



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



# Transmisión Eficiente de Servicios Fijos/Móviles y Servicios Locales en Redes de Televisión Digital Terrestre de Primera y Segunda Generación

Departamento de Comunicaciones  
Universitat Politècnica de València

Tesis para el título de  
*Doctor en Telecomunicación*

Valencia, Enero 2014

Autor:  
Jaime López Sánchez

Directores:  
Dr. David Gómez Barquero  
Prof. Narcís Cardona Marcet



*A mi hijo Santiago y mi esposa Eliana, coautores de esta aventura,  
los amo.*

*A mis padres Mariela y Pedro, por su amor y apoyo incondicional.*





# Abstract

The in-band provision of fixed and mobile services and the insertion of local services in Single Frequency Networks (SFN) are two key topics for the optimization of Digital Terrestrial Television (DTT) networks. On one hand, the transmission of mobile TV services requires the allocation of specific bandwidth and dedicated networks to achieve good coverage levels. The costs associated to the deployment of these dedicated networks and the lack of a successful business model have been the main causes of the failure of the first-generation mobile TV technologies. In this sense, the convergence of fixed and mobile paradigms can facilitate the introduction of mobile TV services by allowing the reuse of spectrum, content and infrastructure. On the other hand, neither SFN nor Multi Frequency Network (MFN) topologies used for the current DTT networks are ideally suited for delivery of both global and local services in an efficient way. MFNs enable the efficient transmission of local services but need a significant amount of frequency spectrum. Without violating the SFN principle, local services meant to address sub regions of an SFN must therefore be transmitted throughout the whole network, causing inefficient distribution of local services. Therefore, the efficient provision of global and local TV contents in SFN topologies allow saving bandwidth and guaranteeing an optimal use of the spectrum.

This dissertation investigates technical solutions to optimize the simultaneous delivery of fixed and mobile DTT services and the efficient transmission of global and local services using the same Radio Frequency (RF) channel and network infrastructure. The technical solutions are focused on the European family of standards developed by the Digital Video Broadcasting (DVB) consortium. This include Digital Video Broadcasting- Terrestrial (DVB-T) and Digital Video Broadcasting- Terrestrial 2nd Generation (DVB-T2), as well as the next generation system Digital Video Broadcasting- Next Generation Handheld (DVB-NGH). Nevertheless, the work carried out in this dissertation is of generic nature and can be applied to future evolutions of standards such as the Japanese Integrated Services Digital Broadcasting (ISDB-T), the Future of

## ABSTRACT

---

Broadcast Television (FOBTV) initiative or the American Advanced Television System Committee (ATSC) 3.0. Our investigations are based on physical layer simulations, laboratory tests and field measurements to assess the performance of the different techniques. Complementary, we analyze the applicability of these solutions by means of coverage estimations in realistic scenarios using a professional DTT network planning tool and information of the current DTT network deployed in Valencia Spain city and the DTT network design of the public TV broadcaster of Colombia.

The provision of mobile broadcasting services is significantly more challenging than traditional fixed services due to the severe propagation conditions of the mobile channel, the utilization of more compact antennas and the reception at ground level. In order to provide good coverage level of mobile broadcasting services with the same DTT networks planned for fixed reception, it is necessary to deploy a dense network with a large number of sites or without deploying additional transmitters, select the more robustness transmission modes at the expense of low bit rates. The transmission modes with services-specific robustness in the same multiplex can be used in order to optimize the coverage and available bit rate of both fixed and mobile services. It is possible in DVB-T by means of the hierarchical modulation, which multiplexes two different streams into the same constellation. In DVB-T2, it can be available through of multiples Physical Layer Pipes (PLP) technique or the T2-Lite profile. Multiples PLP is considered the technical evolution of the hierarchical modulation, where a PLP is a logical channel carrying one or multiple services with independent modulation, coding and time interleaving. T2-Lite is the new profile recently included in the DVB-T2 standard to reduce the complexity of receivers and make possible to efficiently share the capacity of one frequency channel in a time division manner between fixed and mobile services.

In order to improve the reception of mobile broadcasting services in networks planned for fixed reception, we evaluate the combined use of transmission modes that offer services-specific robustness and diversity techniques in the time, frequency, and space domains. Time and frequency diversity is generally achieved by means of Forward Error Correction (FEC) and interleaving, while space diversity is enabled by means of multiple transmit and/or receive antennas. The results show that the incorporation of Time Interleaving (TI) at the physical layer for time diversity, and Single-Input Multiple-Output (SIMO) for space diversity are critical for the performance of mobile broadcasting systems. Upper Layer-FEC (UL-FEC) techniques can be used to enable TI in DVB-T or increase the time interleaving in second generation systems. It can be implemented in generic software in such a manner that ensures that legacy receivers drop it without altering their proper operation. The coverage estimation in real scenarios reveals that the final combination of time and space diversity with

techniques that enable per-service robustness is sufficient to provision mobile services with acceptable coverage level in DVB-T and DVB-T2 networks planned for fixed reception.

The basic principle of SFNs is that all transmitters radiate the same signal synchronized in time and frequency, therefore are especially suitable for global services due to mutual support of the signal by multiple transmitters. However, they are not efficient for transmitting local services because all the content is transmitted throughout the whole network (solution called simulcast). An ideal solution to delivery global and local content in SFN networks should retain all SFN advantages for global services and they are not affected by the local services. Furthermore, the transmission of local services should be spectrally efficient and using any subset of sites of the network, while their coverage area Local Services Area (LSA) is restricted to the specific areas where local content is to be consumed.

Hierarchical modulation (for DVB-T and DVB-NGH) and technical solutions based on temporal or frequency multiplexing (for DVB-T, DVB-T2 and DVB-NGH) are evaluated in this dissertation in order to provide global and local services in SFN broadcasting systems. These solutions keep all SFN advantages for global services, while the coverage area of the local services is restricted to the areas surrounding the transmitters, where generally are located the target population (for example, a city). All solutions offer a transmission capacity gain compared with classic approach to insert local services in SFN such as simulcast. Since the local services are transmitted on top of the global services, the solutions based on hierarchical modulation offer a higher transmission capacity gain than the others solutions.

Using the solutions based on temporal or frequency multiplexing, the local services can have almost the same coverage area as global services. Furthermore, with these solutions the insertion of local services does not affect the coverage of global services. An additional advantage of the frequency multiplexing solution is that there is no interference between transmitters from different LSA because the inserted local content is orthogonal to each other. For the other solutions, a shared time-division manner can be used in order to maximize the coverage area of local services avoiding interferences between adjacent transmitters. However, when the solutions based on hierarchical modulation are used, the coverage of global and local services suffers a reduction compared to the equivalent constellation in non-hierarchical mode due to the inter-layer interference. In general, each technique addresses different use cases with different coverage-capacity performance trade-off, such that they will allow exploring the viability of inserting local services in SFNs in an efficient way.

## ABSTRACT

---

# Resumen

La provisión de servicios fijos y móviles en el mismo canal de radio frecuencia y la inserción de contenidos locales en redes de frecuencia única SFN son dos aspectos claves para la optimización de redes de Televisión Digital Terrestre (TDT). Por un lado, la transmisión de servicios de TV móvil requiere la asignación de un ancho de banda específico y el despliegue de redes dedicadas para lograr buenos niveles de cobertura. Los costos asociados al despliegue y la ausencia de un exitoso modelo de negocios han sido las principales causas del fracaso de las primeras generaciones de tecnologías para TDT móvil. En este sentido, la convergencia de servicios fijos y móviles puede facilitar la introducción de los servicios de TV móvil mediante la reutilización del espectro, contenidos e infraestructura. Por otra parte, ni las SFN ni las redes de múltiples frecuencias (MFN por sus siglas en inglés) son idealmente adecuadas para la entrega de servicios globales y locales de forma eficiente. Las topologías MFN permiten una eficiente transmisión de contenidos locales pero necesita de una significativa cantidad de espectro radioeléctrico. Sin la violación del principio de funcionamiento de una topología SFN, los servicios locales orientados únicamente a una subregión deben ser transmitidos a través de toda la red, causando una ineficiente distribución de los contenidos locales. Por lo tanto, una eficiente provisión de servicios globales y locales en redes SFN permite un ahorro de ancho de banda y garantiza un óptimo uso del espectro.

La presente tesis investiga diferentes soluciones técnicas para optimizar la simultánea transmisión de servicios de TDT a receptores fijos y móviles, y la eficiente transmisión de contenidos globales y locales usando el mismo canal de radio frecuencia e infraestructura de red. Las soluciones técnicas están orientadas a la familia de estándares europeos desarrollados por el consorcio Digital Video Broadcasting (DVB). Esto incluye los sistemas de primera y segunda generación terrestre DVB-T y DVB-T2, así como el sistema de siguiente generación Digital Video Broadcasting- Next Generation Handheld (DVB-NGH). No obstante, el estudio llevado a cabo en la tesis es genérico y puede aplicarse a futuras evoluciones de estándares como el japonés Integrated Services Digital

## RESUMEN

---

Broadcasting (ISDB-T), la iniciativa Future of Broadcast Television (FOBTv) o el americano Advanced Television System Committee (ATSC) 3.0 entre otros. Nuestras investigaciones están basadas en simulaciones de capa física, medidas de laboratorio y campañas de medidas de campo para evaluar el rendimiento de las diferentes soluciones técnicas. Complementariamente, nosotros analizamos la aplicabilidad de estas soluciones por medio de estimaciones de cobertura en escenarios reales usando una herramienta profesional de planificación de redes de TDT, información de la actual red desplegada en la ciudad de Valencia España y el diseño de red TDT del operador público de Colombia.

La recepción de servicios de radiodifusión móvil es significativamente más variable que la tradicional recepción fija debido a las severas condiciones de propagación del canal móvil, la utilización de antenas más compactas y la recepción al nivel del suelo. Con el fin de proveer servicios de TV móvil con buen nivel de cobertura usando la misma red de TDT planificada para recepción fija, es necesario desplegar una densa red con un gran número de estaciones o seleccionar los modos de transmisión más robustos a expensas de una baja tasa binaria si se desea evitar el despliegue de transmisores adicionales. Los modos de transmisión con robustez específica para cada servicio en el mismo multiplex pueden ser usados para optimizar la cobertura y la tasa binaria de los servicios fijos y móviles. Esta técnica de transmisión es posible en DVB-T por medio de la modulación jerárquica, la cual multiplexa dos diferentes flujos en la misma constelación. En DVB-T2, esto es posible a través de la técnica de múltiples Physical Layer Pipes (PLP) o del perfil T2-Lite. Múltiples PLP es considerada la evolución técnica de la modulación jerárquica, donde un PLP es un canal lógico que transporta uno o varios servicios con independiente modulación, tasa de codificación y entrelazado temporal. T2-Lite es el perfil recientemente incluido en DVB-T2 para reducir la complejidad del receptor y facilitar la transmisión de servicios fijos y móviles en un mismo canal radio.

Con el fin de mejorar la recepción móvil en redes TDT planificadas para recepción fija, nosotros evaluamos el uso combinado de modos de transmisión que ofrecen robustez específica para cada tipo de servicio y técnicas de diversidad en el dominio del tiempo, la frecuencia y el espacio. Diversidad en tiempo y frecuencia es generalmente lograda mediante códigos Forward Error Correction (FEC) y entrelazadores, mientras la diversidad espacial es conseguida por medio de múltiples antenas en transmisión y/o recepción. De acuerdo a los resultados, la incorporación de entrelazado de capa física y/o aplicación, y de Single-Input Multiple-Output (SIMO), son esenciales para el rendimiento de sistemas de difusión móviles. La técnica de códigos FEC en capas superiores (UL-FEC por sus siglas en inglés) puede ser usada para habilitar entrelazado temporal en DVB-T o para incrementar el tiempo de entrelazado en sistemas de segunda generación. UL-FEC puede ser implementado de forma retro

compatible con receptores comerciales sin alterar su correcto funcionamiento. Estimaciones de cobertura en escenarios reales muestran que la combinación de diversidad temporal y espacial con modos de transmisión que ofrecen robustez específica por servicio es suficiente para habilitar la provisión de servicios de TV en movilidad con aceptable nivel de cobertura en redes DVB-T y DVB-T2 orientadas inicialmente para recepción fija.

El principio básico de funcionamiento de las redes SFN es que todos los transmisores radien la misma señal sincronizadamente en tiempo, frecuencia y bit, por lo tanto son especialmente adecuados para servicios globales debido al mutuo soporte de señales provenientes de diferentes transmisores. Sin embargo, estas topologías no son eficientes para la transmisión de servicios locales debido a que los contenidos son transmitidos en toda la red (solución conocida como simulcast). Una solución ideal para la entrega de servicios globales y locales en redes SFN debe mantener todas las ventajas SFN para los servicios globales y no deben ser afectados por la inserción de los contenidos locales. Adicionalmente, la transmisión de servicios locales debe ser espectralmente eficiente y disponible para cualquier sub grupo de transmisores de la red, mientras su área de cobertura (LSA por sus siglas en ingles) es restringida a las zonas cercanas a los transmisores donde los contenidos han de ser consumidos.

La modulación jerárquica (para DVB-T y DVB-NGH) y soluciones técnicas basadas en multiplexación en tiempo y frecuencia (para DVB-T, DVB-T2 y DVB-NGH) son evaluadas en esta tesis con el fin de proveer servicios globales y locales en redes de radiodifusión SFN. Estas soluciones mantienen todas las ventajas SFN para servicios globales, mientras las cobertura de los servicios locales es restringida a la zonas cercanas a los transmisores donde generalmente está localizada la población objetivo (ejemplo una ciudad). Todas las soluciones ofrecen una ganancia en la capacidad de transmisión comparada con el enfoque simulcast. Debido a que los servicios locales son transmitidos sobremodulando los servicios globales, las soluciones basadas en modulación jerárquica ofrecen mayor ganancia en capacidad de transmisión que las otras soluciones.

Usando las soluciones basadas en multiplexación en tiempo y frecuencia, los servicios locales pueden conseguir una cobertura muy cercana a la ofrecida para los servicios globales. Además, con estas soluciones la inserción de contenidos locales no afecta el nivel de cobertura de los servicios globales. Una ventaja adicional de la multiplexación en frecuencia es la no existencia de interferencia entre transmisores de diferentes LSA debido a que la inserción se realiza de forma ortogonal. Para el resto de soluciones, una técnica de división temporal puede ser usada con el fin de maximizar el área de cobertura evitando interferencias entre transmisores adyacentes. Por otra parte, cuando las soluciones basadas en modulación jerárquica son usadas, los niveles de cobertura de los servicios globales y locales sufren una reducción comparada con la ofrecida por

## RESUMEN

---

una constelación equivalente en modo no jerárquico debido a interferencia entre niveles. En general, cada técnica está enfocada a diferentes casos de uso con diferentes compromisos entre capacidad y cobertura, las cuales exploran la viabilidad de insertar contenidos locales en redes SFN de una forma eficiente.



# Resum

La provisió de serveis fixos i mòbils al mateix canal RF i la inserció de continguts locals en xarxes SFN són dos aspectes claus per a la optimització de xarxes de TDT. D'una banda, la transmissió de serveis de TV mòbil requereix l'assignació d'un ample de banda específic i el desplegament de xarxes dedicades per aconseguir bons nivells de cobertura. Els costos associats al desplegament i l'absència d'un exitós model de negocis han estat les principals causes del fracàs de les primeres generacions de tecnologies per a TDT mòbil. En aquest sentit, la convergència de serveis fixos i mòbils pot facilitar la introducció dels serveis de TV mòbil mitjançant la reutilització de l'espectre, continguts i infraestructura. D'altra banda, ni les topologies SFN ni les MFN són idealment adequades per al lliurament de serveis globals i locals de forma eficient. Les topologies MFN permeten una eficient transmissió de continguts locals però necessiten d'una significativa quantitat d'espectre radioelèctric. Sense la violació del principi de funcionament d'una topologia SFN, els serveis locals orientats únicament a una sub-regió han de ser transmesos a través de tota la xarxa, causant una ineficient distribució dels continguts locals. Per tant, una provisió eficient de serveis globals i locals en xarxes SFN permet un estalvi d'ample de banda i garanteix un òptim ús de l'espectre.

La present tesi investiga diferents solucions tècniques per optimitzar la transmissió simultània de serveis de TDT a receptors fixos i mòbils, i la transmissió eficient de continguts globals i locals fent servir el mateix canal RF i infraestructura de xarxa. Les solucions tècniques estan orientades a la família d'estàndards europeus desenvolupats pel consorci DVB. Això inclou els sistemes de primera i segona generació DVB-T i DVB-T2, així com el sistema de següent generació DVB-NGH. Tanmateix, l'estudi dut a terme en la tesi és genèric i es pot aplicar a futures evolucions d'estàndards com el japonès ISDB-T, la iniciativa FOBTv o l'americà ATSC 3.0 entre d'altres. Les nostres investigacions estan basades en simulacions de capa física, mesures de laboratori i campanyes de mesures de camp per avaluar el rendiment de les diferents solucions tècniques. Complementàriament, analitzem l'aplicabilitat d'aquestes

## RESUM

---

solucions per mitjà d'estimacions de cobertura en escenaris reals utilitzant una eina professional de planificació de xarxes de TDT, informació de l'actual xarxa desplegada a la ciutat de València, a Espanya, i el disseny de xarxa TDT de l'operador públic de Colòmbia.

La recepció de serveis de radiodifusió mòbil és significativament més variable que la recepció fixa tradicional a causa de les severes condicions de propagació del canal mòbil, la utilització d'antenes més compactes i la recepció al nivell del sòl. Per tal de proveir serveis de TV mòbil amb bon nivell de cobertura mitjançant la mateixa xarxa de TDT emprada per a recepció fixa, cal desplegar una densa xarxa amb un gran nombre d'estacions o seleccionar els modes de transmissió més robustos a costa d'una baixa taxa binària si es vol evitar el desplegament de transmissors addicionals. Els modes de transmissió amb robustesa específica per a cada servei en el mateix múltiplex poden ser usats per optimitzar la cobertura i la taxa binària dels serveis fixos i mòbils. Aquesta tècnica de transmissió és possible en DVB-T per mitjà de la modulació jeràrquica, la qual multiplexa dos fluxos diferents en la mateixa constel·lació. En DVB-T2, això és possible a través de la tècnica de múltiples PLP o del perfil T2-Lite. La tècnica de Múltiples PLP és considerada l'evolució tècnica de la modulació jeràrquica, on un PLP és un canal lògic que transporta un o diversos serveis amb independent modulació, taxa de codificació i entrellaçat temporal. T2-Lite és el perfil recentment inclòs en DVB-T2 per reduir la complexitat del receptor i facilitar la transmissió de serveis fixos i mòbils en un mateix canal RF.

Per tal de millorar la recepció mòbil en xarxes TDT planificades per a recepció fixa, nosaltres avaluem l'ús combinat de modes de transmissió que ofereixen robustesa específica per a cada tipus de servei i tècniques de diversitat en el domini del temps, la freqüència i l'espai. La diversitat en temps i freqüència s'aconsegueix generalment mitjançant codis FEC i entrellaçadors, mentre la diversitat espacial s'aconsegueix per mitjà de múltiples antenes en transmissió i/o recepció. D'acord als resultats, la incorporació d'entrellaçat de capa física i/o aplicació, i de Single-Input Multiple-output (SIMO), són essencials per al rendiment de sistemes de difusió mòbils. La tècnica de codis FEC en capes superiors (UL-FEC) pot ser usada per habilitar entrellaçat temporal en DVB-T o per incrementar el temps d'entrellaçat en sistemes de segona generació. UL-FEC pot ser implementat de forma retro compatible amb receptors comercials sense alterar el seu correcte funcionament. Diverses estimacions de cobertura en escenaris reals mostren que la combinació de diversitat temporal i espacial amb modes de transmissió que ofereixen robustesa específica per servei és suficient per habilitar la provisió de serveis de TV en mobilitat amb un acceptable nivell de cobertura en xarxes DVB-T i DVB-T2 orientades inicialment per a la recepció fixa.

El principi bàsic de funcionament de les xarxes SFN és que tots els trans-

missors radien la mateixa senyal sincronitzadament en temps, freqüència i bit, per tant són especialment adequades per a serveis globals a causa del suport mutu de senyals provinents de diferents transmissors. No obstant això, aquestes topologies no són eficients per a la transmissió de serveis locals a causa que els continguts són transmesos a tota la xarxa (solució coneguda com simulcast). Una solució ideal per al lliurament de serveis globals i locals en xarxes SFN ha de mantenir tots els avantatges SFN per als serveis globals i no ha de ser afectada per la inserció dels continguts locals. Addicionalment, la transmissió de serveis locals ha de ser espectralment eficient i disponible per a qualsevol subgrup de transmissors de la xarxa, mentre la seva àrea de cobertura (LSA) és restringida a les zones properes als transmissors on els continguts han de ser consumits.

La modulació jeràrquica (per a DVB-T i DVB-NGH) i les solucions tècniques basades en multiplexació en temps i freqüència (per a DVB-T, DVB-T2 i DVB-NGH) són avaluades en aquesta tesi per tal de proveir serveis globals i locals en xarxes de radiodifusió SFN. Aquestes solucions mantenen tots els avantatges SFN per a serveis globals, mentre la cobertura dels serveis locals és restringida a la zones properes als transmissors on generalment està localitzada la població objectiu (per exemple, una ciutat). Totes les solucions ofereixen un guany en la capacitat de transmissió comparada amb l'enfocament simulcast. A causa que els serveis locals són transmesos sobremodulant els serveis globals, les solucions basades en modulació jeràrquica ofereixen major guany en capacitat de transmissió que les altres solucions.

Usant les solucions basades en multiplexació en temps i freqüència, els serveis locals poden aconseguir una cobertura molt propera a l'oferida per als serveis globals. A més, amb aquestes solucions la inserció de continguts locals no afecta el nivell de cobertura dels serveis globals. Un avantatge addicional de la multiplexació en freqüència és la no existència d'interferència entre transmissors de diferents LSA donat que la inserció es realitza de forma ortogonal. Per a la resta de solucions, una tècnica de divisió temporal pot ser usada amb la finalitat de maximitzar l'àrea de cobertura evitant interferències entre transmissors adjacents. D'altra banda, quan les solucions basades en modulació jeràrquica són usades, els nivells de cobertura dels serveis globals i locals pateixen una reducció comparada amb la que ofereix una constel·lació equivalent en mode no jeràrquic causa de interferència entre nivells. En general, cada tècnica està enfocada a diferents casos d'ús amb diferents compromisos entre capacitat i cobertura, les quals exploren la viabilitat d'inserir continguts locals en xarxes SFN d'una forma eficient.

## RESUM

---

# Agradecimientos

Doy gracias a Dios, por estar conmigo en cada instante de mi vida, por guiarme y rodearme de personas maravillosas que se convirtieron en el soporte durante el desarrollo de esta investigación.

Quiero agradecer a Eliana mi esposa, amiga y confidente por su apoyo, confianza y valentía para asumir juntos este inmenso desafío. A mi hijo Santiago, quien con su ternura e inocencia me demuestra en cada instante que los ángeles si existen.

Gracias especialmente a mis padres, Mariela y Pedro, por su infinito amor con que han guiado mi vida, por sus esfuerzos, motivaciones y alegrías aún en la distancia. A mi hermana Liliana, por su apoyo y compañía. A mi familia por sus ánimos, comprensión y cariño, en especial a Sara, Jorge y Martha. A la memoria de mis abuelos y todos los seres queridos que desde el cielo han acompañado mi trabajo.

Mis más sinceros agradecimientos a mis dos directores. El Prof. Narcis Cardona Marcet por darme el privilegio de formar parte del grupo de comunicaciones móviles (MCG) y del instituto de Comunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM), por brindarme su confianza, amistad e incondicional apoyo; Su sabiduría y capacidad directiva siempre tendrá mi admiración. El Dr. David Gómez Barquero por sus innumerables lecciones y enseñanzas de la vida académica e investigadora. Sus conocimientos, indicaciones, consejos y dedicación fueron esenciales para el desarrollo de esta tesis. Es también un placer agradecer al Prof. Ulrich Reimers y a Jan Zöllner por invitarme a su grupo de investigación en el instituto de tecnologías para telecomunicaciones (*Institut für Nachrichtentechnik-IfN*) de la Technische Universität Braunschweig - Alemania.

Trabajar en el iTEAM ha sido una de las mejores experiencias de mi vida. Compartir con las extraordinarias personas que han formado parte del instituto en estos años me han ayudado a crecer profesional y personalmente. Estoy especialmente agradecido con mis colegas y amigos Ariana, Gema, Ana, David González, Pedro, Jordi P., Pablo, Jorge, Carlos, David V., Jordi Joan,

## AGRADECIMIENTOS

---

Jefferson, Gerardo, Manuel, Eduardo y Conchi por crear un excelente ambiente de trabajo.

Un especial agradecimiento a mis grandes amigos Waldimar, Gustavo y sus familias, por su incondicional apoyo, por los inolvidables momentos compartidos y sus valiosas enseñanzas. Finalmente, quiero agradecer a la Universidad Politécnica de Valencia por la concesión de la beca de formación de personal investigador (FPI) que me han otorgado para la realización de esta tesis doctoral.

¡A todas las personas que han formado parte de esta tesis, Gracias!

# Índice general

Acrónimos . . . . .	XXI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Introducción . . . . .	1
1.2. Descripción general del problema . . . . .	5
1.3. Objetivos de la tesis . . . . .	9
1.4. Estado del arte . . . . .	10
1.5. Descripción de la tesis y principales contribuciones . . . . .	17
1.6. Disseminación y lista de publicaciones . . . . .	23
<b>2. Fundamentos de TDT</b>	<b>27</b>
2.1. Principales estándares de TDT . . . . .	27
2.2. Topologías de red de TDT . . . . .	33
2.3. Técnicas de diversidad en sistemas DVB . . . . .	35
2.4. Conclusiones . . . . .	42
<b>3. Provisión simultánea de servicios de TDT a terminales fijos/móviles y servicios locales en redes de frecuencia única DVB-T</b>	<b>45</b>
3.1. Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF . . . . .	47
3.2. Servicios globales y locales en redes de frecuencia única . . . . .	61
3.3. Conclusiones . . . . .	82
<b>4. Provisión simultánea de servicios de TDT a terminales fijos/móviles y servicios locales en redes de frecuencia única DVB-T2</b>	<b>87</b>
4.1. Transición de una red DVB-T a DVB-T2 . . . . .	89
4.2. Provisión simultánea de servicios TDT a terminales fijos y móviles . . . . .	99
4.3. Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2 . . . . .	108
4.4. Conclusiones . . . . .	126

## ÍNDICE GENERAL

---

<b>5. Inserción de servicios locales en redes DVB-NGH de frecuencia única</b>	<b>129</b>
5.1. H-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN mediante modulación jerárquica . . . . .	131
5.2. O-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN a través de transmisión ortogonal . . . . .	137
5.3. Resultados de rendimiento . . . . .	140
5.4. Ganancia en capacidad de transmisión . . . . .	145
5.5. Estimaciones de cobertura en un escenario real . . . . .	148
5.6. Conclusiones . . . . .	154
<b>6. Conclusions and design guidelines for fixed/mobile and local insertion services in SFN broadcasting systems</b>	<b>157</b>
6.1. Concluding Remarks . . . . .	157
6.2. Recommendations for the provisioning of fixed/mobile and local insertion services in SFN broadcasting systems . . . . .	165
6.3. Future Research topics . . . . .	169
<b>A. Metodología</b>	<b>171</b>
A.1. Simulaciones Computacionales de Capa Física Extremo a Extremo	171
A.2. Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios de TDT en movilidad . . . . .	172
A.3. Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios locales en redes SFN . . . . .	178
A.4. Conclusiones . . . . .	186
<b>Referencias</b>	<b>189</b>



## Acrónimos

**3G** Tercera Generación

**4G** Cuarta Generación

**3DTV** Three-Dimensional Television

**ACE** Active Constellation Extension

**AL-FEC** Application Layer-Forward Error Correction

**ATSC** Advanced Television System Committee

**ATSC-M/H** Advanced Television System Committee Mobile/handheld

**AWGN** Additive White Gaussian Noise

**BB-FER** Base Band Frame Error Rate

**BCH** Bose Chadhuri Hocquenghem

**BER** Bit Error Rate

**BLER** Block Error Rate

**CC** Convolutional Codes

**CDD** Cyclic Delay Diversity

**CDMA** Code Division Multiple Access

**CMMB** China Mobile Multimedia Broadcasting

**COFDM** Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing

**CNR** Carrier to Noise Ratio

**CR** Coding Rate

**CSI** Channel State Information

**DD** Delay Diversity

**DTT** Digital Terrestrial Television

**DMB-T** Digital Multimedia Broadcasting

**DVB** Digital Video Broadcasting

## ACRÓNIMOS

---

- DVB-H** Digital Video Broadcasting- Handheld
- DVB-NGH** Digital Video Broadcasting- Next Generation Handheld
- DVB-SH** Digital Video Broadcasting- Satellite services to Handheld devices
- DVB-T** Digital Video Broadcasting- Terrestrial
- DVB-T2** Digital Video Broadcasting- Terrestrial 2nd Generation
- DTMB** Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting
- EIRP** Effective Isotropic Radiated Power
- EPG** Electronic Program Guide
- ESR5(20)** Errored Second Ratio of 5% in intervals of 20 seconds
- FEC** Forward Error Correction
- FEF** Future Extension Frame
- FFT** Fast Fourier Transform
- FOBTV** Future of Broadcast Television
- GI** Guard Interval
- GSE** Generic Stream Encapsulation
- HDTV** High Definition Television
- HP** High Priority
- H-LSI** Hierarchical-Local service Insertion
- ICI** Inter Carrier Interference
- IP** Internet Protocol
- IPDC** Internet Protocol Datacast
- IPTV** Internet Protocol Television
- ISD** Iterative Slice Decoding
- ISDB-T** Integrated Services Digital Broadcasting
- ISI** Inter Symbol Interference

<b>LDPC</b>	Low Density Parity Check
<b>LDTV</b>	Low Definition Television
<b>LL-FEC</b>	Link Layer-Forward Error Correction
<b>LLR</b>	Log-Likelihood Ratio
<b>LP</b>	Low Priority
<b>LSA</b>	Local Services Area
<b>MER</b>	Modulation Error Rate
<b>MBMS</b>	Multimedia Broadcast Multicast Service
<b>MFN</b>	Multi Frequency Network
<b>MIMO</b>	Multiple-Input Multiple-Output
<b>MISO</b>	Multiple-Input Single-Output
<b>MPE-FEC</b>	Multi Protocol Encapsulation - Forward Error Correction
<b>MPE-iFEC</b>	Multi Protocol Encapsulation - inter burst Forward Error Correction
<b>MRC</b>	Maximum Ratio Combining
<b>NIT</b>	Network Information Table
<b>OFDM</b>	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
<b>OPEX</b>	OPERating EXPense
<b>O-LSI</b>	Orthogonal-Local service Insertion
<b>PAPR</b>	Peak Average Power Ratio
<b>PAT</b>	Program Association Table
<b>PD</b>	Phase Delay
<b>PL-FEC</b>	Physical Layer-Forward Error Correction
<b>PLP</b>	Physical Layer Pipes
<b>PMT</b>	Program Map Table

## ACRÓNIMOS

---

**PP** Pilot Pattern

**PSI/SI** Program Specific Information/ Service Information

**QoS** Quality of Service

**RF** Radio Frequency

**RoHC** Robust Header Compression

**RS** Reed Salomon

**RSSI** Received Signal Strength Indicator

**SD** Subcarrier Diversity

**SDTV** Standard Definition Television

**SFBC** Space-Frequency Block Code

**SFN** Single Frequency Networks

**SIMO** Single-Input Multiple-Output

**SISO** Single-Input Single-Output

**SVC** Scalable Video Coding

**TDMA** Time Division Multiple Access

**TDT** Televisión Digital Terrestre

**TEI** Transport Error Indicator

**TFS** Time-Frequency slicing

**TI** Time Interleaving

**TIC** Tecnologías de la Información y la Comunicación

**TPS** Transmission Parameter Signaling

**TR** Tone Reservation

**TS** Transport Stream

**TSPER** Transport Stream Packet Error Rate

**TU6** Typical Urban 6 taps

**T2-MI** T2 Modulator Interface

**UHF** Ultra High frequency

**UL-FEC** Upper Layer-FEC

**VHF** Very High frequency

## ACRÓNIMOS

---

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. Introducción

Los grandes beneficios que trae la transición de la televisión analógica a digital para los usuarios, administradores de red y proveedores de servicios ha acelerado el despliegue de las redes de TDT en la última década. A día de hoy, un gran número de países han completado con éxito el apagón analógico y muchos otros están en proceso de despliegue y transición. Las tecnologías en las que han sido diseñadas estas redes de TDT son: ISDB-T adoptado en Japón y con algunas modificaciones en Brasil, Perú, Argentina entre otros países latinoamericanos; Digital Multimedia Broadcasting (DMB-T) adoptado por China, ATSC adoptado en Estados Unidos, Corea del sur, Canadá, México y otros países del Caribe; y la familia de estándares del foro internacional DVB, la cual es a día de hoy la única que cuenta con estándares de radiodifusión terrestre de primera y segunda generación DVB-T y DVB-T2, adoptados o desplegados en más de 140 países.

La alta fragmentación de los sistemas terrestres de radiodifusión alrededor del mundo y la necesidad de beneficiarse de las economías de escala han motivado la convergencia de esfuerzos para promover la cooperación entre diferentes redes y sistemas de transmisión. En este sentido se lanza oficialmente en abril del 2012 la iniciativa FOBTv creada por un amplio consorcio de empresas, operadores de televisión, centros de investigación e ingenieros del sector de telecomunicaciones para definir las futuras necesidades de los sistemas de radiodifusión, promover la unificación de estándares y reducir el solapamiento de tecnologías. Para conseguir estos objetivos, el comité técnico del FOBTv trabaja arduamente en el desarrollo de futuros modelos de ecosistemas para la radiodifusión terrestre teniendo en cuenta todos los aspectos técnicos, re-

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

gulatorios y de mercado, en la definición de los requerimientos para la nueva generación de sistemas de radiodifusión terrestre, en promover la colaboración entre los distintos laboratorios y centros de investigación de TV digital y en establecer una base tecnología común para el desarrollo de nuevos estándares.

Este proyecto de tesis se centra en la familia de estándares desarrollados por el foro DVB para sistemas de radiodifusión terrestre, en particular, en DVB-T, DVB-T2 y DVB-NGH. La primera generación del estándar para la provisión de servicios de TDT conocida como DVB-T [1] fue publicada en 1998. Desde entonces, DVB-T ha sido el estándar con mayor aceptación en el mundo con más de 200 millones de receptores vendidos en más de 40 países [2].

Después del gran éxito de la primera generación y motivado por la necesidad de ofrecer un medio de transporte eficiente para la provisión de servicios avanzados de televisión tales como High Definition Television (HDTV) o Three-Dimensional Television (3DTV), el foro DVB publicó las especificaciones técnicas de DVB-T2 en 2008 [3]. Esta segunda generación del estándar ofrece un incremento en la eficiencia espectral de hasta el 70% comparado con su antecesor. A la fecha de redacción de este documento, se han desplegado 24 redes comerciales de DVB-T2 en un modo básico de transmisión, destacando los países pioneros Reino Unido, Italia, Suecia y Finlandia, y se encuentra adoptado como estándar oficial de TDT en más de 34 países.

El estándar DVB-NGH es la evolución móvil del estándar DVB-T2 y nace con el objetivo de ser el estándar de radiodifusión multimedia móvil de referencia a nivel mundial, con unas prestaciones muy superiores en términos de capacidad y cobertura a las de tecnologías existentes, como el estándar de TDT móvil de primera generación Digital Video Broadcasting- Handheld (DVB-H), el estándar de TV móvil híbrido terrestre-satélite Digital Video Broadcasting-Satellite services to Handheld devices (DVB-SH), o el estándar de radiodifusión celular Multimedia Broadcast Multicast Service (MBMS). Una de las principales ventajas de DVB-NGH es que será posible transmitir servicios DVB-T2 y DVB-NGH en el mismo múltiplex (canal RF), reutilizando la infraestructura de red existente sin que haga falta desplegar nuevas redes dedicadas. Esto permitirá reducir considerablemente la inversión necesaria para empezar a proporcionar servicios móviles.

### 1.1.1. Provisión de servicios de TV en movilidad

El creciente interés en los últimos años por la TV móvil ha motivado el desarrollo de sistemas de radiodifusión para la provisión de servicios de televisión digital móvil a dispositivos de mano. Este es el caso del estándar Advanced Television System Committee Mobile/handheld (ATSC-M/H) utilizado en Norte América, la técnica de transmisión conocida como One-segment



del estándar ISDB-T, el estándar DVB-H o el China Mobile Multimedia Broadcasting (CMMB).

Con el fin de proveer buenos niveles de cobertura de servicios de TV móvil es necesario desplegar densas redes TDT con un elevado número de transmisores y por tanto un elevado costo de implementación (CAPEX por sus siglas en inglés) y operación (COPEX). Esta penalización es particularmente evidente para altos porcentajes de cobertura objetivo (ej. por encima del 90 %) [4]. Estos costos asociados al despliegue, la necesidad de un canal RF específico y la ausencia de un exitoso modelo de negocios han sido las principales causas del fracaso de las primeras generaciones de tecnologías para TDT móvil. Desde el punto de vista técnico, un diseño de redes híbridas creado a partir de las redes de TDT y las redes de comunicaciones móviles de Tercera Generación (3G) y Cuarta Generación (4G) es una solución para la provisión de servicios de TV a receptores fijos y móviles con altas capacidades de transmisión, pero requiere de un complejo modelo de negocio y un fuerte compromiso entre los operadores de las redes que a día de hoy no se ha podido consolidar.

En este escenario, la utilización de las redes TDT para la simultánea transmisión de servicios de TV a receptores fijos y móviles puede acelerar el surgimiento de los servicios de radiodifusión móviles mediante la reutilización del mismo contenido, espectro e infraestructura. Unas primeras versiones de estas redes son las desplegadas en Taiwán y Alemania [5], donde se utilizan los modos de transmisión más robustos de DVB-T (QPSK y 16QAM, respectivamente) para ofrecer servicios de TV a receptores fijos, portables, vehículos y sistemas de transporte público simultáneamente a costa de una fuerte penalización en la capacidad total de transmisión.

El buen rendimiento de DVB-T2 en canales móviles debido a la inclusión de nuevas tecnologías (ej: nuevos codificadores FEC, constelaciones rotadas) y la posibilidad de ofrecer una robustez específica a cada tipo de servicio han motivado el estudio y pruebas técnicas para la provisión de servicios fijos y móviles en las futuras redes DVB-T2 utilizando el mismo canal de frecuencia. Adicionalmente, un nuevo perfil conocido como T2-lite ha sido recientemente incluido en las especificaciones de DVB-T2 para reducir la complejidad de los receptores y mejorar la coexistencia de los servicios fijos y móviles. El nuevo perfil permite compartir la capacidad de transmisión de un canal radioeléctrico mediante técnicas de multiplexación en el tiempo entre tramas DVB-T2 y T2-Lite.

El estándar DVB-NGH, es la evolución tecnológica del estándar DVB-T2 para la provisión de servicios de TDT a terminales móviles. DVB-NGH introduce nuevas soluciones técnicas que junto con el alto rendimiento de DVB-T2 convierten a DVB-NGH en una real tecnológica de nueva generación para sistemas de radiodifusión móviles. DVB-NGH es el primer sistema que explota la

diversidad del canal móvil en todas las dimensiones: diversidad en frecuencia multiplexando diferentes canal RF para la transmisión de contenidos, diversidad temporal con largas duraciones de entrelazado en la capa física y diversidad temporal a través de esquemas Multiple-Input Multiple-Output (MIMO). Una ventaja adicional de DVB-NGH es la posibilidad de ser transmitido junto con tramas DVB-T2 básicas en un mismo canal RF, al igual que el perfil T2-Lite. Esta característica permite reutilizar la infraestructura de una red DVB-T2, reduciendo considerablemente la inversión necesaria para empezar la provisión de servicios de TDT móvil. Sin embargo, la juventud de este estándar hace que a día de hoy no se disponga de equipos comerciales de transmisión/recepción.

### 1.1.2. Provisión de servicios locales/regionales en redes de TDT

El exponencial crecimiento de las plataformas de contenidos digitales ha fomentado el desarrollo de contenidos multimedia orientados a una determinada comunidad geográfica (ej: ciudades o regiones de un país). Estos contenidos reflejan la cultura, costumbres y hábitos de una comunidad en específico, convirtiéndose en atractivos contenidos para los usuarios de la región, en una oportunidad de negocio para los radioperadores y en un reto para el diseño y despliegue de las futuras redes de TDT. En la unión europea existen alrededor de 700 servicios de televisión local al aire [6].

Teniendo en cuenta la existencia de estos canales regionales/locales, los servicios de TV digital transmitidos en las redes TDT pueden ser clasificados dependiendo del área de cobertura objetivo. Unos servicios son de interés para muchos usuarios en toda la red, ej: programas de audiencia nacional, y generalmente son llamados *servicios globales*. Por otro lado, algunos servicios son de interés únicamente para una sub-región (ej: una ciudad) del área total de cobertura de la red y es razonable que solo sean emitidos en su correspondiente zona objetivo. Estos servicios son conocidos como *servicios locales* y el área de cobertura donde deben ser emitidos generalmente es referenciada como LSA. Desafortunadamente, un componente crítico de la viabilidad de la TV local es la ausencia de un claro y rentable esquema de transmisión dentro de las nuevas redes digitales.

Las actuales redes de TDT son desplegadas ya sea en topología MFN donde cada transmisor hace uso de una frecuencia independiente para evitar interferencias, o en topología SFN donde todos los transmisores emiten la misma información en una única frecuencia. Sin embargo, estas topologías no permiten una eficiente provisión de contenidos globales y locales simultáneamente. MFN es una excelente alternativa para emitir contenidos locales pero requiere más canales radioeléctricos y un costo de red más elevado comparado con las

topologías SFN. En topologías SFN ocurre lo contrario, se hace un óptimo uso del espectro pero la inserción de un contenido local se debe realizar remplazando un contenido nacional y emitirlos desde todos los transmisores de la SFN incluso en aquellos que no están en la zona objetivo. Esta solución resulta ser válida para casos donde es necesario insertar un bajo número de contenidos locales, de lo contrario resulta ser poco eficiente espectralmente. Estrategias como compartir temporalmente la fracción del multiplex dedicada a servicios locales (ej: dos horas al día) son utilizadas para aumentar la eficiencia espectral del sistema a costa de una corta disponibilidad de los servicios locales. Sin embargo, la solución más utilizada a día de hoy para la inserción de contenidos locales en redes SFN de gran tamaño (ej: una SFN nacional) es dividir la red en SFNs regionales a costa de aumentar el uso del espectro radioeléctrico.

La provisión de contenidos locales en redes de TDT cada día toma más relevancia y requiere de un adecuado esquema de transmisión que optimice el uso del espectro y mantenga inalterable la provisión de los contenidos globales. Así se vio reflejado en el último llamado a propuestas tecnológicas del foro DVB para la estandarización de DVB-NGH, donde uno de los requisitos comerciales fue la eficiente transmisión de contenidos locales en redes SFN con el mínimo incremento en la complejidad de la red, y la mínima influencia en el rendimiento de los contenidos globales [7].

## 1.2. Descripción general del problema

La mayoría de redes TDT en DVB ya sean de primera o de segunda generación han sido diseñadas para recepción fija con antena en tejados, seleccionando esquemas de modulación de alto orden (ej: 64QAM, 256QAM) y bajas tasas de protección (ej: 2/3, 3/4). Estas configuraciones garantizan una alta capacidad de transmisión por multiplex y permite la emisión de un gran número de canales de TV. Sin embargo, estos modos de transmisión tienen una muy baja robustez de la señal, lo cual limita significativamente la posibilidad de recibir contenidos de TV en condiciones portables o móviles, en particular en ambientes urbanos donde el efecto multicamino es más relevante.

Los principales problemas de una recepción de TV portable o móvil comparada con recepción fija típicamente evaluada para antena en tejados a 10 m de altura son: las pérdidas por recepción a nivel de suelo (evaluada generalmente a 1.5 m de altura), la utilización de antenas más pequeñas y omnidireccionales y la variabilidad del canal provocada por el movimiento del usuario. La tabla 1.1 resume el valor de estas penalizaciones en dB para distintas condiciones de recepción y establece la diferencia en el balance de enlace con respecto a la recepción fija en tejados basados en los valores presentados en [8] y [9] para la

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Tabla 1.1: Diferencias en el balance de enlace de DVB-T para distintas condiciones de recepción en la banda UHF. Valores basados en [8] y [9].

	<b>Fija 95 %</b>	<b>Portable 70 %</b>	<b>Portable 95 %</b>	<b>Móvil 90 %</b>	<b>Móvil 99 %</b>
Perdidas efecto multitrayecto <sup>2</sup>	0.6 dB	3.6 dB	3.6 dB	5 dB	5 dB
Perdidas por altura <sup>3</sup>	0 dB	17 dB	17 dB	17 dB	17 dB
Perdidas alimentador	4 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
Corrección Factor de localización	9 dB	3 dB	9 dB	7 dB	13 dB
Ganancia de antena <sup>4</sup>	11 dB	0 dB	0 dB	0 dB	0 dB
<b>Total</b>	<b>2.6 dB</b>	<b>23.6 dB</b>	<b>29.6 dB</b>	<b>29 dB</b>	<b>35 dB</b>
Diferencia con recepción fija	-	21 dB	27 dB	26.4 dB	32.4 dB

banda Ultra High frequency (UHF).

Aunque no se muestra en la tabla, existe una pérdida adicional en los escenarios de recepción móvil debido a la Inter Carrier Interference (ICI) causada por el efecto Doppler<sup>1</sup>. Esta degradación limita la máxima velocidad de los usuarios dependiendo del modo de transmisión, particularmente del tamaño de la Fast Fourier Transform (FFT) y del patrón de portadoras piloto, así como de la calidad del estimador de canal implementado en el receptor.

De acuerdo a la tabla 1.1, la diferencia en el balance de enlace entre recepción fija y recepción portable o móvil está en el rango de 21 dB a 32.4 dB dependiendo el tipo de recepción y la calidad de servicio deseada.

Un problema adicional del estándar de primera generación DVB-T es la ausencia de un entrelazado temporal de capa física que permita contrarrestar adecuadamente los efectos de fast fading y shadowing del canal móvil [1]. La versión del estándar de primera generación para recepción móvil DVB-H intentó solucionar esta carencia, insertando un entrelazado de capa de enlace basado en

<sup>1</sup>Esta dificultad se acentúa aún más en canales con anchos de banda de 6 MHz donde la separación entre portadoras de la señal Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) es menor comparado con un canal de 8 MHz y por tanto existe mayor probabilidad de experimentar ICI provocada por el efecto Doppler propio de los canales móviles.

<sup>2</sup>Comparado con un canal AWGN y de acuerdo a los valores presentados en [1]. El modo de transmisión seleccionado es 64QAM CR 2/3.

<sup>3</sup>Pérdida de altura correspondiente a escenarios sub-urbanos.

<sup>4</sup>Ganancia de antena relativa a un dipolo de media onda.

## 1.2 Descripción general del problema

---

Multi Protocol Encapsulation - Forward Error Correction (MPE-FEC) [10]. Sin embargo, proporciona duraciones de entrelazado del orden de 100 a 200 ms, lo cual puede llegar a ser suficiente para compensar los efectos del fast fading pero no del shadowing [11]. Es por esto que en las siguientes generaciones, DVB-T2 y DVB-NGH se han incorporado entrelazados temporales del orden de varios segundos en capa física, combinados con técnicas de fast zapping que eviten la degradación de la calidad del servicio experimentada por el usuario [3] [12].

Soluciones técnicas propuestas para mejorar el rendimiento de los sistemas de TDT en movilidad han estado basadas en diversidad temporal del orden de cientos de milisegundos en capa física y hasta segundos en capas superiores, diversidad de frecuencia dentro en el mismo canal RF y diversidad espacial a través de múltiples antenas en transmisión y recepción. Dichas soluciones han sido ampliamente evaluadas de una forma individual estableciendo las ganancias en términos de mínima CNR, tasa binaria útil y máxima frecuencia Doppler. Estas técnicas de diversidad pueden ser combinadas con la característica de transmisión con robustez específica por servicio ofrecida por DVB-T a través de la modulación jerárquica y por DVB-T2 a través de los múltiples PLP o el perfil T2-lite.

La ganancia total ofrecida por el uso combinado de estas técnicas puede no necesariamente corresponder a la suma de las ganancias individuales. Adicionalmente cada solución técnica implica compromisos de implementación, latencias, capacidad de transmisión e interoperabilidad de los servicios fijos y móviles.

Por otra parte, el principio de funcionamiento de las topologías SFN es que todos los transmisores deben emitir el mismo contenido con sincronización en tiempo, frecuencia y bit. Por lo tanto estas topologías no son eficientes para la provisión de contenidos locales ya que estos serían emitidos en toda la red, incluso en aquellas zonas donde no son de interés. Con las topologías MFN ocurre lo contrario, en cada transmisor se dispone completamente de la capacidad del multiplex para emitir contenidos globales y locales sin interferir los transmisores adyacentes. El principal problema es que requieren más canales radioeléctricos y un costo de red más elevado comparado con las topologías SFN.

En este sentido, una red de TDT ideal para la provisión de contenidos globales y locales debe cumplir las siguientes características:

- Utilizar únicamente una frecuencia para toda la red (nacional o regional).
- Transmitir los contenidos locales usando cualquier sub grupo de transmisores de la red.
- Mantener la ganancia SFN para los contenidos globales.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

- La inserción de los contenidos locales no debe afectar el rendimiento de los contenidos globales.
- Para los servicios locales, el área de cobertura debe ser lo suficientemente amplia para cubrir las zonas específicas donde los contenidos locales han de ser consumidos, lo cual para algunos casos de uso es la misma área de los contenidos globales.

Generalmente hablando, para conseguir estas características en una red TDT es conveniente desvincular los contenidos globales de los locales. Esto significa que los contenidos globales sean transmitidos en topología SFN con todas sus ventajas y sin ser afectados por los servicios locales. Para la transmisión de los contenidos locales, es necesario romper parcialmente o por cortos periodos de tiempo el principio de funcionamiento SFN. Un problema adicional a solucionar es que los servicios locales transmitidos en la misma frecuencia podrían generar mutua interferencia. Entonces, en áreas donde las señales provenientes de transmisores con diferentes contenidos locales son recibidas con un comparable nivel de potencia, la decodificación de los servicios locales no podría ser posible. Sin embargo, unas zonas con interferencia entre distintas LSA puede ser aceptable para algunos casos de uso, si la mayoría de los usuarios se encuentran localizados en las zonas de cobertura de cada LSA (ej: una ciudad).

