRE más restrictiva de 9 dB, respecto al valor máximo definido en otros estudios. No obstante, aunque exista esta restricción de potencia en el escenario 3, esta diferencia podría verse compensada por las buenas características de propagación que ofrece la banda de TV (rango entre 470 MHz a 700 MHz). Por ejemplo, las pérdidas de propagación a

700 MHz son aproximadamente 10 dB y 15 dB menores respecto a las obtenidas para las bandas de 1900 MHz y 3400 MHz, a igualdad de condiciones.

En resumen, se demostró que la compartición de espectro entre los servicios IMT-A y TDT es viable en adyacencia. Los resultados de PIRE máxima son entre 11 dBm y 27 dBm, en función de los escenarios de estudio y para una banda de guarda de 0 MHz. Si se realiza una instalación eficiente en el usuario final, se podrían alcanzar valores mayores de PIRE. Por ejemplo, buscar el lugar dentro de la vivienda que garantice las mayores ganancias por propagación entre la femtocelda y la antena de TV, teniendo en cuenta que nosotros hemos emulado los escenarios de estudio más restrictivos, es decir, hemos ubicado la femtocelda donde se garantizaba las menores pérdidas de propagación. Además, aunque no se definieron los valores de PIRE máxima para otros escenarios menos restrictivos, cuando la femtocelda sea ubicada en plantas inferiores, se podrá deducir que podrán transmitir con PIRE superiores a los 18 dBm, teniendo en cuenta que había una diferencia de 7 dB en ganancia de propagación cuando medimos los escenarios 2 y 3, los cuales la principal diferencia que los caracterizaba era la altura de la femtocelda respecto a la antena de TV.

Por último, se evaluó como impactarían las redes de TDT sobre las femtoceldas LTE-A. Las femtoceldas podrán ofrecer una tasa variable de transmisión al móvil que dependerá del esquema de modulación y el ancho de banda que esté usando. Las tasas de transmisión para un MCS índice 6-QPSK es de 1 Mbps para un ancho de banda de 5 MHz y 1.94 Mbps para un ancho de banda de 10 MHz, mientras que un MCS índice 26-QAM soporta tasas de hasta 12.4 Mbps para un ancho de banda de 5 MHz, y 22.6 Mbps para ancho de banda de 10 MHz, para mayor detalle ver sección 2.5. Por lo tanto, en función del esquema de modulación que pueda soportar el móvil tendrá una tasa diferente. Las principales conclusiones son resumidas a continuación:

- El margen de protección requerido para que un móvil LTE pueda ofrecer la máxima tasa de transmisión, y no sea interferido por una señal DVB-T2 es -22.6 dB, es decir, la señal interferente DVB-T2 podría ser como máximo hasta 22.6 dB mayor que la señal LTE-A a la entrada de la antena del móvil, para una banda de guarda de 0 MHz. Este margen podrá ser hasta 30 dB menos restrictivo, margen de protección de -52.7 dB, MCS índice: 6QPSK, si se requieren tasas de transmisión menores. Por lo tanto, en función de la tasa de transmisión requerida por el móvil se tendrá que garantizar un margen de protección que se encuentre dentro de este rango. Si aumentamos la banda de guarda de 0 MHz a 1 MHz, los márgenes de protección mejoran en media 7 dB.

- Las distancias de protección que deberían garantizarse entre una estación de TDT y una femtocelda LTE-A ubicada en el interior de una vivienda u oficina fueron obtenidas para estaciones de TDT que tienen una PIRE de: 84 dBm (250 kW), 73 dBm (20 kW), y, 67 dBm (5 kW), y altura de las estaciones de: 200 m, 100 m, y 60m. Para garantizar máxima tasa de transmisión para el móvil, la femtocelda LTE-A se deberá ubicar a distancias de 17 km, 11 km y 8 km respecto a la estación DVB-T2, para un entorno urbano y considerando una PIRE de 84 dBm, y alturas de la estación de TDT de 200, 100 y 60 metros, respectivamente. Si la PIRE de la estación DVB-T2 se encuentra entre 67 dBm y 73 dBm, se tendrán que garantizar distancias entre 5 km y 8 km para altura de antena de 200 metros y entre 2 km y 4 km para alturas de la estación de TDT de 60 metros. Finalmente, se podrían ubicar femtoceldas a menor distancia de la estación de TDT (entre 370 metros y 2 Km), no obstante, la femtocelda no podría ofrecer la máxima tasa de transmisión y habría una penalización de la tasa, que dependerá de la modulación y codificación que pueda soportar.

4.3.2. Segundo Caso Potencial de Uso:

Compartición de Espectro entre TDT y NB-IoT

Los resultados comprobaron que es factible la compartición de espectro entre los servicios NB-IoT y los servicios de televisión bajo el estándar DVB-T2 (servicio primario), teniendo en cuenta las siguientes restricciones. A cerca de las medidas de los márgenes de protección se puede concluir que:

- En cocanal, cuando los espectros de las señales NB-IoT y DVB-T2 están totalmente solapados, para una separación en frecuencia desde 0 hasta 3.8 MHz, los márgenes de protección son muy restrictivos, tanto para los nodos NB-IoT entre 6 dB y 4 dB, como para los dispositivos IoT entre 8 dB y 5 dB, siendo más restrictivos para el enlace ascendente. Por lo tanto, el nivel máximo de potencia interferente de los dispositivos NB-IoT a la entrada del receptor de TV debe ser entre 8 dB y 5 dB menor respecto al nivel de potencia de la señal deseada DVB-T2, en función de la separación en frecuencia. A partir de una banda de guarda de 500 kHz, se consiguen mejoras considerables en los márgenes de protección alrededor de 30 dB para el enlace ascendente y 42 dB para el enlace descendente, comparándolos con los resultados en cocanal. Por consiguiente, para una separación en frecuencia entre 500 kHz y hasta 8 MHz, los nodos NB-IoT deberán cumplir márgenes de protección entre -40 dB y -47 dB, y los dispositivos NB-IoT entre -24 dB y -39 dB en la entrada del receptor de TV.

- Se comprobó que la interferencia que puede tolerar un receptor víctima de TV es diferente en función del ciclo de trabajo de los dispositivos NB-IoT. Considerando un tiempo de transmisión fijo y variando el tiempo de espera entre transmisiones, se obtienen mejoras en los márgenes de protección de hasta 10 dB en cocanal y hasta 4 dB en adyacencia, para tiempos de espera iguales o superiores a 250 ms, dispositivos NB-IoT con ciclos de trabajo 2% y 1%. Esto sucede debido a que la duración temporal de una trama de DVB-T2 es de 250ms, y, por lo tanto, no todas las tramas consecutivas de DVB-T2 una de cada dos o más se ven interferidas y, así pues, el receptor de TV puede recuperarse (corregir los errores), presentando un comportamiento más robusto. Por otra parte, si consideramos un tiempo de espera entre transmisiones de aproximadamente 250 ms (mejor configuración) y variamos el tiempo de transmisión de los dispositivos NB-IoT, se concluye que no hay variación considerable en los márgenes de protección, obteniendo mejoras solo hasta 2 dB para tiempos de transmisión pequeños o ciclos de trabajo bajos, tanto en cocanal como en adyacencia. En resumen, para garantizar la calidad en el servicio de TV, el parámetro crítico a tener en cuenta en los dispositivos NB-IoT es el tiempo de espera entre transmisiones.

Teniendo en cuenta la geometría de cada uno de los escenarios de estudio, los nodos y dispositivos NB-IoT deberán cumplir con los siguientes requerimientos de PIRE máxima para garantizar la calidad del servicio primario de televisión. Cabe destacar, que las máximas PIRE fueron obtenidas considerando los casos más restrictivos: usuario de TV en el borde de cobertura de celda, y máxima directividad de la antena de TV o menor ganancia por propagación (las ganancias de propagación tanto de los nodos como de los dispositivos NB-IoT fueron menores a 50 dB).

- En cocanal a DVB-T2, tanto los nodos como los dispositivos NB-IoT tendrían que transmitir con una PIRE muy restrictiva, específicamente, los nodos podrían transmitir con una PIRE máxima de alrededor de -30 dBm, y los dispositivos con una PIRE hasta -17 dBm, siempre considerando en el mejor de los escenarios de estudio propuestos. En resumen, se considera que no es factible la compartición de espectro entre los servicios NB-IoT y TV operando en cocanal, debido a las bajas potencias que podrían emitir los nodos y dispositivos, y, en consecuencia, se tendría un alcance limitado y niveles mínimos de calidad.

- Se comprobó que es factible que un nodo NB-IoT opere en adyacencia a un canal DVB-T2, el cual podría transmitir con una PIRE máxima entre 14 dBm y 22 dBm en el mejor de los casos (Smart Parking y Traffic Congestion), y en un rango de 6 dBm a 14 dBm en el caso más restrictivo (Smart Farming and Animal Tracking), considerando una banda de guarda desde 500 kHz hasta 8 MHz. En el caso de estudio E (Patients Surveillance), el nodo NB-IoT podrá transmitir con una PIRE máxima entre 12 dBm y 20 dBm.
- Se concluye que es viable que un dispositivo NB-IoT opere en adyacencia a un canal DVB-T2. Un dispositivo NB-IoT podría transmitir con una PIRE máxima entre 10 y 15 dBm en el mejor de los casos (Smart parking, y ciclo de trabajo del 1%), y en un rango de 4 dBm a 9 dBm en el caso más restrictivo (Smart Farming, y ciclo de trabajo del 1%), considerando una banda de guarda desde 1 hasta 8 MHz. Si quisiéramos usar una banda de guarda de 500 kHz, mínima requerida por los nodos, deberíamos disminuir la PIRE en 2.5 dB respecto a una banda de 1 MHz. Para una banda de guarda de 1 MHz, si aumentamos el ciclo de trabajo, los dispositivos NB-IoT tendrían que reducir la PIRE máxima en 1.5 dB para ciclos de trabajo del 2%, y en 6.5 dB para ciclos de trabajo del 50%, respecto a la definida para ciclos de trabajo del 1%, para un mayor detalle de la PIRE máxima ver la tabla 31. Asimismo, se podrá incrementar la PIRE máxima de los dispositivos o nodos IoT, en función de la ubicación de estos respecto a la antena de TV y de la asignación de recursos por parte del nodo NB-IoT. Por ejemplo, los dispositivos que se encuentren más cerca respecto a la antena de TV o tengan menores ganancias de propagación podrán operar a un espaciado en frecuencia o banda de guarda mayor a un canal de TV, mientras aquellos que presenten unas mayores ganancias de propagación podrán transmitir a una frecuencia más cerca del canal DVB-T2, siempre y cuando se garantice una banda de guarda de por lo menos 500 kHz o 1 MHz en función del escenario.