La característica de transmisión con robustez específica para cada servicio propia de los estándares DVB o técnicas de multiplexación en tiempo o frecuencia pueden ser utilizadas para insertar eficientemente servicios locales en redes SFN.

### Formulación del problema

Los grandes beneficios de la televisión digital y el exponencial crecimiento de las plataformas de contenidos digitales han acelerado el despliegue de las redes de TDT en la última década. Adicionalmente, la aparición de nuevos nichos de mercado como la TV portable o móvil y el desarrollo de contenidos multimedia orientados a una determinada comunidad geográfica exigen adecuados esquemas de transmisión que optimicen el uso del espectro, contenidos e infraestructura.

El problema principal a abordar en esta tesis es la viabilidad de optimizar las redes de TDT de primera generación y segunda generación en dos aspectos claves:

- La provisión en el mismo canal RF de servicios móviles en redes TDT diseñadas inicialmente para servicios fijos a través del uso combinado

de los modos de transmisión con robustez específica por servicio y las técnicas de diversidad en los tres dominios: tiempo, frecuencia y espacio.

- La eficiente provisión de servicios globales y locales en redes SFN a través de soluciones técnicas basadas en la modulación jerárquica y la multiplexación en el dominio de tiempo y frecuencia.

## 1.3. Objetivos de la tesis

El objetivo principal de esta tesis doctoral es el estudio de nuevas soluciones en redes DVB de primera y segunda generación para la provisión simultánea de servicios de TV digital a terminales fijos y móviles y la eficiente inserción de servicios locales/regionales en redes SFN. Este objetivo puede ser dividido en los siguientes objetivos específicos:

- Analizar la viabilidad del uso combinado de técnicas de diversidad en tiempo, frecuencia y espacio con modos de transmisión que ofrecen robustez específica por servicio para mejorar el rendimiento de los estándares DVB-T y DVB-T2 en condiciones de movilidad. Este análisis busca identificar una configuración conjunta de estas soluciones que optimice el rendimiento del sistema no solo en la provisión simultánea de servicios fijos y móviles en el mismo canal RF, sino también en términos de capacidad de transmisión, tiempo de zapping y complejidad de implementación.
- Evaluar el rendimiento individual y conjunto de las soluciones técnicas propuestas para mejorar el rendimiento de los estándares DVB-T y DVB-T2 en condiciones de movilidad mediante simulaciones extremo a extremo de capa física, medidas de campo y medidas de laboratorio y estimaciones de cobertura en escenarios reales. En particular para la red comercial TDT ya desplegada en Valencia España.
- Proponer y validar soluciones técnicas compatibles con los estándares de TDT de la familia DVB que permitan una eficiente transmisión de servicios globales y locales en redes SFN. Estas soluciones estarán orientadas a mantener todas las ventajas SFN para los servicios globales, limitar el área de cobertura de los servicios locales únicamente a las respectivas áreas de interés, insertar los contenidos locales con el mínimo efecto sobre los servicios globales y maximizar el área de cobertura de cada contenido local.
- Evaluar el rendimiento de las soluciones técnicas propuestas para la inserción de contenidos locales en redes SFN en términos de márgenes de

protección entre señales de diferentes LSA, umbrales mínimos de Carrier to Noise Ratio (CNR) para una correcta decodificación, interoperabilidad entre servicios, ganancias en capacidad de transmisión total del sistema, características de implementación y estudios de viabilidad en escenarios reales. En particular, para las condiciones técnicas de transmisión y diseños de red Colombia, dada la disponibilidad de información.

- Generar una serie de recomendaciones basados en los resultados y conclusiones obtenidas en esta investigación, para la óptima planificación de redes DVB-T, DVB-T2 y futuras generaciones de estándares de TDT que transmitan servicios a terminales fijos y móviles en el mismo canal RF, y para diseños de red que desean emitir contenidos locales/regionales haciendo uso de una única frecuencia.

### 1.4. Estado del arte

#### 1.4.1. Provisión Simultánea de Servicios Fijos y Móviles en Redes de TDT

##### Movilidad en redes DVB-T

El trabajo de investigación relacionado con la recepción móvil de DVB-T comenzó en 1998 motivado por el lanzamiento comercial de las redes de TDT en Europa. Aunque DVB-T no fue originalmente diseñado para recepción móvil, su rendimiento en condiciones de movilidad ha sido ampliamente estudiado mediante simulaciones, medidas de campo y laboratorio [13–16]. Estas investigaciones concluyen que la recepción móvil de DVB-T es posible si se despliegan redes dedicadas con los modos más robustos de transmisión a costa de una fuerte penalización en la tasa binaria efectiva del sistema. Un claro ejemplo es la red TDT desplegada en Singapur en 2001 para la provisión de servicios de TV móvil al sistema de autobuses públicos. Esta red utiliza una modulación QPSK, FFT 2K, CR 1/2 y GI 1/4 para ofrecer un tasa máxima de transmisión de 3.7 Mbps (en un ancho de banda de 6 MHz) [17]. Otro ejemplo es la red TDT de Alemania (modulación 16QAM, FFT 8K, CR 2/3, GI 1/4 y capacidad máxima 14.3 Mbps), la cual está diseñada principalmente para la recepción portable indoor, pero ha mostrado buenos rendimientos en recepción móvil [18]. De acuerdo a la tabla 1.1, la diferencia en el balance de enlace entre recepción fija y recepción portable o móvil está en el rango de 21 dB a 32.4 dB dependiendo el tipo de recepción y la calidad de servicio deseada.

Teniendo en cuenta el creciente interés por los servicios de TV digital móvil, el foro DVB publicó las especificaciones del estándar DVB-H en 2004 [10].



DVB-H reutiliza la capa física de DVB-T e incorpora una corrección de errores en capa de enlace conocida como MPE-FEC para mejorar el rendimiento del sistema en escenarios móviles [19]. En particular MPE-FEC es un mecanismo FEC de capa superior UL-FEC que proporciona duraciones de entrelazado temporal del orden de 200ms por medio de bloques de entrelazado y codificación Reed Salomon (RS). De acuerdo a las medidas de campo desarrolladas en un amplio rango de condiciones de recepción en movilidad [20], la ganancia del MPE-FEC depende de la velocidad del usuario, siendo más amplia en recepción vehicular con velocidades por encima de los 70 Km/h. DVB-H ha sido lanzado comercialmente en 14 países (Albania, Austria, Finlandia, India, Italia, Kenia, Nigeria, Filipinas, Polonia, Marruecos, Namibia, Suiza, Holanda y Vietnam) pero su despliegue a nivel mundial se ha visto frenado debido a la necesidad de construir una nueva red dedicada, la necesidad de un elevado número de emplazamientos y las políticas de mercado que generalmente están asociadas a una suscripción de pago por parte del usuario.

La técnica de múltiples antenas en recepción conocida como Single-Input Multiple-Output (SIMO) ha sido tradicionalmente propuesta para recepción vehicular de DVB-T y DVB-H [14, 21]. Medidas de campo y laboratorio muestran que el uso de múltiples antenas en recepción reduce la mínima CNR requerida para correcta recepción móvil y aumenta la máxima velocidad permitida [14, 22]. Los resultados también muestran que la ganancia ofrecida por SIMO aumenta cuando existe menos grado de correlación entre las señales recibidas por cada antena [15]. Por otra parte, aunque la técnica de múltiples antenas en transmisión denominada Multiple-Input Single-Output (MISO) no ha sido directamente incluida en DVB-T ni en DVB-H, diferentes propuestas de esta técnica como Cyclic Delay Diversity (CDD) y Delay Diversity (DD) han sido evaluadas para mejorar la recepción en movilidad [23–25]. Medidas de campo y laboratorio muestran que aunque la ganancia obtenida con estas técnicas es menor que la conseguida con SIMO, también mejoran el rendimiento de los estándares en entornos de movilidad. Al igual que con SIMO, la ganancia de CDD o DD está directamente relacionada con la correlación existente entre antenas [26].

La modulación jerárquica incluida en los estándares DVB-T y DVB-H también ha sido propuesta en [27–29] como una alternativa para la transmisión simultánea de contenidos a terminales fijos y móviles. Aunque la modulación jerárquica permite la transmisión de dos flujos independientes, su mapeado en la capa física crea una interdependencia en el rendimiento de los dos flujos que puede afectar los porcentajes de cobertura comparados con la modulación no jerárquica [28].

La utilización de Application Layer-Forward Error Correction (AL-FEC) ha sido propuesta en [30, 31] para extender la protección de los servicios DVB-H

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

a través ráfagas en múltiples instantes de tiempo o time-slicing. AL-FEC fue estandarizado en DVB-H para la entrega de ficheros [32] y está basado en códigos Raptor [33] para codificar largas cantidades de información. Aunque AL-FEC no ha sido estandarizado para flujos de video, en [31] se propone su utilización para proteger los servicios de TV móvil en DVB-T y DVB-H sin requerir grandes modificaciones para su implementación.

El rendimiento en DVB-T de las técnicas de diversidad de antenas, modulación jerárquica y AL-FEC solo ha sido estudiado de forma individual, obteniendo significativas mejoras en recepción móvil. Un primer estudio combinado de AL-FEC y diversidad de antenas en recepción SIMO ha sido propuesto en [11] demostrando que el uso combinado de estas soluciones no es suficiente para la provisión de servicios móviles con aceptable nivel de cobertura a través de redes DVB-T y DVB-T2 planificadas para recepción fija. En el marco de esta tesis se han llevado a cabo simulaciones dinámicas, medidas de campo y laboratorio para evaluar el rendimiento conjunto de las tres soluciones técnicas: diversidad de antenas, modulación jerárquica y AL-FEC [34, 35]. Los resultados muestran que la ganancia total conseguida en entornos móviles no es la suma de las ganancias individuales y que existe un claro compromiso entre la ganancia en CNR, la tasa de codificación utilizada en capa física, la máxima capacidad de transmisión y el tiempo de zapping permitido para el usuario.

### Movilidad en redes DVB-T2

Al igual que en DVB-T, el rendimiento de DVB-T2 también ha despertado gran interés en escenarios de movilidad. La capa física de DVB-T2 es dividida en canales lógicos conocidos como PLP para transmitir servicios de TV digital con diferente robustez en función del tipo de usuario objetivo y de las condiciones de recepción (fija, portable o móvil). A pesar de que cada PLP permite configurar independientemente el esquema de modulación, la tasa de codificación y el entrelazado temporal, estos mantienen parámetros comunes como el tamaño de la FFT y el intervalo de guarda que establecen un fuerte compromiso entre la máxima capacidad de transmisión, la máxima velocidad permitida y el radio máximo de cobertura de las redes SFN cuando se desea una red para la provisión simultánea de servicios fijos y móviles. La utilización en DVB-T2 de códigos FEC más eficientes (Low Density Parity Check (LDPC) y Bose Chadhuri Hocquenghem (BCH)) comparados con los de DVB-T (convolucional y RS) y las nuevas tecnologías incluidas como constelaciones rotadas, transmisión MISO Alamouti, entrelazado temporal y técnicas de subslicing, mejoran el rendimiento en movilidad [36–38]. Sin embargo, aunque DVB-T2 incorpora un entrelazado temporal en la capa física para los datos útiles, la duración del entrelazado temporal de la señalización está limitada a unos pocos símbolos

OFDM. La robustez de la señalización en recepción móvil ha sido estudiada en varios trabajos [39, 40]. Resultados de simulaciones han demostrado que para ciertas configuraciones DVB-T2, la robustez de los datos de la señalización en condiciones móviles no es lo suficientemente alta comparada con la robustez de los datos útiles. Cabe resaltar que estos resultados han sido obtenidos asumiendo demapeo Genie Aided [41], el cual no representa un rendimiento real de los receptores.

Los beneficios de la técnica de MISO Alamouti incluida en el estándar DVB-T2 han sido estudiados en entornos de recepción móvil [42, 43]. Resultados de simulaciones con dos transmisores muestran que la ganancia en CNR es altamente dependiente de la relación en potencia y del retardo absoluto entre las señales recibidas desde cada transmisor. Simulaciones de tres y cuatro transmisores muestran que la ganancia de MISO está condicionada a la configuración geográfica de la red [43]. En el contexto de DVB-T2 la técnica de MIMO también ha sido evaluada [44, 45]. Medidas de campo y laboratorio muestran que el uso de múltiples antenas en transmisión y recepción ofrece una potencial ganancia de hasta el 75 % en términos de capacidad. Los estudios también demuestran un mejor rendimiento al utilizar antenas de polarización cruzada comparado con antenas de misma polarización, especialmente en escenarios con línea de vista o en presencia de alta correlación entre antenas [45].

Estudios de rendimiento de DVB-T2 en recepción móvil utilizando la combinación de entrelazado temporal, múltiples antenas en transmisión y recepción y diversidad en frecuencia han sido evaluadas en [11, 46]. Los resultados muestran significativas mejoras en la robustez del sistema, resaltando los fuertes compromisos a la hora de implementar las soluciones técnicas en forma conjunta, principalmente en términos de capacidad de transmisión, ahorro de energía y máximo tiempo de zapping. Igualmente concluye que el uso combinado de diversidad en tiempo, frecuencia y espacio no es suficiente para la provisión de servicios móviles con aceptable nivel de cobertura a través de redes DVB-T y DVB-T2 planificadas para recepción fija.

En cuanto al nuevo perfil T2-Lite, primeros estudios de rendimiento en entornos de movilidad han sido presentados en [3]. Este perfil es multiplexado en el tiempo con las tramas básicas de DVB-T2 para transmitir en un mismo canal RF servicios a receptores fijos y móviles con configuraciones de red y robustez totalmente independientes. En función de las longitudes de trama de T2 básicas y T2 lite, este multiplexado en el tiempo alarga la duración del entrelazado temporal, lo cual provoca efectos poco estudiados a día de hoy en el rendimiento en movilidad, la capacidad de transmisión, tiempo de zapping, ahorro de energía, etc. La juventud de este perfil hace que a día de hoy se encuentren disponibles muy pocos resultados de los efectos de utilizar múltiples antenas, mecanismos AL-FEC, diversidad en frecuencia, etc. para mejorar el

rendimiento en movilidad. De igual forma muy pocos estudios de implementación y planificación de redes DVB-T2 y T2-lite se encuentran disponibles en la literatura.

### 1.4.2. Provisión de Contenidos Locales en Redes TDT de Frecuencia Única

Cuatro opciones técnicas para la entrega de servicios de televisión local son propuestas para el Reino Unido son presentadas en [47]. La primera es una difusión mediante satélite, en la cual cada contenido local ocupa una parte del multiplex disponible y es difundido con un alto nivel de cobertura en todo el país. Esta solución es considerada poco viable debido al elevado coste de un canal satelital y al hecho de ser difundido no solo en el área local objetivo sino en general en todo el país. La segunda opción es el cable, el cual tiene una gran facilidad para la provisión de contenidos locales insertándolos en las redes de distribución de cada zona objetivo. Su principal inconveniente es que los usuarios tienen que pagar una suscripción y la cobertura está limitada al nivel de penetración de los cableoperadores locales. La tercera solución está basada en las redes de banda ancha, las cuales combinadas con ordenadores o televisores inteligentes ofrecen la posibilidad de recibir servicios de Internet Protocol Television (IPTV). Al igual que el cable, su inconveniente es la necesidad de un pago mensual y la cobertura sujeta a la penetración de los proveedores de banda ancha. La última opción propuesta en [47] es la utilización de las redes TDT la cual garantiza servicios de TV digital abierta y gratuita con altos niveles de cobertura.

La solución técnica basada en las redes TDT ofrece a día de hoy tres alternativas en función del espectro disponible o de la capacidad de transmisión propia de la red TDT. La primera es la utilización del espectro liberado por el apagón analógico para habilitar nuevas estaciones con cobertura limitada a la zona objetivo. La creación, administración y mantenimiento de estaciones dedicadas a servicios locales, así como la utilización de frecuencias liberadas puede resultar demasiado costosa para un operador local y poco eficiente en el uso del espectro. Una segunda alternativa es el reemplazo de un servicio global en la actual red TDT con el contenido de un servicio local. En topologías MFN este reemplazo se puede hacer en cada uno de los transmisores que la conforman, su cobertura está definida por el alcance de cada transmisor y no afecta la cobertura de los demás servicios locales. El principal inconveniente es la baja eficiencia espectral de las topologías MFN. En topologías SFN ocurre lo contrario, se hace un óptimo uso del espectro pero la inserción de un contenido local se debe realizar en todos los transmisores incluso en aquellos que no están en la zona objetivo, para no romper el principio de funcionamiento de una

SFN. Si el número de contenidos locales a insertar es elevado, la fracción del multiplex global dedicada a servicios locales puede ser compartida temporalmente por cada contenido local (ej: dos horas al día) para no afectar de forma significativa la capacidad total disponible de los servicios globales.

### Inserción en redes de primera generación (DVB-T, DVB-H)

Con el fin de mantener las ventajas de las topologías SFN y optimizar la capacidad de transmisión tanto de contenidos locales como globales, en [48] se propone un modelo de transmisión basado en la técnica *time slicing* de DVB-H. En esta solución, unos slot de tiempo son dedicados a servicios globales y otros slot son dedicados a servicios locales. Durante los instantes de tiempo de contenidos globales, la señal emitida es la misma en todos los transmisores y se mantienen los beneficios SFN. Por el contrario, durante los instantes de tiempo dedicados a contenidos locales, cada transmisor emite un contenido diferente y su cobertura está limitada por el grado de interferencia generado a los transmisores adyacentes. La técnica de *time slicing* esta estandarizada en DVB-H, pero no en los estándares DVB-T ni DVB-T2.

En [49] se propone una solución técnica para la inserción de contenidos locales basada en la modulación jerárquica para redes de radiodifusión. En ella, los contenidos globales son emitidos en el flujo de High Priority (HP) y define el cuadrante de la constelación donde será transmitido el símbolo. Por su parte, los contenidos locales son modulados en el flujo de Low Priority (LP) y definen la posición exacta dentro del cuadrante. Para evitar interferencias entre contenidos locales adyacentes cuando se utilizan topologías SFN, en [49] también se propone el uso de códigos ortogonales como los utilizados en Code Division Multiple Access (CDMA).

La modulación jerárquica ha sido estandarizada en DVB-T, DVB-H y DVB-SH pero la utilización adicional de códigos ortogonales requeriría de un receptor especial que permita la decodificación de los contenidos locales transmitidos con dichos códigos. La inserción de contenidos locales en redes híbridas en DVB-SH es analizada en [50], donde los transmisores terrenos emiten los contenidos globales en QPSK, el satélite emite únicamente contenidos globales en la misma modulación y los transmisores terrenos que deseen emitir contenidos locales habilitan la modulación jerárquica y lo hacen a través del flujo LP. El rendimiento del flujo HP se ve afectado por el flujo LP lo cual provoca una reducción en la cobertura de los servicios globales comparado con la obtenida con una modulación no jerárquica. Adicionalmente, el flujo HP estandarizado en DVB-T, DVB-H y DVB-SH utiliza modulación QPSK, lo cual limita la capacidad de transmisión de los contenidos globales a tasas relativamente bajas.

Teniendo en cuenta que a día de hoy la mayoría de redes TDT desplegadas

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

en todo el mundo han sido en DVB-T y que pocos estudios de soluciones técnicas para la inserción de contenidos locales en redes SFN se han realizado, en el marco de esta tesis se han propuesto y validado técnicas de transmisión basadas en modulación jerárquica y time slicing para DVB-T [51, 52] que permiten la emisión simultánea de contenidos globales y locales en redes SFN con las mínimas modificaciones en la parte de transmisión y manteniendo la compatibilidad con los receptores comerciales. El rendimiento de los contenidos locales y globales ha sido evaluado mediante simulaciones extremo a extremo y medidas de laboratorio. De igual forma se han realizado estimaciones de cobertura en escenarios reales, un estudio comparativo de la capacidad total de transmisión disponible en la red SFN, una identificación de las nuevas características en planificación de este tipo de redes y un análisis de las características de implementación de las soluciones técnicas tanto en transmisión como en recepción.

### **Inserción en redes de segunda generación (DVB-T2, DVB-NGH)**

En DVB-T2 es posible transmitir contenidos locales en redes SFN regionales que a su vez conforman una red MFN nacional, haciendo uso de la técnica de múltiples PLP. La idea consiste en reemplazar un PLP nacional por uno local en la respectiva SFN regional. El reemplazo del PLP es gestionado desde el elemento central de la red TDT denominado Gateway T2 el cual indica los espacios de tiempo y frecuencia en los que cada transmisor debe insertar su contenido local. En esta solución, la cobertura de cada LSA está limitada por la interferencia que un transmisor puede generar a los adyacentes.

Por otra parte, en los requerimientos técnicos del futuro estándar DVB-NGH fue resaltada la necesidad de incluir soluciones técnicas que optimicen la provisión de contenidos locales en redes SFN en términos de cobertura y capacidad de transmisión [7]. Para conseguir esto, en el proceso de estandarización de DVB-NGH se han adoptado dos técnicas. La primera emplea la modulación jerárquica, una técnica que al igual que DVB-T que permite transmitir dos flujos de información independientes con diferente protección mediante una jerarquización de la constelación. El flujo HP será dedicado a la transmisión de los contenidos globales, y en un nivel menos robusto (flujo LP), son emitidos los contenidos locales. El uso del flujo LP entre las áreas donde se quieren proveer servicios locales se realiza mediante multiplexación por división temporal Time Division Multiple Access (TDMA) [53]. La idea es que las transmisiones de contenidos locales no se interfirieran entre sí. Si hay dos áreas locales, por ejemplo, cada una transmitiría durante 50 % del tiempo.

La segunda técnica adoptada en DVB-NGH está basada en la solución de transmisión de flujos auxiliares específicos para la identificación de transmisores definida para DVB-T2 [54]. En esta solución un determinado grupo de

sub-portadoras del total disponible para datos en cada símbolo OFDM, es asignado para la transmisión de contenidos locales. Este grupo de sub-portadoras es dividido a su vez en el número total de LSA que se desean implementar dentro de la SFN. En cada LSA en contenido local es emitido utilizando uno de estos grupos de sub-portadoras y las demás son transmitidas en cero. Esto permite que cada grupo de sub-portadoras pueden ser transmitido con mayor potencia, con el fin de mantener constante la energía total de transmisión del símbolo OFDM. El aumento en la potencia de transmisión del grupo de sub-portadoras permite por un lado, aumentar la capacidad de transmisión en cada LSA utilizando un esquema de modulación menos robusto y manteniendo el nivel de cobertura; por otro lado permite mantener la capacidad de transmisión y aumentar el porcentaje de cobertura en cada LSA.

Dichas soluciones técnicas aún están en proceso de validación y por tanto en el marco de esta tesis se propone la evaluación del rendimiento de cada una de ella en términos de capacidad de transmisión, niveles de cobertura, márgenes de protección frente a interferencias, máximos tamaños de red SFN y características de implementación. Así mismo se realizarán el análisis y las recomendaciones técnicas para la planificación, despliegue y optimización de redes SFN de DVB-T, DVB-T2 y DVB-NGH para la provisión de contenidos locales y globales.

## 1.5. Descripción de la tesis y principales contribuciones

La presente tesis está organizada en seis capítulos de la siguiente forma: el capítulo 1 presenta la identificación del problema, los objetivos establecidos para el desarrollo de esta tesis y el estado del arte más representativo respecto a la transmisión simultánea de servicios fijos y móviles en redes de TDT y la inserción de servicios locales en redes SFN.

El capítulo 2 describe los principales estándares de TDT desarrollados a día de hoy y las topologías de red en que generalmente son desplegados, en particular los desarrollados por el foro de estandarización DVB. Los fundamentos de UL-FEC y entrelazado, los cuales son usados para lograr diversidad temporal, y los conceptos de múltiples antenas en transmisión y recepción, los cuales permiten las ganancias por diversidad espacial, son incluidos en este capítulo. Los modos de transmisión con robustez específica para cada tipo de servicio también son descritos en este capítulo, en particular los fundamentos de la modulación jerárquica, la técnica de múltiples PLP y el perfil T2-Lite.

El capítulo 3 está dedicado a la optimización de redes DVB-T. En primer lugar se investiga el uso combinado de las técnicas de diversidad en el

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

dominio de tiempo, espacio y frecuencia junto con la modulación jerárquica para la transmisión simultánea de servicios fijos y móviles en redes DVB-T. Los resultados presentados se focalizan a las ganancias en CNR y velocidad de desplazamiento ofrecidas por el uso conjunto de dichas soluciones y en los beneficios en términos de población cubierta. Por otra parte, en este capítulo se analizan el uso de la modulación jerárquica y la técnica de time slicing para la inserción de contenidos locales en redes SFN, analizando sus características de implementación, el rendimiento en términos de cobertura y capacidad de transmisión y la mutua relación entre flujos globales y locales.

El capítulo 4 está centrado principalmente en el estándar DVB-T2. En primer lugar se analizan los beneficios de actualizar una red DVB-T a DVB-T2. Posteriormente, se incluye un estudio comparativo del rendimiento en entornos de movilidad utilizando canalización 6 y 8 MHz y las mejoras obtenidas por el uso combinado de técnicas de diversidad temporal, frecuencial y espacial junto con múltiples PLP o el perfil T2 lite. Finalmente, se evalúan la viabilidad de utilizar múltiples PLP o flujos auxiliares de la trama DVB-T2 para la inserción de contenidos locales en redes SFN. Principales características de implementación y arquitecturas de red para la inserción de los contenidos son descritas en este capítulo.

En el capítulo 5 se evalúa el rendimiento de las dos soluciones técnicas adoptadas en DVB-NGH para la inserción de contenidos locales en redes SFN, conocidas como H-LSI y O-LSI. Las características de implementación y los beneficios en términos de cobertura y capacidad de transmisión son presentados en este capítulo. La viabilidad de uso de estas soluciones es analizada con base a estimaciones de cobertura en un escenario real.

Finalmente, el capítulo 6 resume los resultados obtenidos en los capítulos previos y presenta una serie de recomendaciones para la optimización de redes de TDT a través de la provisión de contenidos en movilidad y la inserción de servicios locales en redes SFN. Sugerencias de futuros temas de investigación también son incluidas.

El anexo A resume la metodología seguida en esta investigación para la evaluación de las diferentes soluciones técnicas propuestas en esta tesis. Esta metodología contempla en primer lugar simulaciones extremo a extremo de capa física y capas superiores de los estándares DVB-T/T2/NGH, pruebas de laboratorio con equipos profesionales DVB-T/T2 que permiten evaluar el rendimiento en condiciones reales y controladas y campañas de medidas de campo que permiten validar el rendimiento de DVB-T/T2 en escenarios reales, así como la calibración de los modelos de propagación utilizados en la estimaciones de cobertura móvil. Adicionalmente, este anexo describe la infraestructura de red TDT del operador público RTVC utilizada en la tesis para las estimaciones de cobertura y la validación de las soluciones técnicas propuestas para la



---

## 1.5 Descripción de la tesis y principales contribuciones

provisión de servicios globales y locales en redes SFN.

Las contribuciones más importantes de esta tesis en cada uno de los capítulos son resumidas a continuación. Aunque el capítulo 2 no representa una contribución original, este ofrece los fundamentos de los estándares DVB-T, DVB-T2 y DVB-NGH y de las distintas soluciones técnicas propuestas en esta tesis. El lector debe dirigirse a la sección 1.6 para ver la lista completa de publicaciones y diseminación originada del trabajo de investigación desarrollado en esta tesis doctoral.

### Capítulo 3

Las soluciones técnicas propuestas para proveer diversidad temporal y espacial en DVB-T son AL-FEC y SIMO, respectivamente. Aunque estas soluciones han sido ampliamente estudiadas de forma individual, una de las principales contribuciones de este capítulo es el estudio de rendimiento del uso combinado de estas soluciones junto con el modo de transmisión jerárquico para ofrecer robustez específica por servicio.

La evaluación del rendimiento individual y conjunto de estas soluciones se ha realizada mediante simulaciones dinámicas, medidas de laboratorio y medidas de campo en escenarios reales. La mutua influencia de estas soluciones conlleva a que la ganancia total en términos de CNR y velocidad de desplazamiento del usuario sea menor a la suma de las ganancias individuales. La red comercial de TDT de Valencia (España) y algunas de sus principales rutas de autobuses han sido utilizadas para evaluar los beneficios del uso combinado de estas soluciones para la recepción de servicios de TV en movilidad, optimizando redes inicialmente diseñadas para recepción fija en tejados. Los principales resultados obtenidos por el autor de esta tesis en este aspecto forman parte del trabajo titulado "Provisión de servicios TDT móviles y locales" que recibió el primer premio en la categoría Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC) del IV certamen Valencia Idea 2010.

Otra de las novedosas contribuciones de este capítulo es la propuesta y validación de la técnica de time slicing y la modulación jerárquica para la transmisión de servicios globales y locales en redes SFN. La modulación jerárquica ya ha sido incluida en el estándar DVB-T. La técnica time slicing fue originalmente propuesta en DVB-H y no en DVB-T, sin embargo en este capítulo se propone y valida su implementación en capa de aplicación de las redes DVB-T de forma tal que puede ser decodificada por los actuales receptores comerciales sin ninguna modificación hardware o software. En este sentido, se puede afirmar que las dos soluciones técnicas son totalmente compatibles con los receptores comerciales e infraestructuras de red TDT actualmente desplegadas en más de 120 países del mundo. Estas soluciones mantienen todas las ventajas SFN para

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

los servicios nacionales y habilitan una eficiente transmisión de los contenidos locales en sus respectivas zonas de interés únicamente.

El rendimiento de estas soluciones ha sido evaluado mediante medidas de laboratorio y simulaciones de red SFN emitiendo los mismos servicios globales y diferentes servicios locales. La viabilidad de estas soluciones ha sido evaluada mediante un análisis de las características de implementación, la ganancia en la capacidad total de transmisión del sistema y estimaciones de cobertura en un escenario real, en concreto en Colombia utilizando los diseños de red TDT del operador público RTVC para la provisión de los 6 canales regionales más importantes del país en una topología SFN nacional.

### Capítulo 4

En primer lugar, en este capítulo se analizan los principales beneficios de actualizar una red DVB-T a DVB-T2, identificando diferentes modos de transmisión DVB-T2 que permitan maximizar la capacidad de transmisión, los niveles de cobertura y/o los tamaños de red SFN. Como punto de partida se ha utilizado el diseño inicial de red DVB-T de Colombia del operador público RTVC. Los resultados de esta investigación son actualmente utilizados por la Agencia Nacional de Espectro de Colombia (ANE).

El caso de Colombia es muy especial por ser el primer país en desplegar DVB-T2 en canalización 6 MHz, lo cual permite un mayor tamaño de red SFN comparado con los permitidos en la canalización europea de 8 MHz, a costa de una penalización en el rendimiento en movilidad. Consecuentemente, en este capítulo se incluye un estudio comparativo del rendimiento de DVB-T2 en entornos de movilidad utilizando canalización 6 y 8 MHz y las mejoras obtenidas por el uso combinado de técnicas de diversidad temporal, frecuencial y espacial en estos sistemas.

Adicionalmente, en este capítulo se analiza el uso del entrelazado temporal disponible en capa física de DVB-T2 y la utilización de AL-FEC para sobrellevar las limitaciones de este entrelazado temporal, con el fin de lograr largos tiempo de entrelazado y menores tiempos de zapping. Para la diversidad espacial, se ha evaluado el uso de SIMO y la técnica de MISO distribuido incluido en el estándar. La técnica de MISO distribuido es muy interesante en el contexto de redes terrestres de radiodifusión, teniendo en cuenta que pueden ser implementadas sin ningún costo adicional para el operador. Sin embargo, nuestras investigaciones demuestran que para recepción en condiciones de movilidad, la ganancia es muy limitada comparada con la ofrecida por las técnicas MISO y depende de la diferencia en potencia entre las señal recibidas desde diferentes transmisores y los retardos relativos de las mismas.

Las soluciones tecnológicas analizadas en este capítulo para la transmisión

## 1.5 Descripción de la tesis y principales contribuciones

---

de contenidos nacionales y regionales en redes SFN están basadas en la técnica de reemplazo de PLPs dedicados en cada LSA o en la utilización de los flujos auxiliares de la trama DVB-T2. Una importante contribución es este aspecto ha sido la evaluación, mediante medidas de laboratorio y simulaciones de capa física extremo a extremo, de los márgenes de protección y mínimos niveles de CNR requeridos para correcta decodificación de señales DVB-T2 cuando es interferida por otra señal DVB-T2 proveniente de una LSA diferente. Con base en este rendimiento y con el fin de evaluar la viabilidad de las soluciones propuestas en un escenario real, hemos realizado un ejercicio de planificación y estimación de cobertura de los canales regionales en Colombia. Complementariamente, hemos analizado los principales requerimientos de implementación y las ganancias en capacidad de transmisión ofrecida por dichas soluciones comparadas con la solución clásica conocida como simulcast.

### Capítulo 5

DVB-NGH adoptó dos soluciones técnicas complementarias conocidas como Hierarchical-Local service Insertion (H-LSI) y Orthogonal-Local service Insertion (O-LSI) para la inserción de contenidos locales como respuesta a uno de sus requisitos comerciales. Debido a la juventud del estándar, estas soluciones son completamente novedosas y aun en proceso de validación y estandarización, por lo tanto muy pocos estudios se encuentran disponibles en la literatura a la fecha de redacción de esta tesis.

En este sentido, la mayor contribución en este capítulo es el estudio de rendimiento de las soluciones H-LSI y O-LSI en términos de umbrales mínimos de CNR para correcta decodificación de los servicios globales y locales en diferentes arquitecturas de red, la mutua influencia entre servicios y los márgenes de protección entre señal de diferentes LSA.

Los resultados han sido obtenidos mediante simulaciones extremo a extremo de capa física de DVB-NGH, utilizando las plataformas de simulación del instituto iTEAM de la Universitat Politècnica de València y del Institute for Communications Technology (IfN) of the Technische Universität Braunschweig de Alemania, las cuales han sido validadas durante todo el proceso de estandarización de DVB-NGH. Adicionalmente, hemos analizado los principales requerimientos de implementación tanto en transmisión como en recepción y las ganancias en capacidad de transmisión ofrecida por dichas soluciones comparadas con la solución clásica conocida como simulcast.

Finalmente y con el objetivo de analizar la viabilidad de estas soluciones técnicas, hemos realizado un ejercicio de planificación y estimación de cobertura utilizando los resultados de rendimiento obtenidos en esta investigación en un escenario real, en concreto para la transmisión de los canales regionales más

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

importantes de Colombia en una topología de red SFN.

### Capítulo 6

Las conclusiones y recomendaciones resumidas en este capítulo representan una guía muy importante para la optimización de redes DVB-T, DVB-T2 en la provisión simultánea de servicios a terminales fijos y móviles y en la inserción de contenidos locales en redes de frecuencia única. Igualmente son de gran utilidad para el diseño de las futuras redes de radiodifusión basadas en el estándar DVB-NGH o en las evoluciones tecnológicas del estándar europeo DVB-T2, o el japonés ISDB-T, el americano ATSC, el coreano DMB-T o el estándar chino CMMB.

## 1.6. Diseminación y lista de publicaciones

### Revistas Internacionales

- [RI1] **Lopez-Sanchez, J.**; Gomez-Barquero, D.; Gozalvez, D.; Cardona, N., “On the Provisioning of Mobile Digital Terrestrial TV Services to Vehicles With DVB-T,” *Broadcasting, IEEE Transactions on* , vol.58, no.4, pp.642-647, Dec. 2012.
- [RI2] Gozalvez, D.; **Lopez-Sanchez, J.**; Gomez-Barquero, D.; Gimenez, J.J.; Cardona, N., “Combined Time and Space Diversity: Mobile Reception in DVB-T and DVB-T2 Systems,” *Vehicular Technology Magazine, IEEE* , vol.7, no.4, pp.114-121, Dec. 2012.
- [RI3] **Lopez-Sanchez, J.**; Ruescas, C.; Gomez-Barquero, D.; Cardona, N., “On transmitting of Global and Local Contents within DVB-T Single Frequency Networks,” *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* , vol.9, no.5, pp.673-680, Sept. 2011.
- [RI4] **Lopez-Sanchez, J.**; Acero, C.G.; Gomez-Barquero, D.; Cardona, N., “Planning a Mobile DVB-T Network for Colombia,” *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)* , vol.8, no.4, pp.444-453, Aug. 2010.
- [RI5] **Lopez-Sanchez, J.**; Jan Zöllner; Gomez-Barquero, D.; Samuel Atung-siri; Erik Stare, “Technical Solutions for Local Service Insertion in DVB-NGH Single Frequency Networks,” submitted to *IEEE Transactions on Broadcasting*.
- [RI6] **Lopez-Sanchez, J.**; Gerardo Martínez; Gómez-Barquero, D.; Narcis Cardona, “Optimization of the Digital Terrestrial Television Network of Colombia for the New DVB-T2 Standard,” submitted to *Latin America Transactions*.

### Revistas Nacionales

- [RN1] Giménez Gandia J., **Lopez-Sanchez, J.**; Gomez-Barquero, D.; Cardona N., “Modelos de propagación radio para redes de TDT móvil en la banda UHF,” *Revista de la Facultad de Ingeniería Sistemas y Telemática*, vol.9, no.18, pp.9-27, 2011.
- [RN2] **Lopez-Sanchez, J.**; Romero Ruescas, Carlos; Gomez-Barquero, D.; Cardona N., “Optimization of DVB-T Networks for the Provision of Local and Mobile Services,” *WAVES*, vol.3, pp.48-57, 2011.

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---

- [RN3] **Lopez-Sanchez, J.**; Acero, C.G.; Gomez-Barquero, D.; Cardona, N., “Planificación y Optimización de Redes DVB-T para la Provisión de Servicios Locales y Móviles en Colombia,” *Revista Gerencia Tecnológica Informática*, vol.9, pp.111-123, 2010.
- [RN4] D. Gomez-Barquero; A. Saliato; G. Roig; **Lopez-Sanchez, J.**; C. Garcia; A. Fernandez; N. Cardona, “Mobile TV Network Planning,” *WAVES*, vol.1, pp.45-52, 2009.
- [RN5] **Lopez-Sanchez, J.**; D. Gomez-Barquero, “DVB-T2, la segunda generación de Televisión Digital Terrestre,” *ACIEM*, vol.114, pp.18-20, 2012.

### Capítulos de Libros

- [CL1] Jan Zöllner, **Jaime Lopez-Sanchez**;, David Gómez-Barquero, Samuel Atungsiri, and Erik Stare, “Local Service Insertion in DVB-NHG Single-Frequency Networks,” *Next Generation Mobile Multimedia Broadcasting*, CRC Press, pp. 513-548, 2013.

### Premios o reconocimientos

- [P1] **Jaime López Sánchez**, et al., “TV certamen Valencia Idea 2010 - Primer premio categoria TIC,” *Ajuntament de Valencia*, octubre de 2010.

### Conferencias Internacionales

- [CI1] Navarro, A.; Guevara, D.; Cardona, N.; **Lopez-Sanchez, J.**, “Measurement-based ray-tracing models calibration in urban environments,” *Antennas and Propagation Society International Symposium (APSURSI), 2012 IEEE* , pp.1-2, 8-14 July 2012.
- [CI2] **J. Lopez-Sanchez**; C. Romero; D. Gomez-Barquero; N. Cardona, “Provision of Local and Mobile Services in DVB-T Networks,” *IEEE Latin American Conference on Communications (LATINCOM)*, Bogotá-Colombia, 2010.
- [CI3] **J. Lopez-Sanchez**; C. Garcia; D. Gomez-Barquero; N. Cardona, “Efficient Provisioning of Mobile Digital Terrestrial Television Services to Vehicles with DVB-T,” *European Cooperation in Science and Technology. COST Action*, Athens-Greece, 2010.
- [CI4] **J. López-Sánchez**; C. García Acero; D. Gomez-Barquero; N. Cardona, “Planning a Mobile DVB-T Network for Colombia,” *IEEE COMSOC*

## 1.6 Diseminación y lista de publicaciones

---

*Latin-American Conference on Communications (LATINCOM)*, Medellín-Colombia, 2009.

### Conferencias Nacionales

- [CN1] David Gómez-Barquero, et al., “DVB-NGH, la Nueva Generación de Televisión Digital Móvil,” *XXI Jornadas Telecom I+D*, Santander, España 2011.
- [CN2] **J. Lopez-Sanchez**; C. Romero; D. Gomez-Barquero; N. Cardona, “Optimización de Redes DVB-T para la Provisión de Servicios Locales y Móviles,” *XX Jornadas Telecom I+D*, Valladolid, España 2010.
- [CN3] C. García Acero; **J. López-Sánchez**; D. Gómez-Barquero; N. Cardona, “Provisión de Servicios de TDT Móvil a Autobuses Urbanos de Valencia,” *XIX Jornadas de Telecom I+D*, Madrid-España, 2009.

### Notas de prensa

- [CN1] Se podrán ver contenidos de 3D en vehículos a través de la TDT  
(<http://www.abc.es/agencias/noticia.asp?noticia=1323190>)
- [CN2] La UPV pone en marcha un sistema piloto para ver contenidos digitales 3D en vehículos  
(<http://www.europapress.es/sociedad/noticia-20121228141748.html>)
- [CN3] Pruebas piloto para emitir TV-3D a través de la TDT  
(<http://www.diesl.com/2013/01/02/pruebas-piloto-tv-3d>)
- [CN4] Investigadores de la Politècnica de València ponen en marcha un sistema piloto para poder ver contenidos digitales 3D en vehículos a través de la TDT de segunda generación.  
(<http://www.upv.es/entidades/CTT/noticias42333c.html>)

## CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

---



## Capítulo 2

# Fundamentos de TDT

En este capítulo se describe brevemente la familia de estándares del foro DVB desarrollados para sistemas de TDT y las topologías de red en las que son generalmente desplegados. Adicionalmente se describen de forma general las distintas soluciones técnicas compatibles con DVB y evaluadas en esta tesis doctoral para la provisión simultánea de servicios de TV digital a terminales fijos y móviles en un mismo canal RF y la transmisión eficiente de servicios globales y locales en redes SFN. En la sección 2.1 se presenta un resumen de las principales características de los estándares DVB-T, DVB-T2 y DVB-NGH. Particularmente en el estándar DVB-T se describe la modulación jerárquica, la cual es una de las soluciones evaluadas en esta investigación para la provisión de servicios fijos/móviles y servicios locales en redes SFN. En la sección 2.2 se describen las distintas topologías de red en que puede ser implementado un sistema TDT y las principales ventajas para la transmisión de contenidos móviles, nacionales y locales. Finalmente en la sección 2.3 se presentan las técnicas de diversidad en el dominio temporal, frecuencial y espacial incluidas y/o compatibles con los estándares DVB para sistemas de TDT.

### 2.1. Principales estándares de TDT

La necesidad de sustituir la televisión analógica con el objetivo de optimizar el uso del espectro radioeléctrico y mejorar la calidad del servicio de televisión ha llevado al desarrollo de cuatro principales estándares a nivel mundial, los cuales se mantiene en constante evolución: ATSC, ISDB-T, Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting (DTMB) y DVB. La figura 2.1 muestra la adopción de cada uno de los estándares en los diferentes países del mundo. Como se puede apreciar, el estándar ATSC ha sido adoptado en Norte y gran parte

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE TDT

---

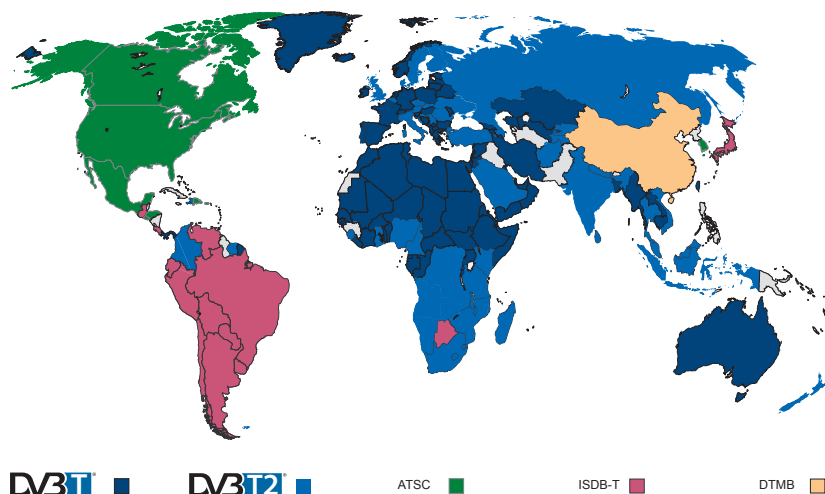


Figura 2.1: Adopción de los estándares de TDT en el mundo. Fuente, [www.dvb.org](http://www.dvb.org) actualizado a octubre de 2013.

de centro América. El estándar ISDB-T ha sido adoptado en Japón y con algunas modificaciones propuestas por Brasil (conocido como ISDB-Tb), ha sido adoptado en la gran mayoría de los países suramericanos. El estándar DTMB ha sido creado y desplegado en china. Finalmente, el estándar DVB ha sido el más adoptado a nivel mundial con más de 172 países y es el único que a la fecha de redacción de este documento cuenta con versiones de estándar de primera (DVB-T) y segunda generación (DVB-T2).

El creciente interés en los últimos años por los servicios de TV en movilidad ha motivado el desarrollo de sistemas broadcast para la provisión de servicios móviles a terminales de mano. Este es el caso de ATSC-M/H en Norte América, el perfil móvil dentro del estándar ISDB-T conocido como One-segment o el CMMB en china. La alta fragmentación de los sistemas de TDT en el mundo y las necesidades de beneficiarse de las economías de escala, han motivado los acercamientos y deseos de cooperación entre los distintos desarrolladores de los estándares. En 2012 se lanzó la iniciativa FOBTv con el objetivo de crear un escenario común de trabajo para la futura generación de los sistemas de radiodifusión terrestre. Esto incluye la definición de casos de uso, requerimientos, escenarios, así como las recomendaciones en términos de tecnologías para ser incluidas en los nuevos estándares. Esta tesis se centra en la familia de estándares europeos desarrollados por el foro DVB <sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup>El Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM) es miembro de

### 2.1.1. DVB-T

La primera generación del estándar europeo para la provisión de servicios de TDT fue publicada en 1998 y es conocida como DVB-T [1]. Desde entonces, DVB-T ha sido ampliamente aceptado, con más de 200 millones de receptores vendidos en más de 40 países. DVB-T es un sistema basado en modulación OFDM capaz de ofrecer tasas de transmisión hasta 24 Mbits, 28 Mbits o 32 Mbits en anchos de banda del canal de 6, 7 u 8 MHz, respectivamente [1]. Esto significa que en un canal de RF de televisión analógico se puede transmitir entre 6 y 8 contenidos digitales de Standard Definition Television (SDTV) o entre 3 y 4 contenidos HDTV utilizando MPEG-4. La codificación de canal definida en DVB-T utiliza un esquema FEC basado en la concatenación de códigos convolucionales (CC) con RS. Un entrelazado temporal de pocos milisegundos (11 símbolos OFDM) ha sido introducido en la capa física de DVB-T, dado que este estándar fue inicialmente diseñado para recepción fija con antena en tejado donde la variación del canal de propagación es muy pequeña. Dos tamaños de FFT conocidos como 8K y 2K han sido definidos para la modulación OFDM formados por 6817 y 1517 portadoras, respectivamente. Dichas portadoras pueden ser moduladas utilizando esquemas QPSK, 16-QAM, 64-QAM convencionales o esquemas de modulación jerárquica (HM por sus siglas en inglés) 16-QAM o 64-QAM. Finalmente, para ofrecer robustez al sistema frente a la propagación multitrayecto, DVB-T incluye un Intervalo de Guarda (GI por sus siglas en inglés) formado por una continuación cíclica de la parte final útil del símbolo OFDM que se inserta al inicio del mismo. Este GI puede tomar valores de  $1/4$ ,  $1/8$ ,  $1/16$ ,  $1/32$  el período útil de símbolo.

### Modulación jerárquica

La modulación jerárquica es un modo de transmisión incluido inicialmente en el estándar DVB-T que permite transmitir dos flujos de información con distinto grado de robustez utilizando diferente esquema de modulación y tasas de codificación independientes. Un flujo denominado HP es modulado en QPSK y constituye los dos bits más significativos del símbolo jerárquico, como se muestra en la figura 2.2. Siguiendo la codificación de gray utilizada en los sistemas DVB, este flujo definirá el cuadrante de la constelación donde será transmitido el símbolo. El otro flujo, conocido como LP constituye los bits menos significativos del símbolo jerárquico y determina la posición exacta dentro del cuadrante. En DVB-T los esquemas de modulación jerárquicos definidos conforman una constelación final 16QAM o 64QAM.

---

pleno derecho del foro DVB y participa activamente en el proceso de estandarización de las futuras generaciones de sistemas de radiodifusión terrestre

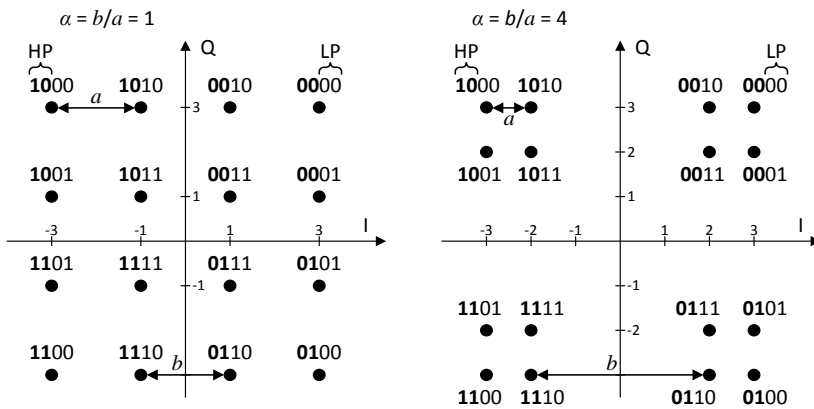


Figura 2.2: Constelación 16QAM jerárquica con  $\alpha=1$  (Izquierda) y  $\alpha=4$  (Derecha). El flujo HP es mapeado con los dos bits más significativos. El flujo LP es mapeado con los restantes bits menos significativos.

En la modulación jerárquica existe una interferencia inter flujo, debido a que el flujo LP actúa como ruido al flujo HP y viceversa. Esta interferencia genera una degradación en la mínima CNR requerida para correcta decodificación provocando una reducción en el área de cobertura de cada flujo, comparado con la transmisión en modulación no jerárquica. La degradación es generada básicamente por la variación en la distancia euclidiana de los símbolos de la constelación y puede ser expresada por medio de un incremento en la efectiva CNR requerida para correcta decodificación comparada con la requerida por la misma constelación en modulación no jerárquica. Esta degradación puede ser ajustada mediante el parámetro ( $\alpha$ ), el cual representa la relación entre la distancia entre dos símbolos adyacentes de distinto cuadrante ( $b$ ) y la distancia entre símbolos adyacentes del mismo cuadrante ( $a$ ), como se muestra en la figura 2.2. Este factor  $\alpha$  puede tomar valores de 1, 2 ó 4. Las convencionales modulaciones 16QAM y 64QAM corresponden a un factor  $\alpha=1$ .