En definitiva, la compartición de espectro entre sistemas NB-IoT usando un TV-White-Space en adyacencia a un canal TV es factible, y los valores de PIRE máxima determinados en esta tesis son comparables con los definidos por el 3GPP para dispositivos NB-IoT (se definen tres límites de PIRE para los dispositivos: clase 6 hasta 14 dBm, clase 5 hasta 20 dBm, clase 3 hasta 23 dBm). Además, nuestros valores de PIRE se encuentran dentro del rango de potencias típicas de otras tecnologías propuestas para IoT: LoRaWAN (14dBm), LoRa (14dBm), SigFox (14dBm) o Wi-Fi (0-12dBm). Por lo tanto, la compartición de espectro para IoT en la banda de TV es una propuesta interesante, teniendo en cuenta que hay un gran abanico de aplicaciones, y, por ende, diferentes requerimientos de implementación.

Capítulo 5

Conclusiones

En la presente tesis se ha estudiado la problemática de la armonización de la banda de televisión después del apagón analógico a través de dos aspectos claves:

El primero de ellos, la convivencia entre las redes de televisión y móviles en la banda de 700 MHz en Sudamérica o Primer Dividendo Digital (DD1): En la actualidad, ningún país de Sudamérica ha llevado a cabo despliegues de redes móviles de cuarta generación a nivel nacional en la banda de 700 MHz, debido a retrasos temporales del apagón analógico, y por consecuencia no se ha alcanzado una limpieza total de las emisiones de televisión en dicha banda. Las redes de televisión operan en Sudamérica principalmente bajo dos estándares: DVB-T2 adoptado en Colombia, e ISDB-Tb en el resto de países de Sudamérica. Las redes móviles operarán en adyacencia a los servicios de televisión a través del enlace ascendente, es decir, transmite el móvil y recibe el e-NodeB, con una banda de guarda de por lo menos 5 MHz. Respecto a los concursos de subasta de la banda de 700 MHz llevados a cabo por cada uno de los países, la canalización adoptada es la siguiente: Colombia subastará la banda en 9 canales 4G-LTE de ancho de banda de 5 MHz. Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay han dividido la banda de 700 MHz igual a Colombia, no obstante, estos países operan con el estándar de televisión digital ISDB-Tb; Argentina y Bolivia el primer canal adyacente de 4G-LTE tienen un ancho de banda de 10 MHz; Perú ha dividido la banda en canales 4G-LTE de 15 MHz, y Venezuela no hay información como subastará la banda, por lo tanto, hemos considerado que podrá tener canales 4G-LTE de ancho de banda de 5 MHz.

El segundo de ellos, se contribuye con dos casos potenciales para el futuro uso de la banda de televisión después de los dividendos digitales. En el año 2023, se realizarán revisiones acerca del uso de la banda de televisión para discutir si seguirá atribuida a título primario a los servicios de televisión, o podría ser atribuida a otros servicios de radiocomunicaciones en un modo de acceso diferente (compartido coprimario, compartido con licencia, entre otros).

Los resultados presentados fueron obtenidos mediante un proceso iterativo de medidas de laboratorio con equipos profesionales y comerciales, modelado analítico en función de los parámetros técnicos de operación de cada tecnología, y la geometría del escenario de estudio, y validación de resultados a través de medidas de campo (solo para el primer caso potencial de uso). Las principales conclusiones son presentadas a continuación.

5.1. Convivencia en la banda de 700 MHz en Sudamérica

La convivencia entre las redes de televisión y móviles en la banda de 700 MHz en Sudamérica evalúa el impacto tanto de los terminales móviles sobre receptores de televisión como el impacto de estaciones de televisión sobre estaciones base 4G-LTE o e-NodeB, siendo el último caso el que evidencia un mayor riesgo de interferencia. Se deberán garantizar soluciones adicionales en la recepción de los e-NodeB debido a las altas potencias de los transmisores de televisión, y alturas elevadas tanto del transmisor interferente como el receptor víctima. Por un lado, las redes de televisión con transmisores de alta potencia (84 dBm o 250 kW), tendrán que garantizar distancias de protección entre una estación de TV y un e-NodeB como mínimo a 23 km para un entorno urbano, y 31 km para un entorno rural, en función de la relación de interferencia en canal adyacente o ACIR y altura del transmisor interferente. Por otro lado, las redes móviles 4G-LTE con usuarios transmitiendo a la máxima potencia de 23 dBm, se deberán cumplir distancias de protección como máximo de 67 metros entre un móvil y la antena de TV ubicada en la azotea de una vivienda, en el peor de los casos. Además, se considera un caso crítico garantizar la correcta emisión del canal 51 de TV, si el móvil está ubicado en la misma sala donde se encuentra el receptor de TV, en escenarios de recepción en interiores, porque se deberán garantizar distancias de protección como mínimo de 6.7 metros para el estándar DVB-T2 adoptado en Colombia, y en el peor de los casos, como mínimo de 10.3 metros para el estándar ISDB-Tb adoptado en Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela.

A continuación, se detallan las principales conclusiones que se deberán tener en cuenta para que las redes móviles no interfieran las de televisión: en primer lugar, para redes de TV en recepción fija, y, en segundo lugar, para redes de TV en interiores:

Para redes DVB-T2: los resultados fueron obtenidos para la red de televisión que estará gestionada por Radio Televisión de Colombia, la cual opera con el siguiente modo de transmisión: modulación: 64QAM, codificación: 2/3, tamaño de la FFT: 16 K, modo: extendido, intervalo de guarda: 1/8 y patrón de portadoras pilotos: PP3. Este modo requiere una SNR mínima de 16 dB en recepción fija, y una potencia mínima a la entrada del receptor de TV de -78 dBm. Los resultados para el Consorcio de Canales Nacionales Privados se pueden obtener a partir de los obtenidos para RTVC, aplicando un factor de corrección igual a la diferencia entre el valor de la relación de portadora a interferencia requerida para RTVC respecto al CCNP. Se ha considerado como objeto de estudio los dos últimos canales de TV: Canal 50 (686-692 MHz) y 51 (692-698 MHz). Las conclusiones respecto a los márgenes de protección son:

- En función de la carga de tráfico que esté emitiendo el móvil 4G-LTE un receptor de televisión DVB-T2 tolera más o menos potencia interferente, siendo el peor caso cuando el móvil está transmitiendo con poca carga de tráfico o en estado idle, es decir, el móvil utiliza solo un número reducido de recursos durante pequeños instantes temporales. Esto sucede principalmente por la alta variabilidad temporal de la señal 4G-LTE, y, por ende, las altas potencias de pico que se producen durante pequeños instantes temporales que conllevan que la calidad de la señal de un canal de televisión se degrade más rápidamente. En concreto, para la banda de guarda mínima de 5 MHz en Sudamérica, los márgenes de protección entre la señal útil DVB-T2 e interferente 4G-LTE-UL son: -40.3 dB (LTE-idle), -50.4 dB (LTE-50%), y -53.7 dB (LTE-100%), considerando un modelo de canal AWGN, es decir ruido Gaussiano. Por lo tanto, si el móvil 4G-LTE está emitiendo con una carga del 50% o 100%, este podría transmitir por lo menos hasta 10 dB más de potencia que un móvil que se encuentre en estado idle. Si aumentamos la banda de guarda entre tecnologías hasta los 11 MHz, el impacto de una señal 4G-LTE sobre el canal 50 de TV (aquellas zonas geográficas donde no se usa el canal 51), los márgenes de protección mejoran hasta en 4 dB para un móvil 4G-LTE con poca carga de tráfico.
- En función del tipo de entorno, recepción fija sobre tejado o recepción en interiores, los márgenes de protección entre una señal útil DVB-T2 y una señal interferente 4G-LTE serán más restrictivos que los medidos para un modelo de canal AWGN. Por un lado, para recepción fija sobre tejado, considerando un modelo de canal Rice para DVB-T2, los márgenes de protección son en media 0.9 dB más restrictivos respecto a los medidos para AWGN. Por otro lado, para recepción en interiores y considerando un modelo de canal Rayleigh, los márgenes de protección son en media 2 dB más restrictivos.

Para una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado, un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia, y teniendo en cuenta la geometría del escenario de estudio, se deberán tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Usuarios de TV en el borde de cobertura de celda con una sensibilidad de -78 dBm para garantizar el 95% de ubicaciones, se deberán cumplir mínimas pérdidas de propagación entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV de 58 dB para el canal 51, y 54 dB para el canal 50, considerando discriminación angular máxima o ganancia por directividad nula. En el caso contrario, el cual sería el peor de los casos, es decir, discriminación angular nula o ganancia por directividad máxima, se deberán garantizar mínimas pérdidas de propagación entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV de 67 dB para el canal 51, y 63 dB para el canal 50, respectivamente.
- Para garantizar la emisión del canal 51 de TV en usuarios recibiendo al borde de cobertura de celda, hemos comparado las MCL requeridas entre el móvil y la antena de TV con valores de referencia, las cuales son obtenidas para garantizar la mínima distancia entre el móvil y la antena de TV en el peor caso. Con estas consideraciones, se requieren atenuaciones adicionales de 19 dB, y 2.5 dB para una MCL de referencia de 47 dB y 56 dB, en función si se considera discriminación angular nula o máxima. Estas atenuaciones deberán ser conseguidas con filtros en el receptor que mejoren el nivel de selectividad en canal adyacente.
- Otra alternativa a un filtrado adicional para garantizar la correcta emisión de canales 51 y 50 de TV, es garantizar una distancia de protección entre el móvil 4G-LTE y la antena de TV. Para un entorno urbano, se deberán garantizar distancias entre 47 metros y 42 metros para los canales 51 y 50, respectivamente. Para un entorno rural, estas distancias se verían incrementadas hasta 80 metros y 52 metros, considerando discriminación nula. Si consideramos discriminación angular máxima de la antena de TV, las distancias se verían reducidas hasta en 29 metros para el canal 51.
- En otros casos de estudio, donde usuarios víctimas reciban la señal de televisión con un umbral mayor o igual de potencia recibida de $P_{rx}^{DVB-T2} \geq -59$ dBm, no se requiere ninguna atenuación adicional o ninguna solución para que las redes de televisión operen en adyacencia a las redes móviles en la banda de 700 MHz en Colombia.

Para redes ISDB-Tb: los resultados han sido obtenidos para el modo de transmisión escogido por Brasil, el cual usa un MODCOD: 64 QAM, FFT: 8k, GI: 1/16, y requiere una SNR mínima de 21 dB en recepción fija, y una potencia mínima a la entrada del receptor de TV de -77 dBm. Asimismo, el resto de los países que escogieron el estándar ISDB-Tb operarán con este modo. No obstante, existen diferencias en las canalizaciones de la banda de 700 MHz. Para un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia de 23 dBm, y con una canalización de 5 MHz (Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela), se puede concluir respecto a los márgenes de protección:

- Para una banda de guarda de 5 MHz, es decir, para el primer canal 4G-LTE que se encuentra adyacente al último canal de televisión, un móvil podría transmitir hasta 33.2 dB más de potencia respecto al nivel de señal útil ISDB-Tb, medidos a la entrada del receptor de TV. Para aquellas zonas geográficas donde solo opera el canal 50, el móvil 4G-LTE con 5 MHz de ancho de banda podría llegar con un incremento de potencia de hasta 5 dB respecto al caso anterior, es decir, deberá cumplir un margen de protección de -38.4 dB. Para el tercer canal adyacente de 4G-LTE, el cual opera en el rango de frecuencias de 713 MHz a 718 MHz, el móvil podría llegar a la entrada del receptor de TV como incremento máximo de potencia de 41.5 dB respecto al nivel de señal útil del canal 50 de ISDB-Tb.
- Para garantizar el correcto funcionamiento del canal 51 de TV, se requieren mínimas pérdidas de propagación entre un móvil 4G-LTE de 5 MHz y una antena de TV entre 57 dB para el tercer canal LTE, y 63 dB para el primer canal LTE, considerando discriminación angular máxima. En el caso contrario, discriminación angular nula, las MCL aumentarían hasta en 9 dB debido a la ganancia máxima de la antena de TV. Si lo comparamos con las MCL de referencia, se requiere atenuaciones adicionales como máximo de 24.9 dB para garantizar la convivencia entre el canal 51 de TV y el primer canal adyacente de LTE. Si en lugar de las atenuaciones queremos garantizar distancias de protección, se deberán cumplir distancias de protección entre un móvil 4G-LTE y una antena de TV entre 25 metros y 53 metros para un entorno urbano, y entre 27 metros y 148 metros para un entorno rural, en función del caso de estudio. En resumen, si se garantiza un umbral de potencia recibida de ISDB-Tb a la entrada del receptor de $P_{recibida}^{ISDB-TB} \geq -52 \text{ dBm}$ no habrá degradación de la calidad del servicio de televisión por operar el servicio móvil en adyacencia, aún en el peor de los casos, es decir, que la señal del móvil llegue a la antena de TV con un ángulo inferior a 22 °, el cual garantiza discriminación angular nula.

- Para garantizar el correcto funcionamiento del canal 50 de TV, se deberán garantizar atenuaciones entre 2.6 dB para una discriminación angular máxima, y 19.7 dB para una discriminación angular nula, si queremos desplegar el primer canal 4G-LTE que opera en el rango de frecuencias de 703 MHz a 708 MHz. Para poder operar en el segundo y tercer canal 4G-LTE, solo se requieren atenuaciones adicionales como máximo de 17 dB para el peor caso cuando la discriminación angular de la antena receptora de TV es nula.

Si comparamos los países que han dividido la banda de 700 MHz en canales de 5 MHz, en función del estándar de televisión digital adoptado por cada uno de ellos podemos concluir: a igualdad de ancho de banda adyacente de canal LTE, los países que adoptaron el estándar ISDB-Tb requieren 6 dB más de atenuación adicional respecto a los que adoptaron el estándar DVB-T2, para garantizar el correcto despliegue de las redes móviles en la banda de 700 MHz, sin interferir ningún canal de TV incluido el 51, considerando los casos más críticos, es decir, usuario víctima en el borde de cobertura de celda, y discriminación angular nula. La principal causa es que DVB-T2 es más robusto frente a ruido interferencias que ISDB-Tb (ver capítulo 2), es decir, que DVB-T2 tolera más potencia interferente sin degradar la calidad del servicio primario a igualdad de condiciones de medida. Además, la diferencia de SNR requerida para cada uno de los modos de transmisión de televisión adoptados es proporcional a esta diferencia.

Si comparamos los resultados obtenidos para ISDB-Tb, en función del ancho de banda del canal del canal 4G-LTE podemos deducir: los márgenes de protección entre un canal útil ISDB-Tb de 6 MHz y un canal interferente 4G-LTE de 10 MHz, como el caso de Argentina y Bolivia, son ligeramente más restrictivos ~ 1 dB que los obtenidos para un canal 4G-LTE de 5 MHz, como es el caso de Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela. Por lo tanto, los resultados de MCL, AT, y DP obtenidos para canales 4G-LTE de 5 MHz son muy parecidos a los obtenidos para canales 4G-LTE de 10 MHz, y se deberán ajustar por este valor. En resumen, el impacto de las redes móviles 4G-LTE con canalizaciones de 10 MHz sobre las redes de televisión bajo el estándar ISDB-Tb es perjudicial solo para usuarios víctima al borde de cobertura de celda.

Para canales 4G-LTE de 15 MHz como el caso de Perú, los resultados demuestran que se requieren atenuaciones adicionales como máximo de 23 dB para garantizar el canal 51 de TV, considerando discriminación angular nula o máxima directividad. Estas atenuaciones adicionales podrán ser conseguidas mediante la implementación de un filtro entre la salida de la antena de TV y antes de la cabecera de distribución que permita mejorar el nivel de selectividad en canal adyacente del receptor por este valor.

Para redes de televisión ofreciendo cobertura en recepción en interiores, y un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia ($P_{tx}^{LTE-UE} = 23 \text{ dBm}$):

- Para garantizar la correcta emisión del canal 51 de TV con una banda de guarda de 5 MHz respecto al primer canal 4G-LTE, los resultados demuestran que un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia, y ubicado en la misma sala donde se encuentra el receptor de TV, deberá garantizar distancias de protección como mínimo de 6.7 metros para el escenario de Colombia, y en el peor de los casos, como mínimo de 10.3 metros para el escenario de Ecuador, Brasil, Chile, Paraguay, Uruguay y Venezuela. Para aquellas zonas geográficas donde solo opere el canal 50 de TV, estas distancias se verían reducidas entre 2.8 metros (como mínimo 3.9 metros, para Colombia) y 2 metros (como mínimo 8.3 metros, para Perú). Por lo tanto, un móvil 4G-LTE transmitiendo a la máxima potencia, y ubicado dentro del interior de una vivienda junto a un receptor de televisión es un caso crítico, ya que estas distancias serán difíciles de conseguir sin ninguna solución adicional.
- Para un móvil 4G-LTE operando en el primer canal adyacente, transmitiendo a la máxima potencia y ubicado en diferente sala donde se encuentra el receptor de TV (considerando unas pérdidas adicionales de penetración de 8 dB), se requiere distancias de protección entre 1.4 metros para garantizar el correcto funcionamiento del canal 50 de TV y 2.6 metros para el canal 51 de TV, considerando la canalización de Colombia. En el peor de los casos, considerando la canalización LTE de Perú de 15 MHz, se requiere distancias de protección entre 3.3 metros y 3.6 metros, para el canal 50 y 51 de TV, respectivamente.
- Por último, en el caso de estudio que el móvil 4G-LTE transmitiera con una potencia menor (valores típicos de 2 dBm), la distancia de protección se vería reducida a distancias ≤ 1 metro para la mayor parte de los casos de estudios, a excepción del caso de estudio del canal ISDB-Tb 51 que alcanzaría una distancia mínima de protección de 1.3 metros en el peor de los casos, canal LTE adyacente con 5 MHz de ancho de banda.

El impacto de las redes móviles sobre la televisión en la banda de 700 MHz en Sudamérica evidencia un riesgo de interferencia principalmente en usuarios víctima en borde de cobertura de celda que se encuentren decodificando los canales 51 y 50 de TV, debido a que el móvil 4G-LTE podría transmitir a la máxima potencia de 23 dBm con poca carga de tráfico. En el peor de los casos, canal 4G-LTE con un ancho de banda de 5 MHz, se requieren atenuaciones adicionales como mínimo de 19 dB para el canal DVB-T2 51, y como máximo de 25 dB para el canal 51 de ISDB-Tb.

Por lo tanto, se comprobó con filtros diseñados para la canalización de Sudamérica la atenuación adicional que proporcionaban estos ubicados a la entrada del receptor de televisión. Para una banda de guarda de 5 MHz, es decir, espaciado en frecuencia entre el canal 51 de TV y el primer canal adyacente 4G-LTE, los filtros consiguen una mayor caída fuera de banda y se pueden conseguir atenuaciones adicionales como mínimo entre 23 dB para el primer filtro medido, y máximo 30 dB con el mejor de los filtros. Al aumentar la banda de guarda hasta 11 MHz, es decir, canal 50 de TV respecto al primer canal adyacente de 4G-LTE, solo se consigue mejorar la atenuación en tan solo 1 dB, alcanzándose como máximo una atenuación de 31 dB. No obstante, las atenuaciones conseguidas por los filtros para una banda de guarda mínima de 5 MHz son suficientes para poder solventar los posibles problemas de interferencia que podrían ocurrir en Sudamérica en la banda de 700 MHz, los cuales requieren atenuaciones menores que se encuentran dentro de los rangos obtenidos con los filtros. Por lo tanto, se demuestra el uso de un filtro paso bajo como una solución óptima para garantizar el correcto funcionamiento de las redes de televisión y móvil en la banda de 700 MHz en Sudamérica.

Una vez evaluado el riesgo de interferencia de las redes móviles sobre las de televisión, se estudió el caso contrario, el impacto de las redes de televisión sobre las móviles. Los resultados han sido obtenidos para valores reales de redes de TDT en Sudamérica, por lo tanto, las siguientes consideraciones han sido hechas: las estaciones de TV de alta potencia podrían emitir con tres PIRE diferentes, en el peor de los casos: 84 dBm (250 kW), 73 dBm (20 kW) y 67 dBm (5 kW); las estaciones de TV son desplegadas con alturas típicas de: 120 m, 100 m, 80m y 60m; las estaciones móviles están ubicadas a 30 metros sobre el nivel del suelo; teniendo en cuenta las máscaras espectrales de los transmisores de TV y los niveles de selectividad en canal adyacente de los e-NodeB, se consideraron cuatro niveles de relaciones de interferencia en canal adyacente o ACIR: 50, 60, 70 y 80 dB. Las siguientes recomendaciones para garantizar que las redes de TV no interfieran a las móviles, se deberán tener en cuenta:

Para garantizar el correcto funcionamiento del primer canal adyacente 4G-LTE respecto a una estación de TV que opere en el canal 51 con una PIRE de 84 dBm, se deberán tener en cuenta las siguientes recomendaciones:

- Para un entorno urbano, distancias de protección entre la estación de TV y el e-NodeB son entre 23 km para una altura del transmisor de TV de 120 m y un ACIR de 50 dB en el peor de los casos, y 2.9 km para una altura del transmisor de TV de 60 m y un ACIR=80 dB en el mejor de los casos.