La figura 2.3 muestra la CNR efectiva para el flujo HP (modulación QPSK) de una modulación jerárquica DVB-T con diferentes valores de  $\alpha$  [50]. La línea punteada representa la CNR requerida por una modulación clásica QPSK CR 1/2 en un canal Rice F1[1]. Una correcta decodificación es lograda cuando la CNR efectiva excede el umbral de CNR requerido (línea punteada). En este caso se observa que la penalización es 5.4 dB, 1.9 dB y 0.6 dB para valores de  $\alpha=1$ ,  $\alpha=2$  y  $\alpha=4$ , respectivamente. Para altos valores de  $\alpha$ , la degradación del flujo HP es prácticamente despreciable a consta de una alta reducción en la robustez del flujo LP. Por lo tanto, la selección del parámetro  $\alpha$  requiere

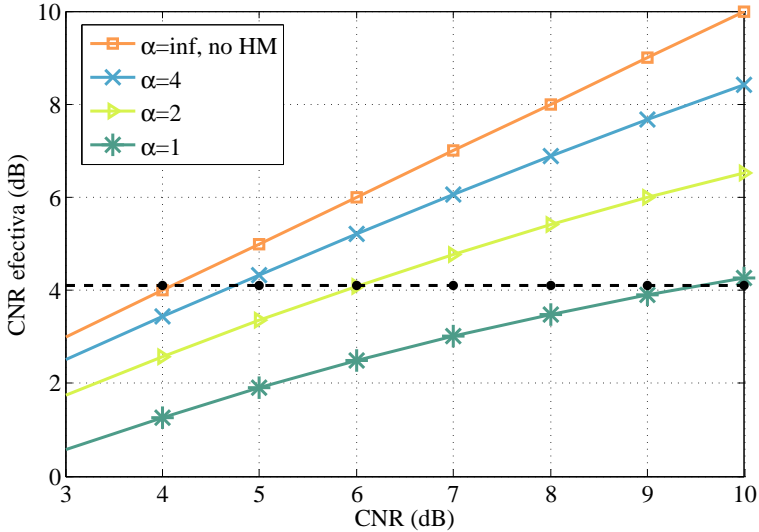


Figura 2.3: CNR efectiva para el flujo HP de la modulación jerárquica. La línea punteada representa el umbral mínimo de CNR requerido para un modo QPSK clásico CR 1/2 en un canal Rice F1.

de una compromiso entre las áreas de cobertura de los servicios transmitidos jerárquicamente. Naturalmente, no existe penalización cuando la modulación jerárquica no es habilitada ( $\alpha = \infty$ ). También es importante resaltar que esta penalización no depende del tipo de canal de propagación ya que tan solo es generada por el desplazamiento del símbolo de la constelación introducida por la sobremodulación del flujo LP. De forma complementaria, las tasas de codificación de cada flujo pueden ser seleccionadas independientemente para aumentar la robustez de cada flujo, estableciendo un compromiso con la máxima capacidad de transmisión disponible.

### 2.1.2. DVB-T2

Los recientes avances tecnológicos y la aparición de servicios HDTV y 3DTV motivaron el desarrollo de la segunda generación del estándar conocida como DVB-T2, la cual ofrece más de un 70 % de aumento en la eficiencia espectral comparado con su antecesor [3]. DVB-T2 es un estándar muy flexible que permite un amplio rango de modos de transmisión orientados a diferentes condiciones de recepción en un mismo canal RF. Las principales diferencias con su antecesor son presentadas en la tabla 2.1. DVB-T2 incluye significativas innovaciones

## CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE TDT

Tabla 2.1: Comparativa entre los parámetros de configuración de DVB-T vs. DVB-T2

parámetro	DVB-T	DVB-T2
Mecanismo FEC y tasa de codificación	CC+RS 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8	LDPC+BCH 1/2, 3/5, 2/3, 3/4, 4/5, 5/6
Esquema de modulación	QPSK, 16QAM, 64QAM	QPSK, 16QAM, 64QAM, 256QAM; [rotación opcional]
Tamaño FFT	2K, 8K	1K, 2K, 4K, 8K, 16K, 32K 8KE, 16KE, 32KE
Intervalo de Guarda (GI)	1/4, 1/8, 1/16, 1/32	1/4, 19/128, 1/8, 19/256, 1/16, 1/32, 1/128
Scattered Pilots	8% del total	1%, 2%, 4%, 8% del total
Máxima capacidad de transmisión @6MHz	23.8 Mbps	37 Mbps

tecnológicas tales como: la última generación de mecanismos FEC (LDPC y BCH), modulación 256-QAM, tamaños de FFT con mayor número de portadoras (16K y 32K) y posibilidad de un modo extendido de ancho de banda, nuevos GI y patrones de portadoras optimizados acorde a los GI. Adicionalmente incluye nuevas funcionalidades tales como múltiples PLP, entrelazado temporal, constelaciones rotadas, esquemas MISO Alamouti, mecanismos de control Peak Average Power Ratio (PAPR), tramas Future Extension Frame (FEF), encapsulación Generic Stream Encapsulation (GSE) y un perfil orientado a recepción móvil conocido como T2-lite.

La técnica de múltiples PLP permite ofrecer diferentes grados de robustez de la señal orientados a servicios específicos con diferentes condiciones de recepción (fija, portable y móvil) en un mismo canal RF. El entrelazado temporal aumenta la robustez de la señal frente al ruido impulsivo y los efectos shadowing y Doppler propios del canal móvil. Las constelaciones rotadas mejoran la robustez de las modulaciones de bajo orden frente a la pérdida de información de un símbolo de la constelación. La técnica de transmisión MISO introduce una decorrelación de las señales emitida desde dos grupos de transmisores con el fin de maximizar la ganancia SFN de la red. Dos opcionales mecanismos de reducción de PAPR conocidos Tone Reservation (TR) y Active Constellation Extension (ACE) permiten una mayor eficiencia en los amplificadores de alta potencia. La encapsulación GSE optimiza la transmisión de contenidos Internet Protocol (IP) comparado con el clásico Transport Stream (TS). Por medio de las tramas FEF, DVB-T2 permite la transmisión de cualquier otra tecnología

en el mismo canal RF mediante técnicas de multiplexación en el tiempo. La primera tecnología en hacer uso de estas tramas FEF ha sido T2-lite el cual reduce la complejidad del receptor móvil y habilita una compartición más eficiente de la capacidad de transmisión del sistema TDT utilizando una multiplexación en el tiempo entre DVB-T2 y T2-lite.

### 2.1.3. DVB-NGH

Actualmente, el foro DVB se encuentra estandarizando la nueva generación de sistemas de radiodifusión a terminales móviles conocido como DVB-NGH, el cual se espera ofrezca grandes mejoras en cobertura y capacidad de transmisión. Al igual que el perfil T2-lite, DVB-NGH está siendo diseñado para coexistir con un sistema DVB-T2. DVB-NGH nace con el objetivo de ser el estándar de radiodifusión multimedia móvil de referencia a nivel mundial, con unas prestaciones muy superiores en términos de capacidad y cobertura a las de tecnologías existentes, como el estándar de TDT móvil de primera generación DVB-H [10], el estándar híbrido terrestre-satelital DVB-SH [55], o el estándar de radiodifusión celular MBMS [56]. DVB-NGH se basa en la capa física de DVB-T2, pero incluye un conjunto de novedades tecnológicas avanzadas que hacen que sea realmente una tecnología de TV digital de tercera generación tales como [57]: la utilización de video escalable Scalable Video Coding (SVC) con diferentes PLP, la utilización de MIMO, la posibilidad de transmitir un servicio en varios canales RF con Time-Frequency slicing (TFS), la inclusión de una componente satélite opcional para posibilitar un despliegue híbrido terrestre-satélite, la definición de un perfil específicamente diseñado para IP utilizando compresión de cabeceras Robust Header Compression (RoHC), la mejora de la señalización en términos de robustez y eficiencia (overhead), y la provisión de manera eficiente de servicios locales en redes SFN.

## 2.2. Topologías de red de TDT

### Topología MFN

Las redes de radiodifusión MFN trabajan con una frecuencia para cada transmisor y diferente entre transmisores adyacentes como se muestra en parte izquierda de la figura 2.4. Su planificación está ajustada a esquemas convencionales de planificación celular donde se debe garantizar la distancia suficiente entre transmisores con la misma frecuencia para evitar la interferencia cocanal. Las redes MFN son consideradas ineficientes espectralmente, ya que un canal RF no se puede reutilizar a menos que exista una considerable distancia entre

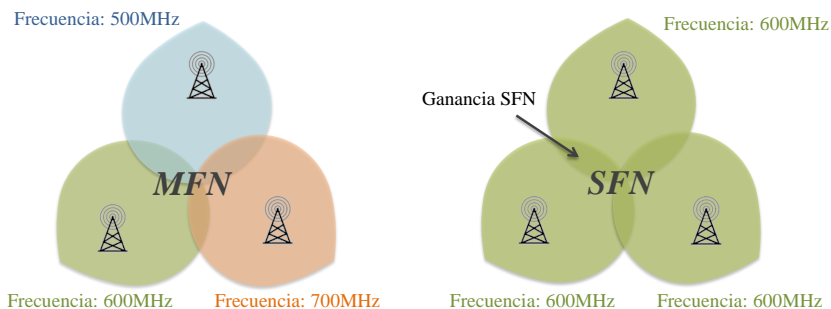


Figura 2.4: Topologías de red TDT. Topología MFN (izquierda). Topología SFN (derecha).

transmisores. Sin embargo su gran ventaja es la posibilidad de emitir contenidos de carácter local.

### Topología SFN

Una topología SFN es una red en la que todos los transmisores emiten simultáneamente la misma señal en la misma frecuencia como se ilustra en la parte derecha de la figura 2.4. Su principal requerimiento es la sincronización tanto en tiempo (tolerancia de  $\pm 1 \mu\text{s}$  en transmisión), como a nivel de bit (tolerancia cero) y de frecuencia (tolerancia 1/1000 veces la separación entre portadoras OFDM). El receptor recibirá la misma señal proveniente de más de un transmisor, forzando una propagación multicamino. Este tipo de redes son posibles gracias a la modulación OFDM que proporciona tolerancia frente a ecos y la posibilidad de que éstos contribuyan constructivamente a la señal recibida.

El principal motivo por el cual resulta interesante la implementación de redes SFN es una mayor eficiencia en el uso del espectro. Donde antes había un transmisor ahora puede haber varios, consiguiendo una distribución de cobertura más uniforme y evitando el sobredimensionamientos. Las redes SFN son ideales para transmisión de contenidos globales, pues es una única frecuencia para toda la red, y se presenta ganancia en regiones donde hay cobertura de más de un transmisor. Gracias a la utilización de este tipo de redes se pueden disminuir las alturas de los transmisores, con lo que se produce un aumento de la inmunidad frente a interferencias. Sin embargo, resultan poco eficientes para la transmisión de contenidos locales debido a su principio de funcionamiento donde se requiere la emisión de la misma señal desde todos los transmisores sincronizada en tiempo y frecuencia.



## 2.3. Técnicas de diversidad en sistemas DVB

El principio de diversidad es proveer al receptor múltiples versiones de la señal transmitida, donde cada versión es recibida a través de distintos canales. El número de canales generalmente es conocido como el número de ramas [58]. Con el fin de obtener un alto grado de mejora a partir de la diversidad, el desvanecimiento experimentado en las diferentes ramas debe tener el menor grado de correlación, de tal forma que la probabilidad de ocurrencia de fuertes desvanecimientos simultáneamente en todas las ramas sea mínima. Adicionalmente, la potencia media disponible en cada rama debe ser casi la misma. Puede ocurrir que la rama más débil no puede ser útil, aun si esta tiene menor desvanecimiento que las otras ramas.

La diversidad en tiempo y frecuencia en sistemas de radiodifusión es generalmente lograda por medio de los mecanismos FEC y técnicas de entrelazo. Cada palabra codificada es dividida en múltiples fragmentos, los cuales son transmitidos en diferentes versiones instantáneas de canal. Con el fin de obtener un bajo grado de correlación en canales móviles, es necesario distribuir las palabras código sobre el tiempo y frecuencia por medio de entrelazadores. Por otra parte, la diversidad espacial es lograda por múltiples antenas en la parte de transmisión y/o recepción. Las señales de diferentes antenas son combinadas en recepción obteniendo un desvanecimiento promedio. Sin embargo, es importante resaltar que existen una disminución en la ganancia obtenida por diversidad en función de cada dominio utilizado [59]. Es decir, entre más alta la ganancia por diversidad ofrecida en un dominio, menor será la ganancia adicional ofrecida por aplicar diversidad en otro dominio.

### 2.3.1. Diversidad temporal

La principal idea del entrelazado temporal es intercalar múltiples fragmentos de palabras código para luego ser transmitidas sobre un extendido periodo de tiempo [60]. El periodo de tiempo total sobre el cual es transmitida una palabra código es conocido como *tiempo de entrelazado*. Con el fin de lograr una efectiva diversidad temporal es necesario que el tiempo de entrelazado sea mayor al tiempo de coherencia, definido como el periodo de tiempo en el cual el canal de propagación permanece constante. En el caso de desvanecimientos rápidos, el tiempo de coherencia es inversamente proporcional al ensanchamiento Doppler, el cual determina el cambio en la amplitud y fase de la señal en función de la frecuencia portadora, la velocidad del usuario y el ángulo de llegada de la señal a la antena receptora<sup>2</sup>. Por otra parte, el tiempo de coherencia en condi-

---

<sup>2</sup>El tiempo de coherencia en condiciones de desvanecimientos rápidos puede ser aproximado a  $T_c \approx 9/(16\pi f_m)$ , donde  $f_m$  es el ensanchamiento Doppler definido como

ciones de shadowing es caracterizado por la velocidad del usuario y la distancia de correlación  $d_{corr}$ , definida como la distancia en la cual la autocorrelación normalizada cae a  $0,37(e^{-1})^3$ . Generalmente, tiempos de entrelazado del orden de cientos de milisegundos son suficientes para combatir los desvanecimiento rápidos en una canal de la banda UHF y del orden de varios segundos para sobrellevar el efecto shadowing característico de la recepción en movilidad. El principal impacto en el receptor para la implementación de entrelazado temporal es la necesidad de incorporar suficiente memoria para almacenar todas las palabras código que fueron entrelazadas conjuntamente en transmisión.

### Time slicing

La técnica de time slicing fue inicialmente incluida en el estándar DVB-H para habilitar un significativo ahorro de energía en los dispositivos de recepción móvil. Esta técnica consiste en una multiplexación temporal de los diferentes servicios a transmitir en un mismo canal de RF, como se ilustra en la figura 2.5. Cada servicio es transmitido en un slot de tiempo mediante ráfagas de datos superiores a la tasa de reproducción del servicio para garantizar en recepción una reproducción continua incluso en los slots de tiempo donde no se transmite dicho servicio. La transmisión discontinua de los servicios permite al receptor desconectar en aquellos instantes de tiempo donde no se transmite información del servicio seleccionado por el usuario, consiguiendo ahorros hasta del 90 % [10] en el consumo de energía a costa de un aumento en la memoria del receptor para almacenar las respectiva ráfaga de información comparado con un sistema convencional y continuo. Un beneficio adicional ofrecido por esta técnica en un sistema DVB-H es la posibilidad de realizar un soft-handover monitorizando celdas vecinas con mejores condiciones instantáneas de recepción en los slots de tiempo donde no se transmite el servicio seleccionado por el usuario.

### Mecanismos de corrección de errores en capa de aplicación AL-FEC

Los mecanismos FEC se pueden clasificar en aquellos que trabajan en la capa física del estándar (Physical Layer-Forward Error Correction (PL-FEC)) y aquellos que trabajan en capas superiores (UL-FEC). La implementación de entrelazados temporales y mecanismos FEC en las capas físicas o de aplicación

---

$f_m = f_c(v/c)\cos\alpha$ . El parámetro  $f_c$  representa la frecuencia de la portadora central,  $v$  es la velocidad del receptor,  $c$  es la velocidad de la luz y  $\alpha$  representa el ángulo de llegada de la señal respecto a la dirección de movimiento

<sup>3</sup>El tiempo de coherencia en canales con shadowing puede ser aproximado a  $T_c \approx d_{corr}/v$ , donde  $v$  es la velocidad del usuario y  $d_{corr}$  es la distancia de correlación. Esto significa que la el tiempo de coherencia es el periodo de tiempo que el usuario tarda en recorrer la distancia de correlación.

## 2.3 Técnicas de diversidad en sistemas DVB

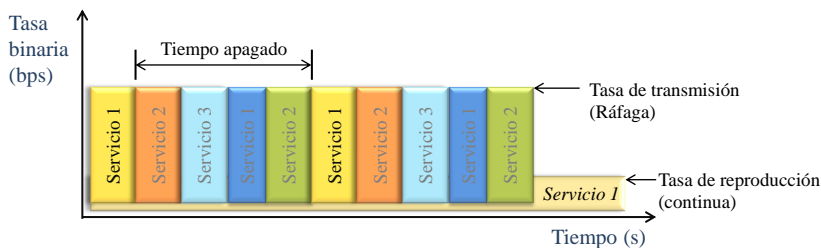


Figura 2.5: Concepto general de la técnica de transmisión time slicing

tienen un importante impacto en la protección frente a errores del sistema y en los requerimientos de memoria del receptor. Los mecanismos PL-FEC generalmente ofrecen mejor rendimiento a nivel de bit y utilizando decodificación con decisión suave en recepción a costa de un incremento los requerimientos de memoria para almacenar los bits por Log-Likelihood Ratio (LLR) y algunos de información del estado del canal (CSI por sus siglas en inglés).

Los mecanismos UL-FEC operan por encima de los PL-FEC para ofrece largos tiempos de entrelazado temporal con reducidos requerimientos de memoria. En particular, UL-FEC trabaja a nivel de paquetes considerando cada uno de ellos como completamente correcto o completamente incorrecto. Diferentes mecanismos UL-FEC son incluidos en las especificaciones DVB. Dependiendo del nivel donde estos mecanismos son integrados, estos pueden ser categorizados como Link Layer-Forward Error Correction (LL-FEC) sin trabajan en la capa de enlace o AL-FEC si trabajan en la capa de aplicación.

En particular, AL-FEC utiliza códigos Raptor definidos en las especificaciones de Internet Protocol Datacast (IPDC) [32]. La protección AL-FEC puede ser usada complementariamente con el estándar DVB-T o DVB-T2 para ofrecer tiempos de entrelazado más largos que los disponibles en la capa física y aumentar la robustez de la información transmitida, principalmente en entornos de recepción móvil. Como se ilustra en la figura 2.6, la técnica AL-FEC procesa una amplia cantidad de paquetes de audio y vídeo para generar un flujo adicional de paquetes de protección FEC, los cuales son multiplexados y transmitidos junto con los paquetes de información originales.

En recepción, un dispositivo que no implemente mecanismos AL-FEC (*legacy receiver*), decodificará los flujos originales de audio y vídeo e ignorará los paquetes de protección FEC. Por su parte, un receptor mejorado que implemente protección AL-FEC, hará uso del flujo de protección FEC para reconstruir los paquetes de audio y vídeo originales que hayan podido perderse durante la transmisión [61].

La protección ofrecida por AL-FEC depende de dos parámetros: el periodo

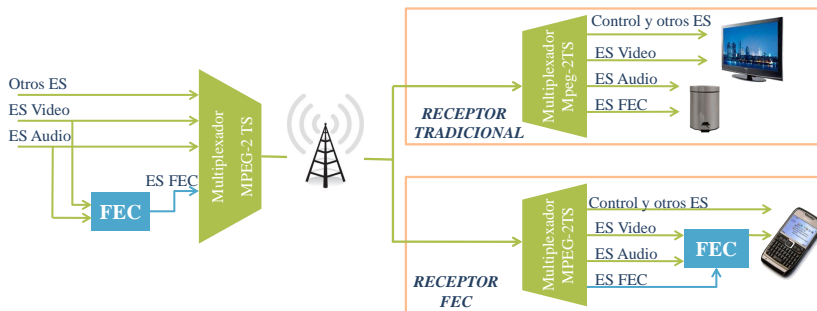


Figura 2.6: Arquitectura general de un sistema DVB extremo a extremo con AL-FEC

de protección y la tasa de codificación o FEC overhead. El *periodo de protección* es la duración total de los paquetes de audio y vídeo procesados conjuntamente para generar los paquetes de protección FEC, el cual típicamente está en el rango de unos 10 milisegundos a varios segundos de duración. El *FEC overhead* es la relación entre la cantidad de datos fuente y el total de datos transmitidos, teniendo en cuenta, tanto los paquetes de información original como los paquetes de protección FEC. Estos dos parámetros de diseño establecen el compromiso entre el nivel de protección frente a la pérdida de paquetes, la reducción de la tasa efectiva de transmisión y el tiempo de latencia y zapping introducido al sistema. Altos periodos de protección toman ventaja de la variabilidad espacial y temporal derivada de la movilidad del receptor, para incrementar la cantidad de información recuperada o disminuir la mínima CNR requerida para una correcta recepción. Por otra parte, altos valores de FEC overhead aumentan la robustez del flujo de información protegido a costa de una significativa reducción en la tasa total de transmisión del sistema.

### Consideraciones para el tiempo de zapping

La utilización de entrelazado temporal también incrementan la latencia extremo a extremo y especialmente el tiempo de zapping, el cual es considerado un parámetro crucial en la calidad de servicio experimentada por el usuario [62]. El tiempo de zapping es el tiempo que tarda un servicio en estar completamente disponible para el usuario medido a partir del momento en que lo solicita. Generalmente se considera que tiempos de zapping menores a 2 segundos son tolerables por el usuario y que tiempos menores a 500 ms son percibidos como una respuesta instantánea [63]. Algunos esquemas de entrelazado permiten utilizar técnicas de *fast zapping* y *parity recovery*, las cuales pueden reducir el

tiempo de zapping a valores tolerables por el usuario cuando se utilizan varios segundos de entrelazado temporal.

### 2.3.2. Diversidad frecuencial

Cuando los mecanismos FEC son usados junto con OFDM, las palabras código pueden ser distribuidas a través de las múltiples sub-portadoras con el fin de lograr diversidad frecuencial. La combinación de FEC y OFDM es usualmente referenciada como Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM). Utilizando COFDM es posible recuperar la información de subportadoras afectadas por desvanecimientos selectivos en frecuencia. En los sistemas DVB el entrelazador frecuencial distribuye las palabras código a través de todo el ancho de banda disponible. Teniendo en cuenta que la distribución se realiza en el dominio de la frecuencia, la diversidad frecuencial no conlleva problemas de latencia. Aunque el ancho de banda de distribución es generalmente limitado a un canal RF (6, 7 u 8 MHz en la banda VHF o UHF), es posible extenderlo a múltiples canales RF por medio de la técnica conocida como TFS. Esta técnica utiliza saltos en intervalos de tiempo y frecuencia para lograr mayor diversidad frecuencial e incrementar la capacidad de sistema por medio de una más eficiente multiplexación estadística (StatMux)<sup>4</sup>. En particular, es conveniente que el entrelazado en el dominio de la frecuencia sea mayor que el *ancho de banda de coherencia* del canal. Al igual que el tiempo de coherencia, el ancho de banda de coherencia es definido como el ancho de banda en el cual el comportamiento del canal puede ser considerado constante. Esto significa, que las subportadoras OFDM con separación entre ellas superior al ancho de banda de coherencia, experimentan desvanecimientos independientes. El ancho de banda de coherencia de un canal es inversamente proporcional al *delay spread*, el cual caracteriza la naturaleza multitrayecto del canal en función de las amplitudes y retardos relativos de cada una de las señales que arriban al receptor. La utilización de COFDM y entrelazado frecuencial en sistemas de radiodifusión generalmente logran suficiente diversidad frecuencial in canales de 6, 7 u 8 MHz en la banda UHF [16] [15].

### 2.3.3. Diversidad espacial

La utilización de múltiples antenas en transmisión y/o recepción ha sido una clave tecnológica en los últimos años para mejorar el rendimiento de los

---

<sup>4</sup>TFS fue inicialmente propuesto en DVB-T2 pero fue finalmente incluido como un anexo informativo debido a la necesidad de implementar más de una cadena de recepción. Las bajas de transmisión de los servicios de TV móviles permiten la operación de TFS con un único sintonizador, y por tanto la técnica ha sido adoptada en DVB-NGH[57]

sistemas de comunicaciones inalámbricas [64]. Si múltiples antenas son usadas y la distancia entre ellas es lo suficientemente grande, el canal entre diferentes pares de antenas experimentará desvanecimientos independientes. En este caso, la ganancia por diversidad espacial puede ser extraída del promediado de los desvanecimientos individuales. Mientras antenas co-polarizadas ofrecen importantes ganancias en el caso de recepción vehicular, estas son generalmente imprácticas para terminales móviles de mano en la banda de UHF, debido a que los requerimientos de separación mínima entre antenas llega a ser mucho más grande que las dimensiones típicas de los terminales (ej. 15 cm a 600 MHz).

### Single-Input Multiple-Output (SIMO)

Comparado con la utilización de una antena en transmisión y una en recepción o Single-Input Single-Output (SISO), la utilización de múltiples antenas en recepción es conocida como *diversidad en recepción* o SIMO. La ganancia ofrecida por SIMO se debe principalmente al promediado de los desvanecimientos experimentados en cada enlace de antenas y a la coherente combinación de la señales en recepción conocida como ganancia de arreglo de antenas.

La configuración SIMO no requiere modificaciones en el estándar ni en la etapa de transmisión. Su implementación está totalmente centrada en el receptor y por tanto son los fabricantes de chips receptores los que deciden implementar múltiples antenas para mejorar el rendimiento en condiciones de movilidad a costa de un costo adicional. Existen diferentes métodos para combinar las múltiples señales recibidas tales como Combinación Selectiva (CS), combinación de igual ganancia (EGC por sus siglas en ingles) o combinación de máximo ratio (MRC por sus siglas en ingles). MRC es considerado el método más óptimo de combinación en el sentido que maximiza la ganancia en CNR y ofrece la mejor reducción estadística del desvanecimiento [65].

### Multiple-Input Single-Output (MISO)

En contraste con SIMO, la utilización de múltiples antenas en transmisión es referenciada como *diversidad en transmisión* o MISO. La utilización de MISO es motivada por el hecho de ser mas económico agregar equipamiento en transmisión que en recepción, teniendo en cuenta que en sistemas broadcast generalmente un solo transmisor sirve a miles de receptores. Aunque MISO no ofrece ganancia por arreglo de antenas, su implementación combinada con Space-Frequency Block Code (SFBC) logra mejorar significativamente el rendimiento de ganancia por diversidad. Basicamente, un modulo SFBC acondiciona la información a transmitir en cada grupo de antenas, para que posteriormente en recepción puedan ser combinadas de la forma más óptima.

En DVB-T2 fue incluida una técnica de MISO distribuido basado en una modificación del SFBC conocido como código Alamouti [3]. En este caso, el código Alamouti es aplicado a dos grupos de transmisores con el fin de mejorar la recepción en topologías de red SFN. La llegada de múltiples señales con similares intensidades de campo eléctrico provenientes de diferentes transmisores en condiciones de visión directa puede provocar profundas caídas en la respuesta en frecuencia del canal. Estas caídas pueden afectar un significativo porcentaje de subportadoras OFDM, degradando la calidad de servicio experimentada por el usuario. Mediante el uso de MISO Alamouti en DVB-T2 es posible combinar de una forma óptima las señales provenientes de diferentes transmisores removiendo la presencia de las caídas profundas en frecuencia del canal.

Alternativamente, técnicas como DD, CDD, Phase Delay (PD) o Subcarrier Diversity (SD) pueden transformar la diversidad espacial en diversidad temporal o frecuencial. La principal ventaja de estas técnicas es el hecho que no requieren patrones de portadoras piloto específicos o aumentos de complejidad en el proceso de decodificación de la señal, por lo tanto pueden ser implementados sin ninguna modificación en los estándares o receptores [66]. Sin embargo la utilización de estas técnicas no resulta en un óptimo promediado de las variaciones del desvanecimiento, como Alamouti, éstas logran un mejor rendimiento que los sistemas con SISO.

### Multiple-Input Multiple-Output (MIMO)

La utilización de múltiples antenas tanto en transmisión como en recepción es conocida como MIMO. Adicionalmente a la ganancia por diversidad y por arreglo de antenas, la técnica MIMO ofrecen una *ganancia por multiplexación* que permite aumentar la tasa de transmisión del sistema. Un tradicional método de explotación de esta ganancia es conocida como multiplexación espacial, y consiste en multiplexar diferentes flujos de datos a través de las antenas de transmisión. Generalmente hablando, la utilización de MIMO requiere el uso de más complejos procesadores de señal en el lado del receptor para la decodificación de múltiples señales y también un incremento en el número de pilotos que deben ser transmitidos para la estimación del canal. Algunas técnicas permiten el uso de múltiples antenas en transmisión sin la necesidad de pilotos adicionales o significativos aumentos en la complejidad del receptor. El objetivo principal de estas técnicas es crear una única señal en transmisión con alto grado de diversidad frecuencial explotada a través de los códigos FEC. Este es el caso de DD, CDD, PD y SD. Aunque la utilización de estas técnicas no ofrece un óptimo promediado de los desvanecimientos individuales, estas técnicas logran una mayor diversidad que los sistemas con una única antena en transmisión.

### 2.4. Conclusiones

La adopción de los estándares DVB en más de 172 países beneficia las economías de escala para la fabricación y venta de dispositivos, facilitando un rápido despliegue y aceptación por parte de los usuarios. Un óptimo diseño de las redes TDT utilizando las diferentes soluciones técnicas propias o compatibles con los estándares DVB para la provisión eficiente de servicios fijos/móviles y servicios locales puede aumentar la eficiencia de las redes, minimizar los gastos de implementación y acelerar la penetración de los servicios de televisión digital en los nuevos nichos de mercado (ej. recepción en movilidad, servicios de TV digital e interactividad a nivel regional/local, etc.).

Las actuales redes de TDT hacen uso de topologías MFN y/o SFN, las cuales no son completamente eficientes para la provisión de servicios nacionales y locales. Por una parte, las topologías MFN son ideales para la provisión de contenidos locales dada la independencia de cada transmisor que las conforman, sin embargo no son muy eficientes para la transmisión de contenidos globales y exigen un amplio uso del espectro radioeléctrico. Por otra parte, las topologías SFN utilizan más eficientemente los recursos radio y son adecuadas para la emisión de contenidos nacionales gracias a su tolerancia frente a ecos y la posibilidad de que estos contribuyan constructivamente a la decodificación de la señal. Sin embargo, las redes SFN resultan poco eficientes para la provisión de contenidos locales debido a su principio de funcionamiento que requiere una emisión de la misma señal desde todos los transmisores sincronizada en tiempo y frecuencia.

Las técnicas de diversidad en el dominio temporal, frecuencial y espacial constituyen una valiosa herramienta para mejorar la recepción de servicios de TV digital en entornos de movilidad. En este contexto, la utilización de entrelazado temporal establece una serie de compromisos entre el tiempo de zapping, el ahorro de potencia y los requerimientos de memoria de los receptores. El tiempo de zapping generalmente es proporcional al tiempo de entrelazado y por lo tanto, tiempos largos de entrelazado solo son viables si implementan en conjunto con técnicas de zapping rápido que permitan reducir el tiempo a valores tolerables por el usuario. El ahorro de potencia en los receptores es logrado en sistemas de radiodifusión móvil por la transmisión de la información en una forma discontinua en el tiempo. Finalmente, la cantidad de memoria requerida para propósitos de desentrelazado temporal depende del tiempo de entrelazado y del mecanismo FEC utilizados en la capa de física y/o de aplicación. Los mecanismos PL-FEC generalmente logra un mejor rendimiento debido a la decodificación con decisión suave a nivel de bit, mientras que UL-FEC utiliza mecanismos de decodificación a nivel de paquete. Sin embargo los mecanismos UL-FEC permiten tiempos de entrelazados más largos con menos requerimien-



tos de memoria.

Varios mecanismos UL-FEC están disponibles en la familia de estándares DVB para la protección de servicios de streaming. Este es el caso de MPE-FEC y Multi Protocol Encapsulation - inter burst Forward Error Correction (MPE-iFEC) los cuales fueron desarrollados durante el proceso de estandarización de DVB-H y DVB-SH respectivamente. Adicionalmente, la técnica AL-FEC, desarrollada para protección en servicios de entrega de ficheros sobre DVB-H, puede ser adaptada con tan solo unos cambios menores para protección de servicios de streaming. Por otra parte, mecanismos de PL-FEC con tiempo de entrelazado han sido incluidos en DVB-T2, DVB-SH y DVB-NGH.

En el dominio de la frecuencia, la utilización de COFDM y entrelazado de sub-portadoras generalmente ofrece suficiente diversidad frecuencial en canal UHF/Very High frequency (VHF) de anchos de banda 6 o 8 MHz. Esta diversidad puede ser mejorada mediante la técnica de TFS, extendiendo el entrelazado a través de múltiples canales RF, donde el proceso de decodificación solo contrarresta el promedio de las variaciones de la señal experimentadas en los distintos canales.

Respecto a la utilización de múltiples antenas, esto puede ser clasificado en SIMO, MISO y MIMO dependiendo si la diversidad es implementada en transmisión y/o en recepción. Los sistemas SIMO logran ofrecer ganancia por diversidad y por arreglo de antenas sin ninguna modificación en los estándares ni en la cadena de transmisión. Adicionalmente las técnicas SIMO no requieren la transmisión de pilotos adicionales y puede ser decodificado mediante técnicas lineales de demodulación en recepción tales como Maximum Ratio Combining (MRC). Los sistemas MISO pueden llegar a ser más fáciles de implementar teniendo en cuenta que tan solo requiere modificaciones en la parte de transmisión y no en cientos/miles de receptores, sin embargo solo ofrecen ganancia por diversidad espacial. El código Alamouti es una técnica de diversidad en transmisión diseñada para dos grupos de transmisores que logra alto grado de diversidad a costa de un leve aumento en la complejidad de decodificación del receptor y en el número de portadoras pilotos necesarias para la estimación de canal. Alternativamente, técnicas como DD, CDD, PD o SD han sido propuestas con el fin de lograr diversidad espacial sin necesidad de aumentar las portadoras piloto ni modificar la operación del receptor. Finalmente, comparado con los sistemas SIMO o MISO, la técnica MIMO ofrece una ganancia adicional por multiplexación que puede permitir un incremento en la tasa binaria de transmisión.

## **CAPÍTULO 2. FUNDAMENTOS DE TDT**

---

## Capítulo 3

# Provisión simultánea de servicios de TDT a terminales fijos/móviles y servicios locales en redes de frecuencia única DVB-T

En este capítulo se analiza, en primer lugar, la utilización conjunta de tres soluciones técnicas para mejorar la recepción de la señal DVB-T en entornos móviles: diversidad de antenas en recepción (SIMO), modulación jerárquica y AL-FEC. El objetivo principal es identificar la ganancia en el balance de enlace ofrecida por el uso combinado de dichas soluciones técnicas y analizar la viabilidad de proveer servicios de TDT a terminales fijos con antena en tejados y terminales portables o móviles en un mismo canal RF.

Desde el punto de vista del operador, la introducción de estas soluciones técnicas no representa mayor complejidad ni requiere grandes modificaciones en la infraestructura de red. En recepción, la diversidad de antenas ya es una técnica implementada en terminales comerciales orientados a recepción en vehículos principalmente. La modulación jerárquica es un modo de transmisión estandarizado en DVB-T y considerado como característica opcional de los receptores en la gran mayoría de países donde se ha implementado dicho estándar. La solución técnica AL-FEC requiere de una decodificación adicional que puede ser fácilmente implementada en nuevos receptores orientados principalmente

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

a vehículos o dispositivos de mano. La transmisión de la información de paridad AL-FEC se realiza sin alterar el correcto funcionamiento de los receptores comerciales ya disponibles en el mercado.

Con estas soluciones técnicas, la actualización de las redes DVB-T o la planificación de una única red que contemple desde la fase de diseño la provisión de servicios fijos y móviles, puede proporcionar grandes beneficios económicos y tecnológicos. Se reduce la infraestructura necesaria, se minimiza el coste de despliegue y se evita la implementación de una red dedicada y el uso de canales radioeléctricos.

La estimación de cobertura y evaluación del rendimiento individual y conjunto de estas soluciones técnicas para recepción móvil han sido analizadas a partir de medidas de campo, pruebas de laboratorio y simulaciones dinámicas para recepción de servicios TV digital en autobuses de transporte público.

En segundo lugar, en este capítulo se analiza la utilización de la modulación jerárquica y la técnica de transmisión time slicing para la provisión de servicios nacionales y regionales/locales en redes de frecuencia única DVB-T. Estas soluciones mantienen todas las ventajas SFN para los servicios nacionales y habilitan una eficiente transmisión de los contenidos locales en sus respectivas zonas de interés únicamente. La cobertura de cada LSA está limitada por el nivel de interferencia generada por las LSAs adyacentes. Sin embargo, dependiendo del escenario de despliegue, el radio de cobertura obtenido es suficiente para cubrir un alto porcentaje de la población objetivo, (ej.: ciudades con alta densidad de habitantes ubicadas en las cercanías de los transmisores). Un patrón temporal de transmisión puede ser implementado con la solución técnica basada en la modulación jerárquica para aumentar el área de cobertura de cada LSA, a costa de una reducción en la máxima capacidad de transmisión disponibles para los servicios locales.

La modulación jerárquica ya ha sido incluida en el estándar DVB-T; La técnica de transmisión conocida como time slicing fue originalmente propuesta en DVB-H pero puede ser implementada en capa de aplicación de las de redes DVB-T y decodificada por los actuales receptores comerciales sin ninguna modificación hardware o software. El rendimiento de estas soluciones ha sido evaluado mediante simulaciones de red SFN y medidas de laboratorio formadas por dos transmisores adyacentes emitiendo los mismos servicios globales y diferentes servicios locales. Los resultados obtenidos pueden ser extrapolados para un mayor número de LSAs considerando como fuentes de interferencia a todos los transmisores SFN que no pertenecen a la LSA de interés. Estimaciones de cobertura en escenarios reales, concretamente para los canales regionales de Colombia, han sido realizadas con el fin de establecer la viabilidad de implementar estas soluciones técnicas en función de los niveles de cobertura, los porcentajes de población con interferencia y la capacidad de transmisión para

### 3.1 Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

---

los servicios locales y nacionales.

El resto de este capítulo se estructura de la siguiente manera: en la sección 3.1 se describen las soluciones técnicas propuestas para la transmisión simultánea de servicios fijos y móviles a través de un mismo canal de RF. En la sección 3.2 se describen las soluciones técnicas para la inserción de servicios locales en redes SFN y se presentan resultados de rendimiento y estimación de cobertura en un escenario real. Finalmente, las principales conclusiones son presentadas en la sección 3.3.

## 3.1. Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

### 3.1.1. Soluciones técnicas para recepción móvil

La mayoría de redes DVB-T en el mundo han sido implementadas en modos de transmisión de baja robustez (16QAM o 64QAM) para lograr una alta capacidad de transmisión, y orientadas principalmente a recepción fija con antenas directivas en los tejados. Las características de propagación en entornos móviles son mucho más severas debido a la falta de visión directa, la propagación multicamino, menor tamaño y ganancia de antenas receptoras. Adicionalmente, el estándar DVB-T fue originalmente diseñado para recepción fija, con un muy corto tiempo de entrelazado (pocos milisegundos) en la capa física, convirtiéndolo en un estándar muy vulnerable al fast fading, al shadowing y al efecto Doppler característico de un canal móvil. Sin embargo, algunos de los modos más robustos de transmisión de DVB-T, como QPSK o 16QAM, tamaño FFT de 2K y fuertes tasas de codificación para protección frente a errores (1/2, 2/3), permiten la provisión de servicios de TV digital a terminales en movimiento con velocidades cercanas a los 200 km/h. Teniendo en cuenta que estos modos DVB-T ofrecen una baja capacidad de transmisión, generalmente son desplegados en redes dedicadas para servicios móviles.

En los últimos años han surgido una serie de avances en las técnicas de transmisión y recepción que permiten planificar una red DVB-T no solo para recepción fija sino también portable y móvil (especialmente en vehículos). Las soluciones técnicas analizadas en este capítulo son: diversidad de antenas en recepción, modulación jerárquica, y AL-FEC.

### 3.1.2. Movilidad utilizando diversidad de antenas en recepción (SIMO)

El objetivo fundamental de la utilización de diversidad de antenas en recepción (SIMO) es que la combinación de dos o más versiones de la señal transmitida presente menos fading que las señales entregadas por cada antena individualmente. La técnica de combinación de señales que ofrece mayor reducción del fading es conocida como MRC, siendo la más implementada en los receptores comerciales DVB-T disponibles actualmente en el mercado. En MRC las señales entregadas por cada antena receptora son combinadas en fase y sumadas ponderadamente en función de su CNR instantánea.

La ganancia por utilización de MISO depende del factor de correlación  $\rho$  entre las señales recibidas. De acuerdo con los resultados presentados en [58], una ganancia de hasta 8 dB es conseguida cuando no existe correlación entre las señales ( $\rho=0$ ) o de tan solo 3 dB cuando las señales están totalmente correladas ( $\rho=1$ ). Sin embargo, leves reducciones (aproximadamente 1 dB) en la máxima ganancia ofrecida por MISO son experimentadas cuando las señales presentan factores de hasta 0.7 de correlación. Desde el punto de vista de implementación, una separación entre antenas de  $\lambda/5$  ofrece un factor  $\rho=0.7$ , donde  $\lambda$  representa la longitud de onda de la señal [58]. Para el rango de frecuencias de operación de la TDT, ésto representa una distancia de 12.7 cm para la frecuencia 470 MHz y 6.9 cm para la frecuencia 862 MHz.

### Resultados de medidas de laboratorio

En esta tesis, la ganancia ofrecida por SIMO en entornos de movilidad ha sido evaluada en condiciones controladas de laboratorio siguiendo la metodología descrita en el anexo A. Dos canales Typical Urban 6 taps (TU6) con un factor constante de  $\rho=0.7$  ha sido configurados. Igualmente se ha incluido la presencia del efecto shadowing en la señal recibida asumiendo que un usuario se mueve a velocidad constante a través de una ruta con distribución log-normal de valores de CNR. Esta distribución fue definida para una desviación estándar ( $\sigma$ ) y una distancia de correlación ( $d_{corr}$ ) siguiendo la metodología descrita en [58]. Estas medidas han permitido establecer la reducción en la mínima CNR requerida para correcta recepción y el aumento en la máxima velocidad de desplazamiento permitida al receptor<sup>1</sup>, comparado con la tradicional esquema SISO.

La figura 3.1, muestra el rendimiento de la configuración DVB-T actualmente utilizada en España, para recepción móvil utilizando SISO y SIMO con

---

<sup>1</sup> Generalmente, para propósitos de planificación, la máxima frecuencia Doppler es aquella que provoca un aumento de máximo 3 dB en el mínimo nivel de CNR

### 3.1 Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

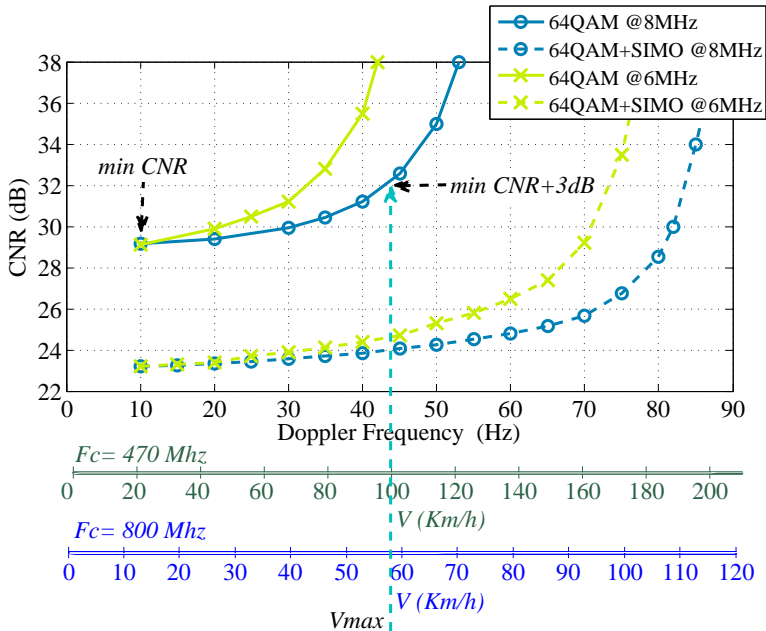


Figura 3.1: Rendimiento SISO y SIMO del modo DVB-T 64QAM, CR 2/3, FFT 8K, GI 1/4 en un modelo de canal TU6 con shadowing ( $\sigma=5.5$  dB y  $d_{corr}=20$  m).

combinación MRC en el receptor. Se puede observar una ganancia de 6 dB en la mínima CNR y un aumento prácticamente del doble en la máxima frecuencia Doppler permitida. Comparativamente se ha evaluado el rendimiento de este modo DVB-T en anchos de banda 6 y 8 MHz. De la gráfica podemos establecer que la mínima CNR requerida es aproximadamente la misma en SISO y SIMO para cualquiera de los anchos de banda utilizados. Sin embargo, la canalización 6 MHz sufre una penalización alrededor del 23% y 27% en la máxima velocidad de desplazamiento del receptor con SISO y SIMO, respectivamente. Este efecto es producido principalmente por la reducción en la distancia entre portadoras OFDM cuando se utiliza canalización 6 MHz, lo cual provoca mayor vulnerabilidad a la ICI generada por el efecto Doppler. La tabla 3.1, resume la ganancia en la mínima CNR y la máxima frecuencia Doppler permitida para diferentes modos de transmisión DVB-T cuando se utilizan esquemas SISO y SIMO en canalización 8 MHz.

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

Tabla 3.1: Ganancia en mínima CNR requerida y máxima frecuencia Doppler ofrecida por SIMO para diferentes modos DVB-T. Canal TU6 con shadowing ( $\sigma=5.5$  dB y  $d_{corr}=20$  m)

Modo DVB-T	SISO		SIMO		Ganancia	
	CNR	Doppler Máximo	CNR	Doppler Máximo	CNR	Doppler
16QAM CR 1/2	21 dB	55 Hz	14.5 dB	98 Hz	6.5 dB	78.2 %
16QAM CR 2/3	24.2 dB	50 Hz	16.4 dB	85 Hz	7.8 dB	70 %
16QAM CR 3/4	31.2 dB	43 Hz	24.3 dB	72 Hz	6.9 dB	69.6 %
64QAM CR 1/2	23 dB	52 Hz	15.5 dB	87 Hz	6.9 dB	67.3 %
64QAM CR 2/3	29.2 dB	42 Hz	23 dB	72 Hz	6.2 dB	71.5 %
64QAM CR 3/4	33 dB	33 Hz	25.8 dB	56 Hz	7.2 dB	69.7 %

#### 3.1.3. Movilidad utilizando modulación jerárquica +SIMO

La modulación jerárquica permite la transmisión de dos flujos (HP y LP) independientes en una misma constelación, cada uno con diferentes grados de robustez. La mayor robustez del flujo HP puede ser aprovechada para transmitir servicios a terminales móviles, mientras el flujo LP simultáneamente puede proveer servicio a receptores fijos en la zona más próxima al transmisor.

La utilización de la modulación jerárquica provoca una penalización en la mínima CNR generada principalmente por la reducción en la distancia euclidiana de los símbolos de la constelación. Esto significa que ambos flujos son transmitidos con menor robustez comparada con constelaciones equivalentes en transmisión no jerárquica. La penalización en CNR del flujo HP puede ser reducida utilizando tasas de codificación más altas a consta de una significativa reducción en la tasa de transmisión. Alternativamente es posible incrementar el factor  $\alpha$  a consta de la robustez del flujo LP.



### 3.1 Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

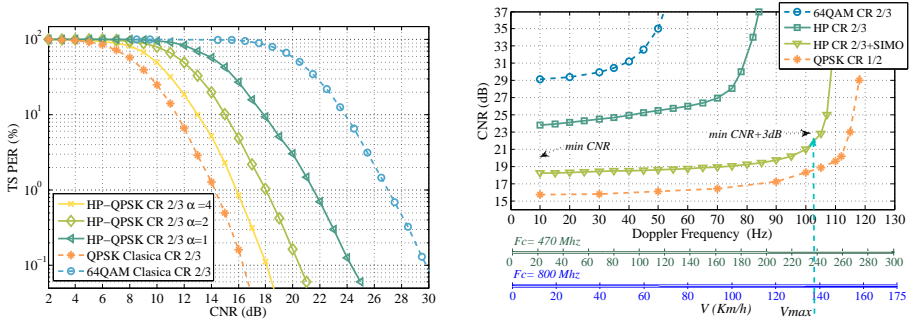


Figura 3.2: Rendimiento del flujo HP de un modo jerárquico 64QAM, FFT 8K, GI 1/4. (Izquierda) configuración SISO para diferentes valores de  $\alpha$  en un canal TU6@30Hz. (Derecha) Rendimiento CNR vs frecuencia Doppler para un flujo HP con  $\alpha=1$  con/sin configuración SIMO. Las líneas punteadas representan como referencia el rendimiento de una QPSK y 64QAM clásicas.

#### Resultados de medidas de laboratorio

Las reducciones en el mínimo nivel de CNR ofrecida por el flujo HP de la modulación jerárquica son mostrada en la gráfica izquierda de la figura 3.2, las cuales han sido evaluadas mediante medidas de laboratorio descritas en el anexo A para un canal TU6 con Doppler 30 Hz y presencia de efecto shadowing ( $\sigma=5.5$  dB y  $d_{corr}=20$  m). En la gráfica se puede observar el rendimiento en recepción móvil del flujo HP utilizando diferentes valores de  $\alpha$  y como referencia el rendimiento de una modulación clásica QPSK y del modo DVB-T no jerárquico utilizado en España. Se puede observar que el modo de referencia no jerárquico requiere alrededor de 29.5 dB de CNR, el cual puede ser reducido hasta en 11 dB<sup>2</sup>, utilizando el flujo HP de la modulación jerárquica y un valor  $\alpha=4$ . En esta configuración de modulación jerárquica, el rendimiento del flujo HP difiere tan solo en 1 dB del rendimiento de una modulación QPSK clásica (modulación no jerárquica).