- Para un entorno rural, teniendo en cuenta las mismas consideraciones del caso anterior, las distancias de protección son entre 31 km en el peor de los casos y 4.4 km en el mejor de los casos.

Teniendo en cuenta que cada país de Sudamérica tiene una topología de red diferente para el despliegue de las redes de televisión digital, los resultados anteriores fueron acotados en función del nivel de interferencia en canal adyacente o ACIR y de la diferencia de alturas de las estaciones de TV y móvil, para que se apliquen un resultado u otro en función de los requerimientos de cada uno de los países de Sudamérica. La siguiente resume las distancias de protección entre una estación de TV y e-NodeB para diferentes configuraciones de redes:

Tabla 33. MCL y DP entre una estación base de TDT y e-NodeB para un entorno urbano y rural, en función del ACIR y potencia de TDT, para la banda 700 MHz en Sudamérica.

Tipo de Entorno		ACIR (dB)			
Urbano		50.0	60.0	70.0	80.0
PIRE= 84 dBm (250 KW)	MCL (dB)	139.0	129.0	119.0	109.0
	DP, Htx=120 m (Km)	23.5	13.9	7.2	3.7
	DP, Htx=60 m (Km)	16.4	9.5	4.9	2.9
PIRE= 73 (20 KW)	MCL (dB)	128.0	118.0	108.0	98.0
	DP, Htx=120 m (Km)	13.1	6.7	3.6	1.7
	DP, Htx=60 m (Km)	9.0	4.5	2.8	1.3
PIRE= 67 (5 KW)	MCL (dB)	122.0	112.0	102.0	92.0
	DP, Htx=120 m (Km)	8.9	4.1	2.3	1.1
	DP, Htx=60 m (Km)	6.1	2.7	1.8	0.9
Rural		50.0	60.0	70.0	80.0
PIRE= 84 dBm (250 KW)	MCL (dB)	139.0	129.0	119.0	109.0
	DP, Htx=120 m (Km)	31.0	19.5	11.1	5.5
	DP, Htx=60 m (Km)	22.3	13.5	7.6	4.4
PIRE= 73 (20 KW)	MCL (dB)	128.0	118.0	108.0	98.0
	DP, Htx=120 m (Km)	18.6	10.4	5.4	2.4
	DP, Htx=60 m (Km)	12.8	7.1	4.3	2.0
PIRE= 67 (5 KW)	MCL (dB)	122.0	112.0	102.0	92.0
	DP, Htx=120 m (Km)	13.3	6.8	3.6	1.2
	DP, Htx=60 m (Km)	9.1	4.6	3.0	1.1

En función de la directividad del e-NodeB respecto a la estación de TV, si consideramos discriminación angular nula o directividad máxima del e-NodeB, la distancia de protección entre una estación de TV y e-NodeB es de 39 km, considerando una PIRE de 84 dBm y una altura de 120 metros de la estación de TV, y un ACIR de 50 dB, el cual representa el peor de los casos. Por lo tanto, si lo comparamos con el resultado anterior, el cual tiene en cuenta discriminación angular máxima, la distancia de protección se incrementó en 15 km respecto al caso anterior. La siguiente tabla resume las distancias de protección entre una estación de TV y e-NodeB para diferentes configuraciones de redes, si consideramos discriminación angular nula o máxima directividad del e-NodeB.

Tabla 34. MCL efectivas y DP entre una estación base de TDT y e-NodeB para un entorno urbano, en función del ACIR y potencia de TDT, para la banda 700 MHz en Sudamérica.

Tipo de Entorno		ACIR (dB)			
		50.0	60.0	70.0	80.0
PIRE= 84 dBm (250 KW)	MCL efectivas (dB)	150.9	140.9	130.9	120.9
	DP, Htx=120 m (Km)	39	25.7	15.5	8.3
	DP, Htx=60 m (Km)	29.1	18.1	10.6	5.6
PIRE= 67 (5 KW)	MCL efectivas (dB)	133.9	123.9	113.9	103.9
	DP, Htx=120 m (Km)	18.3	10.2	4.8	2.8
	DP, Htx=60 m (Km)	12.6	6.9	3.2	2.3

Es importante resaltar que las estaciones de TV en Sudamérica suelen estar ubicadas en las montañas debido a la densa orografía que caracteriza estos países, y no en el caso urbano de la zona de servicio, donde generalmente son ubicadas las estaciones móviles. Por lo tanto, mediante un despliegue coordinado se podrán conseguir estas distancias de protección permitiendo reducir el impacto de las redes de televisión sobre las móviles en la banda de 700 MHz. Además, estas distancias de protección deberán ser validadas mediante medidas de campo en cada país de Sudamérica, debido a que cada uno de ellos tiene una topografía y orografía diferente, por lo tanto, podrán presentar variaciones a los resultados presentados.

5.2. Casos potenciales para el futuro uso de la banda de televisión

Se demostró mediante dos potenciales casos de uso que la compartición de espectro como futuro uso de la banda de televisión es viable para los casos y condiciones estudiadas en esta tesis doctoral: el primero de ellos, propone una red DVB-T2 ofreciendo cobertura en recepción fija sobre tejado, como servicio primario y femtoceldas LTE-A en interiores de un hogar u oficina, como servicio secundario: en el segundo caso de estudio, se propone la compartición de espectro entre los servicios de televisión y los de internet de las cosas bajo el estándar NB-LTE. La importancia de esta propuesta se fundamenta en dos contribuciones: por un lado, se optimiza el uso de la banda de televisión mediante el acceso secundario de dispositivos de baja potencia en las frecuencias libres o TV-White-Space, siempre garantizando la calidad de los servicios primarios de televisión, por otro lado, se contribuye con nuevas frecuencias para las tecnologías móviles de última generación, con el objetivo de aumentar la capacidad de las redes que soportarán tanto los servicios móviles como IoT, respecto al gran desafío de ofrecer conectividad a millones de dispositivos en la próxima década.

5.2.1. *Primer Caso Potencial de Uso: Compartición de Espectro entre TDT y LTE-A*

Se demostró la viabilidad en tres escenarios, los cuales representan los casos más restrictivos. El primer escenario, propone tanto que la femtocelda como la antena de televisión están ubicados en el mismo edificio, no obstante, se encuentran localizados en pisos o plantas diferentes, es decir, la femtocelda está en la última planta y la antena de TV en la azotea del edificio. En el segundo escenario, la femtocelda está ubicada en un edificio frontal donde está ubicada la antena receptora de TV, hay línea de vista entre ellos, con solo una ventana como obstáculo, la diferencia de altura entre ellos es el equivalente a una planta o piso de un edificio. El último de ellos, es muy parecido al segundo escenario, con la diferencia que está ubicados a la misma altura. Respecto a los casos de uso de espacios en blanco: el primero de ellos, la femtocelda LTE-A operará en un μ -TV-White-Space cocanal o adyacente a un canal DVB-T2; en el segundo de ellos, la femtocelda LTE-A opera en un μ -TV-White-Space que se encuentra entre dos canales de TV en uso. El modo de transmisión DVB-T2 con un ancho de banda de 8 MHz es: MODCOD: 256-QAM, CR: 2/3, FFT: 32KE, GI: 1/128, PP7, este modo es utilizado por un operador de televisión en Reino Unido.

A continuación, se presentan las principales recomendaciones para que femtoceldas LTE-A puedan operar en un μ -TV-White-Space como servicio secundario en la banda de televisión. En primer lugar, se detallan conclusiones de las medidas de laboratorio, y en segundo lugar, las medidas de campo:

- Una femtocelda LTE-A que opere en un μ -TV-White-Space cocanal o adyacente a un canal de TV, podrá emitir más o menos potencia, en función de la carga de tráfico del sistema, siendo más restrictivo para una femtocelda LTE-A operando al 100% de carga. En concreto, una femtocelda LTE-A al 100% de carga en cocanal a DVB-T2, puede llegar como máximo con un nivel de señal interferente de 19 dB menor respecto al nivel de señal útil del canal de televisión medido en la entrada del receptor de TV, es decir, el margen de protección entre una señal interferente LTE-A y una señal útil DVB-T2 en cocanal es de 19 dB. Si la femtocelda LTE-A está operando con una carga de tráfico en estado idle, podría transmitir con un nivel de potencia de 8 dB mayor respecto a operar al 100% de carga de tráfico. Respecto a la separación en frecuencia entre portadoras centrales, conforme aumentamos la separación, los márgenes de protección tienen una importante mejora > 45 dB, cuando la frecuencia central de la femtocelda está entre 5 y 7 MHz de separación respecto a la frecuencia central de DVB-T2, es decir, banda de guarda entre 1 y 2 MHz, en adyacencia.
- Si comparamos los dos casos de estudio de μ -TV-White-Space, el primero de ellos, que propone que la femtocelda opere en adyacencia a un canal DVB-T2, con el segundo, donde la femtocelda ópera entre dos canales de DVB-T2, se comprobó que el segundo caso limita el ancho de banda con el que podría operar la femtocelda, donde este no podrá ser mayor al ancho de banda del espacio en blanco, debido a que la compartición de espectro entre estas dos tecnologías con solape mayores o iguales a un 25% no son posibles (los márgenes de protección son muy restrictivos).

Teniendo en cuenta la geometría de cada uno de los escenarios de estudio, y considerando el caso más restrictivo, usuario de TV en el borde de cobertura de celda, se llevaron a cabo medidas de campo dentro de la Universitat Politècnica de València para validar las medidas de laboratorio, los principales resultados son:

- Al comparar los márgenes de protección medidos en campo respecto a los medidos en laboratorio, se comprobó que los de campo son entre 0.3 dB y 3 dB más restrictivos. Esta diferencia se debe a que la señal al propagarse en un entorno real sufre desvanecimientos debidos a la presencia de obstáculos y el clima. Por lo tanto, es más susceptible a degradarse más rápido frente a un incremento del ruido debido a las interferencias de señales externas.