La ganancia para recepción de DVB-T móvil ofrecida por la modulación jerárquica se obtiene básicamente por la utilización de ordenes de modulación de mayor robustez del flujo HP. Esta ganancia puede ser incrementada utilizando la técnica SIMO con el fin de explotar las ventajas de la diversidad espacial en recepción móvil. Los resultados de SIMO presentados en esta sección corresponden al caso de recepción vehicular con dos antenas copolarizadas con un factor de correlación de  $\rho=0.7$ . La gráfica derecha de la figura 3.2 muestra

<sup>2</sup> Umbral de CNR establecido utilizando un criterio de calidad QoS de Transport Stream Packet Error Rate (TSPER)  $10^{-1}$

## **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

el rendimiento del flujo HP y configuración SIMO en función de la frecuencia Doppler experimentada por el móvil. Con el fin de no degradar el nivel de cobertura del flujo LP, un valor de  $\alpha=1$  ha sido considerado. En gráfica podemos observar una ganancia para el flujo HP de alrededor de 6 dB en la mínima CNR y hasta del 70 % de tolerancia al efecto Doppler cuando se utiliza diversidad de antenas en recepción.

Comparado con el modo de referencia DVB-T no jerárquico, la ganancia es de hasta 11 dB, lo que significa un rendimiento similar al ofrecido por el flujo HP y  $\alpha=4$  sin diversidad de antenas en recepción (de acuerdo a los resultados presentados en la parte izquierda de la figura 3.2). Adicionalmente, El uso combinado de la modulación jerárquica y SIMO aumenta la máxima frecuencia Doppler permitida en un 130% comparada con la máxima permitida por el modo de referencia no jerárquico, siendo posible la decodificación de la señal a velocidades de desplazamiento del receptor entre 140 y 220 km/h dependiendo de la frecuencia central de operación.

### **3.1.4. Movilidad utilizando AL-FEC +SIMO**

La idea principal de AL-FEC en un sistema DVB-T es de incorporar diversidad temporal por medio de códigos FEC en una forma retrocompatible, por lo tanto los flujos de transporte con información de audio y vídeo de cada servicio no pueden ser modificados. La información de paridad FEC ha de ser transmitida sin alterar el correcto funcionamiento de los receptores comerciales DVB-T disponibles actualmente. Los códigos Raptor son especialmente adecuados para la protección AL-FEC en DVB-T. Comparado con los algoritmos RS, los códigos Raptor ofrecen menor complejidad para su decodificación en recepción. Esto permite que la decodificación FEC sea hecha en procesadores de software genérico sin grandes actualizaciones hardware.

El tiempo de entrelazado de AL-FEC en DVB-T, puede ser configurado desde unos pocos milisegundos hasta varios segundos de duración, estando limitado únicamente por los requerimientos de memoria en el receptor y el tiempo de zapping experimentado por el usuario. En este caso, el tiempo de zapping es en promedio 1.5 veces el tiempo del entrelazado temporal, siendo hasta 2 veces este tiempo en el peor de los casos.

### **Resultados de simulaciones**

La ganancia ofrecida por AL-FEC ha sido evaluada mediante simulaciones de un sistema DVB-T en canal TU6. Un módulo adicional de AL-FEC ha sido incluido en transmisión y recepción habilitando diferentes tasas de protección y tiempo de entrelazados temporal del orden de milisegundos hasta varios se-

### 3.1 Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

---

gundos. En el caso de tiempos de entrelazado de varios segundos, se ha incluido la presencia del efecto shadowing ( $\sigma=5.5$  dB y  $d_{corr}=20$  m) en la señal recibida asumiendo que un usuario se mueve a velocidad constante a través de una ruta con distribución log-normal de valores de CNR. Los resultados de SIMO presentados corresponden al caso de recepción en vehículos con dos antenas co-polarizadas. Los canales entre el transmisor y cada antena receptora han sido modelados con TU6 correlacionados con un  $\rho=0.7$ .

La figura 3.3 presenta el rendimiento de un modo DVB-T con 8K de FFT, 16QAM y CR 1/2 incorporando protección AL-FEC y SIMO. La gráfica de la izquierda representa la ganancia utilizando tiempos de entrelazado en AL-FEC menores a 1 segundo, analizando principalmente el rendimiento en entornos con fast fading. La gráfica de la derecha, tiempos de entrelazado de hasta 10 segundos han sido evaluados, para una señal recibida con presencia de fast fading y shadowing. En ambos casos la tasa de codificación de AL-FEC seleccionada ha sido 1/2, lo cual corresponde a un sistema con eficiencia espectral total de 1 bit por subportadora, similar a un modo clásico QPSK CR 1/2 (el modo más robusto de DVB-T y apropiado para recepción en movilidad). De acuerdo a los resultados, las ganancias ofrecidas por utilizar cada técnica individualmente son de 6 dB para SIMO y de 5 dB para AL-FEC con tiempos de entrelazado menores a 1 s. La ganancia ofrecida por el uso combinado de AL-FEC y SIMO es de 9 dB aproximadamente, lo que demuestra que la ganancia de utilizar ambas técnicas es menor a la suma de las ganancias individuales. Para el caso de fast fading, tanto SIMO como AL-FEC contrarrestan el efecto de propagación multitrayecto y la utilización de una técnica disminuye el efecto de la otra.

La ganancia de AL-FEC con tiempos de entrelazado de hasta 10 s esta en el rango de 5 a 10 dB dependiendo de la frecuencia Doppler. La ganancia del uso combinado de AL-FEC y SIMO esta en el rango entre 9-14 dB. Mientras SIMO ofrece mayor ganancia que AL-FEC con tiempos de entrelazado menores a 1 s, la utilización de AL-FEC con tiempos de entrelazado de varios segundos es generalmente más efectiva que SIMO. La principal razón es que AL-FEC puede proveer grandes ganancias frente al efecto shadowing en el dominio del tiempo, mientras que múltiples antenas no puede hacerlo tan efectivo en el dominio de separación espacial. la línea negra punteada en las dos gráficas de la figura 3.3, corresponde al rendimiento del modo QPSK 1/2 sin AL-FEC que tiene la misma eficiencia espectral del modo 16QAM 1/2 con AL-FEC 1/2. Para tiempos de entrelazado menores a 1 s, un modo robusto en la capa física ofrece mejor rendimiento que un modo menos robusto con AL-FEC. En contraste, para tiempos de entrelazado de varios segundos, un sistema con AL-FEC requiere menores niveles de CNR para correcta recepción que un modo robusto de DVB-T con protección en la capa física únicamente.

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

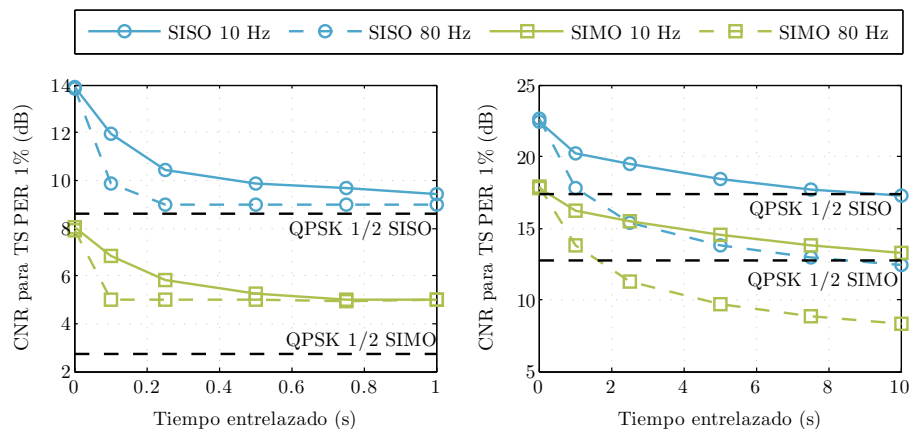


Figura 3.3: Rendimiento de DVB-T con protección AL-FEC y configuración SIMO. En la izquierda, AL-FEC con entrelazados temporales hasta de 1 s en un canal TU6. En la derecha, AL-FEC con entrelazados temporales de hasta 10 s en un canal TU6 con shadowing ( $\sigma=5.5$  dB y  $d_{corr}=20$  m).

#### 3.1.5. Movilidad utilizando modulación jerárquica + AL-FEC + SIMO

Las redes DVB-T son planificadas principalmente para recepción fija utilizando modos de transmisión que maximizan la capacidad de transmisión a consta de una baja robustez de la señal, tales como 64QAM 2/3. El uso combinado de modulación jerárquica con AL-FEC y SIMO permite mantener hasta un 67% de esta capacidad para servicios fijos y simultáneamente ofrecer un flujo orientado a servicios móviles capaz de hacer frente a los efectos propios del canal móvil (fast fading y shadowing) con una robustez incluso más alta que la máxima ofrecida por DVB-T clásico y la posibilidad de ser recibido en condiciones de hasta el doble de velocidad de desplazamiento del usuario. En este caso, la capacidad de transmisión dedicada para servicios móviles depende de las tasas de codificación de capa física y de aplicación, las cuales a su vez establecen el grado de robustez de la señal. Un compromiso adicional entre el tiempo de entrelazado en capa de aplicación, la ganancia por AL-FEC frente al efecto shadowing y los requerimientos de tiempo de zapping y memoria del receptor ha de ser establecido.

### 3.1 Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

---

#### resultados de simulaciones

El rendimiento en recepción móvil de un flujo HP (QPSK 2/3) de modulación jerárquica utilizando SIMO y protegiendo los servicios transmitidos con AL-FEC con diferentes tasas de codificación y tiempos de entrelazado de hasta 15 s es presentado en la figura 3.4. Una señal DVB-T con presencia de fast fading ha sido emulada a través de dos canales TU6 con grado de correlación  $\rho=0.7$ . Una frecuencia Doppler constante de 50 Hz ha sido utilizada, correspondiendo a una velocidad constante de desplazamiento de 115 km/h a frecuencia 470 MHz o de 68 km/h a frecuencia 800 MHz.

De la gráfica podemos comparar el rendimiento del flujo HP utilizando AL-FEC 3/4 y SIMO con el modo clásico QSPK 1/2 (línea punteada), los cuales ofrecen la misma eficiencia espectral de 1 bit por subportadora para servicios móviles. En este caso, el uso de SIMO y tiempos de entrelazado superiores a 12 s son necesarios para obtener el mismo rendimiento del modo clásico QPSK. Sin embargo, la utilización de tasas más altas de codificación en AL-FEC permiten superar el rendimiento de QPSK clásico con tiempos de entrelazado menores, por ejemplo: una tasa de Coding Rate (CR) 1/2 ofrece una ganancia adicional de 1 dB con tan solo 3 s de entrelazado. Esto muestra que AL-FEC en conjunto con la protección de capa física produce una mayor eficiencia que la configuración clásica, con la misma eficiencia espectral. La operación de AL-FEC con largos tiempos de entrelazado permite combatir principalmente el efecto shadowing que la sola capa física de DVB-T no puede contrarrestar. Por lo tanto largos periodos de entrelazado temporal en AL-FEC son importantes para compensar largas pérdidas de la señal DVB-T causadas por la movilidad del receptor. Comparando con los 29.5 dB que requiere el modo 64QAM no jerárquico utilizado en España, se observa una ganancia de hasta 20 dB utilizando entrelazado temporal de 10 s y una tasa de codificación AL-FEC de 1/2.

La ganancia del uso combinado de las tres técnicas también se ve reflejado en la máxima frecuencia Doppler permitida. La figura 3.5 resume el rendimiento general en recepción móvil de una red inicialmente diseñada para recepción fija con modo 64QAM 2/3, FFT 8K y las ganancias en CNR y máxima frecuencia Doppler ofrecidas por el uso individual y combinando de las soluciones técnicas: modulación jerárquica, SIMO y AL-FEC. Una ganancia de 5 dB y un aumento del 70 % aproximadamente en la máxima frecuencia Doppler es ofrecida por la utilización del flujo HP CR 2/3 de la modulación jerárquica, mientras se mantiene aproximadamente el mismo radio de cobertura de los servicios fijos con el flujo LP. El uso combinado de modulación jerárquica y SIMO ofrece una ganancia de 11 dB y un aumento del 138 % en la máxima velocidad de desplazamiento del terminal móvil. Finalmente el uso de AL-FEC con CR 3/4

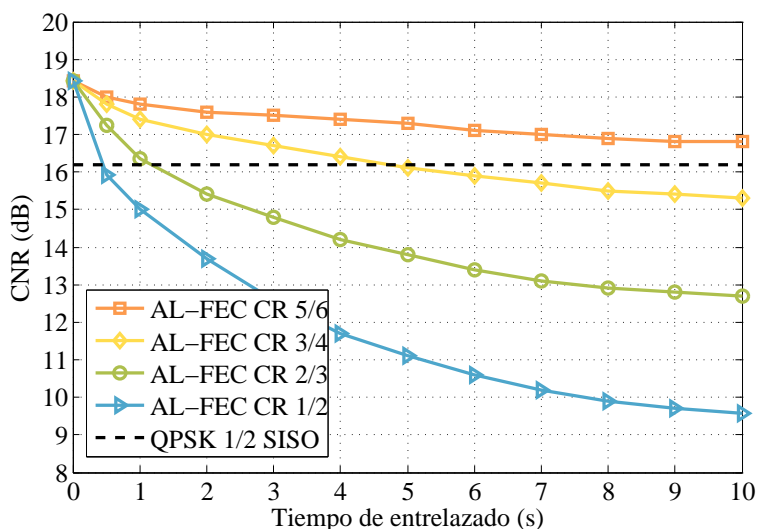


Figura 3.4: Rendimiento de AL-FEC en el flujo HP ( $\alpha=1$ , CR 2/3) de la modulación jerárquica y configuración SIMO en un canal TU6@50Hz con fastfading.

y tiempo de entrelazado 5 s combinado con SIMO y modulación jerárquica ofrece una ganancia en el balance de enlace de 13 dB en un canal TU6, lo que significa la misma eficiencia espectral y un rendimiento prácticamente similar al modo más robusto de DVB-T. Esta ganancia puede llegar a ser hasta de 16 dB en canal TU6 con shadowing ( $\sigma=5.5$  dB y  $d_{corr}=20$  m), o hasta de 25 dB utilizando entrelazado temporal de 10 s y una tasa de codificación AL-FEC de 1/2, a costa de una reducción en la tasa binaria efectiva para servicios móviles y un aumento en el tiempo de zapping.

### 3.1.6. Estimaciones de cobertura DVB-T móvil en escenarios reales

La red comercial DVB-T desplegada en la ciudad de Valencia (España) fue el escenario de evaluación utilizado para las medidas de campo y las estimaciones de cobertura TDT móvil mediante simulaciones dinámicas descritas en el anexo A. El modo DVB-T utilizado en España es 64QAM no jerárquico, CR 2/3, FFT de 8K, Guard Interval (GI) 1/4 y ancho de banda 8 MHz. La estación principal de TDT del operador canal Nou que cubre la ciudad de Valencia está ubicada en el término municipal de Calicanto (Torrent) con coordenadas 39° 25' 44.9' N y 0° 34' 1" W, aproximadamente a 17 km al suroeste de Valencia como se muestra

### 3.1 Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

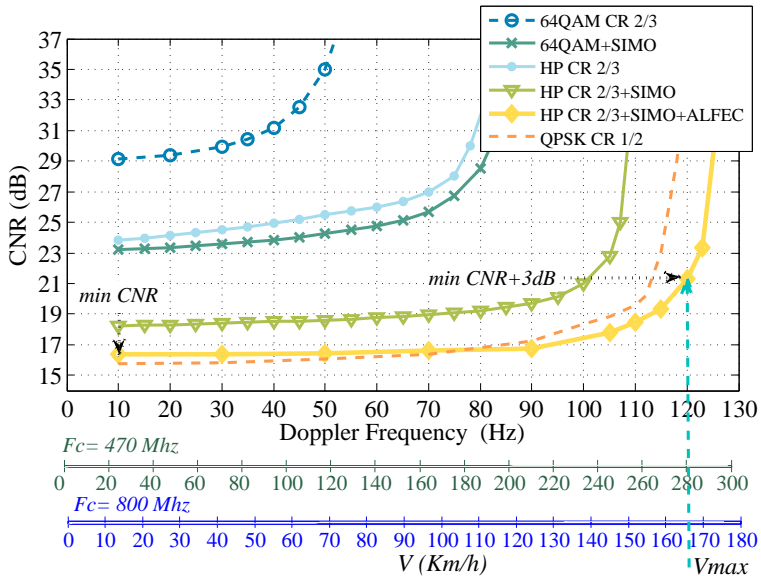


Figura 3.5: Rendimiento de las soluciones SIMO, modulación jerárquica y AL-FEC (CR 3/4 y entrelazado de 5 s) en DVB-T para la provisión simultanea de servicios fijos y móviles en un mismo canal RF.

en la figura 3.6. El emplazamiento está situado en un terreno montañoso a 200 m. sobre el nivel del mar, con una altura de antena 100 m, una potencia de transmisión de 2Kw y una ganancia de array de antenas de 14 dBi, equivalente a una Effective Isotropic Radiated Power (EIRP) de 47 dBw. Adicionalmente, cinco rutas del servicio público de transporte de Valencia (EMT) han sido seleccionadas para evaluar la calidad de servicio de TDT en movilidad, las cuales cubren áreas urbanas y sub-urbanas con avenidas de mediano y gran tamaño en todas las direcciones, como se muestra en la figura 3.6.

#### Medidas de campo en recepción SISO y SIMO

El sistema automatizado de medidas de TDT desarrollado por el instituto iTEAM y utilizado en las campañas de medidas de campo es descrito en el anexo A. Este sistema está conformado básicamente por un receptor profesional de DVB-T Teamcast con opción de recepción a través de una o dos antenas externas. El software del sistema permite el registro y almacenamiento de diferentes parámetros de calidad DVB-T tales como: potencia recibida, Bit Error Rate (BER), Modulation Error Rate (MER) y Transport Error Indica-

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

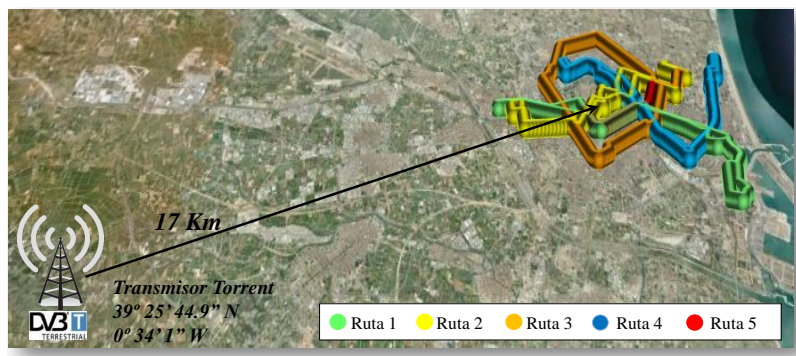


Figura 3.6: Escenario para la estimación de cobertura DVB-T móvil. Red comercial TDT de la ciudad de Valencia-España y cinco rutas de autobuses de la empresa de transporte público (EMT).

tor (TEI), así como el almacenamiento de los paquetes MPEG2-TS de todo el multiplex TDT sintonizado. El procesamiento de estos paquetes TS permite estimar la Quality of Service (QoS) experimentada por los usuarios en los autobuses de la EMT y emular las mejoras obtenidas por la utilización de los mecanismos AL-FEC.

Las medidas de campo se realizaron en condiciones de recepción vehicular en el rango entre 0 y 60 km/h siguiendo las 5 rutas de autobuses seleccionadas y utilizando configuraciones SISO y SIMO. Los datos recogidos corresponden con mediciones de una hora de duración aproximadamente por ruta con las que se evaluará el nivel de cobertura proporcionado por la red comercial para la recepción móvil. Asimismo, las medidas se utilizaron para la calibración de los modelos de propagación utilizados en posteriores simulaciones, como se detalla en el anexo A. El canal sintonizado fue el 58 de UHF (frecuencia central de 770 MHz) para la cual la separación mínima entre antenas ( $d$ ) en el caso de SIMO para conseguir la mínima correlación entre señales está dada por [58]:

$$d = 0,38\lambda = 0,38\frac{C}{F} = 0,38\frac{3 * 10^8 \text{ m/s}}{770 * 10^6 \text{ Hz}} = 14,8\text{cm} \quad (3.1)$$

donde  $\lambda$  es la longitud de onda,  $C$  representa la velocidad de la luz y  $F$  simboliza la frecuencia central del canal.

La tabla 3.2 muestra los niveles de cobertura obtenidos en las medidas de campo para cada una de las rutas de autobuses seleccionadas utilizando diferentes criterios de QoS en condiciones de recepción SISO y SIMO. Se puede observar que el criterio de calidad Errorred Second Ratio of 5% in intervals of 20 seconds (ESR5(20)) es el más restrictivo, pero a su vez el más realista



### 3.1 Servicios TDT a terminales fijos y móviles utilizando un mismo canal RF

Tabla 3.2: Porcentaje de cobertura de DVB-T móvil registrado durante las medidas de campo. Diferentes criterios de calidad QoS han sido usada para configuraciones SISO y SIMO.

Ruta	TSPER 1 %		ESR		ESR5(20)	
	SISO	SIMO	SISO	SIMO	SISO	SIMO
Ruta 1	64.4	83.6	63.6	82.7	37.9	61.7
Ruta 2	69.2	84.1	68.3	82.5	41.9	61.3
Ruta 3	58.5	80.3	58.7	81.0	36.5	52.3
Ruta 4	47.7	69.6	47.1	67.6	19.6	34.1
Ruta 5	48.3	71.9	48.4	70.4	10.2	31.7
<i>Promedio</i>	57.6 %	77.9 %	57.2 %	76.9 %	29.2 %	48.2 %

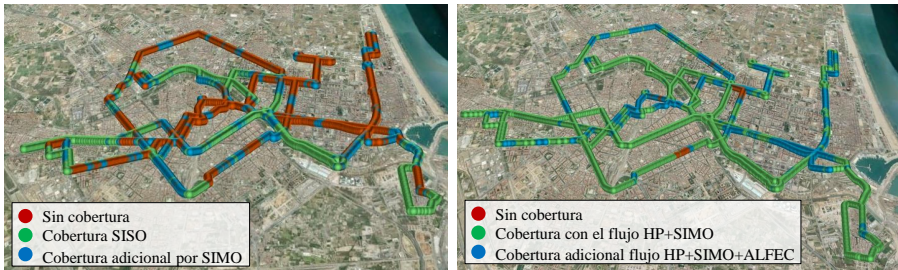


Figura 3.7: Cobertura DVB-T móvil utilizando diferentes soluciones técnicas. En la izquierda, medidas de campo utilizando configuraciones SISO y SIMO. En la derecha, huellas de cobertura de simulaciones dinámicas utilizando SIMO, modulación jerárquica y AL-FEC.

debido a que tiene en cuenta no solo la cantidad de errores registrados en las medidas sino también su distribución temporal y espacial. Tomando como referencia este criterio de calidad, la gráfica izquierda de la figura 3.7 muestra las huellas de cobertura de TDT móvil de las 5 rutas de autobuses medidas. En recepción SISO se obtiene un porcentaje global de cobertura del 29%, el cual puede aumentar hasta un 48% en el caso de utilizar SIMO. Las principales áreas sin cobertura aun utilizando SIMO son la zona centro la ciudad donde hay gran concentración de edificios de mediana altura y las zonas más alejas del transmisor.

#### resultados de simulaciones Dinámicas

Las simulaciones dinámicas desarrolladas en esta investigación y detalladas en el anexo A, permiten emular y estimar el nivel de cobertura de servicios

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

de TV digital en recepción móvil. El modelo de propagación y el modelo de rendimiento del simulador dinámico han sido calibrados a partir de las medidas de campo. Se ha simulado la recepción de TDT en movilidad a través de las mismas 5 rutas de autobuses seleccionadas en las medidas de campo. En primer lugar se realizó una estimación de cobertura utilizando topologías SISO y SIMO, para las cuales se obtuvo un nivel de 29 % y 50 %, respectivamente. Estos valores se aproximan bastante bien a los registrados en promedio en las medidas de campo.

En segundo lugar, se emuló el rendimiento de la red TDT comercial en Valencia utilizando modulación jerárquica combinada con diversidad de antenas en recepción SIMO. Un factor de  $\alpha = 1$  ha sido seleccionado para la modulación jerárquica y tanto el flujo LP como el HP han sido protegidos con un CR 2/3. Bajo estas condiciones, el porcentaje de cobertura móvil en las 5 rutas de autobuses fue del 75.3 %. La gráfica derecha de la figura 3.7 muestra las huellas de cobertura utilizando esta combinación de modulación jerárquica y SIMO. Se puede observar que las zonas sin cobertura siguen siendo el centro de la ciudad y la zona noreste, la cual corresponde al lado opuesto del transmisor. La cobertura para recepción fija (flujo LP) sufre una pequeña penalización debida a un leve aumento en la CNR mínima requerida (1 dB de acuerdo a el rendimiento presentado en [1] para canal Rice F1) para recepción cuando se utiliza este tipo de modulación. Estimaciones de cobertura en recepción fija con antena en tejados siguiendo la metodología descrita en el anexo A, muestra que esta penalización es del 0.2 % de la población. De acuerdo con estos resultados, la restricción más significativa para los servicios en recepción fija es la reducción del 33 % de la capacidad de transmisión que sera dedicada a la provisión de servicios de TDT móvil.

Finalmente, hemos estimado el aumento en el nivel de cobertura TDT móvil ofrecido por la combinación de las tres soluciones técnicas: AL-FEC, modulación jerárquica y SIMO. El principal aporte de AL-FEC es la protección de la señal DVB-T frente al efecto shadowing con largas duraciones de entrelazado temporal. Por lo tanto, AL-FEC es eficaz en zonas con cobertura parcial, donde los usuarios se mueven entre zonas con cobertura y zonas sin cobertura. La gráfica derecha de la figura 3.7 también muestra las zonas de cobertura adicional ofrecida por la utilización de AL-FEC (CR 3/4 y periodo de protección 8 s) en un sistema DVB-T con modulación jerárquica y configuración SIMO. Con la utilización de estas tres soluciones técnicas en la red comercial TDT de Valencia se obtiene una cobertura móvil en la 5 rutas de autobuses del 95 %. A mayor tiempo de protección y/o tasa de codificación de AL-FEC, mayor cantidad de paquetes erróneos de las zonas sin cobertura pueden ser recuperados, y por tanto mayor será el porcentaje de cobertura TDT móvil. Sin embargo, como se explico en la sección 2.3.1, es necesario establecer un compromiso entre estos

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

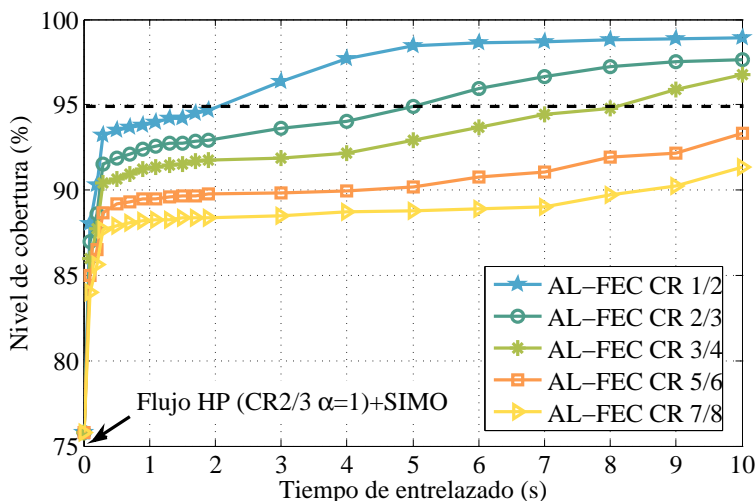


Figura 3.8: Cobertura DVB-T móvil en la ciudad de Valencia en función del tiempo de entrelazado temporal y diferentes CR de AL-FEC. Criterio d calidad ESR5(20). 29% y 50% de cobertura con el modo actualmente utilizando en España y configuración SISO y SIMO, respectivamente. 64% de cobertura con el flujo HP CR 2/3,  $\alpha=1$ .

dos parámetros de configuración de AL-FEC y la capacidad de transmisión, la latencia y el máximo tiempo de zapping deseado para el usuario.

La figura 3.8 resume los porcentajes de cobertura TDT móvil para las 5 rutas de autobuses en Valencia en función de la tasa de codificación y el tiempo de protección AL-FEC combinado con la modulación jerárquica y SIMO. Podemos observar que un porcentaje de cobertura del 95% puede ser logrado con un CR muy alto (1/2) y un corto tiempo de protección (2 s) a costa de una reducción en la tasa efectiva de transmisión disponible para los servicios móviles. Igualmente, este porcentaje de cobertura puede ser logrado con un CR 3/4 pero aumentando el tiempo de protección hasta unos 8 s aproximadamente.

### 3.2. Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

Generalmente, la inserción de contenidos locales en redes SFN requiere la división de la red en SFNs regionales con diferentes frecuencias entre si. Esta solución se convierte en un esquema híbrido MFN entre redes SFN que conlleva un mayor uso de recursos radioeléctricos. Alternativamente es posible emitir

## **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

servicios locales en una red SFN reemplazado un contenido nacional del multiplex por un contenido local para ser emitido a través de toda la red SFN, incluso en las regiones donde no es de interés. Este enfoque es válido para la inserción de pocos servicios locales, pero resulta poco eficiente en el uso de la capacidad de transmisión total del sistema a medida que aumenta la necesidad de servicios locales en la red. En esta sección se evalúan dos soluciones técnicas compatibles con DVB-T y los receptores comerciales disponibles para la inserción de contenidos locales en redes SFN optimizando el uso del espectro radioeléctrico: modulación jerárquica y técnicas de time slicing.

### **3.2.1. Inserción de servicios locales en redes SFN utilizando modulación jerárquica**

La modulación jerárquica no establece ninguna limitación en cuanto a que tipos de datos son transmitidos por cada uno de los flujos, de hecho la información transportada en cada flujo no tiene por qué estar relacionada. Por lo tanto, es posible transmitir contenidos globales y locales mediante la modulación jerárquica, utilizando el flujo HP para los contenidos globales debido a que ellos requieren mayor cobertura, y el flujo LP para los contenidos locales. En DVB-T, el flujo HP siempre es modulado en QPSK y posteriormente sobremodulado por el flujo LP obteniendo un símbolo de orden superior, por ejemplo pasa de una QPSK (contenido global solamente) a una 16QAM (global + local) o a una 64QAM (global + local). En estos casos, la modulación jerárquica proporciona 2 o 4 bits adicionales por símbolo para servicios locales, respectivamente.

La figura 3.9 ilustra de forma general el área de cobertura de los servicios globales y locales utilizando la modulación jerárquica. Los servicios globales mantienen todas las ventajas de la topología SFN, incluyendo el aumento en cobertura por el efecto conocido como ganancia SFN. La gráfica izquierda de la figura representa el caso donde todos los transmisores dentro de las SFN insertan contenidos locales, para el cual, el área de cobertura de cada LSA está limitado por la robustez del flujo LP y el nivel de interferencia generado por las LSA adyacentes.

En la parte derecha de la gráfica se presenta el caso donde un transmisor dentro de la SFN no desea insertar contenido local, en el cual dicho transmisor debe emitir los contenidos globales en el mismo esquema de modulación (QPSK) y tasa de codificación utilizado por el flujo HP de los transmisores que si lo emite. Particularmente, en este caso se pueden distinguir 3 zonas de cobertura diferentes (A, B y C). Un receptor situado en la zona A puede decodificar solo los contenidos globales, porque la señal recibida es básicamente una constelación QPSK. En la zona B es posible recibir los contenidos globales

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

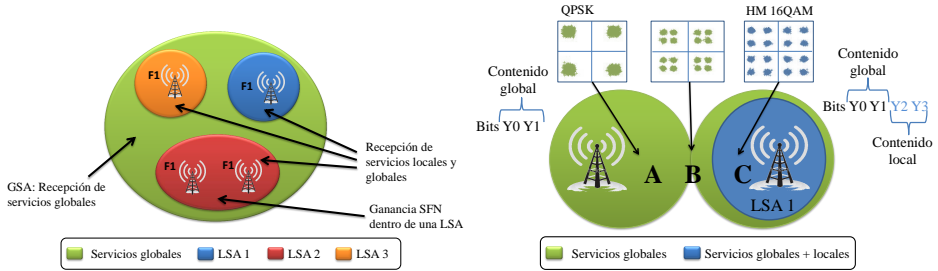


Figura 3.9: Área de cobertura para servicios globales y locales en una red SFN. En la izquierda, todos los transmisores utilizando la técnica de modulación jerárquica o time slicing. En la derecha, caso particular para la modulación jerárquica en el cual un transmisor no inserta contenidos locales.

a través de la combinación de las señales transmitidas por ambos transmisores (ganancia SFN). Por último un receptor situado en la zona C será capaz de recibir tanto los contenidos globales como locales dada la cercanía al transmisor jerárquico.

Es importante resaltar que en la inserción de servicios locales utilizando modulación jerárquica, la tasa binaria dedicada a los servicios globales puede llegar a ser menor que la dedicada a los servicios locales, debido a que el flujo HP utiliza siempre una modulación QPSK. Una primera solución para compensar este efecto es utilizar tasas de codificación bajas a costa de una reducción en la robustez del flujo HP. En determinados casos esta reducción en la robustez no es inconveniente dado el amplio rango de cobertura que puede ser alcanzado por una modulación QPSK.

#### Aspectos de implementación

La señalización Transmission Parameter Signaling (TPS), entre otros parámetros de configuración, indica al receptor si la transmisión ha sido en modo jerárquico o no. Cuando un transmisor inserta contenidos locales utilizando la modulación jerárquica y uno adyacente no lo hace, las respectivas señalizaciones serán diferentes y por tanto interferirán entre sí. Para solucionar este efecto y garantizar la decodificación de los contenidos globales y locales en sus respectivas áreas de interés, es necesario señalar que todos los transmisores están emitiendo en modo jerárquico, incluyendo aquellos que en realidad no lo están haciendo. Teniendo en cuenta que el orden de modulación y tasa de codificación del transmisor no jerárquico son los mismos que los utilizados en el flujo HP del transmisor jerárquico, este cambio en la señalización TPS no afecta la correcta recepción del contenido global en aquellas zonas donde no se

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

emiten contenidos locales.

Por otra parte, las tablas Program Specific Information/ Service Information (PSI/SI) tienen la función de indicar al receptor los contenidos o servicios multimedia transportados en el multiplex y como acceder a ellos en el momento en que el usuario lo solicite [67]. Con el fin de evitar interferencias entre tablas PSI/SI en una red SFN con diferentes LSA, es necesario que todos los transmisores de la red emitan la misma información dentro de sus respectivas tablas PSI/SI, incluyendo señalización de los contenidos locales de otras LSA. De esta forma, las señales provenientes de diferentes LSA se combinan coherentemente en recepción en el momento en que están emitiendo las tablas PSI/SI y el receptor podrá identificar todos los contenidos globales y locales que se emiten en la red SFN. A pesar de que el receptor identifique diferentes servicios locales en las tablas PSI/SI, éste solo podrá decodificar aquellos servicios emitidos en el flujo LP en su respectiva zona de cobertura.

#### **3.2.2. Inserción de servicios locales en redes SFN utilizando Time Slicing**

La transmisión de servicios locales en una red SFN DVB-T utilizando la técnica del time slicing requiere definir dos periodos de tiempo, uno dedicado a la transmisión de contenidos globales, y el otro a contenidos locales. La Figura 3.10 muestra la distribución temporal de los servicios en una transmisión que utiliza time slicing. Estos periodos de tiempo son definidos en la capa de aplicación donde todos los servicios son encapsulados y multiplexados para formar el flujo TS-MPEG2.

La duración de cada slot de tiempo es totalmente flexible y tan solo depende de las características de memoria del receptor. A su vez, esta duración determina la capacidad de transmisión dedicada a cada tipo de servicios. En cada periodo de tiempo, el flujo de datos del respectivo servicio es enviado en modo ráfaga con una tasa de bits instantánea más alta que la utilizada normalmente en la transmisión sin time slicing. Esta ráfaga de información es almacenada en recepción y reproducida a una tasa de bits menor para mantener la continuidad del servicio en los periodos de tiempo donde no se recibe datos del respectivo servicio.

Durante el periodo de tiempo dedicado a servicios globales, todos los transmisores de la red transmiten los mismos contenidos, conservando los beneficios de la topología SFN. Durante el periodo de tiempo de los servicios locales, cada transmisor emite el contenido local de su respectiva LSA y su radio de cobertura estará limitado por el nivel de interferencia generado por las LSAs adyacentes y por el grado de robustez del modo de transmisión DVB-T utilizado. En este caso, las áreas de cobertura también están representadas en forma general por

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

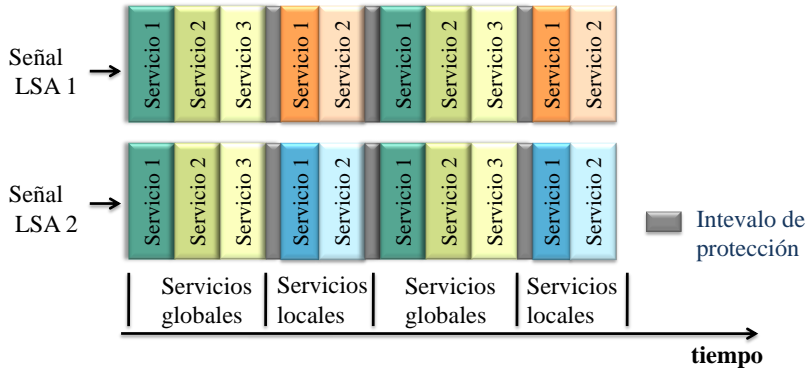


Figura 3.10: Concepto general de la inserción de contenidos locales en redes SFN DVB-T utilizando la técnica de time slicing.

la gráfica izquierda de la figura 3.9. Un usuario localizado cerca al transmisor podrá decodificar servicios globales y locales todo el tiempo. Por el contrario, si el receptor está ubicado lejos del transmisor, éste decodificará solo los servicios globales, los servicios locales sufrirán interferencia de otros transmisores que no pertenecen a la LSA.

#### Aspectos de implementación

En DVB-T cada símbolo OFDM transmite un cierto número de bits de acuerdo al esquema de modulación seleccionado. Si los datos de los servicios globales y locales son enviados en un mismo símbolo OFDM, éste símbolo puede variar entre LSAs. Entonces esto podría afectar la recepción no solo de los contenidos locales sino también de los globales. La solución es insertar periodo de protección entre los dos tipos de servicios, como se muestra en la figura 3.10, los cuales están formados por paquetes TS nulos. De acuerdo a los resultados de simulaciones y medidas de laboratorio desarrolladas en esta investigación, la duración de este periodo de protección debe ser como mínimo de 11 paquetes TS para cualquier modo de transmisión DVB-T seleccionado<sup>3</sup>. Este valor es establecido únicamente por el entrelazador externo de DVB-T, el cual mezcla los bytes de hasta 11 paquetes TS consecutivos. El entrelazador interno de DVB-T tan solo mezcla  $v \cdot 126$  bits, donde  $v$  es el número de bits que conforman cada símbolo de la constelación (ej., 2 para QPSK, 4 para

<sup>3</sup>Al contrario de como se afirma en [48], donde la duración de este periodo de protección depende del modo DVB-H seleccionado y de diferentes parámetros de la etapa de codificación de la señal

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

16QAM o 6 para 64QAM), y por tanto este entrelazado no alcanza a combinar información de los servicios locales y locales cuando se utiliza un periodo de protección de 11 paquetes TS.

Al igual que en la inserción de servicios locales utilizando modulación jerárquica, en la inserción de contenidos locales con técnicas de time slicing es necesario que las tablas PSI/SI emitidas desde todos los transmisores de la SFN sean idénticas. Esto con el fin de evitar distorsiones en la decodificación de las tablas PSI/SI cuando se recibe la señal DVB-T de dos o más LSA.

Cuando una ráfaga de información es recibida utilizando la técnica de time slicing, un receptor DVB-T debe almacenar los datos en su memoria interna para luego ser reproducida a una tasa de bits menor. Considerando que un programa de HDTV requiere 8 Mbps y uno de SDTV alrededor de 4 Mbps en MPEG-4 y asumiendo slots de tiempo de 500 ms tanto para servicios locales como globales, un receptor necesitará 4 Mbits de memoria como mínimo para garantizar una reproducción continua. Hoy en día, la memoria flash incorporada en los receptores no es un problema para los fabricantes y la gran mayoría de receptores incorporan buffers de tamaño superior a 2 MBytes. En este sentido, slots de tiempo de hasta 2 s para HDTV y 4 s para SDTV pueden ser seleccionados para la técnica de time slicing sin afectar la continuidad o calidad de servicio experimentada por el usuario. Sin embargo, es importante recordar el compromiso existente entre la duración del slot de tiempo y el tiempo de zapping. Las medidas de laboratorio desarrolladas en esta investigación para 5 diferentes receptores DVB-T comerciales muestran que no existen problemas de desbordamiento de memoria o pérdida de la continuidad del servicio para slots de tiempo inferiores a 2 segundos.

#### **3.2.3. Resultados medidas de laboratorio**

Las medidas de laboratorio presentadas en esta sección han sido obtenidas siguiendo la metodología descrita en el Anexo A, emulando el funcionamiento de dos transmisores SFN adyacentes que utilizan cada una de las técnicas propuestas para la inserción de contenidos locales: modulación jerárquica y time slicing. El rendimiento de los servicios globales y locales ha sido evaluado en términos de la mínima CNR requerida para correcta recepción en función de la diferencia de potencia existente entre los dos transmisores (representado diferentes posiciones del receptor dentro de la red SFN). La potencia total de transmisión usada en la red ha sido normalizada a 1 en todas las mediciones. Los resultados obtenidos pueden ser extendidos a más de dos transmisores considerando las señales de las otras LSAs como útiles o interferencias según el tipo de servicio a evaluar.

En las medidas de laboratorio se ha configurado dos canales Rice F1, Ray-



### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

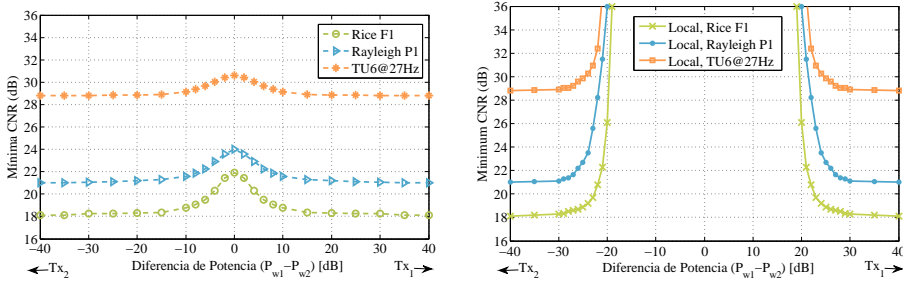


Figura 3.11: Rendimiento de los servicios globales (izquierda) y locales (derecha) utilizando la técnica de time slicing en función de la diferencia de potencia entre transmisores (PI) para diferentes modelos de canal. Modo de transmisión 64QAM, CR 2/3, FFT 8K, GI 1/4.

leigh P1 [1] o TU6 [68] incorrelados con un retardo relativo de 0.9 veces el intervalo de guarda del sistema emulando el efecto de ruptura del principio de la SFN, el cual corresponde al caso más restrictivo de combinación de señales SFN. Para el canal TU6 se utilizó una frecuencia Doppler de 27 Hz, la cual corresponde a 60 km/h para una frecuencia de operación de 500 MHz.

#### Rendimiento de los servicios globales utilizando time slicing

La gráfica de la izquierda en la figura 3.11 muestra el mínimo nivel de CNR requerido para correcta recepción de los slots con servicios globales en función de la diferencia de potencia (Power Imbalance, PI) entre los transmisores SFN adyacentes. De la gráfica podemos observar que el mínimo nivel de CNR para cualquier modelo de canal (Rice F1, Rayleigh P1 o TU6) se establece en las cercanías de los transmisores donde la influencia de otro transmisor es prácticamente despreciable. Este umbral de CNR sufre un aumento hasta de 4 dB en función del tipo de canal, el valor del PI y el tiempo de retardo relativo entre señales. La mayor penalización se presenta cuando el receptor se encuentra ubicado en el centro del área de cobertura con tiempos de retardo relativos cercanos al intervalo de guarda del sistema y niveles de potencia recibida muy similares (PI alrededor de 0 dB). De la gráfica también podemos observar que esta penalización es menor en el modelo de canal TU6 donde la diversidad temporal entre canales reduce la probabilidad de sufrir fuertes desvanecimientos de la señal en un mismo instante de tiempo.

Es importante resaltar que este rendimiento en términos de CNR será el mismo para la solución técnica simulcast que también opera en configuración SFN, lo que significa una misma cobertura para los servicios globales con cualquiera de estas dos soluciones técnicas de inserción de contenidos locales.

## CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

---

### Rendimiento de los servicios locales utilizando time slicing

Durante los instantes de tiempo dedicados a servicios locales, cada grupo de transmisores que forman la LSA emiten su propio contenido local/regional en el área de interés, siendo señales totalmente interferentes para las otras LSA. El mínimo nivel de CNR requerido para correcta decodificación del servicio local depende del modelo de canal de propagación y del nivel de señal recibida de los transmisores de las LSA adyacentes como se muestra en la gráfica derecha de la figura 3.11. En este caso en particular, podemos observar que la decodificación del servicio local solo es posible en zonas donde la diferencia en potencia entre transmisores (PI) es superior a 20 dB y adicionalmente se tienen altos niveles de CNR.

Igualmente podemos observar que el mínimo nivel de CNR requerido desciende exponencialmente a medida que aumenta la diferencia en potencia entre los transmisores, llegando a un valor casi constante (umbral de CNR para un clásico rendimiento del modo de transmisión sin interferencias) para valores de PI superiores a 30 dB. Estos altos niveles de PI generalmente corresponden a las zonas cercanas del transmisor donde la influencia de los transmisores de otras LSA es prácticamente despreciable. Para propósitos de planificación, el máximo nivel de PI permitido para un sistema TDT es conocido como el *margen de protección* entre señales cocanal y corresponde con el valor de PI que requiere 3 dB más del mínimo nivel de CNR requerido en ausencia de interferencias.

### Rendimiento de los servicios globales utilizando modulación jerárquica

Los contenidos globales son comunes para todos los transmisores de la red SFN y son emitidos sobre el flujo HP cuando se habilita la inserción de contenidos locales o en una modulación QPSK clásica, con los mismos parámetros de configuración del flujo HP, cuando no se desea transmitir contenido local. En este sentido, la figura 3.12 muestra dos casos de rendimiento de los contenidos globales en una red SFN con diferentes LSA: cuando se combinan los flujos HP de dos señales provenientes de LSA adyacentes ( $Tx_1$  y  $Tx_2$ ) o cuando se combina una señal con flujo HP proveniente del  $Tx_1$  y otra señal en modulación QPSK convencional proveniente del  $Tx_2$ . Como referencia se incluye también en la figura el rendimiento de una modulación clásica 64QAM CR 2/3, el cual corresponde al caso en que se emiten los contenidos locales y globales de forma simulcast sobre una modulación no jerárquica (con el mismo orden total de constelación de la modulación jerárquica).

Para el caso en que los dos transmisores insertan contenidos locales y comparando con el caso de referencia (64QAM CR 2/3 no jerárquica), los servicios globales emitidos sobre el flujo HP tienen una reducción en la mínima CNR

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

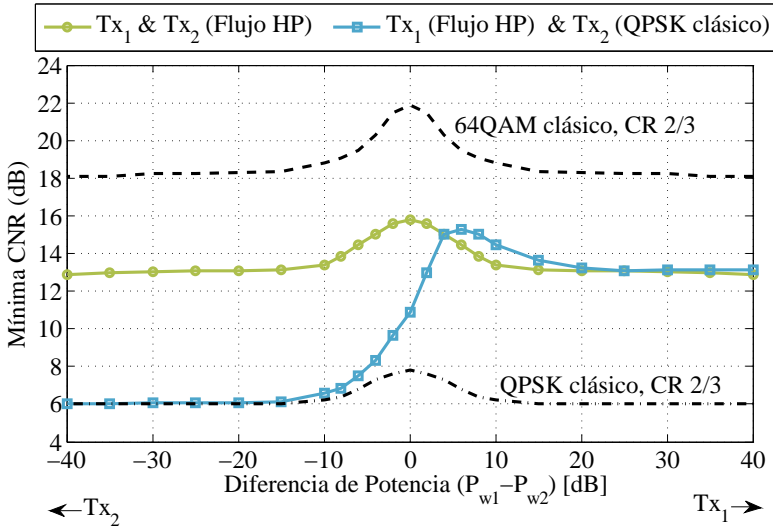


Figura 3.12: Rendimiento de los servicios globales utilizando la técnica de modulación jerárquica en un modelo de canal Rice F1. Modo de transmisión HM-64QAM,  $\alpha=1$ , CR 2/3 para el flujo LP y HP, FFT 8K, GI 1/4.

de alrededor de 5 dB (en las cercanías de los transmisores o valores de  $|PI| > 10$  dB) debida principalmente a la reducción del orden de modulación de 64QAM a QPSK. Esta ganancia en CNR puede significar un aumento del área de cobertura a costa de una significativa reducción en la tasa binaria máxima disponible para este tipo de servicios. La tasa de codificación del flujo HP puede ser un parámetro de ajuste para establecer un compromiso entre el radio de cobertura y la máxima tasa binaria disponible deseado para estos servicios.

En zonas con equiparables valores de potencia de las dos señales recibidas ( $|PI| < 10$  dB) se observa un aumento del mínimo nivel de CNR generado principalmente por los desvanecimientos profundos en el dominio de la frecuencia de la señal resultante y por los retardos relativos entre las señales. Este aumento en CNR puede estar entre 2 y 4 dB cuando el receptor se encuentra ubicado en el centro del área de cobertura con tiempos de retardo relativos cercanos al intervalo de guarda del sistema y niveles de potencia recibida muy similares (PI alrededor de 0 dB).

Para el caso en que se combina el flujo HP con el flujo QPSK clásico podemos observar una diferencia en CNR de 7 dB entre las zonas cercanas al transmisor jerárquico y el transmisor no jerárquico. Esta penalización del flujo HP comparado con una modulación QPSK clásica es generada por el desplaza-

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

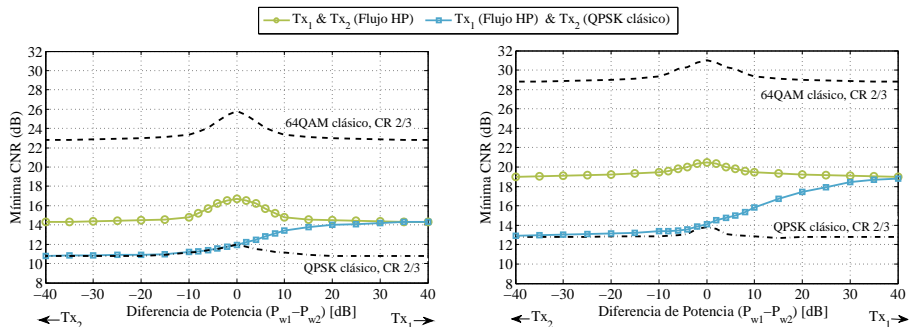


Figura 3.13: Rendimiento de los servicios globales utilizando la técnica de modulación jerárquica en un modelo de canal Rayleigh P1 (Izquierda) y TU6@27Hz (Derecha). Modo de transmisión HM-64QAM,  $\alpha=1$ , CR 2/3 para el flujo LP y HP, FFT 8K, GI 1/4.

miento del símbolo de la constelación introducida por la sobremodulación del flujo LP, como se explica en la sección 2.1.1. A medida que aumenta la influencia de la señal jerárquica sobre la señal QPSK clásica, se observa un aumento del mínimo nivel de CNR alcanzado un rendimiento muy similar al del flujo HP, básicamente a partir de valores de PI superiores a 20 dB. El parámetro  $\alpha$  de la modulación jerárquica permite ajustar la penalización al flujo HP. Para altos valores de  $\alpha$ , la degradación del flujo HP es prácticamente despreciable a costa de una alta reducción en la robustez del flujo LP. Finalmente, la figura 3.13 muestra el rendimiento de los contenidos globales utilizando modelos de canal Rayleigh P1 y TU6@27Hz.

#### Rendimiento de los servicios locales utilizando modulación jerárquica

En la gráfica 3.14 se presentan dos casos particulares de rendimiento del flujo LP dependiendo de la inserción o no de servicios locales en las LSA adyacentes. Para el caso en que dos LSA emiten contenidos locales transmitiendo en modulación jerárquica (rendimiento en líneas continuas), podemos observar que la decodificación del servicio local solo es posible en zonas donde la diferencia en potencia entre transmisores (PI) es superior a 12 dB en recepción fija (canal Rice F1) o de 15 dB en caso de recepción móvil (canal TU6). Lo que significa que la cobertura de cada LSA se concentra en los alrededores de cada transmisor, donde es baja la influencia de los transmisores de LSA adyacentes. El mínimo nivel de CNR requerido desciende exponencialmente a medida que aumenta la diferencia en potencia entre los transmisores, llegando a un valor casi constante para valores de PI superiores a 30 dB. Este valor constante de CNR representa el umbral de CNR para un clásico rendimiento

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

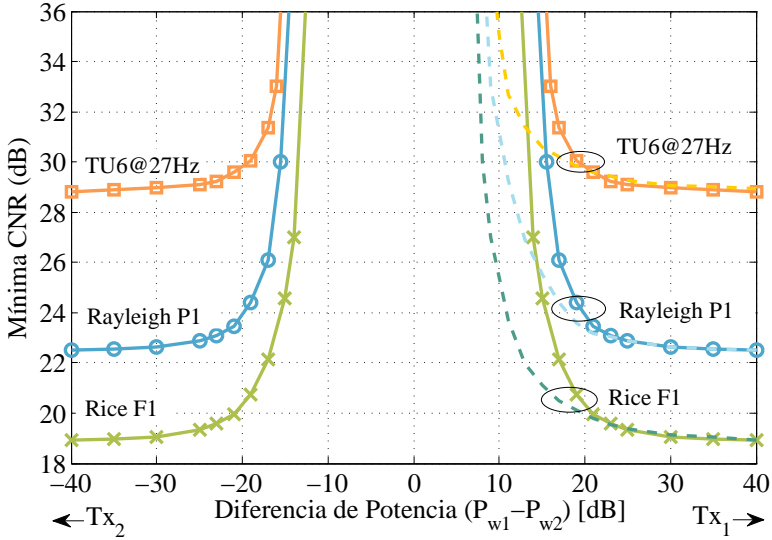


Figura 3.14: Rendimiento de los servicios locales utilizando la técnica de modulación jerárquica. Las líneas continuas representan el rendimiento de los dos transmisores ( $Tx_1$  y  $Tx_2$ ) insertando contenidos locales. Las líneas punteadas representan el rendimiento de solo el transmisor  $Tx_1$  insertando contenidos locales. Modo de transmisión HM-64QAM,  $\alpha=1$ , CR  $2/3$  para el flujo LP y HP, FFT 8K, GI  $1/4$ .

de la modulación jerárquica sin contribuciones/interferencias de transmisores SFN adyacentes.

Para el caso en que los transmisores adyacentes a la LSA no insertan contenido local, estos emitirán únicamente el contenido global en el mismo esquema de modulación y tasa de codificación del flujo HP. En estas condiciones, el grado de interferencia generado al flujo LP en la LSA es menor comparado con el caso en que todas las LSA realizan inserción de contenido local. De acuerdo a los resultados presentados en la gráfica (rendimiento en líneas punteadas), este menor grado de interferencia permite una correcta decodificación del flujo LP con aproximadamente 4 dB menos de diferencia en potencia entre transmisores (PI) comparado con el caso en que ambas LSA emiten contenido local (línea continua). Obviamente, en las zonas con alta influencia de la señal del transmisor sin inserción de contenido local no es posible decodificar ningún contenido local y tan solo se decodificará el contenido global.

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

#### **3.2.4. Estimaciones de cobertura en un escenario real**

El diseño de red TDT del operador público RTVC de Colombia y la respectiva cartografía digital de terreno ha sido el escenario utilizado para la estimación de cobertura de los servicios globales y locales en redes DVB-T. En su primera fase, esta red constará de 14 estaciones de alta potencia distribuidas a lo largo de todo el territorio nacional con el objetivo de conseguir un 50 % de cobertura poblacional para los servicios nacionales utilizando una topología MFN de dos frecuencias (482 MHz y 524 MHz). A su vez, estas estaciones serán utilizadas para emitir los contenidos de los canales regionales utilizando una frecuencia adicional en las respectivas áreas de interés (frecuencia en el rango de los canales 18 a 24 pendientes de asignación a la fecha de redacción de este documento). La información detallada del diseño de red ha sido tomada de [69] y se describe junto con las características de la cartografía utilizada en el anexo A de este documento.

En esta sección se presenta en primer lugar una planificación de frecuencias para los seis canales regionales utilizando topologías MFN y SFN e identificando el número mínimo de frecuencias requeridas para evitar interferencias entre canales y maximizar su cobertura. En esta planificación inicial, los contenidos nacionales son emitidos en frecuencias distintas a las asignadas para los canales regionales. En segundo lugar se presentan de forma comparativa las estimaciones de cobertura de la solución convencional simulcast y de las soluciones técnicas para DVB-T evaluadas en esta investigación para la provisión simultánea de servicios nacionales y locales utilizando una única frecuencia. Los parámetros de configuración del modo de transmisión DVB-T utilizado para todas las estimaciones de cobertura presentadas en esta sección es resumido en la tabla 3.3.

#### **Plan de frecuencias y estimaciones de cobertura de los canales locales/regionales**

En el actual plan nacional de frecuencias, a los canales regionales les ha sido reservada una banda de frecuencia para su transición a televisión digital y será administrada por el operador nacional RTVC. Inicialmente esta frecuencia será dedicada únicamente para la emisión de contenidos locales/regionales. Como punto de partida de esta investigación hemos evaluado diferentes planes de asignación de frecuencias en función de la cantidad de bandas disponibles para los canales regionales. En concreto se han evaluado asignaciones a partir de 2 frecuencias que corresponde al número mínimo de frecuencias requeridas en una topología MFN y hasta 6 frecuencias que corresponde con la asignación de una frecuencia independiente para cada canal regional (representa el número máximo de frecuencias requeridas). La tabla 3.4 resume la asignación de fre-

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

Tabla 3.3: Parámetros de configuración de DVB-T2 para las estimaciones de cobertura de los servicios nacionales y regionales.

parámetro	Valor		
	Clásico	Jerárquico	
		HP	LP
Ancho de banda	6 MHz		
Tamaño de FFT	8K		
Intervalo de guarda	1/4		
Modulación	64QAM	QPSK	HM-64QAM
Tasa de codificación	2/3	2/3	2/3
Distancia entre Tx SFN	90 km		
Capacidad de transmisión	14.93 Mbps	4.98 Mbps	9.95 Mbps
Min. CNR en Rice F1	17.1 dB	13.1 dB	18.3 dB
Min. CNR en Rayleigh P1	20.3 dB	16.4 dB	21.6 dB
$E_{min}$ en recepción fija	42.7 dBuV/m	38.7 dBuV/m	43.9 dBuV/m
$E_{min}$ en recepción Outdoor	70.9 dBuV/m	67 dBuV/m	72.2 dBuV/m
$E_{min}$ en recepción Indoor	83.3 dBuV/m	79.4 dBuV/m	84.6 dBuV/m

Tabla 3.4: Plan de asignación de frecuencias para los canales regionales en topología MFN en función del número de frecuencias disponibles. Establecido para recepción fija con antena en tejados al 70%.

Canal	Frecuencia Central (MHz)				
	6 bandas	5 bandas	4 bandas	3 bandas	2 bandas
Teleantioquia	530	524	506	512	506
TRECE	524	506	500	500	500
Telepacífico	506	512	218	506	500
Telecaribe	512	512	512	500	500
TRO	518	500	506	506	506
Telecafé	500	518	512	500	506

cuencias que mejor rendimiento ofrecen en términos de máxima cobertura para cada canal regional y mínima interferencia entre ellos en función de la cantidad de frecuencias disponibles para cada topología MFN.

Siguiendo este plan de frecuencias, la figura 3.15 representa el porcentaje

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

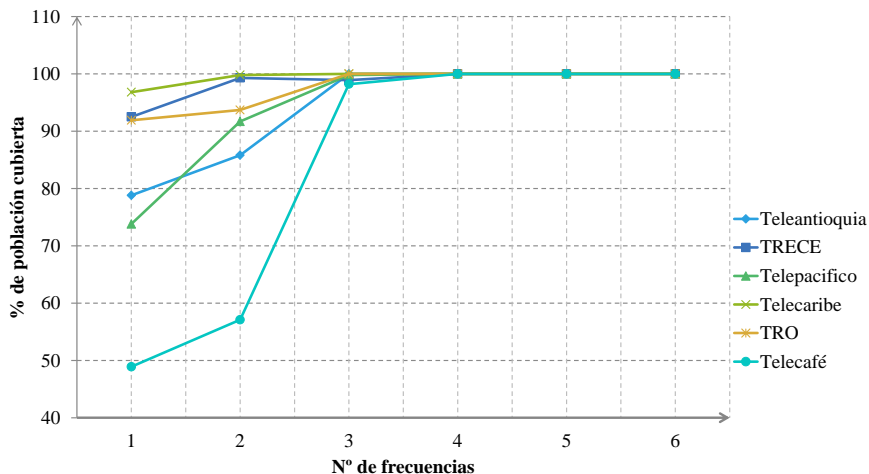


Figura 3.15: Porcentaje normalizado de población cubierta para cada canal regional en función del número de frecuencias utilizadas. Modo de transmisión 64QAM, CR 2/3, FFT 8K, GI 1/4 en recepción fija con antena en tejados (Rice F1).

de población cubierta por cada canal regional en recepción fija 70 % con topologías SFN y MFN hasta 6 frecuencias. Los porcentajes han sido normalizados con respecto a la población cubierta en el caso de máxima cobertura (frecuencias independientes para cada canal). En el caso de topología SFN, todos los transmisores utilizan la banda de 500 MHz y cada canal regional utiliza la capacidad completa de multiplex para emitir el contenidos local en su respectiva área de interés. De la figura podemos observar que con una topología MFN de 3 frecuencias se consigue hasta un 98 % de la población cubierta con la topología MFN de 6 frecuencias, lo que significa un ahorro de la mitad de frecuencias requeridas. La utilización de una única frecuencia puede representar una reducción entre el 5 % y el 25 % de la población cubierta para la mayoría de canales, y en particular hasta del 50 % para el canal telecafé. A manera de ejemplo, La gráfica derecha de la figura 3.16 muestra las huellas de cobertura obtenidas para los canales regionales utilizando una configuración MFN con seis frecuencias y un modo de transmisión DVB-T 64QAM, CR 2/3, FFT 8K y GI 1/4, donde no existen interferencia entre LSA adyacentes.

La Tabla 3.5 resume los porcentajes de cobertura en número de habitantes obtenidos por cada canal regional en recepción fija, portable indoor y portable outdoor al 70 % utilizando una configuración MFN de seis frecuencias. Estos niveles de cobertura serán considerados de aquí en adelante como el caso de referencia debido a que no existe interferencia entre transmisores y por tanto



### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

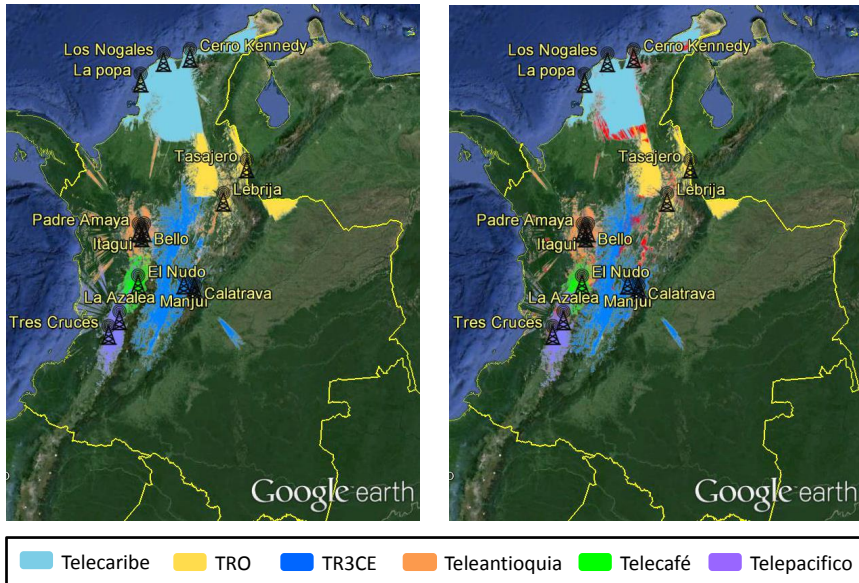


Figura 3.16: Cobertura de los siete canales regionales en Colombia utilizando una configuración MFN de 6 frecuencias (derecha) y una configuración SFN con transmisión simulcast (izquierda). Modo de transmisión 64QAM, CR 2/3, FFT 8K, GI 1/4 en recepción fija con antena en tejados (Rice F1).

la cobertura es la máxima alcanzada para cada canal regional, limitada únicamente por los niveles de potencia y características propias de cada estación base. Basados en este caso de referencia, se evaluará el rendimiento en términos de cobertura de cada canal regional cuando emiten en configuración SFN utilizando las soluciones técnicas propuestas en esta tesis: modulación jerárquica y time slicing.

Por su parte, el nivel de cobertura de los servicios nacionales corresponde con el total de habitantes cubiertos por la infraestructura de los seis canales regionales. De este número de habitantes con cobertura de servicios nacionales, un 8.31 %, 1,01 % y 0,58 % son cubiertos por más de un transmisor debido a que se encuentran en zonas de solapamiento de cobertura para condiciones de recepción fija, portable outdoor e indoor, respectivamente. En estas zonas de solapamiento se puede afirmar que los habitantes también pueden recibir más de un servicio local/regional, lo cual no es necesariamente un requerimiento en la planificación de la red de los canales regionales.

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

---

Tabla 3.5: Estimaciones de cobertura en habitantes de los canales regionales en topología MFN (6 frecuencias) para recepción fija, portable indoor y portable outdoor al 70 %.

		Fija	Portable Outdoor	Portable Indoor
Locales	TeleAntioquia	5'262.948	3'461.474	3'030.435
	TRECE	9'914.162	6'261.689	5'097.980
	Telepacífico	4'123.437	2'852.978	2'458.833
	Telecaribe	5'865.743	3'475.477	3'066.742
	TRO	2'279.183	1'337.693	1'046.371
	Telecafé	3'500.912	1'570.476	1'160.988
Nacionales		28'468.794	18'780.974	15'773.658

#### Cobertura de los servicios nacionales y locales en una red SFN utilizando la solución clásica simulcast

La solución clásica simulcast emite los servicios regionales desde todos los transmisores que conforman la red SFN y por tanto la cobertura de cada servicio regional está directamente relacionada con la cobertura general de la red SFN. La gráfica izquierda de la figura 3.16 muestra la cobertura que se obtiene estableciendo una red SFN con la infraestructura de red de los seis canales regionales, la cual es la misma tanto para los servicios nacionales como para los servicios locales/regionales. Las zonas en color rojo representan las áreas sin cobertura debida a la autointerferencia de la red SFN.

La tabla 3.6 presenta el porcentaje de población cubierta para cada canal regional con la solución simulcast en una red SFN comparado con el caso de referencia donde cada canal regional utiliza una frecuencia independiente. Podemos observar que los porcentajes de cobertura en SFN simulcast están por encima del 95 % de la obtenida con una topología MFN en cualquier tipo de recepción (fija, portable indoor o portable outdoor) y para los seis canales regionales. Como caso particular, el único porcentaje de cobertura que está por debajo de este umbral es para recepción fija del canal Telepacífico (90.21 %) debido principalmente al amplio radio de cobertura que se obtiene para este tipo de recepción y a las autointerferencias SFN que se pueden presentar en zonas lejanas. Aunque los niveles de cobertura obtenidos con esta solución clásica son prácticamente los mismos que los ofrecidos por una configuración MFN, su principal inconveniente es la necesidad de compartir la tasa binaria entre todos los canales regionales y la emisión de sus contenidos en toda el área de cobertura, incluso en zonas donde no son de especial interés.

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

Tabla 3.6: Estimaciones de cobertura en porcentaje de habitantes de los canales regionales en topología SFN utilizando simulcast comparado con el caso de referencia con frecuencias independientes para cada canal (MFN). Recepción fija, portable indoor y portable outdoor al 70 %.

		Fija	Portable Outdoor	Portable Indoor
Locales	TeleAntioquia	96.34 %	99.37 %	99.07 %
	TRECE	97.83 %	99.77 %	99.89 %
	Telepacífico	90.21 %	95.18 %	96.35 %
	Telecaribe	92.54 %	98.62 %	99.66 %
	TRO	95.09 %	99.75 %	99.92 %
	Telecafé	95.21 %	97.77 %	99.28 %
Nacionales		95.16 %	99.12 %	99.51 %

El porcentaje de población cubierta con contenidos nacionales también se encuentra por encima del 95 % del obtenido en una configuración MFN en los tres tipos de recepción. La leve reducción que se presenta en el caso de la topología SFN se debe principalmente a la autointerferencia propia de este tipo de topologías. Al igual que para los servicios locales, esta reducción es más significativa para recepción fija donde el umbral de CNR mínimo requerido es menor comparado con la recepción portable y por tanto se alcanzan zonas más alejas con mayor probabilidad de interferencia por parte de otros transmisores.

#### Cobertura de los servicios nacionales y locales en una red SFN utilizando modulación jerárquica

La parte izquierda de la figura 3.17 muestra las huellas de cobertura obtenidas para los canales regionales en una topología SFN utilizando el flujo LP de la modulación jerárquica para la inserción de sus contenidos. Para la estimación de esta cobertura, hemos considerado que todos los transmisores habilitan la inserción de contenidos locales/regionales y por lo tanto el mínimo nivel de CNR y margen de protección entre señal DVB-T de diferentes LSA es el presentado en la sección 3.2.1. En la figura hemos resaltado en rojo las zonas con interferencia entre LSA donde se tiene el nivel de intensidad de campo mínima requerida  $E_{min}$  pero el nivel de la señal interferente es demasiado alto para conseguir una correcta decodificación.

La tabla 3.7 resume los porcentajes de cobertura obtenidos para cada canal y compara el porcentaje de población cubierta con el establecido en el caso de

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

referencia donde cada transmisor utiliza una frecuencia independiente. De la tabla podemos observar que esta técnica ofrece niveles de cobertura entre el 54 y 97 % de la ofrecida por una topología MFN dependiendo del canal regional y del tipo de recepción a la que está orientada la red TDT. En condiciones de recepción portable indoor y portable outdoor se observa una menor reducción en la población cubierta debido a que sus radios de cobertura se limitan a las cercanías de los transmisores de cada LSA y por tanto existe una menor probabilidad de ser interferidos por LSA adyacentes. Como caso particular, la LSA que presenta una significativa reducción en la población cubierta es Telecafé debido principalmente a su ubicación central dentro de la red SFN, con porcentajes de 54.4 %, 82.4 % y 82.8 % para recepción fija, portable outdoor y portable indoor, respectivamente. Sin embargo, estos niveles de cobertura pueden ser aumentados desplegando gapfillers de baja potencia puntuales en las zonas de mayor concentración de población, orientados de forma tal que garanticen la menor interferencia a las LSA adyacentes y manteniendo el uso de una única frecuencia de operación.

Para el caso de los servicios globales, no solo se mantienen los porcentajes de población cubierta, sino que se ven aumentados en 8 % y 12 % para recepción portable outdoor e indoor respectivamente. Este aumento en la población cubierta se debe principalmente a la mayor robustez del flujo HP comparado con el modo de transmisión no jerárquico utilizado en el caso MFN de referencia a costa de un compromiso de reducción en la máxima tasa binaria disponible para los servicios nacionales. Finalmente, la tabla presenta de forma comparativa los resultados de población cubierta obtenidos con la solución técnica Time slicing, los cuales serán discutidos en la siguiente subsección.

#### **Cobertura de los servicios nacionales y locales en una red SFN utilizando time slicing**

La parte derecha de la figura 3.17 muestra las huellas de cobertura obtenidas para los canales regionales en una topología SFN utilizando la técnica de time slicing. En la estimación de estos niveles de cobertura hemos considerado el mínimo nivel de CNR y margen de protección entre señal DVB-T de diferentes LSA presentado en la sección 3.2.2. En la figura hemos resaltado en rojo las zonas con interferencia entre LSA donde se tiene el nivel de  $E_{min}$  pero el nivel de la señal interferente es demasiado alto para conseguir una correcta decodificación. Igualmente, podemos observar que las áreas de cobertura para los contenidos locales se limitan a las zonas cercanas de los transmisores.

La tabla 3.7 resume los porcentajes de cobertura obtenidos para cada canal y compara el porcentaje de población cubierta con el ofrecido por la modulación jerárquica. De la tabla podemos observar que esta técnica ofrece niveles de

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

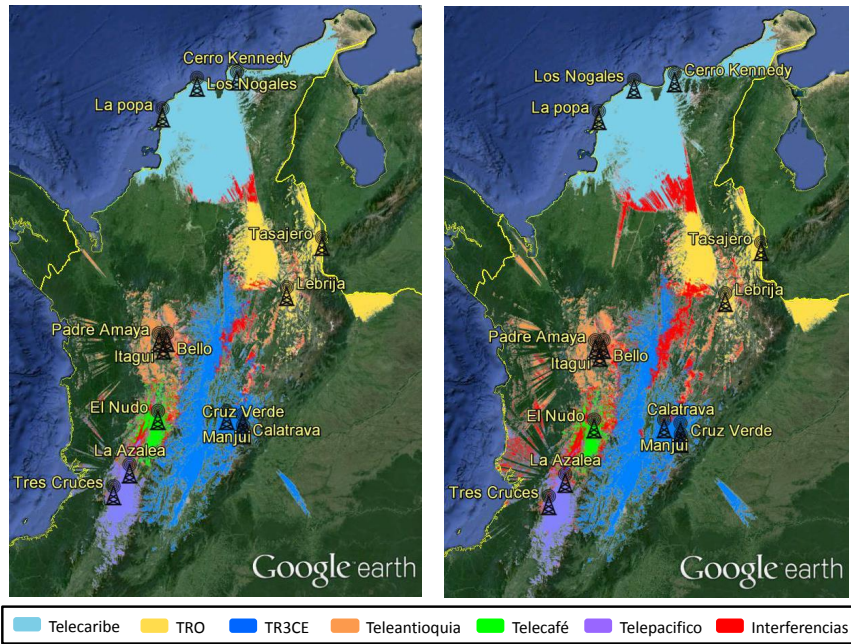


Figura 3.17: Cobertura de los canales regionales utilizando una configuración SFN y la técnica de time slicing (derecha) o la técnica de modulación jerárquica (izquierda). Recepción fija con antena en tejados (Rice F1).

cobertura entre el 49 y el 99 % de la ofrecida por una topología MFN dependiendo del canal regional y del tipo de recepción. Al igual que con la modulación jerárquica, la técnica de time slicing ofrece una menor reducción en la población cubierta en condiciones de recepción portable indoor y portable outdoor, debido principalmente a que sus radios de cobertura se limitan a las cercanías de los transmisores de cada LSA y por tanto existe una menor probabilidad de ser interferidos por LSA adyacentes. En condiciones de recepción fija, esta técnica de time slicing presenta una mayor reducción en la población cubierta comparada con la técnica de modulación jerárquica. Este efecto se debe principalmente a la mayor vulnerabilidad de una modulación no jerárquica frente a una señal totalmente interferente, comparada con la vulnerabilidad de una modulación jerárquica donde el cuadrante de la constelación es común (flujo HP) para todos los transmisores de la SFN y la parte interferente es únicamente la distorsión dentro del cuadrante provocada por los distintos flujos LP.

Para el caso de los contenidos nacionales, los porcentajes de cobertura obtenidos son exactamente iguales a los ofrecidos por la técnica clásica de simulcast,

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

Tabla 3.7: Estimaciones de cobertura en porcentaje de habitantes de los canales regionales en topología SFN utilizando modulación jerárquica (HM) y Time Slicing (TSL) normalizado con el caso de referencia (frecuencias independientes para cada canal). Recepción fija, portable indoor y portable outdoor al 70 %.

Solución		Fija		Portable Outdoor		Portable Indoor	
		HM	TSL	HM	TSL	HM	TSL
Locales	TeleAntioquia	81.1 %	78.8 %	94.5 %	96.4 %	94.6 %	98.3 %
	TRECE	94.5 %	92.5 %	94.9 %	99 %	90.3 %	99.1 %
	Telepacífico	81.1 %	73.8 %	92.6 %	90.1 %	93.4 %	91.59 %
	Telecaribe	96.2 %	96.8 %	97.6 %	100 %	96.7 %	100 %
	TRO	91.6 %	91.9 %	95.7 %	99.8 %	95.8 %	100 %
	Telecafé	54.4 %	48.9 %	82.4 %	82.1 %	82.8 %	87 %
Nacionales		98.2 %	95.1 %	109 %	99.1 %	112 %	99.5 %

pues en ambos casos se mantiene las ventajas propias de las topologías SFN. Estos porcentajes se encuentran por encima del 95 % de los ofrecidos por una configuración MFN y su leve variación se debe principalmente a las autointerferencias que pueden presentarse en este tipo de redes SFN.

#### 3.2.5. Ganancia en capacidad de transmisión

En esta sección se analiza la ganancia en capacidad de transmisión ofrecida por las soluciones técnicas modulación jerárquica y time slicing comparada con el enfoque convencional *simulcast*, sin considerar topologías MFN. La ganancia en capacidad de transmisión  $G_{LSI}$  puede ser calculada mediante la ecuación 3.2 y define la relación entre la tasa binaria disponible para la transmisión de servicios nacionales y locales en toda la red SFN utilizando modulación jerárquica o time slicing  $R_{LSI}$ , y la tasa binaria ofrecida utilizando el enfoque convencional  $R_{SFN}$ :

$$G_{LSI} = \frac{R_{LSI}}{R_{SFN}} \quad (3.2)$$

La ganancia depende del número de LSA presentes en la red SFN ( $n_{LSA}$ ) y del porcentaje de tasa binaria dedicada a los servicios locales ( $\rho_{local}$ ) relativo a la tasa binaria total para servicios nacionales y locales. En el enfoque convencional la tasa binaria total del sistema es igual a la tasa binaria ofrecida por el

### 3.2 Servicios globales y locales en redes de frecuencia unica

multiplex ( $R_{SFN}=R_{Mux}$ ) y el porcentaje  $\rho_{local}$  de esta tasa binaria dedicado a servicios locales es compartido entre todas las LSA que conforman la SFN.

Utilizando las soluciones técnicas de modulación jerárquica o time slicing, cada LSA dispone de toda la tasa binaria ofrecida por el Multiplex para la emisión de contenidos nacionales y locales <sup>4</sup>. En este caso, la tasa binaria total del sistema puede ser expresada mediante la ecuación 3.3:

$$R_{LSI} = (1 - \rho_{local}) + n_{LSAs} \times \rho_{local} \quad (3.3)$$

Es importante resaltar que en el caso de utilizar la solución de time slicing, el factor  $\rho_{local}$  puede ser ajustado libremente en el rango entre 0 y 1, donde el valor de 1 significa una dedicación del 100 % de la tasa binaria del multiplex a la provisión de servicios locales. Por el contrario, en el caso de utilizar la modulación jerárquica, el factor  $\rho_{local}$  depende del esquema de modulación del flujo LP y de las tasas de codificación utilizadas para los flujos HP y LP ( $CR_{global}$  y  $CR_{local}$ , respectivamente). La ecuación 3.4 define los posibles valores de  $\rho_{local}$  utilizando modulación jerárquica:

$$\rho_{Local\_HM} = \frac{\mu_{Local} \times CR_{Local}}{(2 + \mu_{Local}) \times CR_{Global}} \quad (3.4)$$

donde el parámetro  $\mu_{Local}$  representa la eficiencia espectral del flujo LP, el cual toma valores de 2 o 4 si la modulación jerárquica es 16-QAM o 64-QAM, respectivamente. El factor constante "2" en denominador indica que el flujo HP siempre es modulado en QPSK. De la ecuación podemos notar que utilizando la misma tasa de codificación para los flujos LP y HP, el máximo porcentaje de capacidad dedicado a servicios locales  $\rho_{local}$  es del 50 % o del 66.6 % para la modulación jerárquica 16QAM o 64QAM, respectivamente.

La figura 3.18 muestra la potencial ganancia en capacidad de transmisión que puede ser lograda con la modulación jerárquica o time slicing comparada con la ofrecida por el enfoque clásico simulcast en función del valor de  $\rho_{local}$  y del numero de LSAs presentes en la red SFN. A manera de ejemplo, podemos observar de la gráfica que para una topología SFN con 4 LSA, ambas técnicas ofrecen cerca del doble de capacidad de transmisión (97 % ganancia) utilizando un factor  $\rho_{local}$  del 33 %, comparado con el enfoque tradicional. Las ganancias en capacidad pueden llegar a ser hasta de  $n$  veces con la técnica de time slicing, siendo  $n$  el numero de LSA que conforman la red SFN, a costa de reducción el el área de cobertura de los servicios locales, la cual está limitada por el grado de interferencia generado por las LSA adyacentes. Dependiendo del escenario de despliegue, la cobertura obtenida puede ser suficiente para ofrecer servicios

<sup>4</sup>cuando no se aplica esquemas de multiplexación temporal para reducir las interferencias entre LSAs

### CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T

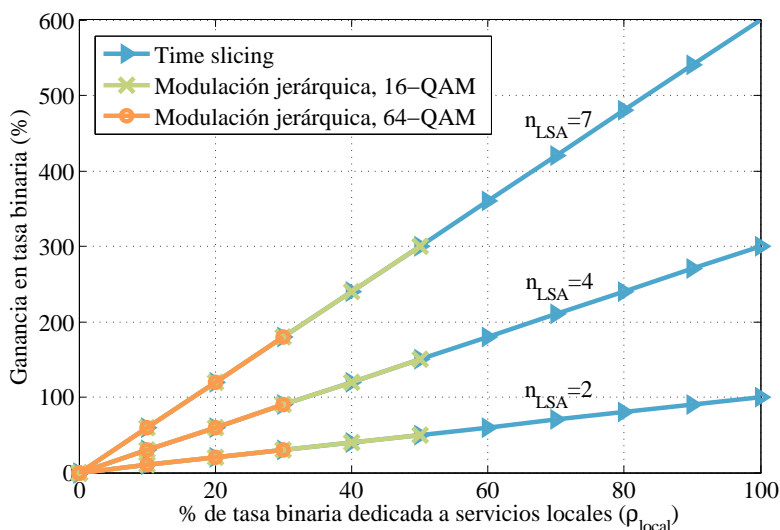


Figura 3.18: Ganancia en capacidad de transmisión utilizando las soluciones modulación jerárquica y time slicing en función del porcentaje dedicado a servicios locales  $\rho_{local}$  y del número de LSA.

locales en las áreas de interés de dichos servicios (ej. ciudades cercanas a los transmisores).

### 3.3. Conclusiones

En este capítulo hemos investigado el uso combinado de modulación jerárquica y diversidad en el dominio de tiempo y el espacio para mejorar la recepción de servicios de DVB-T en movilidad. Las investigaciones han estado enfocadas en la simultánea provisión de servicios a terminales fijos y móviles utilizando el mismo canal radio y una única infraestructura de red TDT, lo cual es considerado un aspecto clave para el inicio comercial de los servicios móviles. La utilización de estas soluciones no conlleva grandes cambios en las etapas de transmisión y/o recepción, siendo totalmente compatibles con los receptores comerciales y diseños de red actualmente desplegados. Nosotros hemos demostrado que es posible proveer servicios de TDT a vehículos a través de redes DVB-T dimensionadas para recepción fija en tejados sin impactar su nivel de cobertura. Los resultados obtenidos son de gran interés no solo para la actualización de las redes DVB-T ya desplegadas, sino también para reducir la



inversión en infraestructura de las redes emergentes en países en proceso de transición a la TDT que deseen abordar desde ya el nuevo nicho de mercado de la TV en movilidad.

El principal beneficio de la modulación jerárquica es ofrecer la posibilidad de emitir dos flujos de servicios con distintos grados de robustez en un mismo canal RF, los cuales pueden estar orientados a receptores fijos (flujo LP) y a receptores móviles (flujo HP). El flujo LP puede ser configurado para mantener el rendimiento de un modo no jerárquico y por tanto ofreciendo el mismo nivel de cobertura. Por otra parte, el flujo HP puede requerir hasta 25.7 dB<sup>5</sup> menos de CNR que el flujo LP, aumentando significativamente el porcentaje de cobertura de los servicios móviles.

AL-FEC puede ser aplicado al flujo HP de forma transparente para los receptores comerciales ya disponibles en el mercado y con una leve modificación software en los nuevos receptores orientados a movilidad que harán uso de esta solución técnica. AL-FEC habilita en DVB-T la opción de diversidad temporal con tiempos de entrelazado del orden de varios segundos. De acuerdo a los resultados obtenidos, AL-FEC en el flujo HP ofrece ganancias de hasta 9 dB en entornos de movilidad con presencia de shadowing utilizando tiempos de entrelazados mayores a 1 segundo y tasas de codificación 1/2. Para duraciones inferiores a 1 segundo, la ganancia es menos significativa, siendo preferible emplear una protección más robusta en capa física en lugar de AL-FEC.

En el dominio de diversidad espacial, la configuración SIMO ofrece una ganancia de 5 dB en la recepción del flujo HP cuando las técnicas UL-FEC no son utilizadas. Debido a que AL-FEC y SIMO explotan la diversidad causada por la propagación multitrayecto, la mejora ofrecida por el uso combinado de estas soluciones es menor que la suma de las ganancias individuales.

En particular, los resultados demuestran que la red comercial DVB-T de la ciudad de Valencia puede lograr buena cobertura a sistemas de transporte público o vehículos en general utilizando diversidad de antenas en recepción, un esquema de modulación jerárquico 64-QAM con CR 2/3 en la capa física (para los tipos de flujo) y una protección AL-FEC para los servicios móviles con CR 3/4 y tiempo de entrelazado de 8 segundos. Esta configuración ofrece una tasa binaria de 13.3 Mbps para servicios de recepción fija y 4.4 Mbps para servicios en recepción móvil, lo cual es suficiente para emitir (con codificación MPEG-4) hasta 2 servicios en HDTV a terminales fijos y 6 servicios de Low Definition Television (LDTV) a receptores de mano generalmente diseñados con bajas/medianas resoluciones de pantalla. La tasa binaria disponible para servicios móviles y el rendimiento en movilidad obtenido para esta configuración

---

<sup>5</sup>Pasando del flujo LP menos robusto (16QAM, CR 7/8,  $\alpha = 4$ ) al flujo HP más robusto disponible en DVB-T (QPSK CR 1/2,  $\alpha = 4$ ) en un canal Rayleigh P1 [1], a costa de la respectiva reducción en tasa binaria.

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

es similar al ofrecido por una configuración clásica QPSK CR 1/2. Sin embargo, el principal beneficio de esta configuración es la disponibilidad de los 13.3 Mbps para servicios fijos en el mismo canal RF con una muy ligera reducción en el área de cobertura (requiere 0.5 dB de CNR para correcta decodificación) comparada con la obtenida con el modo 64-QAM CR 2/3 no jerárquico utilizado actualmente.

Si el contenido es el mismo para los receptores fijos y móviles, la codificación SVC puede ser usada para ofrecer eficientemente servicios de HDTV a receptores fijos capaces de decodificar el flujo HP y LP, y servicios de SDTV en escenarios de movilidad o zonas de con bajo nivel de señal decodificando únicamente el flujo HP. El beneficio de SVC es que requiere menos tasa binaria comparada con la transmisión individual del contenido en las dos diferentes calidades de vídeo.

Por otra parte, en este capítulo hemos presentado el rendimiento de las soluciones técnicas modulación jerárquica y time slicing para la inserción de contenidos locales/regionales en redes SFN DVB-T evaluado mediante medidas de laboratorio. Las investigaciones han permitido establecer los márgenes de protección y mínimos niveles de CNR requeridos para correcta decodificación de señales DVB-T cuando es interferida por otra señal DVB-T en modo no jerárquico y en modo jerárquico con flujo HP común y flujo LP diferente. De acuerdo a los resultados obtenidos, los contenidos locales soportan un mayor grado de interferencia (mayor radio de cobertura) cuando son emitidos sobre el flujo LP de la modulación jerárquica que cuando son emitidos utilizando la técnica de time slicing con el mismo orden final de modulación. Este efecto se debe principalmente a la mayor vulnerabilidad de una modulación no jerárquica frente a una señal totalmente interferente, comparada con la vulnerabilidad de una modulación jerárquica donde el cuadrante de la constelación es común (flujo HP) para todos los transmisores de la SFN y la parte interferente es únicamente la distorsión dentro del cuadrante provocada por los distintos flujos LP.

El ejercicio de planificación de frecuencias desarrollado en esta investigación para los seis canales regionales de Colombia permitió establecer que tres canales RF reutilizados en función de la distancia o ubicación de cada LSA son suficientes para garantizar más del 98 % de la población cubierta con el uso de frecuencias individuales para cada canal, lo que significa un ahorro del 50 % del uso del espectro. Posteriormente hemos evaluado los porcentajes de cobertura obtenidos por las soluciones técnicas time slicing y modulación jerárquica propuestas en esta investigación para optimizar la transmisión de los contenidos nacionales y locales haciendo uso de una única frecuencia.

En condiciones de recepción portable indoor y portable outdoor se observa que ambas soluciones técnicas conservan como mínimo un 90 % de la población

cubierta por los canales regionales cuando utilizan frecuencias independientes, llegando incluso a ser del 99 % para algunos operadores regionales. En este caso la ventaja no solo es mantener los porcentajes de cobertura, sino el ahorro de hasta seis veces el uso del espectro al utilizar una única frecuencia para todos los canales regionales del país.

En condiciones de recepción fija, ambas soluciones técnicas presentan una considerable reducción de población cubierta (hasta del 51 %) debido principalmente a que los radios de cobertura de cada LSA son mayores que los obtenidos para recepción portable y por tanto aumentan las zonas con alta probabilidad de interferencia por parte de las LSA adyacentes. Como caso particular, la LSA que presenta una significativa reducción en la población cubierta es Telecafé debido principalmente a su ubicación central dentro de la red SFN. Sin embargo es importante resaltar, que la cobertura máxima ofrecida por la topología con frecuencias independientes, no es necesariamente la cobertura final deseada por cada operador regional y por tanto es conveniente evaluar si la cobertura ofrecida en configuración SFN está suficientemente focalizada en su población objetivo. En este sentido, la selección e implementación de estas técnicas dependen de la ubicación de las distintas LSA, de las zonas con mayor concentración de población objetivo y de la robustez del modo DVB-T de transmisión. Como estrategia complementaria para aumentar la cobertura de las LSA, es posible implementar gapfiller de pequeña potencia en aquellas zonas con altos niveles de interferencia y significativa concentración de población objetivo.

En cuanto a los servicios nacionales, las soluciones técnicas mantienen todas las ventajas de una topología SFN y por tanto ofrecen porcentajes de cobertura muy similares a los obtenidos con una topología MFN de frecuencias independientes. Las leves diferencias en tales porcentajes de cobertura son establecidas principalmente por la ganancia SFN en zonas con cobertura de dos o más señales OFDM y por las autointerferencias propias de una topología SFN. Como caso particular, la modulación jerárquica no solo conserva el nivel de población ofrecido por la topología MFN con frecuencias independientes, sino que incluso presenta un aumento hasta del 12 % (en recepción portable outdoor). Este aumento en la población cubierta se debe principalmente a la mayor robustez del flujo HP comparado con el modo de transmisión no jerárquico utilizado en el caso MFN de referencia a costa de un compromiso de reducción en la máxima tasa binaria disponible para los servicios nacionales.

La ventaja más significativa de las soluciones técnicas de modulación jerárquica y time slicing no es solo el uso eficiente del espectro sino también la ganancia en términos de capacidad efectiva de transmisión de la red SFN. El aumento en la capacidad de transmisión se debe a la reutilización en cada LSA del porcentaje de tasa binaria dedicada a servicios locales ( $\rho$ ) cuando se utiliza las soluciones técnicas, comparado con la solución clásica de simulcast donde este

### **CAPÍTULO 3. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T**

---

porcentaje es compartido entre todas las LSA que forman la red SFN. En este sentido la ganancia en capacidad de transmisión depende del número de LSA, del factor  $\rho$  y de la solución técnica implementada.

Para el caso de la modulación jerárquica, el factor  $\rho$  es fijado por la relación del orden de modulación y las tasas de codificación FEC de los flujos HP y LP. Para el caso de time slicing, este factor  $\rho$  es más flexible y permite una libre asignación entre 0 y 100 % del MUX de la red SFN. Las ganancias en capacidad pueden llegar a ser hasta de  $n$  veces con la técnica de time slicing, siendo  $n$  el número de LSA que conforman la red SFN, a costa de reducción el el área de cobertura de los servicios locales, la cual está limitada por el grado de interferencia generado por las LSA adyacentes. Dependiendo del escenario de despliegue, la cobertura obtenida puede ser suficiente para ofrecer servicios locales en las áreas de interés de dichos servicios (ej. ciudades cercanas a los transmisores).

## Capítulo 4

# Provisión simultánea de servicios de TDT a terminales fijos/móviles y servicios locales en redes de frecuencia única DVB-T2

El estándar DVB-T2 permite un amplio abanico de posibilidades de configuración orientadas a diferentes condiciones de recepción. La combinación de todos sus parámetros de configuración OFDM y codificación de canal permiten la construcción de redes MFN o SFN para diferentes aplicaciones, desde servicios con baja tasa binaria y alta robustez orientados a recepción móvil, hasta servicios con alta capacidad de transmisión orientados a receptores domésticos o de uso profesional.

En este capítulo se analizan, en primer lugar, los principales beneficios de actualizar una red DVB-T a DVB-T2, identificando diferentes modos de transmisión DVB-T2 que permitan maximizar la capacidad de transmisión, los niveles de cobertura y/o los tamaños de red SFN. Como escenario real de análisis se ha considerado el diseño de red DVB-T del operador público de televisión de Colombia (RTVC) descrito en el anexo A, el cual ha de ser actualizado a DVB-T2 tras su respectiva adopción oficial en 2011 como estándar nacional para el despliegue de las redes TDT.

El caso de Colombia es muy especial al ser el primer país en desplegar

## **CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2**

---

DVB-T2 en canalización 6 MHz, lo cual permite un mayor tamaño de red SFN comparado con los permitidos en la canalización europea de 8 MHz, a costa de una penalización en el rendimiento en movilidad. Consecuentemente, en este capítulo se incluye un estudio comparativo del rendimiento de DVB-T2 en entornos de movilidad utilizando canalización 6 y 8 MHz y las mejoras obtenidas por el uso combinado de técnicas de diversidad temporal, frecuencial y espacial. Desde el punto de vista de planificación eficiente de redes DVB-T2, en este capítulo se analiza la viabilidad de proveer servicios fijos y móviles en un mismo canal RF combinando técnicas de diversidad en tiempo, frecuencia y espacio con la técnica de múltiples PLP o de los perfiles T2-lite.

Finalmente, en este capítulo se analiza la utilización de PLPs o de flujos auxiliares dedicados para la provisión de servicios nacionales y regionales/locales en redes de frecuencia única DVB-T2. Desde el punto de vista del operador, la inserción de los contenidos locales requiere de un adaptador de trama DVB-T2 en los cluster de cada LSA que identifique los PLP o flujos auxiliares reservados para tales contenidos desde la cabecera principal de transmisión, y los reemplace por el contenido local a difundir. Desde el punto de vista del usuario, los contenidos nacionales y locales pueden ser decodificados con receptores DVB-T2 convencionales.

Con la utilización de estas soluciones técnicas, la cobertura de los servicios locales esta limitada por el nivel de interferencia generada por las LSA adyacentes. Dependiendo del escenario de despliegue, puede ser suficiente para cubrir un alto porcentaje de la población objetivo. Un esquema de transmisión con multiplexación temporal puede aumentar el área de cobertura de cada LSA, a costa de una reducción en la máxima tasa binaria disponible para los servicios locales. El rendimiento de estas soluciones ha sido evaluado mediante medidas de laboratorio y simulaciones de red SFN formada por dos transmisores adyacentes emitiendo los mismos servicios globales y diferentes servicios locales. Los resultados obtenidos pueden ser extrapolados para un mayor número de LSAs considerando como fuentes de interferencia a todos los transmisores SFN que no pertenecen a la LSA de interés.

Estimaciones de cobertura en escenarios reales, concretamente para los seis canales regionales de Colombia, han sido realizadas con el fin de establecer la viabilidad de implementar estas soluciones técnicas en función de los niveles de cobertura, los porcentajes de población con interferencia y la capacidad de transmisión para los servicios locales y nacionales.

### 4.1. Transición de una red DVB-T a DVB-T2

Las principales razones para realizar la migración de DVB-T a DVB-T2 son las considerables ganancias en la capacidad de transmisión, el área de cobertura y/o el tamaño de red SFN en las mismas condiciones de transmisión/recepción. Algunos radioperadores optan por mantener los diseños de red y niveles de cobertura de la red original DVB-T para conseguir la máxima ganancia en la tasa binaria con la migración a DVB-T2 como es el caso de el Reino Unido y Suecia [8]. Otros operadores pueden optar por aumentar la penetración de los servicios DVB-T2 extendiendo los radios de cobertura y/o nichos de mercado. Por ejemplo, un aumento en la robustez de la señal permite pasar de una red orientada a servicios fijos a una red para servicios de TV en recepción portable y móvil.

Generalmente, el proceso de migración de una red DVB-T a DVB-T2 requiere el uso de frecuencias adicionales durante un periodo de coexistencia o transición. Muchos países han optado por utilizar temporalmente frecuencias disponibles en la banda UHF y/o VHF. Alternativamente existe la posibilidad de compactar diferentes programas de TV (con una ligera reducción en la calidad) en multiplex DVB-T existentes con el fin de liberar espectro para los nuevos multiplex de DVB-T2. En casos excepcionales se considera el apagado de multiplex DVB-T para iniciar la emisión de multiplex DVB-T2 en la misma frecuencia. La posibilidad de crear redes SFN de gran tamaño en DVB-T2 permite hacer un uso más óptimo del espectro y la posibilidad de realizar la transición con menos frecuencias adicionales.

Para países que están finalizando el despliegue de DVB-T, la nueva migración a DVB-T2 debe estar muy enfocada en los beneficios y satisfacción de los consumidores. La introducción de DVB-T ha venido acompañada de una inversión económica por parte del usuario en nuevos equipos de recepción y por tanto la nueva inversión requerida para la migración a DVB-T2 debe estar muy bien justificada. En este sentido, los países pioneros en el despliegue de redes DVB-T2 han optado por ligar la migración a DVB-T2 con la oferta de servicios de HDTV y 3DTV que solo pueden ser decodificados con los nuevos receptores. La estrategia de introducción de DVB-T2 ha de definirse cuidadosamente con el fin de evitar que los usuarios se cambien a otras plataformas, como ha sucedido en algunos países con la transición de TV analógica a DVB-T.

Una situación especial se presenta en aquellos países que han iniciado pero no completado el proceso de transición de TV analógica a DVB-T. En función del porcentaje de despliegue realizado con el estándar de primera generación, puede resultar mucho más beneficioso para el operador y los usuarios continuar el despliegue utilizando el estándar de segunda generación. Para ello es conveniente establecer un periodo de coexistencia de las dos generaciones del

## **CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2**

---

estándar y posteriormente actualizar totalmente la red a DVB-T2. Este es el caso particular de Colombia donde se adoptó el estándar DVB-T en 2008, se realizaron los diseños de red y las primeras emisiones comerciales en 2010, y posteriormente en diciembre de 2011 debido a las grandes mejoras tecnológicas incluidas en DVB-T2 y a la escasa infraestructura de red DVB-T desplegada hasta ese momento en el país se decidió actualizar el estándar nacional de TDT a DVB-T2.

Esta actualización requiere una adecuada replanificación de la red haciendo uso de todas las nuevas funcionalidades de DVB-T2 para alcanzar nuevos escenarios de mercado y ganancias en términos de cobertura, capacidad de transmisión y tamaño de red SFN. Los principales resultados de investigación presentados en esta sección están enfocados en identificar los mejores modos de transmisión para la actualización de la red DVB-T a DVB-T2 en Colombia estableciendo los compromisos en cobertura, tasa binaria disponible y tamaño de red SFN.

### **Ganancia en cobertura**

La ganancia en cobertura ofrecida por DVB-T2 está directamente relacionada con la reducción en la mínima CNR requerida para una correcta decodificación en las mismas condiciones de transmisión/recepción de un sistema DVB-T. Esta reducción en CNR es ofrecida en primer lugar por los nuevos mecanismos FEC de DVB-T2, los cuales son considerados los códigos de protección más eficientes a día de hoy.

El código LDPC tiene un rendimiento muy cercano al límite teórico de Nyquist con una diferencia de tan solo 1 dB para un canal de transmisión Gaussiano. Comparado con el código Convolutional Codes (CC) empleado en DVB-T, la ganancia en mínima CNR en un canal estacionario ofrecida por el LDPC está en el rango de 2.3 dB para modulaciones de bajo orden y 3.2 dB para modulaciones de alto orden [3]. Dependiendo de la topología de red y las características geográficas del escenario, esta ganancia puede significar hasta el doble de área cubierta. La ganancia ofrecida por los mecanismos FEC de DVB-T2 puede ser aún mayor cuando es combinada con el entrelazado temporal, principalmente en entornos de recepción móvil donde se logra una ganancia conjunta de hasta 9 dB en condiciones de alta velocidad de recepción (por ej. 144Km/h) [12].