- Se midieron los valores de ganancia por propagación para todos los escenarios de estudio, es decir, las pérdidas de propagación desde la femtocelda hasta la entrada del receptor de TV, y se comprobó que el escenario 3 es el más restrictivo de todos, con un valor de ganancia de propagación de 47 dB, debido a la geometría del escenario, tanto la femtocelda LTE-A y la antena de TV están ubicados a la misma altura con línea de vista, y solo una ventana de vidrio como obstáculo entre ellos. Respecto al menos crítico, se comprobó que era el escenario 1, con una ganancia por propagación de 62 dB, puesto que no hay línea de vista entre la femtocelda y la antena de TV, y el tipo de obstáculo que los separaba presentaba mayor atenuación. El escenario 2, tiene una ganancia por propagación adicional de 7 dB respecto al escenario 1 $G_{PL} = 54$ dB, es decir, que una femtocelda podría emitir hasta 7 dB más de potencia bajo las mismas consideraciones. Nuestros resultados se contrastaron con medidas de campo llevadas cabo por la BBC en Reino Unido, de las cuales se puede extraer que nuestros resultados son entre 2 y 4 dB menos restrictivos que los obtenidos por la BBC, siendo el escenario 2 el que presentaba la mayor diferencia. Las principales razones de las diferencias entre los resultados se deben a la geometría de los escenarios: nuestros estudios fueron realizados en un escenario urbano, con densidad media de edificios, mientras los de la BBC, fueron llevados a cabo en un entorno abierto con pocas casas alrededor. Además, existían diferencias en las distancias y las alturas de las antenas de la femtocelda y del receptor de TV, las cuales eran inferiores en sus estudios respecto a las tenidas en cuenta en nuestras medidas de campo.
- Se concluye que no es viable la compartición de espectro entre una femtocelda LTE-A operando en cocanal a un canal de TV, debido a las bajas potencias que podría transmitir la femtocelda. Concretamente, una femtocelda podría transmitir una PIRE entre -46 dBm y -34 dBm para el escenario 3 (peor caso), y entre -31 dBm y -19 dBm (en el escenario 1, el cual tiene las mayores ganancias por propagación), por ende, con estas potencias no se podría garantizar un nivel adecuado de cobertura y calidad de señal a los dispositivos.
- Se comprobó que es factible la compartición de espectro entre una femtocelda LTE-A operando en adyacencia a un canal de TV. Una femtocelda con un ancho de banda de 5 MHz podría transmitir con una PIRE de hasta 27 dBm en el mejor de los casos (escenario 1), y hasta 11 dBm en el más restrictivo, es decir, en el escenario 3, considerando una banda de guarda de 0 MHz o solape del 0%. En el escenario 2, se podría transmitir hasta 7 dBm más de potencia respecto al escenario 1, es decir con una PIRE = 18 dBm. En algunos escenarios, se podría incluso operar con solape < 10 %, logrando alcanzar potencias

superiores a los 0 dBm. Además, estos resultados son consistentes tanto para el caso A, donde la femtocelda opera en adyacencia a un canal DVB-T2, como el caso B de estudio, donde la femtocelda opera entre dos canales de TV. Si la femtocelda LTE-A tiene un ancho de banda de 10 MHz, esta solo podría operar para el caso de estudio A, con una PIRE similar a los límites definidos para un ancho de banda de 5 MHz, sin embargo, se requiere una separación en frecuencia mayor para conseguir un solape del 0%, es decir una diferencia de 9 MHz entre la portadora central de la femtocelda y el canal de TV. La razón de que una femtocelda de 10 MHz no puede operar en el caso B es porque su espectro siempre estará solapado por lo menos un 25% con algún canal de TV, y por ende, solo se podría operar con PIRE máxima menores a -5 dBm. Asimismo, nuestros resultados de PIRE máxima fueron contrastados con valores típicos máximos de femtoceldas 4G-LTE en interiores, los cuales están en el rango entre 10 dBm y 20 dBm, definidos para las bandas 1900 MHz, 2600 MHz, y 3400 MHz [105] [106] [107]. Se puede concluir que nuestros resultados son consistentes aun siendo los escenarios más restrictivos propuestos a excepción del escenario 3, el cual permite una PIRE de 11 dBm. Si comparamos el caso más restrictivo, nuestros resultados definen una PIRE más restrictiva de 9 dB, respecto al valor máximo definido en otros estudios (PIRE = 20 dBm). No obstante, aunque exista esta restricción de potencia en el escenario 3, esta diferencia podría verse compensada por las buenas características de propagación que ofrece la banda de TV (rango entre 470 MHz a 700 MHz). Por ejemplo, las pérdidas de propagación a 700 MHz son aproximadamente 10 y 15 dB menores respecto a las obtenidas para las bandas de 1900 MHz y 3400 MHz, a igualdad de condiciones.

En resumen, se demostró que la compartición de espectro entre los servicios móviles y televisión es viable en adyacencia. Los resultados de PIRE máxima son entre 11 dBm y 27 dBm para una banda de guarda de 0 MHz, y en función de los escenarios de estudio. Si se realiza una instalación eficiente en el usuario final, se podría alcanzar valores mayores de PIRE. Por ejemplo, buscar el lugar dentro de la vivienda que garantice las mayores ganancias por propagación entre la femtocelda y la antena de TV, teniendo en cuenta que nosotros hemos emulado los escenarios más restrictivos en cuanto a la ubicación de la femtocelda. Además, aunque no se definieron los valores de PIRE máxima para otros escenarios menos restrictivos, por ejemplo, femtocelda esté ubicada en plantas inferiores a la última, se podrá garantizar que podrán transmitir con PIRE superiores a los 18 dBm, teniendo en cuenta que había una diferencia de 7 dB en la ganancia cuando medimos los escenarios 2 y 3, los cuales la principal diferencia que los caracterizaba era la altura de la femtocelda respecto a la antena de TV.

Por último, se evaluó como impactarían las redes de TDT sobre las femtoceldas LTE-A. Las femtoceldas podrán ofrecer una tasa variable de transmisión al móvil que dependerá del esquema de modulación y el ancho de banda que esté usando. Por ejemplo, las tasas de transmisión si el móvil soporta un MCS índice 6-QPSK es de 1 Mbps para un ancho de banda LTE de 5 MHz, y 1.94 Mbps para un ancho de banda de 10 MHz, mientras que para un MCS índice 26-QAM soportará tasas de hasta 12.4 Mbps para ancho de banda de 5 MHz, y 22.6 Mbps para ancho de banda de 10 MHz, respectivamente. Por lo tanto, en función del esquema de modulación que pueda soportar el móvil tendrá una tasa diferente, el cual depende de la calidad del enlace en ese momento o de la SNR que el móvil reporta a la femtocelda a través del parámetro de calidad, CQI. Las principales conclusiones son resumidas a continuación:

- El margen de protección requerido para que un móvil LTE pueda ofrecer la máxima tasa de transmisión (MCS índice: 26-QAM), y no sea interferido por una señal DVB-T2 es -22.6 dB, es decir, la señal interferente DVB-T2 podría ser como máximo hasta 22.6 dB mayor que la señal LTE-A a la entrada de la antena del móvil, para una banda de guarda de 0 MHz. Este margen podrá ser hasta 30 dB menos restrictivo, es decir, margen de protección de -52.7 dB, para un MCS índice: 6-QPSK, no obstante, solo podrá soportar tasas de transmisión hasta 2 Mbps. Por lo tanto, en función de la tasa de transmisión requerida por el móvil se tendrá que garantizar un margen de protección que se encuentre dentro de este rango. Si aumentamos la banda de guarda de 0 MHz a 1 MHz, los márgenes de protección mejoran en media 7 dB.

Las distancias de protección que deberían garantizarse entre una estación de TV y una femtocelda LTE-A ubicada en el interior de una vivienda u oficina fueron obtenidas para los casos más restrictivos: estaciones de TV de alta potencia: PIRE de 84 dBm (250 kW), 73 dBm (20 kW), y 67 dBm (5 kW), y altura de las estaciones: 200 m, 100 m, y 60m.

- Para garantizar la máxima tasa de transmisión para el móvil, si la estación de TV emite con una PIRE de 84 dBm, la femtocelda LTE-A se deberá ubicar a distancias de 17 km, 11 km y 8 km respecto a la estación DVB-T2, considerando alturas de la estación de TDT de 200, 100 y 60 metros, para un entorno urbano. Si la PIRE de la estación DVB-T2 se encuentra entre 67 dBm y 73 dBm, se tendrán que garantizar distancias entre 5 km y 8 km para altura de antena de 200 metros, y entre 2 km y 4 km para alturas de la estación de TV de 60 metros. Finalmente, se podrían ubicar femtoceldas a menor distancia de la estación de TV entre 370 metros y 2 Km, no obstante, la femtocelda podría ofrecer tasa de transmisión limitada que dependerá de la modulación y codificación que pueda soportar el móvil en función de su SNR medida.

**5.2.2. Segundo Caso Potencial de Uso:
Compartición de Espectro entre TDT y NB-IoT**

Los resultados demostraron que es factible la compartición de espectro entre los servicios de televisión bajo el estándar DVB-T2 y casos de uso para internet de las cosas bajo el estándar NB-LTE-IoT, teniendo en cuenta las siguientes restricciones. A cerca de las medidas de los márgenes de protección se puede concluir que:

- En cocanal, cuando los espectros de las señales NB-IoT y DVB-T2 están totalmente solapados, para una separación en frecuencia desde 0 hasta 3.8 MHz, los márgenes de protección están en un rango de 4 dB a 8 dB para los nodos y dispositivos NB-IoT, siendo más restrictivos para el enlace ascendente. Por lo tanto, el nivel máximo de potencia interferente de los dispositivos NB-IoT a la entrada del receptor de TV debe ser entre 5 dB y 8 dB menor respecto al nivel de potencia de la señal deseada DVB-T2, en función de la separación en frecuencia. A partir de una banda de guarda de 500 kHz, se consiguen mejoras considerables en los márgenes de protección alrededor de 30 dB para el enlace ascendente, y 42 dB para el enlace descendente, si los comparamos con los resultados en cocanal. En concreto, para una separación en frecuencia entre 500 kHz y hasta 8 MHz, los nodos NB-IoT deberán cumplir márgenes de protección entre -40 dB y -47 dB, y los dispositivos NB-IoT entre -24 dB y -39 dB medidos en la entrada del receptor de TV.
- Se comprobó que la interferencia que puede tolerar un receptor víctima de TV es diferente en función del ciclo de trabajo de los dispositivos NB-IoT. Por un lado, considerando un tiempo de transmisión fijo y variando el tiempo de espera entre transmisiones, se obtienen mejoras en los márgenes de protección de hasta 10 dB en cocanal y hasta 4 dB en adyacencia, para tiempos de espera iguales o superiores a 250 ms, es decir, dispositivos NB-IoT con ciclos de trabajo 2% y 1%. Esto es debido a que la duración temporal de una trama de DVB-T2 es de 250ms, y, por lo tanto, no todas las tramas consecutivas de DVB-T2 se verían interferidas (una de cada dos o más), presentando un comportamiento más robusto. Por otra parte, si consideramos un tiempo de espera entre transmisiones de aproximadamente 250 ms (mejor configuración), y variamos el tiempo de transmisión de los dispositivos NB-IoT, se concluye que no hay variación considerable en los márgenes de protección, obteniendo mejoras solo hasta 2 dB para tiempos de transmisión pequeños o ciclos de trabajo bajos, tanto en cocanal como en adyacencia. En resumen, para garantizar la calidad en el servicio de TV, el parámetro crítico a tener en cuenta en los dispositivos NB-IoT es el tiempo de espera entre transmisiones.