Las constelaciones rotadas también ofrecen una robustez adicional a la señal DVB-T2 principalmente en constelaciones de bajo orden y altas tasas de codificación. Esta ganancia depende del canal de las condiciones de recepción, pero pueden estar en el rango de 0.5 a 2 dB para modulaciones QPSK y 16QAM, y prácticamente despreciable para modulaciones de orden superior.



Igualmente, la utilización del modo de transmisión MISO Alamouti propio de DVB-T2 puede ofrecer una reducción en la mínima CNR de hasta 2.5 dB, cuando los niveles de potencia y retardo entre señales son muy pequeñas [12], comparado con el rendimiento de una red clásica SFN.

### Ganancia en capacidad de transmisión

En forma global, la potencial ganancia en capacidad de transmisión de DVB-T2 comparada con DVB-T es hasta del 70 % para una misma área de cobertura [12]. El uso de la modulación 256QAM incrementa la eficiencia espectral a 8 bits por símbolo, lo que significa un 33 % más comparado con la modulación de orden más alto de DVB-T (64QAM). El mejor rendimiento de los mecanismos FEC de DVB-T2 también pueden ser trasladados a un aumento de capacidad de transmisión, utilizando esquema de modulación o tasas de codificación con un alto grado de eficiencia espectral para un mismo umbral de CNR establecido. Generalmente hablando, se puede decir que en DVB-T2 es posible incrementar un orden de modulación manteniendo el mismo nivel de cobertura.

Los tamaños de FFT más grandes incluidos en DVB-T2 (16K y 32K) también incrementan la tasa binaria del sistema para una misma distancia entre transmisores SFN (o duración del GI) comparada con el máximo tamaño de FFT disponible en DVB-T (8K), a costa una penalización en el rendimiento en movilidad. Largos tamaños de FFT significan largas duraciones del tiempo de guarda o distancia entre transmisores.

Estos nuevos tamaños de FFT también permiten habilitar un modo de ancho de banda extendido debido a la rápida caída fuera de banda de su respuesta espectral. Este modo extendido permite agregar hasta en un 2 % el número de portadoras OFDM para transportar mayor cantidad de información. El principal inconveniente de los altos tamaños de FFT es una reducción del rendimiento en movilidad debido a su más corta separación entre portadoras OFDM comparado con los modos FFT de menor tamaño. Esta menor separación significa una mayor vulnerabilidad al efecto Doppler, reduciendo la velocidad máxima de desplazamiento del receptor aproximadamente a la mitad cuando se dobla el número de portadoras.

El overhead generado por el Pilot Pattern (PP) también es reducido en DVB-T2. Mientras en DVB-T se define un único y denso PP con un 10.6 % de overhead, DVB-T2 define 8 diferentes PP con overhead en el rango entre 1.35 % a 10.6 % de la capacidad total de transmisión [3]. Esto permite optimizar el uso de un PP en función del escenario de recepción objetivo.

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

---

Tabla 4.1: Máxima distancia (km) entre transmisores SFN para un sistema DVB-T2 a 6MHz.

Tamaño FFT	Intervalo de Guarda (GI)						
	1/128	1/32	1/16	19/256	1/8	19/128	1/4
32K	11.2	44.8	89.6	106.4	179.2	212.8	n/a
16K	5.6	22.4	44.8	53.2	89.6	106.4	179.2
8K	2.8	11.2	22.4	26.6	44.8	53.2	89.6
4K	n/a	5.6	11.2	n/a	22.4	n/a	44.8
2K	n/a	2.8	5.6	n/a	11.2	n/a	22.4
1K	n/a	n/a	2.8	n/a	5.6	n/a	11.2

### Ganancia en tamaño de red SFN

El parámetro básico que define el tamaño de la red SFN es la duración del intervalo de guarda  $T_g$ , el cual depende del tamaño de la FFT y de la fracción GI seleccionados. Señales que lleguen al receptor con retardos relativos superiores al  $T_g$  del sistema generan Inter Symbol Interference (ISI). La máxima duración de GI disponible en DVB-T es de 298  $\mu\text{s}$  y 224  $\mu\text{s}$  para canalización 6 y 8 MHz respectivamente, la cual corresponde a un sistema con FFT 8K y GI 1/4 [1]. Esto corresponde a una distancia entre transmisores de 89 km y 67 km para en canalización de 6 y 8 MHz respectivamente.

En DVB-T2, los nuevos tamaños de FFT (16K y 32K) permiten distancias más largas entre transmisores SFN a costa de una reducción en el rendimiento en movilidad. DVB-T2 permite una distancia de hasta 212 Km en canalización 6 MHz la cual corresponde a un modo de transmisión FFT 32K, GI 19/128,  $T_g$  532  $\mu\text{s}$ ). La tabla 4.1 resume la máximas distancias entre transmisores SFN en función del los tamaños FFT y los GI para un ancho de banda de 6 MHz.

#### 4.1.1. Actualización del diseño de red DVB-T a DVB-T2 en un escenario real (Colombia)

Diferentes modos de transmisión DVB-T2 han sido analizados y comparados con el modo DVB-T inicialmente seleccionado por RTVC con el fin de identificar la mejor configuración en términos de cobertura, capacidad de transmisión y distancia SFN. El modo DVB-T elegido por RTVC fue 16QAM, CR 3/4, FFT 8K y GI 1/4 en canalización 6 MHz, el cual llamaremos modo de referencia de aquí en adelante en esta sección. Este modo de referencia ofrece una capacidad de transmisión de 11.2 Mbps y una distancia entre transmisores SFN de hasta 90 km (la máxima soportada por un sistema DVB-T). El mínimo nivel de CNR

## 4.1 Transición de una red DVB-T a DVB-T2

---

requerido por este modo de referencia es 15.7 dB y 17.4 dB para recepción fija con antena en tejados y recepción portable, respectivamente. El diseño de red original de RTVC está basado en una combinación de clúster SFN entre transmisores con separación menor a 90 km y topología MFN de dos frecuencias entre los diferentes clúster SFN del país como se muestra en la figura 4.1.

El despliegue de estas estaciones está dividido en dos fases, en las cuales la primera etapa consistirá en el despliegue de 14 transmisores con potencias en el rango de 500 w a 5 Kw, como se describe en [69] y en el anexo A del presente documento. Los resultados presentados en la siguientes subsecciones han sido evaluados utilizando la frecuencia 485 MHz (canal 16) para los estudios de SFN, y las frecuencias 485 MHz y 525 MHz (canales 16 y 23) para las topologías MFN.

### Ganancia en cobertura

La tabla 4.2 presenta dos modos de transmisión DVB-T2 que requieren un menor nivel de CNR comparados con el modo DVB-T de referencia, y mantienen aproximadamente igual la capacidad de transmisión del sistema y la distancia entre transmisores SFN. De acuerdo a los resultados obtenidos para la primera etapa de despliegue de RTVC (14 estaciones), el modo DVB-T de referencia ofrece en topología MFN de dos frecuencias, una cobertura del 60.7% y 30.4% de la población nacional en condiciones de recepción fija con antena en tejados y portable indoor, respectivamente.

La gráfica derecha de la figura 4.2 muestra las huellas de cobertura del modo DVB-T de referencia en topología MFN y la ganancia en cobertura obtenida por la utilización de los dos modos de transmisión DVB-T2. El modo de transmisión DVB-T2 opción 1 utiliza la misma configuración OFDM del modo de referencia y requiere 2.3 dB menos de CNR debido únicamente a la mejor eficiencia de los códigos FEC de DVB-T2. Esta reducción en CNR representa una ganancia de 1.9% y 0.8% de población nacional en recepción fija y portable indoor respectivamente.

El modo DVB-T2 opción 2 utiliza un tamaño FFT mas largo y un PP menos denso lo cual permite reducir la fracción del GI mientras mantiene la misma distancia entre transmisores SFN del modo de referencia. Una fracción GI con menor overhead significa una ganancia en la tasa binaria, la cual puede ser usada para seleccionar una tasa de protección o esquema de modulación más robusto y mantener la capacidad de transmisión ofrecida por el caso de referencia. En este caso, la opción 2 mantiene el orden de modulación en 16QAM y cambia la tasa de protección de 3/4 a 3/5, logrando una reducción en CNR de 5.3 dB y un incremento en la población cubierta de aproximadamente 3.7% para recepción fija y portable indoor.

A pesar de que la combinación de una FFT 32K y un GI 1/16 también

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

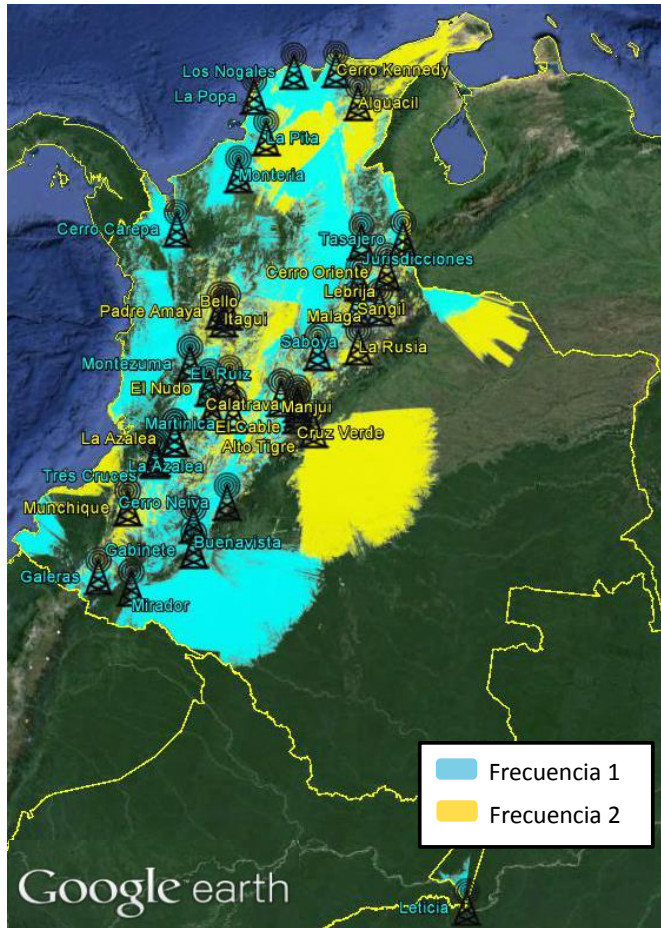


Figura 4.1: Cobertura con el modo de referencia DVB-T en Colombia utilizando una topología MFN de dos frecuencias.

ofrece una distancia entre transmisores SFN de 90 km, la tasa binaria obtenida para cualquier combinación de modulación y CR que requiere el mismo CNR son menores a las ofrecidas por el modo DVB-T de referencia y por tanto no han sido incluidas en la tabla.

## 4.1 Transición de una red DVB-T a DVB-T2

Tabla 4.2: Modos de transmisión DVB-T2 propuestos para maximizar la ganancia en cobertura comparada con el modo DVB-T de referencia.

Parámetro		DVB-T	DVB-T2	
		(referencia)	Opción 1	Opción 2
Tamaño FFT		8K	8KE	16KE
Intervalo de Guarda		1/4	1/4	1/8
Modulación		16QAM	16QAM	16QAM
Tasa de codificación		3/4	3/4	3/5
Pilot Pattern		PP1	PP1	PP3
Capacidad @6MHz		11.2 Mbps	11.3 Mbps	11.51 Mbps
Máxima distancia SFN		90 km	90 km	90 km
Mínima CNR	Rice F1	15.7 dB	12.9 dB	9.9 dB
	Rayleigh P1	18.1 dB	14.9 dB	11.4 dB
% población cubierta en MFN	fija	60.7 %	62.6 %	64.4 %
	indoor	30.4 %	31.2 %	33.9 %

### Ganancia en capacidad de transmisión

En esta investigación hemos identificado tres potenciales modos de transmisión DVB-T2 que maximizan la ganancia en la tasa binaria final del sistema y mantienen prácticamente constante el porcentaje de cobertura y el tamaño de la SFN. La tabla 4.3 muestra un modo de transmisión DVB-T2 que requiere aproximadamente el mismo nivel de CNR que el modo de referencia (opción 3), lo que significa básicamente un mismo nivel de cobertura, y dos modos de transmisión DVB-T2 (opción 4 y 5) que requieren casi 1 dB menos de CNR que el modo de referencia. Estas tres opciones ofrecen una misma duración del GI y por tanto una misma distancia SFN, pero con un menor overhead en la capacidad de transmisión del sistema.

En este caso, las tres opciones sugieren un incremento en el orden de modulación pasando de 16QAM a 64QAM, permitido principalmente por la mejor eficiencia de los códigos FEC como se describió en la sección anterior. La disponibilidad de PP menos densos en las tres opciones DVB-T2 propuestas permite una ganancia adicional en la capacidad de transmisión a costa de una reducción en el rendimiento en movilidad. La ganancia total en la capacidad de transmisión puede ser hasta del 70 % con la opción 3 de la tabla a expensas de una reducción de tan solo un 0.2 % de la población nacional cubierta.

Por otra parte, una ganancia del 66 % y el 54 % son obtenidas por las op-

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

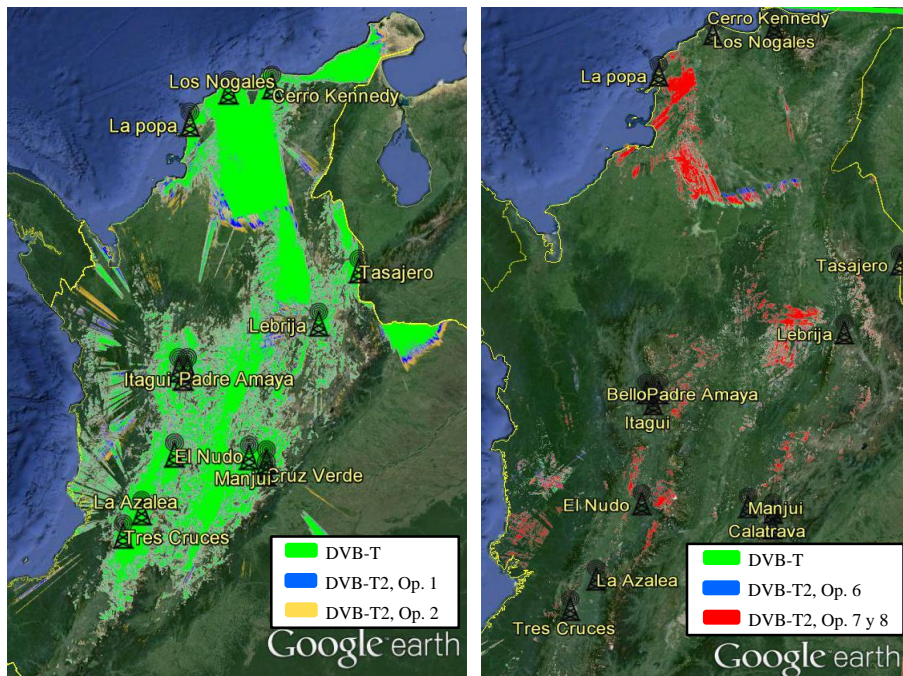


Figura 4.2: Ganancia en cobertura para recepción fija ofrecida por los modos DVB-T2 propuestos (izquierda). Áreas con auto interferencias SFN en condiciones de recepción fija (derecha).

ciones 4 y 5 respectivamente. En particular, la opción 4 ofrece una ganancia en capacidad mayor a la opción 5 pero también tiene un menor rendimiento en condiciones de recepción móvil. Esta opción 4 comparada con la opción 3, representa una reducción de la mitad de la velocidad máxima soportada por el receptor debido al hecho de reducir a la mitad la separación entre subportadoras OFDM.

### Ganancia en tamaño de red SFN

La distancia entre transmisores SFN inicialmente seleccionada por RTVC fue de 90 km la cual es la máxima permitida en un sistema DVB-T. La tabla 4.4 resume tres modos DVB-T2 que permiten mayor distancia entre transmisores y una mayor tasa de transmisión que el modo DVB-T de referencia, manteniendo aproximadamente constante el grado de robustez de la señal DVB-T2. En la tabla podemos observar que el modo DVB-T de referencia ofrece un 58.9% de

## 4.1 Transición de una red DVB-T a DVB-T2

Tabla 4.3: Modos de transmisión DVB-T2 propuestos para maximizar la capacidad de transmisión del sistema comparada con el modo DVB-T de referencia. Resultados de cobertura para recepción fija en tejados al 70 %.

Parámetro	DVB-T	DVB-T2		
	(referencia)	Opción 3	Opción 4	Opción 5
Tamaño FFT	8K	16KE	32KE	16KE
Intervalo de Guarda	1/4	1/8	1/16	1/8
Modulación	16QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Tasa de codificación	3/4	2/3	3/5	3/5
Pilot Pattern	PP1	PP3	PP4	PP3
Distancia SFN	90 km	90 km	90 km	90 km
CNR Rice	15.7 dB	16.1 dB	14.8 dB	14.8 dB
Capacidad @6MHz	11.2 Mbps	19.2 Mbps	18.5 Mbps	17.2 Mbps
Población cubierta en MFN	60.7 %	60.5 %	60.9 %	60.9 %

población cubierta en configuración SFN, lo que representa un 1.8 % menos de la obtenida con una configuración MFN de dos frecuencias. Esta reducción se debe principalmente a las zonas con auto interferencias SFN las cuales pueden ser reducidas mediante la inserción de retardos artificiales como se describe en la siguiente sección. Los resultados también mostraron que para este modo de referencia en topología SFN, aproximadamente un 1 % de la población consiguen cobertura debido a la ganancia SFN en aquellos puntos donde se recibe señal proveniente de dos o más transmisores.

Todas las opciones DVB-T2 presentadas en esta tabla incrementan el orden de modulación a 64QAM y una tasa de codificación 3/5, con el fin de obtener un incremento en la tasa de transmisión del sistema. Adicionalmente, la opción 6 habilita una distancia entre transmisores de hasta 212 km, la cual es la máxima permitida en un sistema DVB-T2, y alcanza un porcentaje de población cubierta en recepción fija del 61.4 %. Este porcentaje representa un 2.5 % más de población nacional comparado con el porcentaje del modo DVB-T de referencia en topología SFN.

Es importante resaltar que los resultados de cobertura presentados en esta sección han sido obtenidos para configuraciones SFN sin optimización de retardos artificiales. En la tabla también observamos que las opciones 7 y 8 habilitan una distancia entre transmisores de 180 km, la cual de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación son suficientes para obtener el mismo

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

Tabla 4.4: Modos de transmisión DVB-T2 propuestos para maximizar la distancia entre transmisores SFN comparada con el modo DVB-T de referencia. Resultados de cobertura para recepción fija en tejados al 70%.

Parámetro	DVB-T	DVB-T2		
	(referencia)	Opción 6	Opción 7	Opción 8
Tamaño FFT	8K	32KE	32KE	16KE
Intervalo de Guarda	1/4	19/128	1/8	1/4
Modulación	16QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Tasa de codificación	3/4	3/5	3/5	3/5
Pilot Pattern	PP1	PP2	PP2	PP1
Distancia SFN	90 km	212 km	180 km	180 km
CNR Rice	15.7 dB	15.1 dB	15.1 dB	15.1 dB
Capacidad @6MHz	11.2 Mbps	15.8 Mbps	16.2 Mbps	13.4 Mbps
Población cubierta sin retardos artificiales	58.9 %	61.4 %	61.4 %	61.4 %
Población cubierta con retardos artificiales	60.3 %	61.8 %	61.6 %	61.6 %

porcentaje de población cubierta que la red SFN de 212 km. Este efecto se debe principalmente a las características geográficas del país, la distribución de los transmisores y la robustez de los modos de transmisión DVB-T2 propuestos. En este caso, la principal ventaja de la opción 7 es una ganancia del 45 % en la tasa de transmisión. Por su parte, la principal ventaja de la opción 8 es un mejor rendimiento en movilidad, debido a que utiliza un tamaño de FFT más pequeño, pero con un aumento en capacidad de transmisión de tan solo un 20.2 %.

### Optimización de la red SFN DVB-T2 mediante retardos artificiales

Los porcentajes de población cubierta obtenidos para configuraciones SFN pueden ser optimizados desplazando las zonas de interferencia a lugar con muy baja o incluso nula concentración de población. Para realizar este desplazamiento se insertan retardos artificiales en los transmisores que varíen los tiempos de retardo relativo de las señales recibidas en determinados puntos del escenario. La metodología de cálculo de estos retardos artificiales es un proceso iterativo descrito en el anexo A y consiste básicamente en identificar la influencia de cada transmisor en las zonas de interferencia, para luego insertar un determi-



## 4.2 Provisión simultánea de servicios TDT a terminales fijos y móviles

---

nado tiempo de retardo en los transmisores con mayor efecto negativo en la estimación de la CNR. La principal ventaja de esta técnica de optimización es que su implementación no supone ningún costo para el operador ni para el usuario final.

La tabla 4.4 también presenta el porcentaje de población cubierta obtenida con la inserción de retardos artificiales en los transmisores. Ganancias entre el 0.2% y el 1.4% son obtenidas dependiendo el modo de transmisión y su distancia máxima permitida entre transmisores SFN. La gráfica derecha de la figura 4.2 muestra las áreas con auto interferencia SFN después de aplicar los retardos artificiales en las tres opciones DVB-T2 propuestas en la tabla 4.4. A mayor distancia entre transmisores SFN menor será el tamaño de las áreas de interferencia y por tanto mayor será el porcentaje de población cubierta.

## 4.2. Provisión simultánea de servicios TDT a terminales fijos y móviles

### 4.2.1. Técnicas para la transmisión simultánea en redes DVB-T2 de servicios fijos y móviles en un mismo canal RF

Las redes DVB-T2 diseñadas para recepción fija utilizan grandes tamaños de FFT y PP menos densos en orden de lograr la más alta capacidad de transmisión con suficiente robustez para recepción con antena en tejados. Por otra parte, la recepción de señales DVB-T2 a altas velocidad requiere la utilización de pequeños tamaños de FFT y PP muy densos para identificar las rápidas variaciones del canal en el dominio del tiempo.

Con el estándar DVB-T2, los operadores de TV pueden elegir el uso de múltiples PLP o el perfil T2-lite en las tramas FEF para emitir servicios a terminales fijos y móviles en un mismo canal RF. En el caso de múltiples PLP, el tamaño de la FFT y el patrón de portadoras piloto son comunes para todos los PLP transmitidos en el mismo multiplex. Por el contrario, el perfil T2-lite permite una configuración totalmente independiente de la configuración básica de DVB-T2, la cual es multiplexada en el dominio del tiempo en las tramas FEF.

Para analizar la utilización de los múltiples PLP o el perfil T2-lite, nosotros comparamos dos diferentes configuraciones en términos de eficiencia espectral. La primera configuración está basada en múltiples PLP y emplea una combinación robusta de tamaño de FFT y PP para todo el multiplex. En contraste, la segunda configuración está basada en T2-lite y alterna entre diferentes combinaciones para la eficiente transmisión de servicios fijos y móviles. Los parámetros

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

---

Tabla 4.5: Configuraciones DVB-T2 para la transmisión simultanea de servicios fijos y móviles en el mismo canal RF.

Configuración Parámetro	Configuración basada en múltiples PLPs		Configuración basada en T2-Lite	
	Fija	Móvil	Fija	Móvil
Tamaño de FFT	8K Ext.	8K Ext.	32K Ext.	8K Ext.
Intervalo guarda	1/4	1/4	1/16	1/4
PP	PP1	PP1	PP4	PP1
Constelación	256QAM	QPSK	256QAM	QPSK
Tasa de codificación	3/5	1/2	3/5	1/2

de las dos configuraciones son resumidos en la tabla 4.5. Podemos observar que los servicios fijos y móviles tienen la misma robustez en cualquiera de las dos configuraciones y también la misma duración del intervalo de guarda.

La eficiencia espectral total de un canal RF que combina servicios fijos y móviles por medio de múltiples PLP,  $S_{PLP}$ , puede ser aproximada por:

$$S_{PLP} \approx \frac{N_d}{N_c} \cdot (1 - G) \cdot (T_f \cdot B_f + T_m \cdot B_m), \quad (4.1)$$

donde  $N_c$  es el número total de sub-portadoras por símbolo OFDM,  $N_d$  es el número de sub-portadoras con datos útiles de información por símbolo,  $G$  es la fracción del intervalo de guarda,  $B_f$  es el número de bits por celda en el caso de servicios fijos,  $B_m$  es el número de bits por celda en el caso de servicios móviles,  $T_f$  y  $T_m$  son las porciones de tiempo dedicadas a servicios fijos y móviles, respectivamente. Por su parte, para el caso del perfil T2-lite, la eficiencia espectral total puede ser calculada mediante:

$$S_{Lite} \approx \frac{N_d^f}{N_c^f} \cdot (1 - G_f) \cdot T_f \cdot B_f + \frac{N_d^m}{N_c^m} \cdot (1 - G_m) \cdot T_m \cdot B_m, \quad (4.2)$$

donde  $N_c^f$ ,  $N_d^f$ ,  $G_f$ ,  $N_c^m$ ,  $N_d^m$ , y  $G_m$  son el número de sub-portadoras por símbolo OFDM, el número de sub-portadoras con datos de información por símbolo OFDM y el intervalo de guarda en el caso de servicios fijos y móviles, respectivamente. Es importante resaltar que en las ecuaciones no está incluido el tiempo necesario para la señalización L1, el cual representa menos de 1% del total de tiempo de transmisión y por lo tanto su impacto en los cálculos es mínimo. Asumiendo que el tiempo reservado para servicios fijos es del 80% ( $T_f = 0,8$ ) y que el 20% es dedicado a servicios móviles ( $T_m = 0,2$ ), la eficiencia

## 4.2 Provisión simultánea de servicios TDT a terminales fijos y móviles

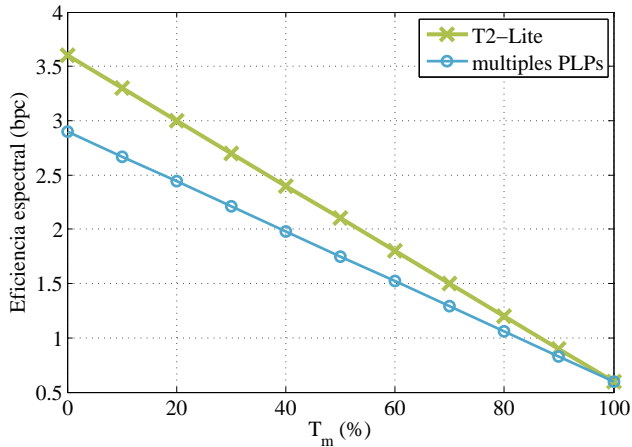


Figura 4.3: Eficiencia espectral de DVB-T2 utilizando múltiples PLPs o T2-lite para la transmisión simultánea de servicios fijos y móviles.

espectral para la solución de múltiples PLP es aproximadamente 2.3 bps y de 3 bps para la configuración de T2-lite. Esto representa una ventaja del 30 % para la solución de T2-lite.

La figura 4.3 representa la eficiencia espectral de redes DVB-T2 utilizando múltiples PLP o T2-lite en función del porcentaje de tiempo dedicado a la transmisión de servicios móviles. Se puede observar que la mayor efectividad del perfil T2-lite, comparado con múltiples PLP, disminuye a medida que los servicios móviles ocupan un mayor porcentaje del tiempo de transmisión. El rendimiento de las dos soluciones llega a ser el mismo cuando el tiempo dedicado para los servicios móviles es del 100 % ( $T_m = 1$ ).

### 4.2.2. Comparación del rendimiento de DVB-T2 en movilidad entre sistemas con canalización 6 y 8 MHz

El rendimiento en movilidad de un sistema DVB-T2 depende principalmente de la separación entre las sub-portadoras OFDM, la cual es definida por el tamaño de la FFT y el ancho de banda del canal RF. A mayor separación entre sub-portadoras, mayor es la frecuencia Doppler soportada por el sistema, la cual a su vez determina la velocidad máxima de desplazamiento del usuario permitida para una correcta decodificación.

La figura 4.4 compara el rendimiento en movilidad de un sistema DVB-T2 en canalización 6 MHz y 8 MHz utilizando diferentes tamaños de FFT. Los re-

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

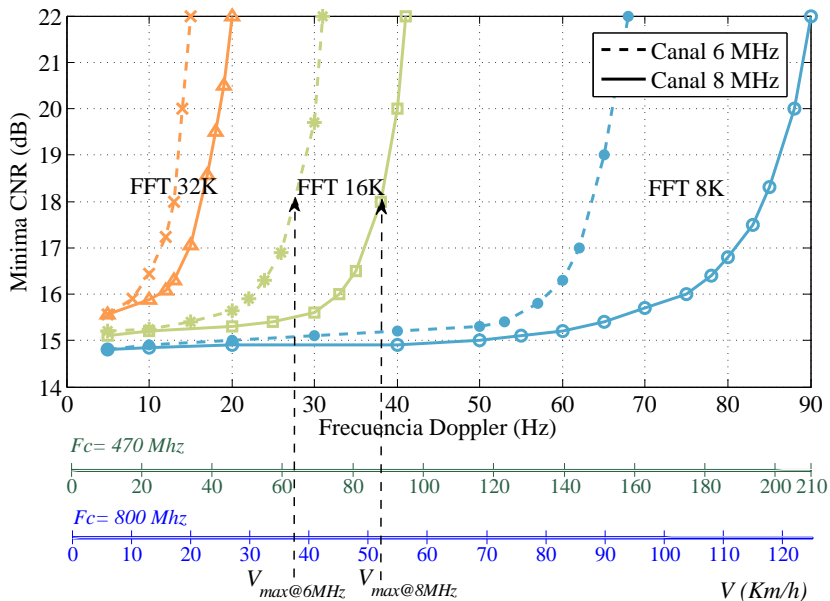


Figura 4.4: Rendimiento de DVB-T2 en movilidad con canalización 6 MHz y 8 MHz. Modo de transmisión 64QAM, CR 1/2, LDPC 16K, estimación de canal ideal.

sultados han sido obtenidos mediante simulaciones en un canal TU6 y permiten establecer el nivel mínimo de CNR requerido para una correcta decodificación en función de la frecuencia Doppler. Con el fin de evaluar concretamente el efecto en movilidad del ancho de banda del canal y el tamaño de la FFT se ha utilizando estimación de canal ideal en la etapa de recepción. En la simulaciones se ha utilizando entrelazado temporal intra-trama con la duración máxima permitida por la configuración DVB-T2 en los diferentes casos de evaluación.

De la gráfica podemos observar que para un mismo nivel de CNR, la correcta decodificación de la señal DVB-T2 depende del tamaño de FFT, el ancho de banda del canal y la velocidad instantánea del receptor. A mayor tamaño de FFT menor es la frecuencia Doppler máxima permitida para el sistema, conservando aproximadamente una relación lineal entre el numero de portadoras y la máxima frecuencia Doppler, ej.: un sistema con el doble de portadoras, permite la mitad de la frecuencia Doppler.

Comparando los resultados en canalización 6 MHz y 8 MHz, podemos observar que la diferencia en la máxima frecuencia Doppler soportada es proporcional a la relación 6/8 existente entre estos dos anchos de banda, es decir, la velocidad máxima permitida en un sistema con canalización 6 MHz es el 75 %

## 4.2 Provisión simultánea de servicios TDT a terminales fijos y móviles

---

de la máxima permitida en un sistema de 8 MHz. Estableciendo como límite de frecuencia Doppler aquella que aumenta el mínimo nivel de CNR @ 5Hz en solo 3 dB y tomando como frecuencia central la más baja de la banda asignada para TDT en la mayoría de países que han adoptado DVB-T2 (470 MHz), podemos observar que la máxima velocidad del usuario es 64 km/h y 86 km/h para un tamaño de FFT 16K y canalización de 6 MHz y 8 MHz, respectivamente. Finalmente podemos observar que el tamaño de FFT 32K no ofrece un rendimiento adecuado para recepción móvil, pues tan solo soporta velocidades hasta de 40 km/h en la frecuencia más baja de la TDT y canalización 8 MHz.

### 4.2.3. Técnicas de diversidad en DVB-T2 para mejorar el rendimiento en movilidad

#### Rendimiento de DVB-T2 utilizando diversidad temporal y espacial.

El rendimiento del entrelazado temporal de capa física de DVB-T2 combinado con la utilización de técnicas de diversidad espacial (SIMO y MISO Alamouti) en canales con fast fading es presentado en la figura 4.5. Los resultados han sido obtenidos mediante simulaciones de dos canales TU6 con un factor constante de  $\rho=0.7$ . Con el fin de tener en cuenta el máximo rendimiento del estándar, hemos seleccionado el máximo número de sub-slices que es posible para cada configuración.

Los resultados presentados en el lado izquierdo corresponden al rendimiento de DVB-T2 utilizando duraciones de entrelazado temporal en el rango de 100 ms a 1 s (4 tramas). En esta gráfica podemos observar que las ganancias ofrecidas solo por el entrelazado temporal están entre 1 y 2 dB, y que esta ganancia se ve reducida aproximadamente en 0.5 dB al utilizar conjuntamente múltiples antenas en el sistema DVB-T2. Estas ganancias permanecen prácticamente constante para los diferentes tiempos de entrelazado de capa física evaluados. La gráfica de la derecha resume las ganancias que pueden ser logradas con la utilización combinada del entrelazado temporal y las diferentes técnicas de diversidad espacial en canales con fast fading.

Los resultados muestran que la utilización de SIMO en DVB-T2 puede ofrecer importantes ganancias (hasta 6 dB) en términos de mínima CNR debido a la combinación de ganancia por diversidad y por arreglo de antenas. Por su parte, la ganancia ofrecida por SIMO Alamouti es menos significativa (tan solo hasta 2 dB), pero puede considerarse alta comparada con la ofrecida por las técnicas de diversidad de antenas en transmisión de DVB-T tales como PD o DD (tan solo 1 dB). Este efecto debido principalmente a que los códigos Alamouti permiten una óptima reducción del fading en la etapa de recepción. Sin embargo es importante resaltar que la utilización de MISO Alamouti implica

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

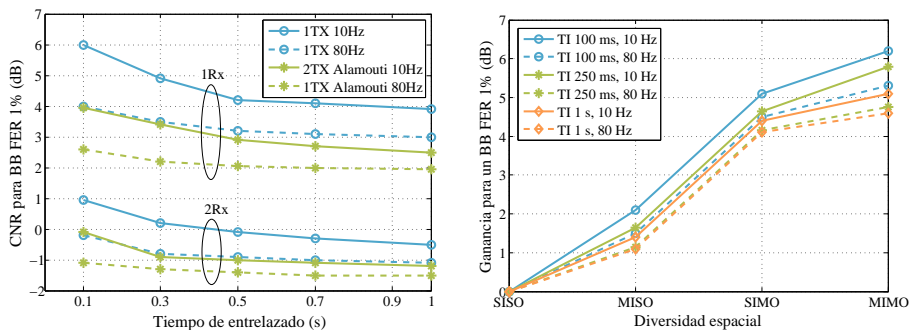


Figura 4.5: Rendimiento de DVB-T2 utilizando entrelazado temporal de capa física y diversidad espacial en canales con fast fading. En la izquierda, entrelazado temporal con duraciones hasta de 1 s en canal TU6. En la derecha, ganancia en mínima CNR por la utilización conjunta de diversidad temporal y espacial.

un reducción en tasa binaria efectiva del sistema debido a la transmisión de portadoras piloto adicionales. Asumiendo la utilización del PP más denso de los disponibles en DVB-T2 (PP1), la pérdida de capacidad es del orden de 0.08 %.

Por otra parte, la figura 4.6 muestra el rendimiento del entrelazado temporal de capa física de DVB-T2 combinado con técnicas de diversidad espacial en canales con fast fading y la presencia de shadowing ( $\sigma = 5,5dB$  y  $d_{corr} = 20m$ ). La gráfica de la izquierda corresponde al rendimiento de DVB-T2 utilizando entrelazados temporales largos (hasta de 10 s) que permitan combatir efectivamente el efecto shadowing. Podemos observar que en este tipo de canales que emulan muy cercanamente el comportamiento de un receptor en movilidad, la ganancia ofrecida por el entrelazado temporal y una configuración SISO puede ser hasta de 9 dB dependiendo del Doppler. Esta ganancia puede considerarse similar a la ofrecida por AL-FEC en un sistema DVB-T (ver figura 3.3) con igual eficiencia espectral, pero sin penalizar la capacidad de transmisión del sistema.

La gráfica de la derecha resume las ganancias que pueden ser logradas con la utilización combinada del entrelazado temporal y las diferentes técnicas de diversidad espacial en canales con fast fading y shadowing ( $\sigma = 5,5dB$  y  $d_{corr} = 20m$ ). Comparando con la figura 4.5, la mejora en CNR lograda por múltiples antenas es significativamente menor que la ofrecida en canales únicamente con fast fading, debido a los adicionales desvanecimientos de la señal introducidos por el shadowing. La ganancia introducida por diversidad de antenas en recepción (alrededor de 4 dB) es mayor que la ofrecida por la diversidad en transmisión (aproximadamente 1 dB). Aunque la transmisión MISO Alamouti logra un mejor rendimiento comparada con las técnicas PD o DD en

## 4.2 Provisión simultánea de servicios TDT a terminales fijos y móviles

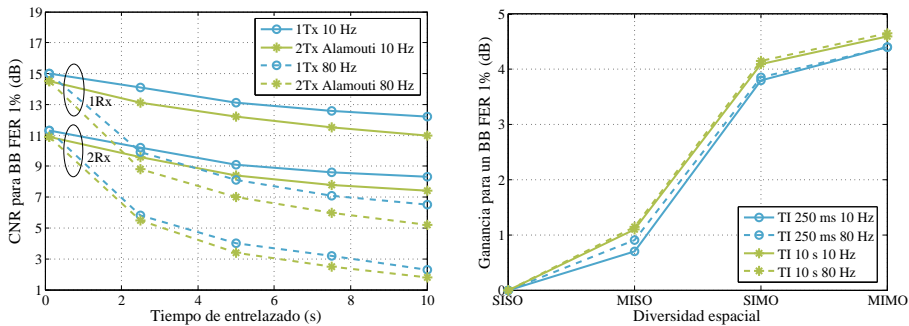


Figura 4.6: Rendimiento de DVB-T2 utilizando entrelazado temporal de capa física y diversidad espacial en canales con fast fading y shadowing ( $\sigma = 5,5dB$  y  $d_{corr} = 20m$ ). En la izquierda, entrelazado temporal con duraciones hasta de 10 s en canal TU6. En la derecha, ganancia en mínima CNR por la utilización conjunta de diversidad temporal y espacial.

DVB-T, la ganancia sobre un sistema SISO es muy pequeña, especialmente si también se tiene en cuenta la pérdida en la capacidad de transmisión debido a las portadoras piloto adicionales.

Es importante resaltar que tiempos de entrelazado superiores a 1 s no son viables en DVB-T2 debido a las limitaciones en términos de memoria y tiempo de zapping, por lo tanto los resultados presentados en esta sección solo tienen un carácter orientativo. Sin embargo, al igual que en DVB-T y como se describe en la sección 2.3.1, la técnica AL-FEC permite la implementación de tiempos de entrelazado muy largos (varios segundos) de una forma transparente para la capa física y con la posibilidad de implementar técnicas de fast zapping.

### Rendimiento de AL-FEC en sistemas DVB-T2

Los mecanismos AL-FEC pueden ser introducidos en DVB-T2 para sobrellevar las limitaciones de la capa física en términos de memoria y tiempo de zapping cuando se desean largos tiempos de entrelazado temporal. En este caso, la idea es combinar la potente protección de la capa física frente al ruido y el fast fading, con los largos tiempos de entrelazado temporal que pueden ser configurados en capas superiores para combatir el efecto shadowing principalmente.

AL-FEC puede ser implementado únicamente en los PLP orientados a movilidad, resultando totalmente transparentes para los receptores domésticos que decodifiquen los PLP con servicios orientados a recepción fija. Con el fin de optimizar el rendimiento de esta combinación, la duración del tiempo de entrelazado de la capa física debe ser del orden de cientos de milisegundos, mientras

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

---

para la duración del entrelazado de las capas superiores debe ser del orden de uno o varios segundos. En general, el mecanismo AL-FEC descrito en la sección 2.3.1 puede ser implementado para proteger paquetes TS en DVB-T2.

La figura 4.7 muestra el rendimiento de AL-FEC para un sistema DVB-T2 en un canal TU6 con shadowing ( $\sigma = 5,5dB$  y  $d_{corr} = 20m$ ). Los resultados han sido obtenidos mediante simulaciones para un sistema 16QAM CR 1/2 en capa física y diferentes tasas de codificación y tiempos de entrelazado en capa de aplicación. Las simulaciones combinan la utilización de entrelazado temporal intra trama y sub-slicing en la capa de aplicación con entrelazado temporal inter-trama por medio de AL-FEC. La longitud de cada trama T2 ha sido seleccionada de 250 ms y por tanto el rango de la figura es desde 1 trama (250ms) hasta 40 tramas (10 s).

De acuerdo a los resultados, la ganancia de AL-FEC es similar a la ganancia obtenida por el entrelazado temporal de capa física (4-9 dB), aunque en este caso la ganancia implica una reducción en tasa binaria efectiva debido a la transmisión de los datos de paridad AL-FEC. Comparando estos resultados con los presentados en la figura 4.6, los cuales fueron obtenidos para QPSK CR 1/2, podemos observar que la combinación de 16QAM CR 1/2 en capa física con AL-FEC habilita la decodificación de la señal DVB-T2 con menor nivel de CNR (<15 dB) para la misma o mejor eficiencia espectral. Esto significa que dependiendo de la velocidad del usuario, la utilización de AL-FEC en DVB-T2 puede ser preferible a una configuración más robusta de modulación y tasa de codificación de la capa física. En este caso las principales ventajas de utilizar AL-FEC son el uso más eficiente de la memoria y la posibilidad de usar técnicas de fast zapping.

### Comparación del rendimiento de DVB-T y DVB-T2

En la figura 4.8 comparamos el rendimiento de DVB-T y DVB-T2 en un modelo de canal TU6 para una eficiencia espectral de 1 bpc, concretamente 16QAM, CR 1/2, AL-FEC 1/2 para DVB-T y QPSK CR 1/2 para DVB-T2. El criterio de calidad utilizado es Block Error Rate (BLER) 1%, el cual corresponde a TSPER 1% y Base Band Frame Error Rate (BB-FER) 1% en el caso de DVB-T y DVB-T2 respectivamente. La duración mínima evaluada para DVB-T2 fue de 100 ms ya que esta es la duración de entrelazado más baja utilizada en las redes de TDT. Largos entrelazos temporales fueron simulados con sub slicing y entrelazado inter trama. Adicionalmente, se presenta en la figura el límite de Shannon [70] del rendimiento de DVB-T2 en un canal TU6 para una eficiencia espectral de 1 bpc y una probabilidad objetivo de error del 1%.

En parte izquierda de la gráfica podemos observar que el rendimiento de



## 4.2 Provisión simultánea de servicios TDT a terminales fijos y móviles

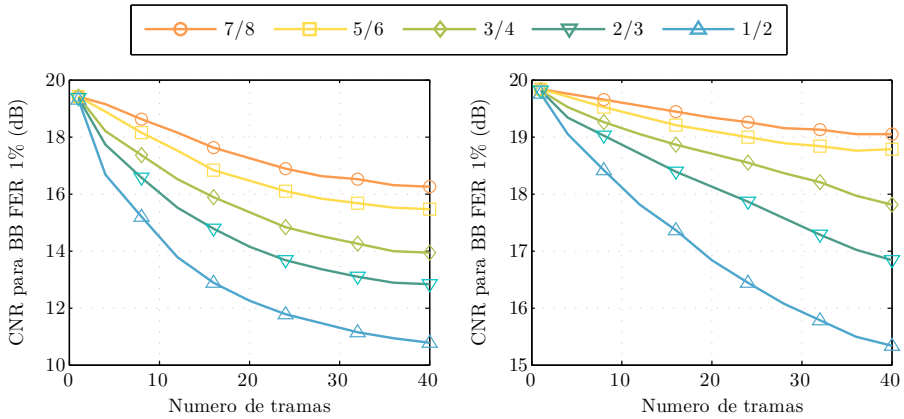


Figura 4.7: Rendimiento de AL-FEC en función del tiempo de protección y diferentes tasas de codificación para un sistema DVB-T2 16QAM CR 1/2 en capa física. Canal TU6 con shadowing ( $\sigma = 5,5dB$  y  $d_{corr} = 20m$ ) y frecuencia Doppler 80 hz (izquierda) y 10 hz (derecha).

DVB-T2 está entre 6 y 7 dB menos del requerido por el sistema DVB-T y es aproximadamente 2 dB cercano al límite teórico del canal con fast fading. La principal razón del bajo rendimiento de DVB-T es la ausencia del entrelazado temporal de capa física, el cual ha de ser implementado en capas de aplicación mediante AL-FEC, y el más bajo rendimiento de los mecanismos FEC de capa física (CC+RS) comparados con los utilizados en DVB-T2 (LDPC+BCH).

En la parte izquierda de la gráfica también podemos observar que la configuración DVB-T con 16QAM, CR 1/2 y AL-FEC 1/2 no consigue un rendimiento mejor al de una configuración sin AL-FEC con la misma eficiencia espectral (QPSK, CR 1/2, la cual necesita un nivel de CNR de 9.5 dB). Por lo tanto, se puede afirmar que en escenarios con fast fading, la utilización de AL-FEC en DVB-T no resulta en una ganancia significativa en CNR para la misma eficiencia espectral, y por el contrario resulta en una degradación del sistema. Para una configuración similar DVB-T y DVB-T2 (QPSK CR 1/2), el entrelazado temporal de capa física (hasta 1 s) y la mejor eficiencia de los códigos FEC ofrecen una ganancia en CNR de hasta 5.5 dB al sistema DVB-T2.

En la parte derecha de la figura 4.8 se compara el rendimiento de DVB-T y DVB-T2 en un canal TU6 con fast fading y shadowing ( $\sigma = 5,5dB$  y  $d_{corr} = 20m$ ). Tanto en DVB-T como en DVB-T2, largas duraciones de entrelazado temporal (hasta 10 s) pueden ofrecer grandes reducciones en el mínimo nivel de CNR (entre 10 y 11 dB) en presencia de shadowing, especialmente en escenarios de alta velocidad. Adicionalmente, el rendimiento de DVB-T2 es hasta 7 dB

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

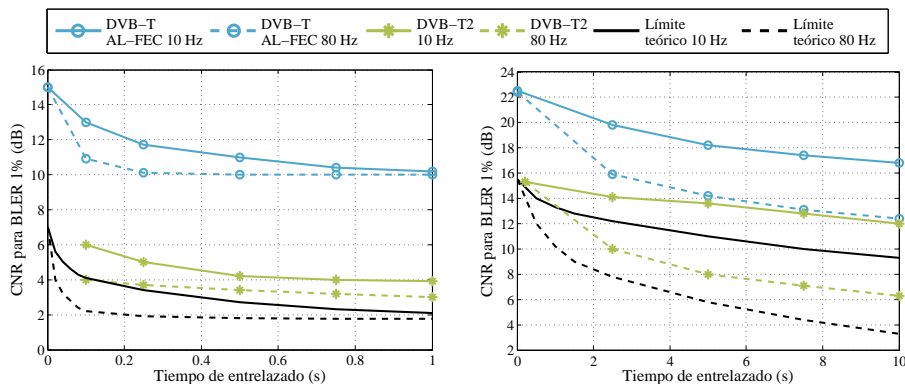


Figura 4.8: Comparación del rendimiento entre DVB-T (16QAM, CR 1/2 y AL-FEC 1/2) y DVB-T2 (QPSK, CR 1/2) en un modelo de canal TU6. resultados sin shadowing en la izquierda y con presencia de shadowing en la derecha.

mejor que DVB-T con AL-FEC y aproximadamente a 3 dB del límite teórico. Por otra parte podemos observar que una configuración DVB-T con 16QAM, CR 1/2 y AL-FEC 1/2 mejora el rendimiento de una configuración sin AL-FEC con la misma eficiencia espectral (QPSK, CR 1/2, la cual necesita un nivel de CNR de 17 dB en un canal con shadowing). En este caso, la utilización de AL-FEC puede llegar a ofrecer una ganancia de hasta 5 dB cuando se configuran largos tiempos de entrelazado.

### 4.3. Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2

Adicional a la mejora en robustez y/o capacidad de transmisión, DVB-T2 ofrece una alta flexibilidad de configuración/operación, lo cual abre una amplia variedad de nuevas oportunidades de negocios tales como la regionalización. Las soluciones tecnológicas en DVB-T2 para la transmisión de contenidos nacionales y regionales en redes SFN están basadas en la técnica de múltiples PLPs o en la utilización de los flujos auxiliares de la trama DVB-T2.

La idea principal de la solución basada en múltiples PLPs es insertar un servicio regional en un multiplex de TDT nacional reemplazando el contenido de un predefinido PLP nacional por uno con contenido regional. En este sentido, cada región emitirá su propio multiplex DVB-T2 compuesto por servicios nacionales comunes para todas las regiones y servicios regionales/locales diferentes entre LSAs.

## **4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2**

La segunda solución para inserción de contenidos regionales en redes SFN consiste en utilizar los flujos auxiliares de la trama DVB-T2 para transmitir contenidos regionales en cada LSA. Estos flujos junto con las celdas dummy han sido definidos en DVB-T2 para completar la capacidad de cada trama después de insertar los diferentes tipos de PLP y pueden ser diferentes en cada transmisor de la SFN [54]. El total del número de sub-portadoras utilizadas por los flujos auxiliares y las celdas dummy no puede exceder el 50% de las portadoras totales del sistema. La información requerida para la correcta decodificación de estos flujos es transmitida en la señalización de capa física de DVB-T2 junto con la información de los diferentes PLPs.

### **4.3.1. Arquitecturas para la transmisión de servicios locales en redes SFN**

Dependiendo del lugar en la etapa de transmisión donde se realice la inserción del contenido local, ya sea utilizando la solución de múltiples PLPs o de flujos auxiliares, se pueden definir tres arquitecturas para la inserción de contenidos locales en redes SFN DVB-T2: nacional, regional o local.

En la arquitectura nacional, los contenidos regionales son combinados con los nacionales en la cabecera central de transmisión como se muestra en la figura 4.9. En este caso, cada canal regional provee su contenido a la cabecera central para crear el multiplex (MUX) DVB-T2 a emitir en cada LSA. Para cada región, un gateway T2 construye el MUX con contenido nacional y regional utilizando cualquiera de las dos técnicas de inserción de contenidos regionales (múltiples PLP o flujos auxiliares). Luego, cada uno de estos MUX es enviado a las diferentes regiones a través de redes de distribución satélite, microondas, fibra óptica, etc. utilizando el protocolo propio de T2 para la comunicación entre gateway y transmisores, T2 Modulator Interface (T2-MI). Aunque esta solución es relativamente sencilla, su principal desventaja es el hecho de replicar el contenido nacional en las redes de distribución tantas veces como regiones existan en la red SFN, lo cual incrementa significativamente la tasa de transmisión y los gastos de utilización de estas redes.

En la arquitectura regional, la inserción de los contenidos regionales se realiza en su respectiva cabecera de transmisión. Cada una de sus cabeceras recibe el contenido nacional y agrega su contenido regional para crear el MUX DVB-T2, como se muestra en la figura 4.10. Posteriormente, este MUX es distribuido a todos los transmisores que conforman su red SFN utilizando el protocolo T2-MI. El principal inconveniente de este modelo es el uso de dos canales de distribución (de la cabecera central a las cabeceras regionales, y de las cabeceras regionales a los transmisores) y la réplica del contenido nacional en la red secundaria de distribución de cada región.

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

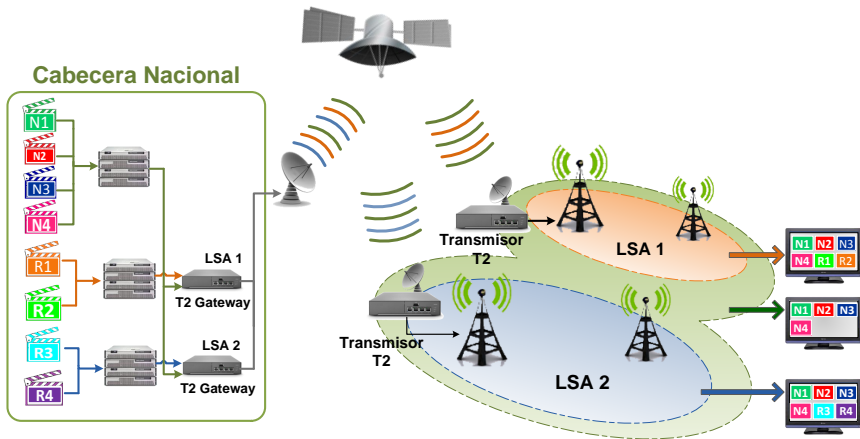


Figura 4.9: Arquitectura nacional para la inserción de contenidos regionales/locales en redes SFN DVB-T2.

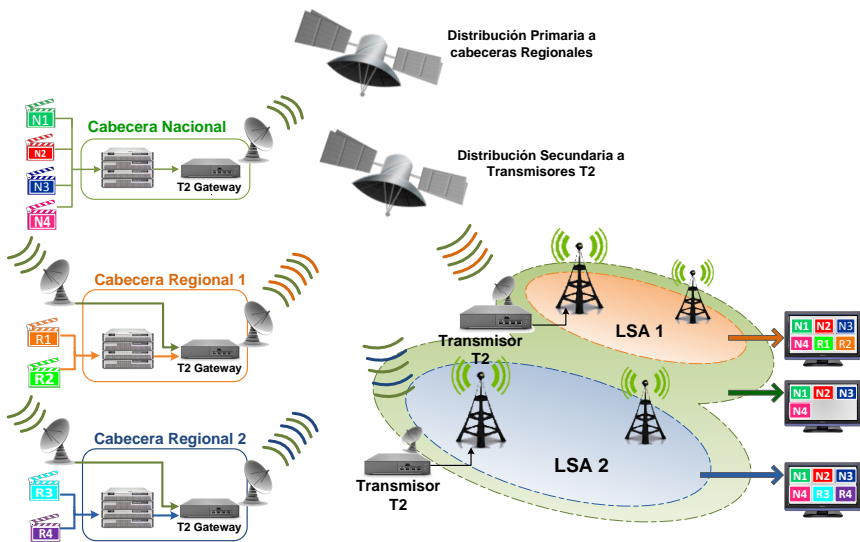


Figura 4.10: Arquitectura regional para la inserción de contenidos regionales/locales en redes SFN DVB-T2.

Finalmente, en la arquitectura local mostrada en la figura 4.11, el gateway T2 de la cabecera nacional genera un MUX con los contenidos nacionales en sus específicos PLP e inserta un contenido nulo en la parte dedicada a los servicios

### 4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2

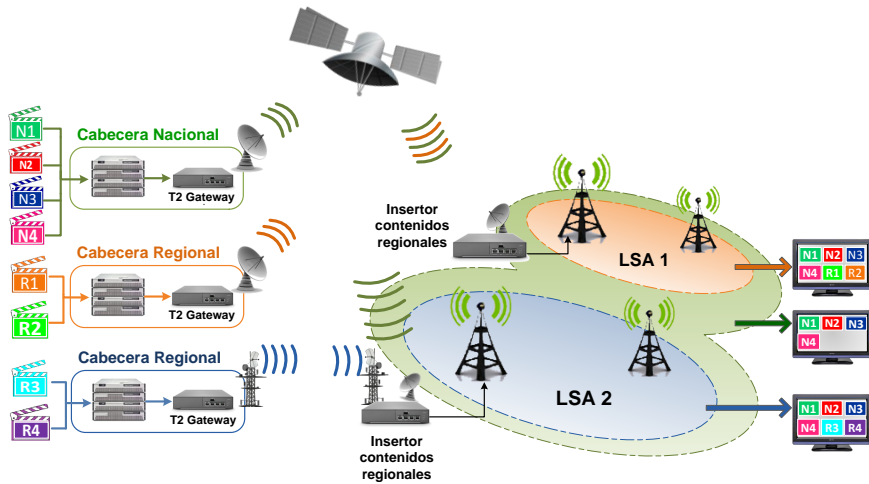


Figura 4.11: Arquitectura local para la inserción de contenidos regionales/locales en redes SFN DVB-T2.

regionales, el cual será posteriormente reemplazado en cada estación de transmisión. El contenido regional es generado centralizadamente, regionalmente o localmente a través de un gateway T2 dedicado. En cada estación transmisora, un determinado insertor de contenidos locales (llamado de aquí en adelante T2 edge), recibe el flujo T2-MI proveniente del gateway nacional y el flujo T2-MI del gateway regional. Posteriormente, el T2 edge identifica las tramas banda base de los flujos marcados como regionales (PLP o flujo auxiliar) que vienen en los paquetes del flujo T2-MI nacional para reemplazarlos por las tramas banda base recibido en el flujo T2-MI regional. De esta forma se realiza un adecuado reemplazo de contenidos en cada estación transmisora manteniendo las características SFN a los contenidos de carácter nacional. La principal ventaja de este modelo es la reducción en los gastos de distribución de los contenidos debido a que evita que los contenidos nacionales sean replicados en dichas redes.

#### Aspectos de implementación

En el momento de realizar el reemplazo de un contenido por otro dentro de un MUX de DVB-T2 es necesario actualizar las tablas PSI/SI, las cuales transportan información necesaria para la decodificación de cada servicio y la presentación de la Electronic Program Guide (EPG) al usuario. En las arquitecturas nacionales y regionales anteriormente descritas, la generación/actualización de

## **CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2**

---

las tablas PSI/SI se realiza en los gateway regionales, los cuales generan el MUX T2 final que será emitido en cada LSA. Para el caso de la arquitectura local, la actualización de las tablas PSI/SI se realiza en el T2 edge, el cual debe identificar correctamente la ubicación de dichas tablas dentro del MUX nacional y actualizarlas con la información de los servicios regionales que se desean insertar. Es necesario garantizar como mínimo la actualización de las tablas Program Association Table (PAT), Program Map Table (PMT) y Network Information Table (NIT) para que un receptor comercial DVB-T2 pueda demultiplexar y decodificar correctamente los flujos MPEG-2 TS de cada servicio contenido en el MUX [71].

Los parámetros de transmisión tales como esquema de modulación, tasa de codificación y entrelazado temporal de los PLP o los flujos auxiliares dedicados a servicios regionales deben ser los mismos en todas las LSA, con el fin de garantizar que los símbolos P2 de la trama T2 sean siempre iguales en toda la red SFN. Estos símbolos P2 contienen información para la correcta decodificación de todos los PLP tanto nacionales como regionales, y por tanto su alteración en cualquier transmisión podría afectar la correcta recepción de los contenidos nacionales. Cuando se utiliza la solución de flujos auxiliares es necesario señalar dichos flujos en los respectivos campos del símbolo P2 de la trama T2, siguiendo la metodología descrita en las guías de implementación de DVB-T2 [41]. Estos flujos auxiliares siempre son insertados después de los PLP del tipo 2 y antes de las celdas dummy.

### **4.3.2. Resultados medidas de laboratorio y simulaciones**

Teniendo en cuenta que las sub-portadoras de los PLP dedicados a servicios regionales y las sub-portadoras disponibles para los flujos auxiliares serán los mismos en todas las LSA, el rendimiento en términos de mínimo nivel de CNR y márgenes de protección en función de la diferencia de potencia entre señales DVB-T2 es el mismo para las dos soluciones. Por lo tanto, los resultados presentados a continuación son válidos para la planificación de redes SFN con servicios nacionales y regionales/locales utilizando cualquiera de las dos soluciones técnicas.

Los resultados presentados en esta sección han sido obtenidos mediante medidas de laboratorio siguiendo la metodología descrita en el Anexo A, y simulaciones computacionales para el caso de la técnica de transmisión MISO Alamouti. Básicamente se ha emulado el funcionamiento de dos transmisores SFN adyacentes en canales Rice F1, Rayleigh P1 y TU6 [68] incorrelados con un retardo relativo de 0.9 veces el intervalo de guarda del sistema emulando el efecto de ruptura del principio de la SFN, el cual corresponde al caso más restrictivo de combinación de señales SFN. Para el canal TU6 se utilizó una

### **4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2**

frecuencia Doppler de 27 Hz, la cual corresponde a 60 km/h para una frecuencia de operación de 500 MHz.

El rendimiento de los servicios globales y locales ha sido evaluado en términos de la mínima CNR requerida para correcta recepción en función de la diferencia de potencia existente entre los dos transmisores (representado diferentes posiciones del receptor dentro de la red SFN). La potencia total de transmisión usada en la red ha sido normalizada a 1 en todas las mediciones. Los resultados obtenidos pueden ser extendidos a más de dos transmisores considerando las señales de las otras LSA como útiles o interferencias según el tipo de servicio a evaluar.

#### **Rendimiento de los servicios globales en SFN clásica**

Los PLP que transportan servicios nacionales mantienen todos los beneficios de las redes SFN para sobrellevar recepciones multitrayecto. La figura 4.12 muestra el mínimo nivel de CNR requerido para correcta recepción de los PLP nacionales en función de la diferencia de potencia PI entre transmisores SFN adyacentes. Las señales transmitidas desde los dos transmisores DVB-T2 son exactamente iguales y emitidas en la misma frecuencia, creando una red SFN clásica. Podemos observar que el mínimo nivel de CNR para cualquier modelo de canal (Rice F1, Rayleigh P1 o TU6) se establece en las cercanías de los transmisores donde la influencia de otro transmisor es prácticamente despreciable. Este nivel de CNR sufre una penalización a medida que la diferencia entre los niveles de potencia de las señales recibidas disminuye, llegando a ser hasta de 2.3 dB en el canal Rice cuando los niveles de potencia son iguales ( $PI=0$ ). Este efecto es causado por los profundos desvanecimientos en frecuencia de la señal resultante cuando se combinan dos señales OFDM con retardos y niveles de potencia muy parecidos. De la gráfica también podemos observar que esta penalización es menor en el modelo de canal TU6 donde la diversidad temporal entre canales reduce la probabilidad de sufrir fuertes desvanecimientos de la señal en un mismo instante de tiempo.

Es importante resaltar que este rendimiento en términos de CNR será el mismo para la solución técnica simulcast que también opera en configuración SFN, lo que significa una misma cobertura para los servicios globales utilizando cualquiera de las soluciones técnicas de inserción de contenidos locales.

#### **Rendimiento de los servicios globales en SFN con MISO Alamouti**

La técnica de transmisión MISO distribuido incluida en DVB-T2 utiliza una adaptación del código Alamouti entre un par de grupos de transmisores para combinar las señales de una forma óptima, reduciendo la penalización en CNR

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

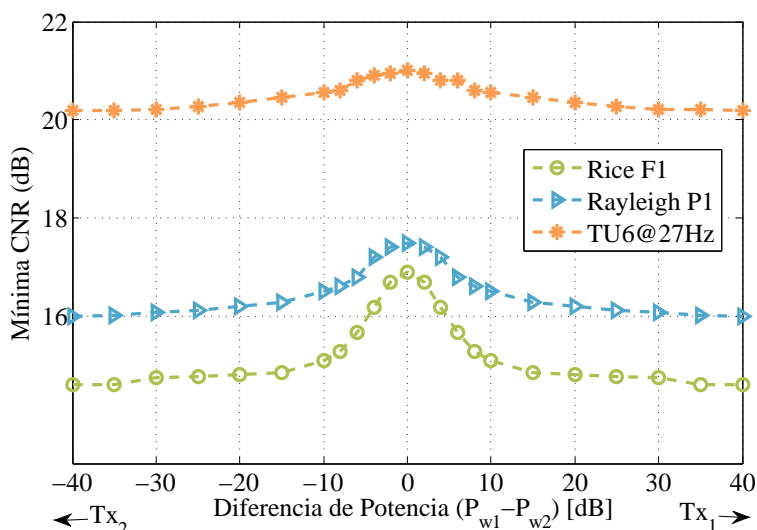


Figura 4.12: Rendimiento de un sistema DVB-T2 en configuración SFN clásica (64QAM, CR 2/3) en canales TU6 incorrelados.

generada por los profundos desvanecimientos de la respuesta en frecuencia del canal. Esta técnica también puede mejorar el rendimiento en escenarios sin visión directa como resultado de una mejor diversidad. La principal ventaja de MISO Alamouti es el aumento de la robustez de la señal resultante en redes SFN sin la necesidad infraestructura adicional. Sin embargo, es importante resaltar que la implementación de MISO Alamouti requiere una mayor densidad de portadoras piloto para la estimación de canal de los dos grupos de transmisores, reduciendo la eficiencia espectral del sistema.

La figura 4.13 muestra la ganancia en términos de CNR ofrecida por la transmisión MISO Alamouti para un sistema QPSK, CR 1/2 en canales TU6, comparada con una configuración SFN clásica como la evaluada en la sección anterior. Esta ganancia ha sido evaluada para diferentes tiempos de retardo relativo expresados como una fracción del intervalo de guarda del sistema ( $\Delta GI$ ) y diferentes niveles de potencia entre señales. Las ganancias han sido evaluadas mediante simulaciones en dos canales TU6 incorrelados asumiendo un entrelazado temporal de 250 ms y cada uno teniendo un único valor de retardo y nivel de potencia. En la figura podemos observar que la máxima ganancia por MISO Alamouti en este sistema DVB-T2 es de tan solo 1 dB y se consigue cuando no existe retardo relativo o diferencia de potencia entre las señales. La diferencia en niveles de potencia reduce la diversidad de señales, en tanto que



### 4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2

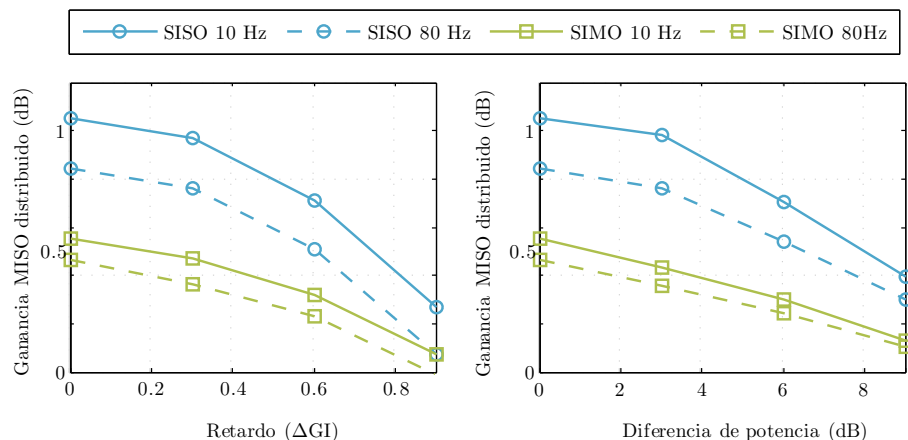


Figura 4.13: Ganancia por transmisión en MISO Alamouti de un sistema DVB-T2 (QPSK, CR 1/2). Configuración SFN de dos canales TU6 con retardo relativo (izquierda) y diferencia en niveles de potencia (derecha) entre señales de diferentes transmisores.

no se cuenta con suficiente contribución de un transmisor a la señal resultante.

Por otra parte, la recepción de señales en SFN retardadas es similar a la utilización de técnicas como DD o PD en transmisión que ofrecen una mejor diversidad frecuencial como resultado de un incremento en el perfil de retardos de la señal resultante. Sin embargo, esto es una desventaja en el caso de la transmisión MISO Alamouti debido a que rápidas variaciones de las sub-portadoras en el dominio de la frecuencia pueden reducir el rendimiento del código Alamouti. La recepción con alta frecuencia Doppler o la implementación de SIMO en receptores también reducen la mejora de MISO Alamouti debido a la mejor diversidad en tiempo y espacio que introducen. Como se muestra en la figura 4.13, la ganancia por MISO Alamouti puede ser despreciable en algunos casos, incluso puede llegar a ser negativa, resultando en una pérdida de rendimiento comparada con el rendimiento en SFN clásica.

#### Rendimiento de los servicios locales reutilizando PLPs dedicados en cada LSA

En los PLP dedicados a servicios locales cada grupo de transmisores que forman la LSA emiten su propio contenido local/regional en el área de interés, siendo señales totalmente diferentes y por tanto interferentes entre LSAs. El mínimo nivel de CNR requerido para correcta decodificación del servicio local depende del modelo de canal de propagación y del nivel de señal interferente recibida de los transmisores adyacentes como se muestra en la gráfica izquier-

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

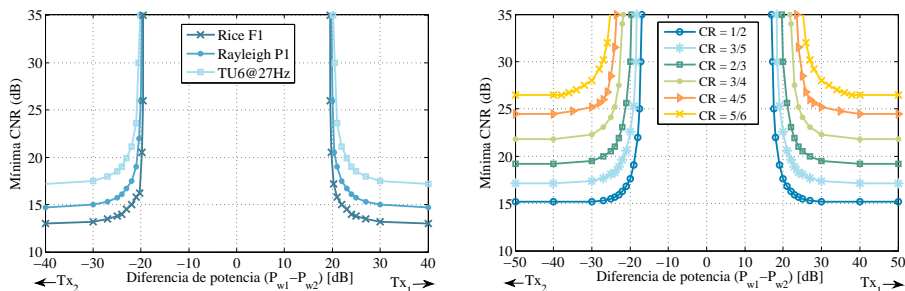


Figura 4.14: Rendimiento en términos de mínima CNR y diferencia de potencia entre señales DVB-T2 de los PLP con servicios locales. En la izquierda, rendimiento para un PLP 64QAM y CR 3/5 en diferentes modelos de canal. En la derecha, rendimiento de un PLP 64QAM y diferentes tasas de codificación en un canal TU6.

da de la figura 4.14. En este caso en particular (64QAM, CR 3/5), podemos observar que la decodificación del servicio local solo es posible en zonas donde la diferencia en potencia entre transmisores (PI) es superior a 20 dB y adicionalmente se tienen altos niveles de CNR.

Igualmente podemos observar que el mínimo nivel de CNR requerido desciende exponencialmente a medida que aumenta la diferencia en potencia entre los transmisores, llegando a un valor casi constante (umbral de CNR para un clásico rendimiento del modo de transmisión sin interferencias) para valores de PI superiores a 30 dB. Estos altos niveles de PI generalmente corresponden a las zonas cercanas del transmisor donde la influencia de los transmisores de otras LSA es prácticamente despreciable. Para propósitos de planificación, el mínimo nivel de PI requerido para un sistema TDT es conocido como el *margen de protección* entre señales cocanal y corresponde con el valor de PI que requiere 3 dB más del mínimo nivel de CNR requerido en ausencia de interferencias.

El mínimo nivel de PI y de CNR requerido para una correcta decodificación también depende de la tasa de protección (CR) seleccionada para el sistema DVB-T2. La gráfica derecha de la figura 4.14 muestra el rendimiento de los servicios locales utilizando un PLP con modulación 64QAM y diferentes tasas de codificación en un canal TU6. En la gráfica podemos observar que el mínimo nivel de PI entre señales DVB-T2 es menos restrictivo (17 dB) para la tasa de protección más alta (CR 1/2) comparado con los 25 dB de PI requerido por un sistema con la tasa de protección más baja (CR 5/6). A menor umbral de PI y CNR, mayor será el radio de cobertura de cada LSA, a costa de una mayor reducción en la capacidad de transmisión efectiva del sistema.

## 4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2

### 4.3.3. Ganancia en capacidad de transmisión

En esta sección se analiza la ganancia en capacidad de transmisión obtenida por la utilización dedicada de PLPs a servicios locales en cada LSA comparada con el enfoque convencional conocido como *simulcast*, donde todos los servicios locales son emitidos a través de toda la red SFN incluso en aquellas zonas donde no son de interés. Se asume que una sola frecuencia es disponible en toda el área de servicio, sin considerar topologías MFN. Al igual que en DVB-T (ver sección 3.2.5), la ganancia en capacidad de transmisión  $G_{LSI}$  puede ser calculada mediante la ecuación 3.2. Esta ganancia depende del número de LSA presentes en la red SFN ( $n_{LSA}$ ) y del porcentaje de tasa binaria dedicada a los servicios locales ( $\rho_{local}$ ) relativo a la tasa binaria total para servicios nacionales y locales. En el enfoque convencional la tasa binaria total del sistema es igual a la tasa binaria ofrecida por el multiplex ( $R_{SFN}=R_{Mux}$ ). El porcentaje  $\rho_{local}$  de esta tasa binaria dedicado a servicios locales es compartido entre todas las LSA que conforman la SFN.

Reutilizando los PLP dedicados a servicios locales en cada LSA, se dispone de toda la tasa binaria ofrecida por el multiplex para la emisión de contenidos nacionales y locales. En este caso, la tasa binaria total del sistema puede ser expresada mediante la ecuación 3.3. El número de PLP dedicado a servicios locales, y por tanto el factor  $\rho_{local}$ , puede ser ajustado libremente en el rango entre 0 y 100%. La figura 4.15 muestra la potencial ganancia en capacidad de transmisión que puede ser lograda con la reutilización de los PLP locales en cada LSA comparada con la ofrecida por el enfoque clásico simulcast en función del valor de  $\rho_{local}$  y del número de LSAs presentes en la red SFN. Este rendimiento es similar al obtenido para la técnica de time slicing en DVB-T, debido a que ambos enfoques utilizan una multiplexación temporal de las sub-portadoras para la transmisión de los servicios locales.

A manera de ejemplo, podemos observar que para una topología SFN con 4 LSA, se consigue una ganancia de 120% en la capacidad de transmisión cuando se selecciona un  $\rho_{local}$  del 40%. Estas ganancias en capacidad pueden llegar a ser hasta de  $n$  veces, siendo  $n$  el número de LSA que conforman la red SFN, a costa de reducción en el área de cobertura de los servicios locales, la cual está limitada por el grado de interferencia generado por las LSA adyacentes.

### 4.3.4. Estimaciones de cobertura en un escenario real

Al igual que para DVB-T (ver sección 3.2.4), en esta investigación hemos utilizado el diseño de red TDT del operador público RTVC de Colombia y la respectiva cartografía digital de terreno para la estimación de cobertura de los servicios nacionales y regionales en redes DVB-T2. En esta sección se

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

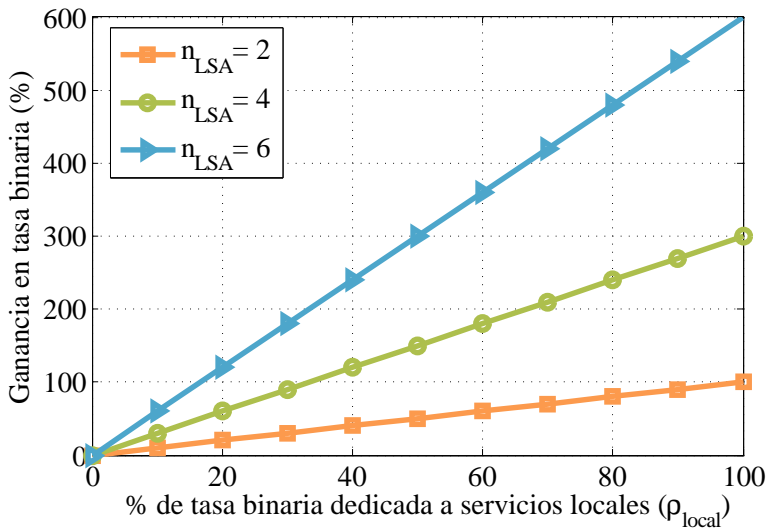


Figura 4.15: Ganancia en capacidad de transmisión reutilizando en cada LSA los PLP dedicados a servicios a servicios locales.

presenta en primer lugar una planificación de frecuencias para los seis canales regionales utilizando topologías MFN y SFN, identificando el número mínimo de frecuencias requeridas para evitar interferencias entre canales y maximizar su cobertura. En esta planificación inicial, los contenidos nacionales son emitidos en frecuencias distintas a las asignadas para los canales regionales.

En segundo lugar, se presenta de forma comparativa las estimaciones de cobertura de una configuración SFN para la transmisión simultánea de servicios nacionales y regionales utilizando el enfoque convencional simulcast o la técnica de reutilización de los PLP dedicados a servicios locales en cada LSA. Los parámetros de configuración del modo de transmisión DVB-T2 utilizado para todas las estimaciones de cobertura presentadas en esta sección es resumido en la tabla 4.6. En el caso de múltiples PLP, todos utilizan la misma configuración.

### Plan de frecuencias y estimaciones de cobertura de los canales locales/regionales

Como punto de partida hemos evaluado diferentes planes de asignación de frecuencias en función de la cantidad de bandas disponibles para los canales regionales en las futuras redes DVB-T2 en Colombia. En concreto se han evaluado asignaciones entre 2 y 6 frecuencias, esta última correspondiendo con la

### 4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2

Tabla 4.6: Parámetros de configuración de DVB-T2 para las estimaciones de cobertura de los servicios nacionales y regionales.

parámetro	Valor
Ancho de banda	6 MHz
Tamaño de FFT	16K extendido
Intervalo de guarda	1/8
Modulación	64QAM
Tasa de codificación	3/5
Patrón de portadoras	PP3
Distancia entre Tx SFN	90 km
Capacidad de transmisión	17.25 Mbps
Min. CNR en Rice F1	14 dB
Min. CNR en Rayleigh P1	16 dB
$E_{min}$ en recepción fija	39 dBuV/m
$E_{min}$ en recepción Outdoor	66 dBuV/m
$E_{min}$ en recepción Indoor	78 dBuV/m

Tabla 4.7: Plan de asignación de frecuencias para los canales regionales en topología MFN en función del número de frecuencias disponibles. Establecido para recepción fija con antena en tejados al 70%.

Canal	Frecuencia Central (MHz)				
	6 bandas	5 bandas	4 bandas	3 bandas	2 bandas
Teleantioquia	518	512	518	512	506
TRECE	512	506	512	500	500
Telepacífico	530	524	506	512	506
Telecaribe	500	524	500	500	506
TRO	506	500	506	506	500
Telecafé	524	518	500	506	500

asignación de una frecuencia independiente para cada canal regional. La tabla 4.7 resume la asignación de frecuencias que mejor rendimiento ofrecen en términos de máxima cobertura para cada canal regional y mínima interferencia entre ellos.

Siguiendo este plan de frecuencias, la gráfica izquierda de la figura 4.16

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

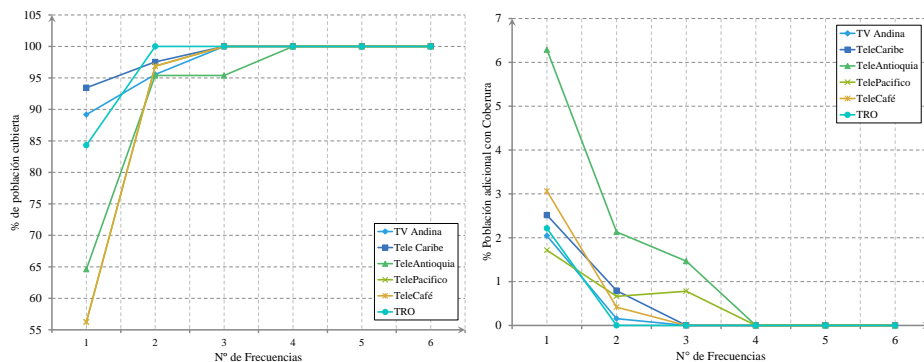


Figura 4.16: Izquierda, porcentaje normalizado de población cubierta para cada canal regional utilizando una modo DVB-T2 64QAM, CR 3/5, FFT 16KE, GI 1/4, PP3 y recepción fija 70 %. Derecha, porcentaje de población adicional cubierta por tener en cuenta la directividad de la antena receptora.

representa el porcentaje de población cubierta por cada canal regional en recepción fija 70 % con topologías SFN y MFN hasta 6 frecuencias. Los porcentajes han sido normalizados con respecto a la población cubierta en el caso de máxima cobertura (frecuencias independientes para cada canal). En el caso de topología SFN, todos los transmisores utilizan la banda de 500 MHz, emitiendo simultáneamente contenidos diferentes en cada LSA y utilizando toda la capacidad del multiplex. De la figura podemos observar que una topología MFN de 2 frecuencias consigue hasta el 95 % de la población cubierta con frecuencias independientes para cada canal, lo que significa un ahorro del 66 % de frecuencias requeridas. Esto también significa una frecuencia menos de las mínimas requeridas para una topología MFN en DVB-T (ver sección 3.2.4), utilizando una configuración DVB-T2 con la misma distancia entre transmisores SFN, el mismo nivel de cobertura para los canales regionales y un 15 % más de capacidad de transmisión.

La Tabla 4.8 resume los porcentajes de población cubierta obtenidos para cada canal regional en recepción fija, portable indoor y portable outdoor al 70 % utilizando una configuración MFN de seis frecuencias. La correspondiente huella de cobertura para recepción fija en tejados al 70 % es presentada en la gráfica izquierda de la figura 4.17. Estos porcentajes de cobertura serán considerados de aquí en adelante como el caso de referencia debido a que no existe interferencia entre transmisores y por tanto la cobertura es la máxima alcanzada para cada canal regional. Basados en este caso de referencia, se evaluará el rendimiento en términos de cobertura de cada canal regional cuando emiten en configuración SFN utilizando el enfoque simulcast o las técnicas de reemplazo

### 4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2

Tabla 4.8: Estimaciones de cobertura en habitantes de los canales regionales en topología MFN (6 frecuencias) de un sistema DVB-T2 para recepción fija, portable indoor y portable outdoor al 70 %.

		Fija	Portable Outdoor	Portable Indoor
Locales	TeleAntioquia	5'943.739	3'848.529	3'194.798
	TRECE	10'305.139	7'270.344	5'683.855
	Telepacífico	4'344.869	3'206.615	2'618.682
	Telecaribe	6'196.268	4'070.782	3'247.548
	TRO	2'444.762	1'560.318	1'146.650
	Telecafé	3'690.992	2'153.242	1'335.387
Nacionales		29'539.621	21'406.527	17'132.559

de PLP locales o flujos auxiliares en cada LSA.

La tabla 4.8 también presenta el nivel de cobertura de los servicios nacionales, el cual corresponde al total de habitantes cubiertos por la infraestructura de los seis canales regionales. De este porcentaje de habitantes con cobertura de servicios nacionales, un 11.46 %, 3,28 % y 0,55 % son cubiertos por más de un transmisor debido a que se encuentran en zonas de solapamiento de cobertura para condiciones de recepción fija, portable outdoor e indoor, respectivamente. En estas zonas de solapamiento se puede afirmar que los habitantes también pueden recibir más de un servicio local/regional, lo cual no es necesariamente un requerimiento en la planificación de la red de los canales regionales.

#### Efecto de la discriminación o directividad en la antena en recepción fija

Las antenas generalmente utilizadas para recepción fija de TDT en tejados presentan ciertas características de rechazo de las señales recibidas en función del ángulo de llegada conocido como *directividad*, las cuales son resumidas en la norma UIT.419-3 [72]. En concreto para la banda IV y V el factor de rechazo es 0 dB para señales con ángulo de llegada de hasta 20° a partir del centro del lóbulo principal y un rechazo gradual de hasta 16 dB para señales con ángulo de llegada entre 20° y 60°. Para propósitos de planificación, tener en cuenta esta directividad se traduce en una reducción del nivel de interferencias generadas por señales indeseadas que llegan con un ángulo mayor a 20° (para el caso de la banda IV y V), pero también una reducción de la señales útiles que tengan un ángulo de llegada superior a dicho valor. Por tanto, este efecto depende de la

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

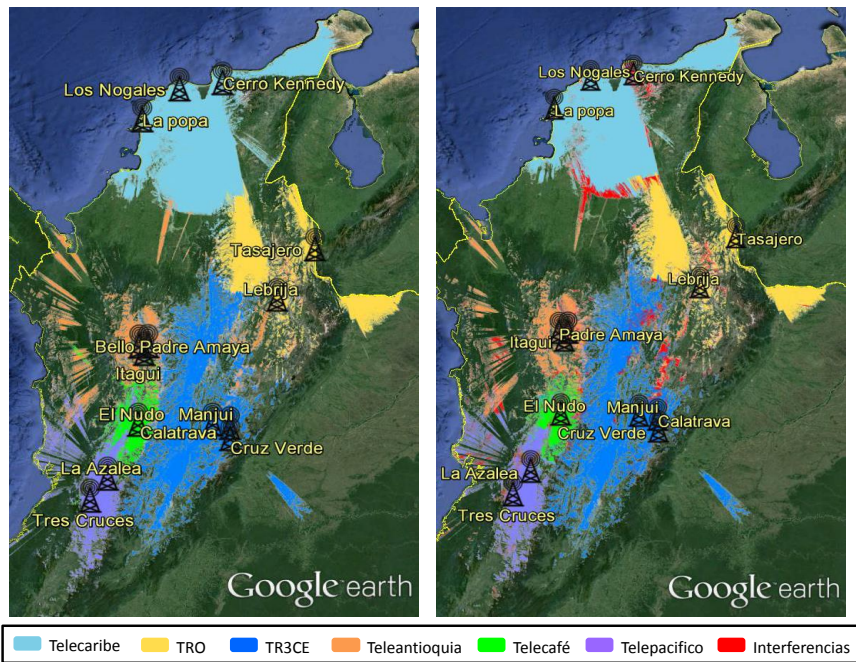


Figura 4.17: Cobertura de los canales regionales. Utilizando una topología MFN de seis frecuencias (izquierda). Utilizando una topología SFN y el enfoque simulcast (derecha). Recepción fija con antena en tejados (Rice F1).

ubicación y cantidad de transmisores, del punto de recepción y de la orientación la antena receptora.

El efecto de la directividad de la antena receptora en los niveles de cobertura fija 70 % de cada canal regional ha sido evaluado en este estudio, orientando la antena receptora al transmisor que mayor nivel de señal útil aporta en cada punto del escenario y utilizando los factores de rechazo descritos en la norma [72]. La gráfica derecha de la figura 4.16 muestra el porcentaje de población adicional cubierta por efecto de tener en cuenta la directividad de la antena. De la gráfica podemos observar que la topología MFN de 2 frecuencias tendría un aumento de población cubierta de hasta el 2 % en algunos canales regionales. Para configuraciones MFN con 4 o más frecuencias no se presentan aumentos de población con servicio de TDT debido a que las interferencias son mínimas y generadas por transmisores demasiado alejados. El mayor incremento de población cubierta se presenta para la topología SFN donde de acuerdo a la gráfica se logra hasta un 6,5 % para el canal Teleantioquia y alrededor de un



### **4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2**

2.5 % para el resto de canales regionales.

#### **Cobertura de los servicios nacionales y locales en una red SFN utilizando la solución clásica simulcast**

La solución clásica simulcast emite los servicios regionales desde todos los transmisores SFN y por tanto la cobertura de cada servicio regional depende directamente de la cobertura general de la red SFN. La gráfica derecha de la figura 4.17 muestra la cobertura que se obtiene estableciendo una red SFN con la infraestructura de red de los seis canales regionales, la cual es la misma tanto para los servicios nacionales como para los servicios locales/regionales. Las zonas en color rojo representan las áreas sin cobertura debida a la autointerferencia de la red SFN.

La tabla 4.9 resume el porcentaje de población cubierta para cada canal regional con la solución simulcast en una red SFN, normalizado con el caso de referencia donde cada canal regional utiliza una frecuencia independiente. Podemos observar que los porcentajes de cobertura en topología SFN simulcast están por encima del 96 % de la obtenida con una topología MFN en cualquier tipo de recepción (fija, portable indoor o portable outdoor) y para los seis canales regionales. Aunque los niveles de cobertura obtenidos con esta solución clásica son prácticamente los mismos que los ofrecidos por una configuración MFN, su principal inconveniente es la necesidad de compartir la tasa binaria entre todos los canales regionales y la emisión de sus contenidos en toda el área de cobertura, incluso en zonas donde no son de especial interés.

El porcentaje de población cubierta con contenidos nacionales también se encuentra por encima del 95 % del obtenido en una configuración MFN en los tres tipos de recepción. La leve reducción que se presenta en el caso de la topología SFN se debe principalmente a la autointerferencia entre transmisores lejanos (más allá del intervalo de guarda) propia de este tipo de topologías. De acuerdo a los resultados podemos observar que esta reducción es más significativa para recepción fija donde el umbral de CNR mínimo requerido es menor comparado con la recepción portable y por tanto se alcanzan zonas más alejadas con mayor probabilidad de interferencia por parte de otros transmisores.

#### **Cobertura de los servicios nacionales y locales en una red SFN con la técnica de reutilización de PLP para servicios locales**

En esta estimación de cobertura se ha utilizado la frecuencia de 500 MHz (canal 18) para la emisión de un sistema DVB-T2 dedicando el PLP0 para los contenidos regionales y el PLP1 para los contenidos nacionales. Este tipo de configuración se puede considerar la más eficiente en el uso del espectro debido a

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

Tabla 4.9: Porcentaje de población cubierta por los canales regionales en topología SFN utilizando el enfoque simulcast y la reutilización de PLP en cada LSA, normalizado con el caso de referencia (frecuencias independientes para cada canal). Recepción fija, portable indoor y portable outdoor al 70 %.

Solución		Fija		Portable Outdoor		Portable Indoor	
		Simul	PLPs	Simul	PLPs	Simul	PLPs
Locales	TeleAntioquia	96.9 %	78.5 %	99.1 %	96.9 %	99.7 %	98.2 %
	TRECE	98.1 %	96.5 %	99.7 %	98.7 %	99.9 %	99.2 %
	Telepacífico	96.5 %	80.2 %	98.4 %	90.5 %	99.7 %	97.7 %
	Telecaribe	96.4 %	99.5 %	99.8 %	99.7 %	99.9 %	99.9 %
	TRO	96.9 %	94.8 %	99.8 %	99.6 %	99.9 %	99.9 %
	Telecafé	96.2 %	55.2 %	97.9 %	75.6 %	99.1 %	93.5 %
Nacionales		95.7 %		98.01 %		99.78 %	

la utilización de una única frecuencia. Sin embargo el porcentaje de cobertura de cada servicios regional se puede ver afectado en aquellas zonas donde no se logra superar el margen de protección entre señales concanal DVB-T2 evaluado en la sección 4.3.2. En este caso en particular, utilizamos el margen de protección de 20 dB que corresponde a un sistema DVB-T2 64QAM CR 3/5. La gráfica izquierda de la figura 4.18 muestra la cobertura de los PLP0 en cada canal regional. Las zonas en color rojo representan las área sin cobertura debida a la autointerferencia de la red SFN.

De la gráfica podemos observar que estas áreas de interferencias son mayores que las generadas con la solución simulcast (ver figura 4.17) y se presentan principalmente en los bordes de cobertura entre los diferentes canales. Sin embargo en algunos la población objetivo se concentra en las cercanías de los transmisores y por tanto se consiguen equiparables porcentajes de cobertura para cada canal regional. La tabla 4.9 también resume el porcentaje de población cubierta para cada canal regional reutilizando el PLP0 en una red SFN, normalizado con el caso de referencia donde cada canal regional utiliza una frecuencia independiente.

De la tabla podemos observar que esta técnica ofrece niveles de cobertura entre el 55 % y el 99 % de la ofrecida por una topología MFN dependiendo del canal regional y del tipo de recepción. La reutilización de los PLP locales ofrece una menor reducción en la población cubierta en condiciones de recepción portable indoor y portable outdoor, debido principalmente a que sus radios de cobertura se limitan a las cercanías de los transmisores de cada LSA y por

### 4.3 Servicios globales y locales en redes de frecuencia única DVB-T2

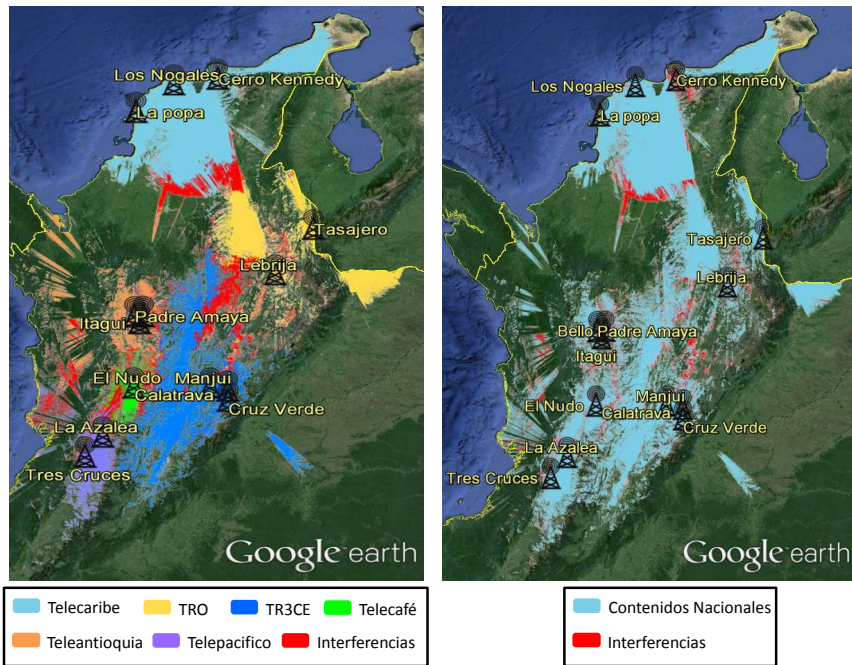


Figura 4.18: Cobertura de los canales regionales utilizando el PLP0 (izquierda) y de los servicios globales utilizando el PLP1 de una configuración SFN (derecha). Recepción fija con antena en tejados (Rice F1).

tanto existe una menor probabilidad de ser interferidos por LSA adyacentes. La implementación de gap fillers en zonas de alta concentración de población sin cobertura puede aumentar estos porcentajes de cobertura, manteniendo el uso de una única frecuencia.

Para el caso de los contenidos nacionales, la gráfica derecha de la figura 4.18 muestra la cobertura utilizando el PLP1 en topología SFN con los transmisores de todos los canales regionales. Los porcentajes y huellas de cobertura obtenidos son exactamente iguales a los ofrecidos por la técnica clásica de simulcast, pues en ambos casos se mantiene las ventajas propias de las topologías SFN. Estos porcentajes se encuentran por encima del 95% de los ofrecidos por una configuración MFN y su leve variación se debe principalmente a las autointerferencias que pueden presentarse en este tipo de redes SFN.

## 4.4. Conclusiones

En este capítulo hemos investigado en primer lugar, los beneficios de una adecuada transición de DVB-T a una red DVB-T2, principalmente en términos de capacidad de transmisión, niveles de cobertura, flexibilidad de configuración y uso del espectro. En particular hemos investigado los potenciales modos de transmisión DVB-T2 para optimizar el despliegue de la red de TDT en Colombia, el cual es un caso especial por ser el primer país en desplegar DVB-T2 en canalización 6 MHz. Nuestros resultados muestran que comparado con el diseño de red DVB-T inicialmente realizado por RTVC en Colombia, DVB-T2 puede incrementar el porcentaje de población cubierta en un 7.3 % aumentando hasta en 5 dB la robustez de la señal para la misma tasa binaria, u ofrecer hasta un 70.26 % más de capacidad de transmisión para la misma cobertura, o incrementar el tamaño de la red SFN hasta en un 135 % manteniendo la potencia de transmisión y la distribución geográfica de los transmisores.

La red SFN DVB-T2 desplegada en Colombia podría ser la más grande del mundo debido a sus características de canalización 6 MHz con distancias entre 180 y 220 km. Los resultados obtenidos en esta investigación indican que para Colombia, el modo de transmisión DVB-T2 que permite una distancia entre transmisores SFN de 180 km ofrece prácticamente la misma cobertura que el diseño inicial DVB-T y que el modo DVB-T2 que ofrece 220 km, ofreciendo a su vez un 45 % de ganancia en la capacidad de transmisión. Con el fin de maximizar el tamaño y porcentaje de cobertura de estas redes SFN, hemos realizado una reducción de las autointerferencias entre transmisores a través de la inserción de retardos artificiales en la señal emitida desde cada transmisor. La introducción de estos retardos permitió reducir el porcentaje de población con interferencias a menos del 0.5 %, el cual podría ser posteriormente cubierto con gap fillers o transmisores puntuales de baja potencia.

El único inconveniente de los modos DVB-T2 que maximizan la cobertura, capacidad de transmisión y/o tamaño de red SFN es que utilizan el tamaño de FFT 32K, el cual tiene un bajo rendimiento en escenarios de movilidad. Este rendimiento es aun más bajo en el caso de canalización 6 MHz debido a la menor separación entre sub-portadoras OFDM del sistema y por tanto mayor vulnerabilidad al efecto Doppler. De acuerdo a los resultados presentados en esta sección, el tamaño de FFT de 32K tan solo permite velocidad entre 20 y 35 km/h en canalización 6 MHz y las bandas de frecuencia reservadas para TDT en Colombia. Esta velocidad aumenta en la misma proporción en que se reduce el tamaño de la FFT, es decir para una FFT con la mitad de portadoras (16K) las velocidades serian el doble.

En esta investigación hemos evaluado dos técnicas para las transmisión simultánea de servicios fijos y móviles en un mismo canal RF: el uso de múltiples

PLP y el perfil T2 lite. La eficiencia espectral de estas dos técnicas depende del porcentaje de tiempo dedicado a la transmisión de servicios móviles, siendo más efectivo el perfil T2 lite cuando este porcentaje es bajo y teniendo una eficiencia equiparable a medida que aumenta la dedicación del multiplex a los servicios móviles. Complementariamente, en este capítulo hemos investigado el uso combinado de diversidad temporal y espacial para mejorar el rendimiento de un sistema DVB-T2 en movilidad. El estudio indica que aunque el entrelazado temporal de capa física incluido en DVB-T2 puede extenderse a varios segundos, en la práctica la máxima duración del entrelazado temporal está limitada por la tasa binaria del servicio y el máximo tiempo de zapping, debido principalmente por la cantidad de memoria disponible en los receptores y a la ausencia de técnicas de fast zapping para el usuario.

Los resultados obtenidos indican que mientras 250 ms de entrelazado temporal son generalmente suficientes para compensar el efecto de fast fading, el uso de tiempos de entrelazado largos (varios segundos) ofrece ganancias de hasta 9 dB debido a la mejor protección frente al efecto shadowing. Las ganancias ofrecidas por largos tiempos de entrelazado temporal con AL-FEC son similares a las obtenidas con el entrelazado en la capa física, a expensas de reducir la capacidad de transmisión del sistema. En el dominio de diversidad espacial, la utilización de SIMO logra similares ganancias a las ofrecidas en sistemas DVB-T, entre 4 dB y 6 dB dependiendo del entrelazado temporal. En contraste, la mejora introducida por el modo de transmisión SIMO Alamouti en escenarios de movilidad es más limitada (alrededor de 1 dB), estando condicionada por la diferencia en potencia y retardo relativo entre señales que arriban al receptor.

Por último, en este capítulo hemos investigado la óptima transmisión de servicios nacionales y regionales/locales en redes SFN DVB-T2. En primer lugar hemos identificado el número mínimo de frecuencias requerido para la emisión de los contenidos locales utilizando una topología MFN, lo cual nos permitió establecer el punto de partida en términos de cobertura y uso del espectro. Las soluciones tecnológicas en DVB-T2 para la transmisión de contenidos nacionales y regionales en redes SFN están basadas en la técnica de reemplazo de PLPs dedicados en cada LSA o en la utilización de los flujos auxiliares de la trama DVB-T2. Diferentes arquitecturas para la inserción de los contenidos regionales fueron analizadas en función de la ubicación dentro de la etapa de transmisión donde serán insertados. De las tres arquitecturas analizadas, la de inserción de forma local resulta más eficiente y flexible para los operadores de TV debido a que solo tiene que transmitir una vez los contenidos comunes a través de las redes de distribución.

Las investigaciones han permitido establecer los márgenes de protección y mínimos niveles de CNR requeridos para correcta decodificación de señales DVB-T2 cuando es interferida por otra señal DVB-T2 proveniente de una LSA

## CAPÍTULO 4. PROVISIÓN SIMULTÁNEA DE SERVICIOS DE TDT A TERMINALES FIJOS/MÓVILES Y SERVICIOS LOCALES EN REDES DE FRECUENCIA ÚNICA DVB-T2

---

diferente. Con base en este rendimiento y con el fin de evaluar la viabilidad de las soluciones propuestas en un escenario real, hemos realizado un ejercicio de planificación y estimación de cobertura de los canales regionales en Colombia. Los resultados indican que en condiciones de recepción portable indoor y portable outdoor, la utilización de PLP o flujos auxiliares dedicados en redes SFN, ofrecen una cobertura por encima del 90 % de la obtenida en cada canal regional con una topología MFN con frecuencias individuales, llegando incluso a ser del 99 % para algunos operadores regionales. Para los servicios nacionales, las soluciones técnicas mantienen todas las ventajas de una topología SFN y por tanto ofrecen porcentajes de cobertura muy similares a los obtenidos con una topología MFN de frecuencias independientes. Las leves diferencias en tales porcentajes de cobertura son establecidas principalmente por la ganancia SFN en zonas con cobertura de dos o más señales OFDM y por las autointerferencias propias de una topología SFN, aun después de la optimización mediante retardos artificiales.

Finalmente, la ventaja más significativa de las soluciones técnicas no es solo el uso eficiente del espectro al reducirlo a una única frecuencia, sino también la ganancia en términos de capacidad efectiva de transmisión de la red SFN. El aumento en la capacidad de transmisión se debe a la reutilización en cada LSA del porcentaje de tasa binaria dedicada a servicios locales ( $\rho$ ), comparado con la solución clásica de simulcast. En este sentido la ganancia en capacidad de transmisión depende del número de LSA y del factor  $\rho$  el cual puede ser asignado libremente entre 0 y 100 % del multiplex de la red SFN. Las ganancias en capacidad pueden llegar a ser hasta de  $n$  veces, siendo  $n$  el número de LSA que conforman la red SFN, a costa de reducción en el área de cobertura de los servicios locales, la cual está limitada por el grado de interferencia generado por las LSA adyacentes.