Teniendo en cuenta la geometría de cada uno de los escenarios de estudio, los nodos y dispositivos NB-IoT deberán cumplir con los siguientes requerimientos de PIRE máxima para garantizar la calidad del servicio primario de televisión. Cabe destacar, que las máximas PIRE fueron obtenidas considerando los casos más restrictivos: usuario de TV en el borde de cobertura de celda, y máxima directividad de la antena de TV o menor ganancia por propagación (las ganancias de propagación tanto de los nodos como de los dispositivos NB-IoT fueron menores a 50 dB).

- En cocanal a DVB-T2, tanto los nodos como los dispositivos NB-IoT tendrían que transmitir con una PIRE muy restrictiva, específicamente, los nodos podrían transmitir con una PIRE máxima de alrededor de -30 dBm, y los dispositivos con una PIRE hasta -17 dBm, siempre considerando el mejor de los escenarios de estudio propuestos. En resumen, se considera que no es factible la compartición de espectro entre los servicios NB-IoT y TV operando en cocanal, debido a las bajas potencias que podrían emitir los nodos y dispositivos, y, en consecuencia, se tendrían un alcance limitado y niveles mínimos de calidad.
- Se comprobó que es factible que un nodo NB-IoT opere en adyacencia a un canal DVB-T2, el cual podría transmitir con una PIRE máxima entre 14 dBm y 22 dBm en el mejor de los casos (*Smart Parking* y *Traffic Congestion*), y en un rango de 6 dBm a 14 dBm en el caso más restrictivo (*Smart Farming and Animal Tracking*), considerando una banda de guarda desde 500 kHz hasta 8 MHz. En el caso de estudio E (*Patients Surveillance*), el nodo NB-IoT podrá transmitir con una PIRE máxima entre 12 dBm y 20 dBm. Además, mediante una ubicación adecuada de los nodos NB-IoT respecto a la antena receptora de TV, la cual garantice las mayores pérdidas de propagación, se podrá garantizar una PIRE transmitida mayor por los nodos NB-IoT
- Al igual que el caso anterior (NB-IoT), se concluye que es viable que un dispositivo NB-IoT opere en adyacencia a un canal DVB-T2. Un dispositivo NB-IoT podría transmitir con una PIRE máxima entre 10 dBm y 15 dBm en el mejor de los casos, Smart parking, y ciclo de trabajo del 1%, y en un rango de 4 dBm a 9 dBm en el caso más restrictivo, Smart Farming, y ciclo de trabajo del 1%, considerando una banda de guarda desde 1 hasta 8 MHz. Si quisiéramos usar una banda de guarda de 500 kHz (mínima requerida por los nodos), deberíamos disminuir la PIRE en 2.5 dB respecto a una banda de 1 MHz. Para una banda de guarda de 1 MHz, si aumentamos el ciclo de trabajo, los dispositivos NB-IoT tendrían que reducir la PIRE máxima en 1.5 dB para ciclos de trabajo del 2%, y en 6.5 dB para ciclos de trabajo del 50%, respecto a la definida para ciclos de trabajo del 1% (para un mayor detalle de la PIRE máxima que podrá

emitir un dispositivo, en función del escenario, ver Tabla 31). Asimismo, al igual que se propuso para los nodos, se podrá incrementar la PIRE máxima de los dispositivos, en función de la ubicación de estos respecto a la antena de TV y de la asignación de recursos por parte del nodo NB-IoT. Por ejemplo, los dispositivos que se encuentren más cerca respecto a la antena de TV o tengan menores ganancias de propagación podrán operar a un espaciado en frecuencia o banda de guarda mayor a un canal de TV, mientras aquellos que presenten unas mayores ganancias de propagación podrán transmitir a una frecuencia más cerca del canal DVB-T2, siempre y cuando se garantice una banda de guarda de por lo menos 500 kHz o 1 MHz en función del escenario.

- Respecto a la banda de guarda entre NB-IoT y DVB-T2, los nodos requieren una banda de guarda de 500 kHz para poder transmitir con potencias adecuadas, sin embargo, los dispositivos requieren al menos una banda de guarda de 1 MHz, por lo tanto, se deberá garantizar una banda de guarda de 1 MHz entre servicios NB-IoT y DVB-T2 para garantizar el correcto funcionamiento de los sistemas. En consecuencia, se lograría optimizar 6 MHz de espectro por canal libre en la banda de TV el cual antes no se usaba, si operarán entre dos canales DVB-T2.

En definitiva, la compartición de espectro entre sistemas NB-IoT usando un TV-White-Space en adyacencia a un canal TV es factible, y los valores de PIRE máxima determinados en esta tesis son comparables con los definidos por el 3GPP para dispositivos NB-IoT, los cuales definen tres límites de PIRE para los dispositivos: clase 6 hasta 14 dBm, clase 5 hasta 20 dBm, clase 3 hasta 23 dBm. Además, nuestros valores de PIRE se encuentran dentro del rango de potencias típicas de otras tecnologías propuestas para IoT: LoRaWAN (14dBm), LoRa (14dBm), SigFox (14dBm) o Wi-Fi (0-12dBm). Por lo tanto, la compartición de espectro para IoT en la banda de TV es una propuesta interesante, teniendo en cuenta que hay un gran abanico de aplicaciones, y, por ende, diferentes requerimientos de implementación.

5.3. Trabajo Futuro

En el ámbito de esta tesis doctoral, se resolvieron dos problemáticas acerca de la armonización de la banda de televisión digital terrestre. Por lo tanto, teniendo en cuenta las vertientes de esta importante línea de investigación, se identificaron los siguientes temas como trabajo futuro:

- **Medidas de campo a través de un piloto ubicado en aquellas posibles zonas que se verían interferidas por el despliegue de las redes móviles de cuarta generación 4G-LTE en la banda de 700 MHz en Sudamérica.** Teniendo en cuenta las particularidades de la topografía y orografía que caracteriza los países de Sudamérica es importante validar los resultados obtenidos en esta tesis mediante medidas de campo con el objetivo de acotar los resultados y poder coordinar un correcto despliegue de las redes móviles en la banda de 700 MHz a nivel nacional en cada país de Sudamérica.
- **Armonización de la banda de televisión en zonas de frontera cada país.** La diversidad de estándares y cuotas de mercado del servicio de televisión en cada uno de los diferentes países a nivel mundial, plantea un interesante reto para proponer directrices que garanticen una coordinación entre diferentes países en el despliegue tanto de los servicios de televisión como los móviles en la banda de los dividendos digitales y optimice el uso del espectro radioeléctrico.
- **Definición de los requerimientos técnicos de operación de los sistemas móviles de quinta generación 5G en la banda de 700 MHz en Europa y 600 MHz en América.** La banda de 700 MHz y 600 MHz ha sido identificada para el despliegue de los sistemas móviles de quinta generación en la WRC del 2015. En Europa, se ha decidido que se deberá garantizar la limpieza de la banda de 700 MHz en todos los países que conforman la Unión Europea como fecha límite en 2020 con una diferencia temporal de ± 2 años. En América, aún no hay una decisión unánime acerca del futuro uso de la banda de 600 MHz. No obstante, Estados Unidos ya ha decidido atribuirle y subastarla en el año 2017 para los servicios móviles de quinta generación. México y Colombia también han ratificado que será atribuida para los servicios móviles, sin embargo, aún no ha sido subastada. Por lo tanto, estudios que evalúen la convivencia entre los servicios de televisión digital terrestre y los servicios móviles de quinta generación son requeridos.

- **La compartición de espectro entre los dispositivos y nodos IoT operando en los TV-White-Spaces como servicio secundario, y los servicios de televisión como servicio primario, plantea un interesante caso de uso futuro de la banda de televisión**, el cual podría ser discutido en la WRC de 2023. En el ámbito de esta tesis, se definieron los requerimientos técnicos de operación para una tecnología específica propuesta por los operadores móviles. No obstante, teniendo en cuenta la diversidad de aplicaciones y servicios IoT que se proyectan para el año 2020, los cuales podrán ser implementados mediante diferentes soluciones de tecnologías inalámbricas, se plantea interesante extender estos estudios a otros estándares inalámbricos, tales como, LoRA, Bluetooth, Wi-Fi, entre otros. Además, se deberán definir guías de recomendación para que los servicios de televisión no interfieran la calidad de los servicios IoT.

Contribuciones de la Tesis Doctoral

Esta Tesis Doctoral tiene su punto de partida entre los años 2013 y 2014 con el proyecto de cooperación entre la Agencia Nacional del Espectro de Colombia (ANE), y el Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM, el cual pertenece a los institutos de investigación vinculados a la Universitat Politècnica de València. El objetivo de este proyecto era realizar estudios de convivencia entre los servicios de televisión y otros servicios de telecomunicaciones en bandas de frecuencias adyacentes para Colombia. En concreto, se realizaron recomendaciones para que los servicios de televisión bajo el estándar DVB-T2, los de comunicaciones móviles de cuarta generación 4G-LTE y los de comunicaciones de cuerpos de seguridad y defensa bajo el estándar P25 operaran correctamente en bandas de frecuencias adyacentes, teniendo en cuenta las condiciones particulares de las redes desplegadas en Colombia. Dentro de las recomendaciones presentadas, se definieron la banda de guarda requerida entre las tecnologías para garantizar el correcto funcionamiento en adyacencia; límites de emisiones fuera de banda del transmisor interferente; nivel de selectividad en bandas adyacentes requerido en el receptor para garantizar la convivencia; técnicas de mitigación de interferencias, entre otros. Las principales contribuciones de este proyecto, y que validan la calidad de esta tesis doctoral son:

- Contribución a la ITU presentada a través del gobierno de Colombia, y en la cual se definieron las relaciones de protección entre el estándar de televisión DVB-T2 con canalización de 6 MHz, y otros servicios de telecomunicaciones en bandas de frecuencias adyacentes. Es importante resaltar que la mayor parte de los estudios realizados en Europa son focalizados para las condiciones propias de las redes de Europa, ancho de banda de un canal de televisión 8 MHz, diferentes atribuciones de las bandas del dividendo digital respecto América, entre otros.

“Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands,” ITU-R WP6A contribución 403, presentada a través del gobierno de Colombia, ITU 2014.

- Un artículo de investigación que plantea la problemática completa de Colombia desde la transición de la televisión analógica a la digital, la convivencia entre las redes móviles, las de televisión analógica y digital, y las redes de protección pública y seguridad en las bandas de 700 MHz y 450 MHz. Además, aborda el plan técnico de televisión de Colombia, teniendo en cuenta las recomendaciones de los estudios de convivencia. Los resultados son fundamentados con estudios teóricos, medidas de laboratorio y simulaciones computacionales.

D. Gómez-Barquero; J. López-Sánchez; G. Martínez-Pinzón; J. Ribadeneira-Ramírez; E. Garro; C. García-Pardo; M. Fuentes; N. Cardona, "Frequency and Network Planning and Optimization of the Digital Terrestrial Television DVB-T2 Networks in Colombia," WAVES, vol.6, pp.35-49, 2014.

Posteriormente a la culminación del proyecto, se continuó trabajando en esta línea de investigación que abordaba la problemática de la armonización de la banda de televisión después del apagón analógico, y la cual se materializó en esta tesis doctoral a través de dos aspectos claves: El primero de ellos, la convivencia entre las redes de televisión y móviles en la banda de 700 MHz o Primer Dividendo Digital en Sudamérica. El segundo de ellos, el futuro uso de la banda de televisión después de los dividendos digitales.

Las principales contribuciones de esta tesis respecto a la convivencia entre los servicios de televisión y móviles operando en adyacencia son:

- Un artículo de investigación que aborda la problemática de la convivencia entre los servicios móviles y de televisión en la banda de 800 MHz y 700 MHz tanto en Europa como en América. Las recomendaciones presentadas para garantizar el correcto funcionamiento de las redes en adyacencia permiten ser extrapoladas a diferentes escenarios.

J. Ribadeneira-Ramírez, G. Martínez, D. Gómez-Barquero and 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. 1, pp. 24-34, March 2016.

- Un reporte técnico desarrollado en cooperación entre GSMA Latinoamérica, Backhaul Advisor S.A.S y el Grupo de Comunicaciones Móviles del iTEAM donde se estudia la viabilidad de la coexistencia entre sistemas de radiodifusión.

sión de TV bajo los estándares PAL e ISDB-Tb, y los servicios 4G-LTE en la banda de 700 MHz para las condiciones de las redes de Argentina.

“Análisis de la situación actual y estudio de viabilidad de coexistencia de sistemas de radiodifusión de TV y servicios LTE en la banda de 700 MHz y banda adyacente en Argentina,” GSMA, Blackhaul Advisory e iTEAM, 2016.

La principal contribución de esta tesis doctoral respecto al futuro uso de la banda de televisión fue demostrar la viabilidad de la compartición de espectro en la banda de televisión mediante dos casos de uso que se materializaron en dos artículos de investigación:

- El primero de ellos, se propone una red DVB-T2 ofreciendo cobertura sobre recepción fija sobre tejado y Femtoceldas LTE-A en interiores haciendo uso de los micro-TV-White-Spaces como servicio secundario. Por ejemplo, para ofrecer conectividad de banda ancha en zonas rurales. Los resultados proporcionan restricciones técnicas para que las femtoceldas LTE-A puedan operar correctamente en espectro compartido con los servicios de televisión. Específicamente, se define la Potencia Isotrópica Radiada Equivalente (PIRE) máxima que podrían transmitir las femtoceldas, en función de la separación en frecuencia con los servicios de televisión

G. Martínez-Pinzón, N. Cardona, C. Garcia-Pardo, A. Fornés-Leal and J. Ribadeneira-Ramírez, "Spectrum Sharing for LTE-A and DTT: Field Trials of an Indoor LTE-A Femtocell in DVB-T2 Service Area," IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 62, no. 3, pp. 552-561, Sept. 2016.

- En el segundo de ellos, se propone el uso de los espacios en blanco en la banda de la televisión digital terrestre para la compartición de espectro entre los servicios de Internet of Things bajo el estándar NB-LTE-IoT como servicio secundario y servicios de televisión digital terrestre bajo el estándar DVB-T2 como servicio primario. Se definen la máxima potencia transmisible por los nodos y dispositivos IoT sin interferir al servicio primario. Asimismo, se presentan recomendaciones de las bandas de guarda necesaria entre las dos tecnologías para garantizar el correcto funcionamiento, y los ciclos de trabajo óptimo de los dispositivos IoT que minimizan la interferencia sobre DVB-T2.

G. Martínez-Pinzón, K. Llamas and N. Cardona, "Potential Sharing between DTT and IoT services in the UHF band," 2016 IEEE 27th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC), Valencia, September 2016, pp. 1-6.

Referencias

- [1] “*Handbook on National Spectrum Management*,” ITU, 2015.
- [2] “*Radio Regulations*,” ITU, 2016.
- [3] “*Intermediate description of the spectrum needs and usage principles*,” Metis, project, March 2015.
- [4] ITU, “*Future spectrum requirements estimate for terrestrial IMT*,” Report ITU-R M.2290. December 2013.
- [5] ITU, “*IMT Traffic estimates for the years 2020 to 2030*,” Report ITU-R M.2370. July 2015.
- [6] “*Harnessing the Internet of Things for Global Development*,” ITU and Cisco, Report 2016.
- [7] “*Gartner Says 8.4 Billion Connected 'Things' Will Be in Use in 2017, Up 31 Percent from 2016*,” Gartner, February 2017. [Online]. Available: <https://www.gartner.com/newsroom/id/3598917>
- [8] “*Global Mobile Data Traffic Forecast Update 2016–2021 White Paper*”, Cisco Visual Networking Index, February 2017.
- [9] G. Martínez, J. Sanchez, D. Barquero and N. Cardona, “*Optimization of the Digital Terrestrial Television Transmission Mode of DVB-T2 in Colombia*,” IEEE Latin America Transactions, vol. 13, no. 7, pp. 2144-2151, July 2015.

- [10] “*Final Acts World Radiocommunication Conference (WRC-07)*,” ITU-R, 2007.
- [11] “*Final Acts World Radiocommunication Conference (WRC-12)*,” ITU-R, 2012.
ITU, “*Status of the transition to Digital Terrestrial Television Broadcasting*,”
Available: [https://www.itu.int/en/ITU-D/Spectrum-](https://www.itu.int/en/ITU-D/Spectrum-Broadcasting/Pages/DSO/Default.aspx)
- [12] [Broadcasting/Pages/DSO/Default.aspx](https://www.itu.int/en/ITU-D/Spectrum-Broadcasting/Pages/DSO/Default.aspx)
- [13] “*Status of the 700 MHz and 2.5 GHz Spectrum Bands in Latin America*,” 5G Americas, October 2017.
- [14] DTT adoption map. [Online]. Available : <https://www.dvb.org/news/worldwide>
- [15] “*Final Acts World Radiocommunication Conference (WRC-15)*,” ITU-R, 2015.
- [16] Pascal Lamy, “*Results of the work of the high level group on the future use of the UHF band (470-790 MHz)*”, September 2013.
- [17] CEPT, “*The Identification of Common and Minimal (least restrictive) Technical Conditions for 790 - 862 MHz for the Digital Dividend in the European Union*,” CEPT Report 30, Oct. 2009.
- [18] “*Report for GSMA on the Coexistence of ISDB-T and LTE*,” ATDI, 2014.
- [19] “*Análisis de la situación actual y estudio de coexistencia de sistemas de radiodifusión y servicios LTE en la banda de 700MHz en Perú*,” GSMA con el apoyo del iTEAM, 2015.
- [20] “*Análisis de la situación actual y estudio de viabilidad de coexistencia de sistemas de radiodifusión de TV y servicios LTE en la banda de 700 MHz y banda adyacente en Argentina*,” GSMA, Backhaul Advisor e iTEAM, 2016.
- [21] ECC, “*Measurements on the Performance of DVB-T Receivers in the presence of Interference from the Mobile Service (especially from LTE)*,” ECC Report 148, June 2010.
- [22] “*Technical analysis of interference from mobile network base stations in the 800 MHz band to digital terrestrial television*,” Ofcom, Technical Report, February 2012.
- [23] “*Study on Specification and Use of in-line Filters to Reduce Interference in Broadcast Bands from Mobile Base Stations*,” DVB, White Paper, SB2122, Mar 2014.

-
- A. De Vita et al., "Assessment of Interference to the DTT Service Generated by LTE Signals on Existing Head Amplifiers of Collective Distribution Systems: A Real Case Study," in *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 60, no. 2, pp. 420-429, June 2014.
- [24]
- ITU, "Planning criteria, including protection ratios, for second generation of digital terrestrial television broadcasting systems in the VHF/UHF bands," Recommendation BT.2033, February 2015.
- [25]
- ITU, "Measurements of protection ratios and overload thresholds for broadcast TV receivers," Report ITU-R BT.2215, February 2016.
- [26]
- "Implementation Issues Associated with use of the Band 698-806 MHz by Mobile Services," APT Report, September 2011
- [27]
- ITU, "Technical characteristics and other technical issues for terrestrial television broadcasting in connection with WRC-15 Agenda item 1.2," JTG 4-5-6-7 November 2012.
- [28]
- "Lower edge of mobile allocation and adjacent band compatibility," WRC-15 agenda item 1.2: CPG-PTD (13)010, Jan. 2013.
- [29]
- CEPT, "To develop harmonized technical conditions for the 694-790 MHz (700 MHz) frequency band in the EU for the provision of wireless broadband and other uses in support of EU spectrum policy objectives," CEPT Report 53, November 2014
- [30]
- "Protection of DTT from LTE 700," EBU Fact sheet, February 2015.
- [31]
- F. de Sousa Chaves and R. Ruismaki, "LTE 700 MHz: Evaluation of the Probability of Interference to Digital TV," 2014 IEEE 80th Vehicular Technology Conference (VTC2014-Fall), Vancouver, BC, 2014, pp. 1-7.
- [32]
- M. Fuentes, et al., "Coexistence of digital terrestrial television and next generation cellular networks in the 700 MHz band," *IEEE Wireless Communications*, vol. 21, no. 6, pp. 63-69, Dec 2014.
- [33]
- G. Ancans, et al., "Evaluation of LTE 700 and DVB-T Electromagnetic Compatibility in Adjacent Frequency Bands," *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings (PIERS)*. IEEE, pp. 585-589, July 2015
- [34]
- ITU, "Planning criteria, including protection ratios, for digital terrestrial television services in the VHF/UHF bands," Recommendation ITU-R BT.1368-12, February 2015.
- [35]

- [36] M. I. Rahman, et al., “*License-exempt LTE systems for secondary spectrum usage: Scenarios and first assessment*,” 2011 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN), Aachen, 2011, pp. 349-358.
- [37] Z. Zhao, et al., “*Interference study for cognitive LTE-femtocell in TV white spaces*,” 2011 Technical Symposium at ITU Telecom World (ITU WT), Geneva, 2011, pp. 153-158.
- [38] L. Polak, et al., “*Study of coexistence between indoor LTE femtocell and outdoor-to-indoor DVB-T2-Lite reception in a shared frequency band*,” EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking, vol. 2015, no. 114, April 2015.
- [39] “*Measured DVB-T Protection Ratios in the presence of Interference from White space Devices*,” BBC White Paper, April 2012.
- [40] “*Cambridge TV White Spaces Trial*,” Cambridge White Spaces Consortium, 2012.
- [41] V. Popescu, M. Fadda, M. Murrioni, J. Morgade and P. Angueira, “*Co-Channel and Adjacent Channel Interference and Protection Issues for DVB-T2 and IEEE 802.22 WRAN Operation*,” in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 60, no. 4, pp. 693-700, Dec. 2014.
- [42] ECC, “*Technical and Operational Requirements for the Possible Operation of Cognitive Radio Systems in the ‘White Spaces’ of the Frequency band 470-790 MHz*,” ECC REPORT 159, 2011.
- [43] ECC, “*Complementary Report to ECC Report 159 Further definition of technical and operational requirements for the operation of white space devices in the band 470-790 MHz*,” ECC REPORT 185, January 2013.
- [44] ECC, “*Technical and operational requirements for the operation of white space devices under geo-location approach*,” ECC REPORT 186, January 2013.
- [45] ECC, “*Guidance for national implementation of a regulatory framework for TV WSD using geo-location databases*,” ECC Report 236, May 2015.
- [46] ETSI, “*Use Cases for Operation in White Space Frequency Bands*,” ETSI Std. TR 102 907, October 2011.
- [47] ETSI, “*White Space Devices (WSD); Wireless Access Systems operating in the 470 MHz to 790 MHz frequency band; Harmonised EN covering the essential requirements of article 3.2 of the R&TTE Directive*,” ETSI EN 301 598, September 2014.

-
- [48] ETSI, “System requirements for Operation in UHF TV Band White Spaces,” ETSI Std. TS 102 946, July 2014.
- [49] ETSI, “System Architecture and High Level Procedures for Coordinated and Uncoordinated Use of TV White Spaces,” ETSI Std. TS 103 145, January 2015.
- [50] ETSI, “System architecture for information Exchange between different Geo-Location databases (GLDB’s) enabling the operation of White Space Devices (WSDs),” ETSI Std. TS 103 143, January 2015.
- [51] ETSI, “Enabling the operation of Cognitive Radio System (CRS) dependent for their use of radio spectrum on information obtained from Geo-location Databases (GLDBs); Parameters and procedures for information exchange between different GLDBs,” ETSI Std. EN 303 144, November 2015.
- [52] ETSI, “Signaling Protocols and information Exchange for Coordinated use of TV White Spaces; Interface between Cognitive Radio System (CRS) and Spectrum Coordinator (SC),” ETSI Std. EN 303 387, November 2015.
- [53] “Standard for Information Technology - Telecommunications and Information Exchange Between Systems - Local and Metropolitan Area Networks - Specific Requirements - Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications- TV White Spaces Operation,” IEEE Std. 802.11af, 2014.
- [54] “Standard for Information technology- Telecommunications and information exchange between systems - Local and metropolitan area networks - Specific requirements - TV White Space Coexistence Methods,” IEEE Std. 802.19.1, 2014.
- [55] “In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band,” FCC Second Memorandum, Opinion and Order, September 2010.
- [56] “In the Matter of Unlicensed Operation in the TV Broadcast Bands: Additional Spectrum for Unlicensed Devices Below 900 MHz and in the 3 GHz Band,” FCC third Memorandum, Opinion and Order, Apr. 2012.
- [57] “TV White Spaces — A Consultation on White Space Device Requirements,” Ofcom, Nov. 2012.
- [58] “TV White Spaces — Approach to Coexistence,” Ofcom, Sept. 2013.
- [59] “Implementing TV White Spaces,” Ofcom, Feb. 2015.
- [60] “The Wireless Telegraphy (White Space Devices) (Exemption) Regulations 2015,” Ofcom Electronic Communications, No 2066, December 2015.

- [61] “Por la cual se modifica la Resolución 711 de 2016 para establecer las condiciones de uso de los dispositivos en blanco,” ANE Resolución 461, Agosto 2017.
Recurso Online: última visita 15 de diciembre de 2017:
- [62] <http://www.csp.it/en/2010/10/06/white-spaces-prima-in-italia-la-sperimentazione-di-csp-e-politecnico-di-torino-2/>
- [63] S. Roberts, P. Garnett and R. Chandra, "Connecting Africa using the TV white spaces: from research to real world deployments," The 21st IEEE International Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, Beijing, 2015, pp. 1-6.
- [64] “TV White Space Devices Standards and Requirements”, Government of Canada, February 2015. [Online].
Available : <https://www.canada.ca/en/news.html>
- [65] ITU, “Sharing and compatibility studies between digital terrestrial television broadcasting and terrestrial mobile broadband applications, including IMT, in the frequency band 470-694/698 MHz,” Report ITU-R BT.2337, November 2014.
- [66] “The future role of spectrum sharing for mobile and wireless data services,” Ofcom, April 2014.
- [67] CEPT “Long Term Vision for the UHF broadcasting band,” ECC Report 224, November 2014.
- [68] “Digital Video Broadcasting (DVB); Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2),” ETSI Std. TS 102 831, Rev. 1.2.1, August 2012.
- [69] “Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting,” ARIB Std. STD-B31, Rev. 1.6, November 2005.
- [70] Narcís Cardona, Juan Olmos, et al., “3GPP LTE: Hacia la 4G móvil,” Marcombo, Abril 2011.
- [71] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (Release 15),” 3GPP Std. TS 36.211, Rev. 15.0.0, December 2017.
- [72] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network; Cellular system support for ultra-low complexity and low throughput Internet of Things (CIoT),” 3GPP Technical report, TR 45.820, Rev v13.1.0, November 2015.

- [73] Dino Flore, “3GPP Standards for the Internet-of-Things,” 3GPP, Feb. 2016.
- [74] Díaz Zayas, Almudena & Merino, Pedro & Javier Rivas Tocado, Francisco, “3GPP NB-IoT,” tecnología y herramientas de medida, pág. 310-317. 10.4995/JITEL2017.2017.6577.
- [75] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 15),” 3GPP Std. TS 136 101, Rev. 15.1.0, December 2017.
- [76] ITU, “Unwanted emissions in the spurious domain,” Recommendation ITU-R SM.329-12, September 2012.
- [77] “Electromagnetic compatibility and Radio spectrum Matters (ERM); Transmitting equipment for the digital television broadcast service, Terrestrial (DVB-T); Harmonized EN under article 3.2 of the R&TTE Directive,” ETSI Std. EN 302 296, Rev.1.2.1, March 2011.
- [78] ITU, “Spectrum limit masks for digital terrestrial television broadcasting,” Recommendation ITU-R BT.1206-3, April 2016.
- [79] ECC, “Unwanted emissions of common radio systems: measurements and use in sharing/compatibility studies,” ECC Report 249, April 2016.
- [80] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 15),” 3GPP Std. TS 136 104, Rev. 13.3.0, December 2017.
- [81] “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) conformance specification; Radio transmission and reception; Part 1: Conformance testing,” ETSI Std. TS 136 521, Rev. 13.1.0, May 2016.
- [82] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception,” 3GPP Std. TR 36.803, Rev. 1.1.0, April 2008.
- [83] ITU, “Planning criteria, including protection ratios, for digital terrestrial television services in the VHF/UHF bands,” Recommendation ITU-R BT.1368-13. Jun 2017
- [84] “Estudio sobre los requisitos técnicos que permitan caracterizar la cobertura con tecnología LTE necesaria para proporcionar determinados servicios de datos,” Ministerio de Industria y comercio, España.

-
- Recurso Online. última visita 06 de noviembre del 2017.
- [85] <https://www.laroccasolutions.com/>
- [86] “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) system scenarios,*” ETSI Std. TR 136 942, Rev. 11.0.0. October 2012.
- [87] “*LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio access capabilities,*” ETSI Std. TS 136 306, Rev. 13.1.0, May 2016.
- [88] “*Por la cual se establecen los requisitos, las condiciones y el procedimiento para participar en el proceso de selección objetiva mediante el mecanismo de subasta, para otorgar permisos de uso del espectro radioeléctrico, en las bandas de 700 MHz y 1900 MHz,*” Resolución MinTIC, Colombia, Enero 2018.
- [89] “*Resolución EL-804-29,*” Conatel, Ecuador, 2012.
- [90] “*Para el Otorgamiento de Licencia para la Prestación de los Servicios de Telefonía Móvil Celular y de Acceso a Internet y de transmisión de Datos en la Banda de Frecuencias de 700 MHz mediante Subasta Simultánea Ascendente, y las Obligaciones para su Operación y Explotación,*” Conatel, Paraguay, 2017.
- [91] “*3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Radio Frequency (RF) system scenarios (Release 14),*” 3GPP Std. TR 25 942, Rev. 14.0.0, March 2017.
- [92] ECC, “*Compatibility and sharing studies for BB PPDR systems operating in the 700 MHz range,*” ECC Report 239, September 2015.
- [93] ITU, “*Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting,*” Recommendation ITU-R BT.419-3, 1992.
- [94] ITU, “*Calculation of free-space attenuation,*” Recommendation ITU-R 525-3, September 2016.
- [95] ITU, “*Characteristics of terrestrial IMT-Advanced systems for frequency sharing/interference analyses,*” Recommendation ITU-R M.2292, December 2013.
- [96] “*White Paper 288: WSD Coexistence Testing at the Building Research Establishment: An Experimental Validation of Ofcom Regulatory Proposals,*” BBC Arquiva, December 2014.
- [97] “*Frequency and Network Planning Aspects of DVB-T2,*” EBU TECH 3348, 2014.

-
- [98] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); FDD Home eNode B (HeNB) Radio Frequency (RF) requirements analysis (Release 14),” 3GPP Std. TR 136 921, Rev. 14.0.0, March 2017.
- [99] M. R. Palattella et al., “Internet of Things in the 5G Era: Enablers, Architecture, and Business Models,” in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 34, no. 3, pp. 510-527, March 2016.
- [100] “Promoting investment and innovation in the Internet of Things”, Ofcom, 2014.
- [101] “More Radio Spectrum for the Internet of Things,” Ofcom, 2015.
- [102] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., “Smart Parking Technical Guide,” 2015.
- [103] Libelium Comunicaciones Distribuidas S.L., “Smart Cities Technical Guide,” 2016.
- [104] “Agricultural machine-to-machine: a platform for expansion,” GSMA, 2015.
- [105] “3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Scenarios and requirements for small cell enhancements for E-UTRA and E-UTRAN,” 3GPP Std. TR 136 932, Rev. 14.0.0, March 2017.
- [106] “Small cell and Wi-Fi coverage study”, Small Cell Forum, February 2014.
- [107] Lizhong Zheng and D. N. C. Tse, “Communication on the Grassmann manifold: a geometric approach to the noncoherent multiple-antenna channel,” in IEEE Transactions on Information Theory, vol. 48, no. 2, pp. 359-383, Feb 2002.