## Capítulo 5

# Inserción de servicios locales en redes DVB-NGH de frecuencia única

Uno de los requisitos comerciales del nuevo estándar DVB-NGH fue la eficiente transmisión de contenidos locales en redes SFN con los mínimos compromisos de implementación [7]. En este sentido, DVB-NGH ha adoptado dos soluciones técnicas complementarias para insertar servicios locales en redes SFN conocidas como H-LSI (Hierarchical - Local Service Insertion) y O-LSI (Orthogonal - Local Service Insertion).

La solución basada en modulación jerárquica no permite asegurar el mismo nivel de cobertura para los servicios locales y globales, lo que significa que en algunas áreas el receptor tan solo podrá decodificar los servicios globales. Otro inconveniente de esta solución es que sufre de interferencia inter flujo, debido a que cada flujo actúa como ruido para el otro. Esto significa que el área de cobertura de los servicios globales se ve reducida cuando se habilita la inserción de los contenidos locales. Al igual que en DVB-T, la tolerancia a este ruido puede ser ajustada mediante la tasa de codificación aplicada a cada flujo o mediante el parámetro  $\alpha$ . La principal ventaja de esta técnica es la ganancia en capacidad de transmisión del sistema, la cual puede llegar a ser hasta del 100%. Adicionalmente, la tasa binaria destinada para servicios nacionales no se ve afectada en el momento de insertar los contenidos locales.

La segunda técnica adoptada en DVB-NGH para insertar contenidos locales es conocida como transmisión ortogonal u O-LSI. En esta solución la idea es que un grupo de sub-portadoras OFDM de la trama NGH sean reservadas

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

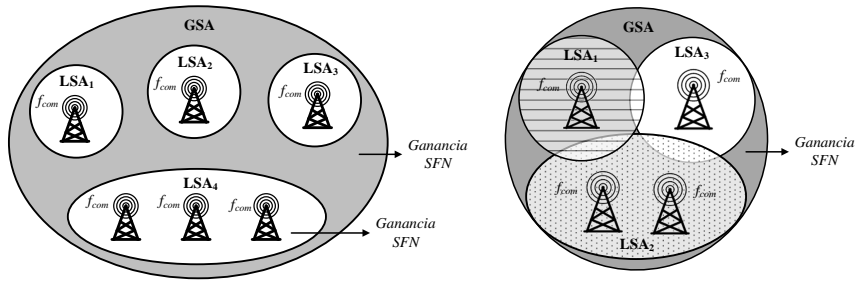


Figura 5.1: Áreas de cobertura de los servicios globales y locales en una red SFN utilizando H-LSI (izquierda) u O-LSI (derecha). Todos los transmisores utilizan la misma frecuencia.

y solamente usadas por un determinado clúster de transmisores para emitir su contenido local. Los principales beneficios de esta técnica son dos: por un lado, el área de cobertura de los servicios globales no se ve afectada por la inserción de los contenidos locales y por otro lado, el área de cobertura de los servicios locales puede ser potencialmente la misma de los servicios globales. En esta técnica, la capacidad de transmisión disponible para los servicios locales en cada transmisor depende del número de sub-portadoras reservadas y de la cantidad de transmisores que desean emitir tales contenidos dentro de la SFN. Sin embargo, al contrario de la técnica H-LSI, con O-LSI la tasa binaria inicialmente destinada a servicios nacionales se ve reducida en el momento de insertar los contenidos locales. Teniendo en cuenta que para cada símbolo OFDM, solo un grupo de sub-portadoras está activo, estas sub-portadoras pueden ser transmitidas con mayor potencia para mantener la energía media del símbolo. Este aumento de potencia puede ser utilizado para incrementar un orden de modulación en tales sub-portadoras y compensar parcialmente la pérdida de capacidad de transmisión del sistema.

El esquema general de una red SFN transmitiendo servicios globales y locales mediante las soluciones técnicas H-LSI y O-LSI es mostrado en la figura 5.1. Todos los transmisores utilizan una frecuencia común  $f_{com}$ . Las áreas de cobertura de los servicios globales son conocidas como GSA (Global service Area) y presentan una ganancia en cobertura en zonas de solapamiento entre transmisores debido a la diversidad de señales y a su coherente combinación, la cual es llamada generalmente *ganancia SFN*. Las áreas de cobertura de los servicios locales (LSA, Local Service Area), son limitadas únicamente al área de interés de dichos servicios y dependen del grado de interferencia generado por los transmisores de las LSA adyacentes. En concreto, el área de cobertura de los servicios locales cuando se utiliza H-LSI es limitado a las zonas cercanas de los transmisores, si estos emiten el contenidos local en el mismo instante



## 5.1 H-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN mediante modulación jerárquica

---

de tiempo, como se muestra en la parte izquierda de la figura 5.1. Estos radios de cobertura pueden ser aceptables dependiendo el tipo de escenario, ej. cuando el transmisor está localizado cerca a una ciudad principal. Una solución para aumentar el radio es realizara la inserción jerárquica de los servicios locales siguiendo una multiplexación temporal, de tal forma que cada servicio local es transmitido en diferentes instantes de tiempo. LSA suficientemente alejadas pueden reutilizar el intervalo de tiempo en que emite sus contenidos para reducir la penalización en la capacidad de transmisión generada por la multiplexación temporal.

En O-LSI, su principal ventaja es la posibilidad de crear LSAs sin interferencia entre ellas y con un límite de cobertura que solo depende de las características técnicas de cada transmisor, no necesariamente en la vecindad del transmisor como en el caso de H-LSI. La parte derecha de la figura 5.1 muestra las áreas de cobertura de los servicios globales y locales en una red SFN utilizando O-LSI. En las zonas de solapamiento entre LSA solo los servicios globales experimentan ganancia SFN, sin embargo los receptores están en capacidad de decodificar más de un servicios local. Al igual que en la técnica de modulación jerárquica, la inserción de contenidos locales en áreas suficientemente alejadas puede realizarse reutilizando los recursos (en este caso sub-portadoras) para optimizar la capacidad de transmisión del sistema.

Este capítulo presenta una descripción de las dos técnicas adoptadas por DVB-NGH para la inserción de contenidos locales en redes SFN. Adicionalmente se presentar los resultados de rendimiento de dichas técnicas obtenidos mediante simulaciones computacionales, un análisis de las ganancias en capacidad de transmisión ofrecidas por cada una de las técnicas comparado con la técnica tradicional simulcast para la inserción de contenidos locales y una estimación de cobertura en un escenario real que permite evaluar la viabilidad de implementación de dichas soluciones.

### 5.1. H-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN mediante modulación jerárquica

La inserción de servicios locales utilizando la modulación jerárquica (llamada de aquí en adelante H-LSI) está directamente relacionada con el concepto de modulación jerárquica descrito en la sección 2.1.1). Los servicios locales son transmitidos en el flujo LP de la modulación jerárquica y sobremodulan los servicios globales transmitidos en el flujo HP. El estándar DVB-NGH soporta modulaciones jerárquicas de un orden final de modulación 16QAM y 64QAM,

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

---

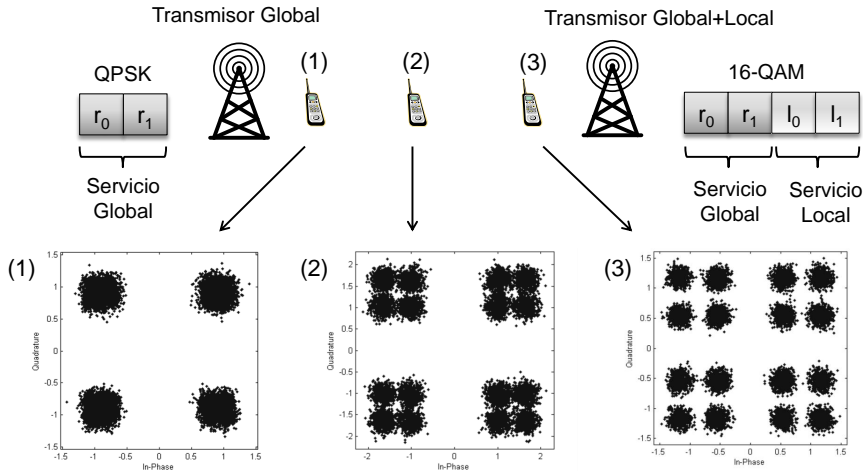


Figura 5.2: Recepción de los servicios globales y locales en función de la distancia del receptor a los transmisores SFN. Los dos transmisores utilizan la misma frecuencia.

donde siempre el flujo LP está conformado por los dos bits menos significativos (LSB) de cada símbolo. Los valores de  $\alpha$  son 1, 2 y 4 para la modulación 16QAM, y 1 y 3 para la modulación 64QAM.

La recepción de los servicios locales siempre requiere un mayor nivel de CNR comparado con los servicios globales, debido a la menor robustez del flujo LP. Sin embargo, esto puede no ser un inconveniente cuando los usuarios objetivo se encuentran ubicados en las cercanías de las estaciones transmisoras. Por otra parte, dentro del área de cobertura de la red SFN, los símbolos modulados jerárquicamente pueden actuar como ruido para los contenidos globales requiriendo un mayor nivel de CNR para su correcta recepción. Ésta penalización disminuye con la distancia desde el transmisor que inserta los contenidos locales como se muestra en la figura 5.2. Una segunda penalización para la decodificación de los contenidos globales y locales es provocada por la violación al principio de funcionamiento de una SFN, donde todas las portadoras moduladas jerárquicamente transmiten diferentes valores complejos y experimentan diferentes canales de propagación hasta el receptor. Esto causa una imperfecta ecualización en el receptor y una penalización en el rendimiento de los servicios globales y locales que depende de las características del canal propagación en el receptor. La penalización puede ser reducida implementando una ecualización y decodificación iterativa como se discute en la sección 5.1.2.

## 5.1 H-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN mediante modulación jerárquica

---

### 5.1.1. Topologías de red

Para las topologías de red analizadas en esta sección se consideran dos transmisores SFN adyacentes, sin embargo los resultados y conclusiones pueden ser extensibles a topologías de red formadas por un mayor número de transmisores. En ausencia de servicios locales, ambos transmisores emitirán los mismos servicios en SFN utilizando los mismos símbolos QAM. La inserción de contenidos locales puede llevarse a cabo sobre uno o varios PLPs utilizando H-LSI. Al igual que en DVB-T2, un PLP en DVB-NGH consiste en un flujo GSE o TS codificado en capa física, modulado en QAM, entrelazado temporalmente y posteriormente mapeado en una trama DVB-NGH, donde se puede configurar una robustez diferente para cada uno de los PLPs. Si un transmisor dentro de la SFN no desea emitir contenidos locales, este emitirá únicamente con la modulación clásica del flujo HP configurada por el otro transmisor. En el caso en que ambos transmisores insertan contenidos locales sobre el mismo PLP, se podría generar una fuerte interferencia para los contenidos locales en las zonas de solapamiento, limitando el radio de cobertura de dichos servicios.

Una solución es compartir en el tiempo la inserción de los contenidos locales en tal forma que un transmisor emite los contenidos locales en un instante de tiempo (ej. una trama NGH), mientras el otro los emite en el siguiente instante. Si existen más transmisores en la red SFN, el tiempo de no emisión de contenidos locales en cada transmisor puede aumentar, lo cual significa una directa reducción en la capacidad de transmisión disponible para dichos servicios. Estrategias de reutilización de los intervalos de tiempo, pueden ser utilizadas en función de una suficiente separación entre transmisores, lo cual reduce la penalización en la capacidad de transmisión. Un segundo enfoque para evitar interferencias es habilitar H-LSI en diferentes PLP, la cual también permite una estrategia de reutilización en función de la distancia. En términos de eficiencia espectral ambos enfoques son iguales, sin embargo el uso de diferentes PLP en lugar de establecer intervalos de tiempo para compartir el mismo PLP logra mejor uniformidad en las tasas de transmisión de los servicios locales.

### 5.1.2. Características de implementación

El diagrama de bloques de un sistema DVB-NGH con H-LSI es mostrado en la figura 5.3. Los bits de los servicios globales y locales requieren ser codificados de forma independiente utilizando los bloques típicos de la generación de una señal DVB-NGH tales como el codificador LDPC, los entrelazadores temporal y frecuencial. La rama de procesamiento de los servicios locales incluye un constructor de trama el cual inserta la información de señalización y los bits de sincronismo necesarios para una correcta decodificación en recepción.

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

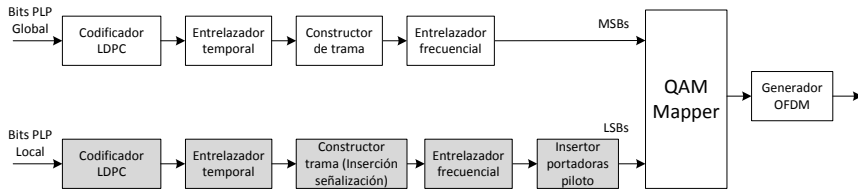


Figura 5.3: Diagrama de bloques de un transmisor con H-LSI.

Antes de realizar el mapeado jerárquico con los bits de los servicios locales, es necesario realizar la inserción de portadoras piloto para cada clúster de transmisores con servicios locales dentro de la SFN, siguiendo la organización de trama descrita en la sección 5.1.2. Estas portadoras piloto le permitirán al receptor realizar una correcta estimación y ecualización del canal experimentado desde cada transmisor H-LSI. Finalmente, ambos flujos son combinados en el mapeador QAM utilizando los bits más significativos (MSBs por sus siglas en inglés) de cada símbolo para los servicios globales y los menos significativos (LSB) para los servicios locales.

Al igual que en DVB-T2, el estándar DVB-NGH permite el uso de constelaciones rotadas para mejorar la robustez de la transmisión. Si la técnica de constelaciones rotadas es habilitada para el PLP global, es necesario tener en cuenta el ángulo de rotación aplicada en el momento de decodificar el servicio local en caso de estar utilizando H-LSI. Por el contrario, la técnica de H-LSI no es compatible con algunas novedades técnicas de DVB-NGH tales como la modulación no uniforme o la técnica ACE para la reducción de PAPR, debido principalmente a que los algoritmos de decodificación de estas técnicas no pueden ser aplicados directamente a constelaciones jerárquicas compuestas por dos flujos diferentes.

### Estructura de trama DVB-NGH

En DVB-T2 existen dos tipos de PLP conocidos como tipo 1 y tipo 2 [3]. Los PLP tipo 1 son transmitidos antes de los PLP tipo 2 en una única ráfaga dentro de una trama DVB-T2. Los PLP tipo 2 son transmitidos en al menos dos ráfagas de información por trama. Adicionalmente existen los denominados PLP común que transportan información común para todos los PLP, los cuales son transmitidos antes de PLP tipo 1. En DVB-NGH son definidos dos nuevos tipos de PLP para la inserción de servicios locales en redes SFN conocidos como tipo 3 y tipo 4, los cuales son usados para las soluciones técnicas O-LSI y H-LSI, respectivamente. La figura 5.4 muestra la estructura lógica de trama DVB-NGH con los diferentes tipos de PLP. Los PLP H-LSI son transmitidos

## 5.1 H-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN mediante modulación jerárquica

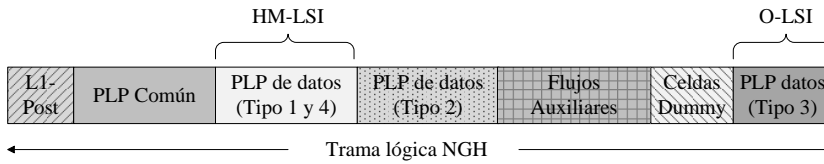


Figura 5.4: Estructura de trama lógica DVB-NGH con los diferentes tipos de PLP.

sobre los PLP tipo 1 y por tanto aparecen justo después del PLP común. Los PLP O-LSI son transmitidos al final de la trama después de los PLP del tipo 2. Los flujos auxiliares y las celdas de relleno si existen son transmitidos en medio de los PLP tipo 2 y 3.

### Señalización de H-LSI

En H-LSI los servicios locales son transmitidos básicamente en determinados PLPs y por tanto son insertados solamente en un grupo de sub-portadoras del símbolo OFDM. La sincronización de las correspondientes sub-portadoras es lograda por medio de un encabezado de sincronismo formado por 64 bits al inicio de cada trama local codificada con una secuencia conocida como Walsh-Hadamard. Este encabezado contiene además información de señalización del respectivo PLP local tal como la tasa de codificación del LDPC, el número de tramas FEC, etc. El encabezado es protegido frente a errores por un mecanismo Reed-Muller (32,16) usando una tasa de codificación 1/2. El valor del parámetro  $\alpha$  de la modulación jerárquica y el identificador del PLP global que transmite H-LSI son transmitidos en la señalización general L1 de la trama DVB-NGH. Un receptor interesado en el contenido local, primero identifica en la señalización L1 el PLP global que porta contenido local y luego por medio del encabezado de la trama local decodifica los datos del respectivo servicio local.

### Patrones de Portadoras Piloto en H-LSI

La correcta decodificación del contenido local requiere de un preciso conocimiento del canal experimentado por la señal desde el respectivo transmisor que utiliza H-LSI hasta el receptor, el cual debe estar claramente diferenciado de los canales experimentados desde los otros transmisores. Por esta razón, las portadoras piloto locales son moduladas jerárquicamente sobre los símbolos QAM del contenido global con un determinado espaciado que permita la estimación de canal de la rama local únicamente. El patrón de portadoras debe ser siempre el mismo que se utilice para los PLP globales, solo que es desplazado una sub-portadora para evitar distorsión entre las portadoras piloto del PLP

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

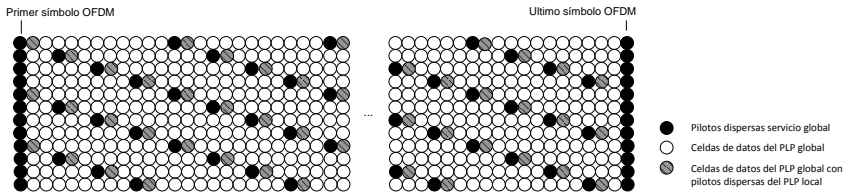


Figura 5.5: Patrón de portadoras piloto en H-LSI basado en el PP1 ( $D_x = 3$  y  $D_y = 4$ ).

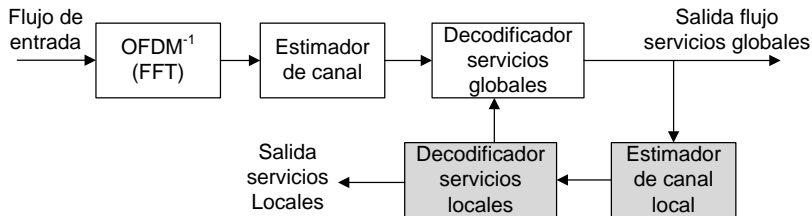


Figura 5.6: Diagrama de bloques simplificado de un receptor H-LSI utilizando ISD.

global y las portadoras piloto de los servicios locales, como se muestra en la figura 5.5 para un patrón de pilotos PP1 con  $D_x = 3$  y  $D_y = 4$ . Para reducir el impacto de estas portadoras piloto sobre los símbolos QAM de datos en donde son sobremodulados, se utiliza una secuencia compleja de  $(1/2 \pm j/2)$  en lugar de la secuencia típica utilizada para las portadoras piloto.

### Etapa de recepción

La inicial decodificación de los servicios globales y locales es distorsionada debido a que los flujos con contenidos globales y locales no pueden ser extraídos directamente de la señal recibida. Por tal razón, la decodificación de estos servicios se realiza de una forma iterativa [53]. La primera iteración permite corregir los errores del flujo global, mientras el flujo local es decodificado por la extracción del contenido global a la señal general recibida. Si la decodificación no es completamente correcta, se realiza una segunda iteración y así sucesivamente. Este algoritmo de decodificación es llamado Iterative Slice Decoding (ISD) y su diagrama de bloques simplificado es presentado en la figura 5.6. Es importante resaltar que esta decodificación iterativa es diferente a la realizada por los mecanismos de corrección de errores propios de DVB-NGH como el LDPC.

## 5.2 O-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN a través de transmisión ortogonal

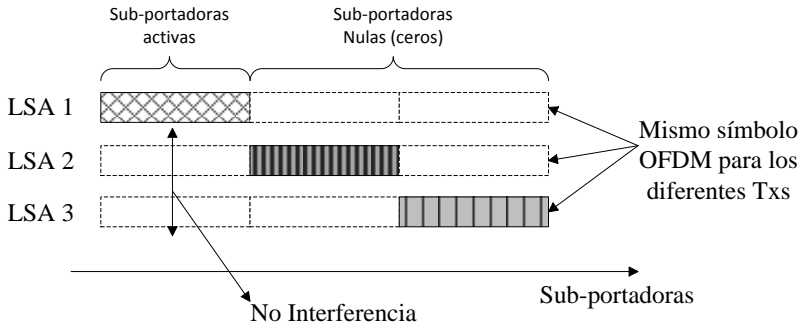


Figura 5.7: Concepto general de la técnica O-LSI. Cada transmisor dispone de un dedicado grupo de sub-portadoras OFDM para la inserción de contenidos locales.

## 5.2. O-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN a través de transmisión ortogonal

### 5.2.1. Descripción de la técnica de transmisión

La técnica de O-LSI adoptada en DVB-NGH se basa en la solución propuesta en DVB-T2 para la transmisión de firmas e identificador de transmisores en redes SFN utilizando los flujos auxiliares [73]. Con O-LSI un grupo de sub-portadoras de los símbolos OFDM son reservadas para la transmisión de contenidos locales. En el mismo símbolo OFDM, los transmisores de diferentes LSA utilizan dedicados subgrupo de portadoras para emitir sus contenidos locales, mientras las portadoras utilizadas por los otros transmisores son emitidas en cero. Esta ortogonalidad obtenida mediante la reserva de portadoras para cada servicio local asegura la no interferencia entre transmisores adyacentes a costa de una reducción en la capacidad de transmisión.

La figura 5.7 muestra es concepto general de la técnica O-LSI en redes SFN para cuatro LSA. Para efectos de claridad, la figura muestra la ubicación de la sub-portadoras antes del entrelazador frecuencial. Después del entrelazador frecuencial, cada subgrupo de portadoras son dispersadas en todo el ancho de banda disponible del canal con el fin de lograr mayor diversidad frecuencial, sin embargo se mantiene la característica de no interferencia entre transmisores con diferentes servicios locales. LSA suficientemente separadas podrían reutilizar el mismo subgrupo de portadoras, al igual que la técnica de reutilización propuesta para H-LSI.

La principal ventaja de O-LSI no es solo la ausencia de interferencia entre

## **CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA**

---

diferentes LSA, sino también la posibilidad de tener radios de cobertura para los servicios locales similares a los radios de cobertura de los servicios globales. Adicionalmente, la inserción de contenidos locales no afecta el rendimiento de los servicios globales. Sin embargo, comparado con la técnica H-LSI, el inconveniente de O-LSI es que la capacidad de transmisión disponible para servicios globales se reduce. En O-LSI los servicios globales y locales comparten las sub-portadoras OFDM de datos disponibles.

### **5.2.2. Aumento de potencia para las subportadoras OFDM - Power Boosting**

Con la técnica de O-LSI, la tasa binaria de transmisión disponible para servicios locales en cada LSA depende de la fracción de portadoras reservadas para la inserción de tales servicios y del número de LSA que debe compartirlas. Es importante resaltar que la fracción de sub-portadoras se reparte equitativamente entre todas las LSA presentes en la SFN. Comparado con el enfoque tradicional para la inserción de contenidos locales en redes SFN conocida como simulcast, la principal diferencia es que en lugar de transmitir los contenidos locales a través de toda la red SFN, lo cual podría generar un overhead innecesario, el contenido local es transmitido solamente en la LSA de interés usando un específico subgrupo de portadoras OFDM.

Una ventaja adicional de O-LSI comparada con simulcast es la posibilidad de aumentar la potencia de las portadoras asignadas para la inserción del contenido local con el fin de mantener constante la potencia del símbolo OFDM. Este aumento de potencia en la parte de transmisión puede ser usada para aumentar el radio de cobertura o para aumentar la capacidad de transmisión utilizando modos de transmisión con eficiencia espectral más alta (mayor orden de modulación y/o tasas de codificación más altas). Por ejemplo, si existen cuatro LSA en la red SFN, una ganancia matemática hasta de 6 dB en el balance de enlace puede ser obtenida debido a la transmisión de la sub-portadoras con cuatro veces más la potencia. Esto permitiría utilizar una modulación 16QAM en lugar de una QSPK, doblando la tasa binaria disponible para los servicios locales. Un análisis más detallado de estas ganancias en el balance de enlace y capacidad de transmisión es presentado en las secciones 5.3 y 5.4, respectivamente.

### **5.2.3. Características de implementación**

#### **tipo de PLP para O-LSI**

Los datos útiles de los servicios locales transmitidos usando O-LSI son enviados en los PLP tipo 3 como se muestra en la figura 5.4. Todos los datos de



## 5.2 O-LSI, Inserción de servicios locales en DVB-NGH SFN a través de transmisión ortogonal

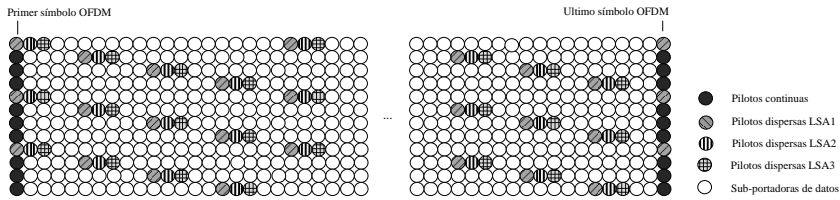


Figura 5.8: Patrón de portadoras piloto para tres LSA basado en el PP7.

los PLP tipo 3 en una trama DVB-NGH son transmitidos en símbolos OFDM consecutivos. El primero y el último O-LSI símbolo siempre son transmitidos con una mayor densidad de portadoras piloto para garantizar una adecuada estimación de canal.

### Patrones de Portadoras Piloto en O-LSI

En forma similar a la técnica H-LSI, en O-LSI es necesario agregar patrones de portadoras piloto dedicados para la estimación de canal en cada LSA. En este caso, los transmisores de cada LSA incluyen su propio PP que permita una correcta estimación de canal independiente de la influencia de los otros transmisores. La inserción de estos PP reduce la capacidad de transmisión del sistema en función del número de LSA presentes en la SFN. Las pilotos continuas son las mismas para todos los transmisores de la red. Sin embargo, las pilotos dispersas para cada LSA están basadas en el correspondiente PP con un desplazamiento en frecuencia de un determinado número de celdas, en forma tal que se obtengan PP ortogonales como se muestra en la figura 5.8. Teniendo en cuenta que los PP se repiten por cada una de las LSA, los PP más densos (PP1 y PP2) no son usados con O-LSI.

### Nivel de potencia de las celdas O-LSI

Las celdas piloto y de datos reservadas para O-LSI en cada LSA son transmitidas con un nivel de potencia amplificado por un factor  $\sqrt{n_{LSA}}$  seguido por un factor de normalización  $K$ . El valor de  $K$  es seleccionado de tal forma que los símbolos O-LSI de inicio y fin tengan la misma potencia promedio de los símbolos preámbulo P2. La potencia media de cualquier otro símbolo intermedio será ligeramente menor debido a la menor densidad de portadoras pilotos.

### Señalización de O-LSI

La señalización de O-LSI es transmitida dentro de la señalización de capa física L1. En esta señalización se indica el PP utilizado, la ubicación dentro de la trama DVB-NGH de los símbolos O-LSI de inicio y fin, el número de portadoras piloto dedicadas para O-LSI, el número de LSA presentes dentro de la SFN y su factor de reutilización.

### 5.3. Resultados de rendimiento

Los resultados presentados en esta sección han sido obtenidos utilizando una plataforma de simulación extremo a extremo de DVB-NGH <sup>1</sup>, la cual ha sido validada durante el proceso de estandarización. Esta plataforma permanece en constante evolución y adaptación a las nuevas tecnologías desarrolladas en el grupo de trabajo del foro DVB. Para las simulaciones se ha utilizado dos canales Rayleigh P1 o dos canales TU6 incorrelados. Con el fin de causar la violación del principio de la SFN se ha utilizado un retardo adicional entre canales configurado a 0.9 veces el intervalo de guarda del sistema. La frecuencia Doppler seleccionada para los canales TU6 fue de 27 hz, la cual corresponde a una velocidad de 60 km/h a una frecuencia de operación de 500 MHz. Un entrelazado temporal de 58 ms ha sido seleccionado, el cual es suficiente para sobrellevar las restricciones de un canal móvil en anchos de banda de 6 y 8 MHz.

#### 5.3.1. Rendimiento en cobertura de H-LSI

El rendimiento en cobertura para la solución técnica H-LSI ha sido obtenida considerando dos transmisores SFN adyacentes: uno emitiendo contenidos globales y locales en modulación jerárquica y otro emitiendo contenidos globales únicamente. Al igual que en los capítulos anteriores, la relación PI describe la diferencia en potencia de recepción (dB) de las señales provenientes del transmisor no jerárquico y el transmisor que utiliza H-LSI. Estos resultados pueden ser extendidos a más de dos transmisores considerando las señales de otras LSA como interferencia para el flujo LP deseado.

#### Degradación en cobertura de los servicios globales

Debido a la interferencia inter flujos propia de la modulación jerárquica, el flujo LP con contenidos locales actúa como ruido para el flujo HP con contenidos

---

<sup>1</sup>Plataforma de simulación del Institute for Communications Technology (IfN) de la Technische Universität Braunschweig en Alemania.

### 5.3 Resultados de rendimiento

Tabla 5.1: Mínima CNR para correcta decodificación del flujo HP de la modulación jerárquica (HM). LDPC 16200, PP4.

Modo de transmisión	Canal	No HM ( $\alpha = \infty$ )	HM ( $\alpha = 1$ )	HM ( $\alpha = 3$ )
QPSK CR 7/15	Rayleigh P1	2 dB	4.2 dB	-
	TU6@27Hz	4.2 dB	10 dB	-
QPSK CR 2/3	Rayleigh P1	3.8 dB	8 dB	-
	TU6@27Hz	5.3 dB	16 dB	-
16QAM CR 7/15	Rayleigh P1	7.8 dB	9.8 dB	8.3 dB
	TU6@27Hz	11.2 dB	13.2 dB	11.8 dB
16QAM CR 2/3	Rayleigh P1	12.3 dB	14.8 dB	12.9 dB
	TU6@27Hz	16 dB	19 dB	16.8 dB

globales. Esta penalización puede ser expresada como una reducción en la CNR efectiva para los servicios globales en función del valor de  $\alpha$ . La tabla 5.1 resume los valores de mínima CNR requerida para una correcta recepción del flujo HP cuando la señal es recibida del transmisor que utiliza H-LSI. Este puede ser considerado como el peor caso de recepción de los contenidos globales dentro del área de cobertura de la SFN, teniendo en cuenta que la distorsión generada por el flujo LP disminuye a medida que se aleja del transmisor jerárquico y se acerca al transmisor no-jerárquico. En este caso, la penalización a los servicios globales corresponde a la diferencia entre la mínima CNR requerida para el modo no jerárquico ( $\alpha = \infty$ ) y la CNR requerida para los modos jerárquicos evaluados. Esta penalización es básicamente generada por el desplazamiento a los puntos de la constelación que introduce la sobremodulación del flujo LP y depende del esquema de modulación, la tasa de codificación, el valor del parámetro  $\alpha$  y el tipo de canal donde es evaluado. Naturalmente, sin la utilización de H-LSI (ej.  $\alpha = \infty$ ) no existiría penalización.

La segunda penalización a los servicios globales es provocada por la violación del principio de la SFN, la cual no puede ser calculada de una forma general como la anterior debido a que esta depende de la ubicación del receptor dentro del área de cobertura de la SFN y de las características de propagación. La figura 5.9 muestra la penalización total a los servicios globales teniendo en cuenta la interferencia inter flujos y la diferencia en potencia entre señales recibidas (PI). Como referencia, la línea punteada muestra el rendimiento de un sistema no jerárquico 16QAM, CR 7/15 emitido desde los transmisores en SFN para los canales Rayleigh P1 y TU6. Comparando con estas referencias, la penalización

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

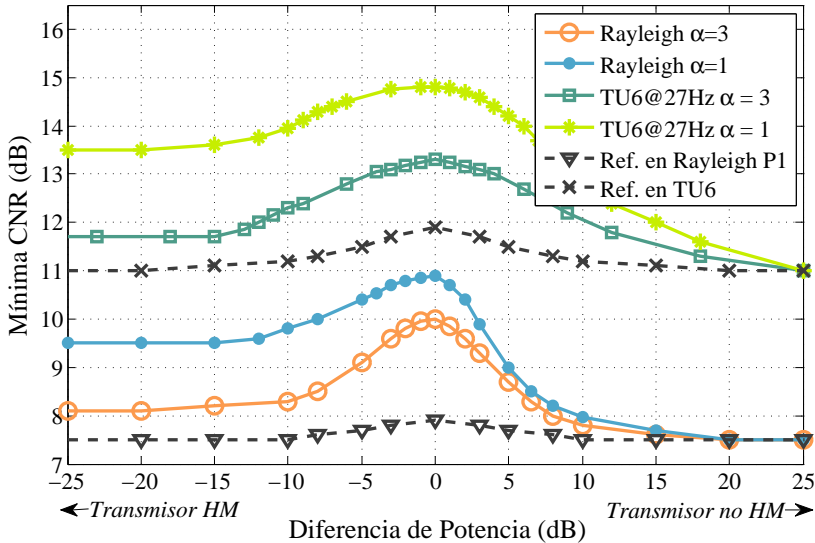


Figura 5.9: Rendimiento de los servicios globales utilizando H-LSI. HM 64QAM, CR 7/15 en canal Rayleigh y TU6. Las líneas punteadas representan el rendimiento de un sistema no jerárquico 16QAM, CR 7/15.

es mayoritariamente generada por la interferencia inter flujos en la vecindad del transmisor jerárquico (alrededor de 2 dB para  $\alpha=1$ , correspondiendo con los resultados presentados en la tabla 5.1). Esta penalización tiende a ser mayor a medida que el receptor se ubica en la mitad del área de cobertura de la SFN, alcanzando su valor máximo justo en aquellas zonas donde el PI es cero. Por ejemplo, se obtiene una penalización general de 3 dB para recepción portable y móvil cuando se habilita H-LSI con  $\alpha=1$  en uno de los transmisores y el receptor se encuentra ubicado en una zona con  $PI=0$ . La penalización general disminuye en áreas donde la señal del transmisor no jerárquico es dominante, llegando a ser despreciable en las vecindades de dicho transmisor.

### Rendimiento de los servicios locales

El rendimiento del flujo LP en canal Rayleigh y TU6 decodificado con una iteración ISD y para diferentes ubicaciones del receptor (valores de PI) entre el transmisor H-LSI y el transmisor no jerárquico es presentado en la figura 5.10. De la gráfica podemos observar que aun en las zonas con alto nivel de señal del transmisor no jerárquico ( $PI>0$ ) es posible conseguir una correcta decodificación de los contenidos locales, siempre y cuando se disponga de un

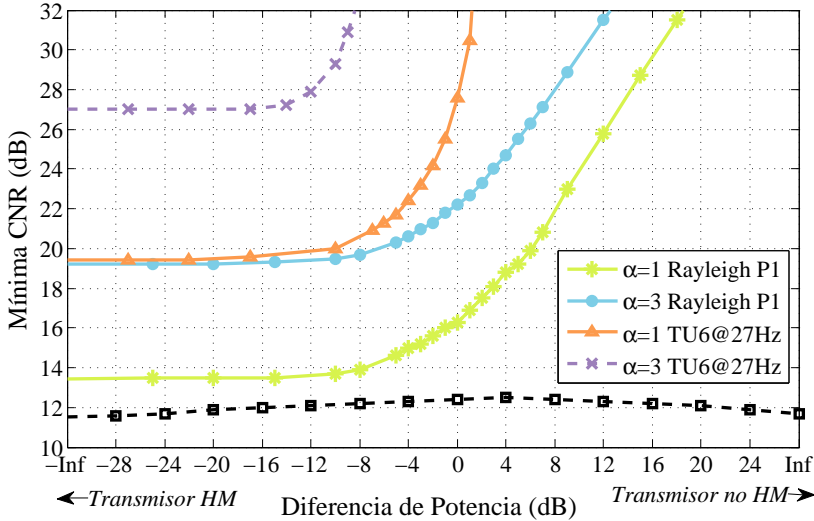


Figura 5.10: Rendimiento de los servicios locales usando H-LSI y decodificación ISD. HM 64QAM, CR 7/15 en canal Rayleigh P1 y TU6. La línea punteada representa el rendimiento de un modo no jerárquico 64QAM, CR 7/15.

alto nivel de CNR. El mínimo nivel de CNR requerido para decodificar correctamente los servicios locales se obtiene en las cercanías del transmisor H-LSI, sin embargo a medida que la distancia al receptor aumenta, este nivel de CNR también aumenta. Estableciendo como límite un incremento de hasta 3 dB en la mínima CNR requerida en un canal Rayleigh P1, podemos observar que la máxima diferencia en los niveles de potencia PI es de 3 dB y 0 dB cuando se utiliza H-LSI con  $\alpha = 1$  y  $\alpha = 3$ , respectivamente. Esto significa que los servicios locales pueden ser decodificados en aquellas zonas donde la potencia recibida del transmisor H-LSI es el doble o mayor de la potencia del transmisor no jerárquico, para el caso de  $\alpha = 1$  o donde son iguales o mayor para el caso de  $\alpha = 3$ .

Comparando el rendimiento de los servicios locales en un sistema H-LSI con la transmisión en un sistema SFN del mismo orden final de modulación pero no jerárquico (en este caso un modo 64QAM, CR 7/15 presentado como referencia en la gráfica 5.10), podemos observar que la penalización es de 2 dB y 7 dB para valores de  $\alpha = 1$  y  $\alpha = 3$ , respectivamente. Este efecto es debido básicamente a la falta de dispersión de la información del flujo LP y a la reducción de la distancia euclidiana entre los símbolos de la constelación jerárquica (principalmente para valores de  $\alpha > 1$ ). Una penalización adicional

## **CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA**

---

de 4.5 dB para ambos valores de  $\alpha$  se presenta si comparamos el rendimiento de H-LSI con una modulación clásica 16QAM, CR 7/15, el cual sería el modo de transmisión utilizado en una red SFN con enfoque simulcast para la transmisión de los servicios globales y locales, sin habilitar modulación jerárquica. Esta penalización se debe básicamente a la sobremodulación de los PLP globales utilizada en H-LSI para la transmisión de los contenidos locales.

### **5.3.2. Rendimiento en cobertura de O-LSI**

El rendimiento en cobertura para la solución técnica O-LSI ha sido obtenido considerando dos transmisores SFN adyacentes, cada uno emitiendo los mismos contenidos globales en los receptivos PLP y contenidos locales diferentes en las sub-portadoras asignadas ortogonalmente. Los resultados presentados pueden ser extendidos a más de dos transmisores debido a la ortogonalidad de las portadoras dedicadas a los servicios locales.

#### **Rendimiento de los servicios globales**

En O-LSI, la inserción de los contenidos locales no afecta el rendimiento en términos de CNR de los contenidos globales, debido a que su inserción se realiza en sub-portadoras totalmente independientes. En este sentido, los servicios globales mantienen todos los beneficios de las redes SFN (ej. cobertura adicional por la ganancia SFN) y por tanto el radio de cobertura solo depende de las características técnicas de las estaciones base, de la potencia de transmisión y del intervalo de guarda seleccionado para el sistema DVB-NGH. El rendimiento de este sistema es muy similar al presentado en la sección 4.3.2 para la combinación de señales en una clásica SFN de DVB-T2.

#### **Aumento en potencia de las celdas dedicadas a servicios locales**

Para O-LSI, el área de cobertura de los servicios locales podría ser básicamente el mismo de los servicios globales, si se selecciona el mismo modo de transmisión. Sin embargo el aumento en potencia de transmisión permitido en O-LSI para las celdas piloto y de datos de los servicios locales puede ser usado ya sea para aumentar el radio de cobertura y mantener la capacidad de transmisión, o para mantener el radio de cobertura y aumentar la capacidad de transmisión disponible para los servicios globales y locales.

El máximo aumento en potencia de las sub-portadoras O-LSI influye directamente en el rendimiento de los contenidos locales y depende principalmente del número de LSA presentes en la SFN, del PP y del tamaño de FFT seleccionado para el sistema. El máximo aumento en potencia teórico es representado

## 5.4 Ganancia en capacidad de transmisión

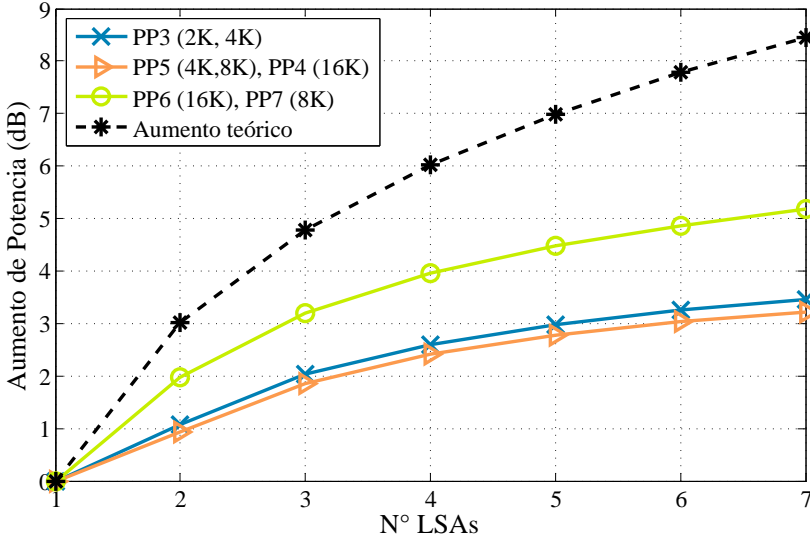


Figura 5.11: Aumento de potencia permitido para la sub-portadoras O-LSI en función del número de LSA. La línea punteada representa el máximo aumento teórico sin aplicar el factor de corrección  $K$ .

en la figura 5.11 mediante la línea punteada, el cual asume que toda la potencia no utilizada por las sub-portadoras no moduladas puede ser usada por las sub-portadoras O-LSI asignadas en las respectiva LSA. Sin embargo, un factor de corrección  $K$  debe ser aplicado al máximo aumento de potencia permitido con el fin de obtener una potencia promedio del primer y último símbolo O-LSI similar a la potencia media del símbolo P2. El máximo aumento en potencia resultante es presentado en la figura 5.11, para todas las combinaciones de tamaño de FFT y PP disponibles en DVB-NGH en función del número de LSA presentes en la SFN, el cual está limitado a 7 LSAs [12]. De acuerdo a los resultados, el máximo aumento de potencia es de alrededor de 5 dB (difiere alrededor de 3 dB del valor máximo teórico) y se consigue en sistemas DVB-NGH con 16K de FFT y PP6 o 8K de FFT y PP7.

## 5.4. Ganancia en capacidad de transmisión

En esta sección analizamos la ganancia en capacidad de transmisión ofrecida por las soluciones técnicas H-LSI y O-LSI comparada con el enfoque convencional para la inserción de contenidos locales en redes SFN conocido como

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

---

simulcast. En este análisis se asume que solo hay una frecuencia disponible para la transmisión de contenidos locales y globales. Al igual que en el análisis presentado para DVB-T y DVB-T2 en la secciones 3.2.5 y 4.3.3 respectivamente, la ganancia en capacidad de transmisión  $G_{LSI}$  puede ser calculada mediante la ecuación 3.2. Esta ganancia depende del número de LSA presentes en la red SFN ( $n_{LSA}$ ) y del porcentaje de tasa binaria dedicada a los servicios locales ( $\rho_{Local}$ ) relativo a la tasa binaria total para servicios nacionales y locales. En el enfoque convencional la tasa binaria total del sistema es igual a la tasa binaria ofrecida por el multiplex ( $R_{SFN}=R_{Mux}$ ). El porcentaje  $\rho_{local}$  de esta tasa binaria dedicado a servicios locales es compartido entre todas las LSA que conforman la SFN.

En H-LSI, los servicios locales son emitidos sobre los servicios globales utilizando una modulación jerárquica. Asumiendo que solamente se transmiten PLPs del tipo 1, la tasa binaria disponible en cada LSA puede ser calculada mediante la ecuación 5.1:

$$R_{H-LSI} = R_{Mux} \left( 1 + \frac{\rho_{Local}}{1 - \rho_{Local}} \times \frac{D_x D_y - 1}{D_x D_y} \right), \quad (5.1)$$

la cual incluye la reducción en tasa binaria producida por el PP adicional para los servicios locales, con una separación horizontal  $D_x$  y una vertical  $D_y$ . Es importante resaltar que el máximo porcentaje  $\rho_{local}$  para H-LSI asumiendo el uso de todas las sub-portadoras de datos para transmitir contenido local depende del orden de modulación y las tasas de codificación utilizadas para los dos tipos de contenidos, el cual puede ser calculado mediante la siguiente ecuación 5.2:

$$\rho_{Local,MaxH-LSI} = \frac{2 \times CR_{Local}}{(2 + \mu_{Global}) \times CR_{Global}} \quad (5.2)$$

donde  $CR_{Local}$  y  $CR_{Global}$  son las tasas de codificación de los servicios locales y globales, respectivamente. El parámetro  $\mu_{global}$  representa el numero de bits por símbolo del PLP global (ej. para QPSK es 2, para 16QAM es 4). El factor constante "2" refleja que los contenidos locales siempre son insertados como una sobremodulación QPSK. Cuando la misma tasa de codificación es utilizada para los servicios globales y locales, el factor  $\rho_{Local}$  tiene un máximo valor de 33.3% y 50% para modulaciones HM-64QAM y HM-16QAM, respectivamente.

La figura 5.12 muestra la potencial ganancia que puede ser lograda con H-LSI comparada con el enfoque clásico multicast, en función del factor  $\rho_{Local}$ . Ambas modulaciones HM disponibles en DVB-NGH han sido consideradas (HM-64QAM y HM-16QAM), con un PP3 ( $D_x = 6$  y  $D_y = 4$ ). Para estos resultados se asumen las mismas tasas de codificación para los servicios locales y globales, una multiplexación en tiempo para evitar interferencias entre LSA



## 5.4 Ganancia en capacidad de transmisión

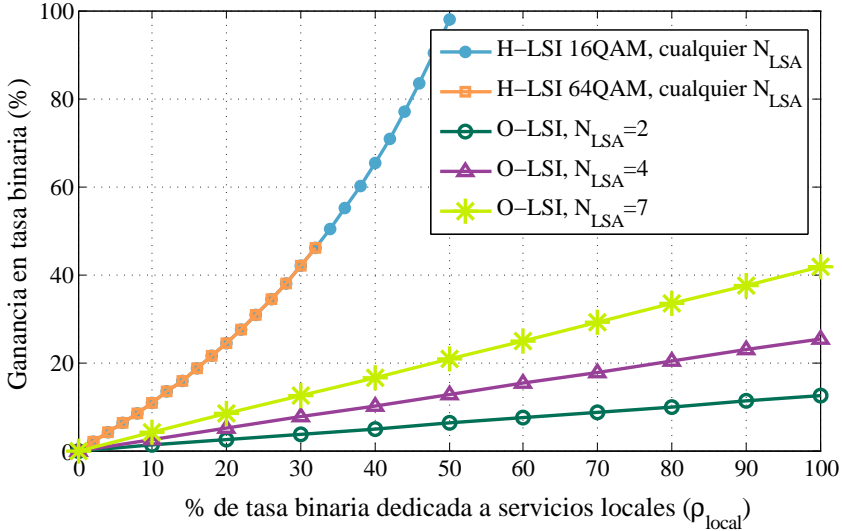


Figura 5.12: Ganancia en capacidad de transmisión ofrecida por las soluciones técnicas H-LSI y O-LSI en función del número de LSA presentes en la red SFN y del porcentaje de tasa binaria dedicada a servicios locales relativo a la tasa binaria total  $\rho_{local}$ .

adyacentes y la disponibilidad de todas las sub-portadoras de datos OFDM para H-LSI. Como se observa en la figura, se logra casi duplicar la capacidad de transmisión del sistema (100% de ganancia) cuando se utiliza una modulación HM-16QAM, básicamente porque por cada dos bits globales se insertan 2 bits locales en todas las sub-portadoras de datos. Esta ganancia en capacidad de transmisión de H-LSI puede ser multiplicada por el número de LSAs presentes en la SFN ( $n_{LSA}$ ) en aquellos casos donde no se habilita la multiplexación temporal entre LSA para realizar la inserción de los contenidos locales, a costa una reducción en el radio de cobertura debido a la interferencia entre LSAs.

En forma similar a H-LSI, la ganancia en capacidad de transmisión ofrecida por O-LSI depende del factor  $\rho_{Local}$  y de  $n_{LSA}$ . Comparado con el enfoque clásico simulcast, la ganancia en tasa binaria de O-LSI radica en la posibilidad de utilizar modos de transmisión con una eficiencia espectral más alta para los servicios locales mientras se mantiene la cobertura de los servicios globales, haciendo uso del aumento en potencia permitido para las sub-portadoras O-LSI. En este sentido, la tasa binaria disponible en un sistema con O-LSI puede ser calculada mediante la siguiente ecuación 5.3:

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

---

$$R_{O-LSI} = R_{Mux} \left[ (1 - \rho_{Local}) + \Delta C \times \rho_{Local} \times \frac{D_x D_y - n_{LSA} - 1}{D_x D_y} \right] \quad (5.3)$$

donde  $\Delta C$  es el aumento en capacidad ofrecida por el aumento en potencia de las sub-portadoras. Este aumento en tasa binaria no puede ser directamente estimado debido a que los modos de transmisión que habilitan una mejor eficiencia espectral, con la misma cobertura de los servicios globales, dependen de la CNR mínima inicial y del tipo de recepción a la que este orientada la red. Sin embargo, asumiendo que el aumento de potencia puede ser directamente agregado al nivel de potencia útil recibido, es posible identificar un orden de modulación y tasa de codificación que incremente la tasa binaria y que requiera la CNR de los servicios globales mas el aumento de potencia disponible (presentado en la figura 5.11).

La figura 5.12 muestra la máxima ganancia en tasa binaria ofrecida por O-LSI para recepción portable comparada con el enfoque clásico simulcast usando una modulación inicial 16QAM para los servicios globales y locales. La penalización en capacidad de transmisión debida a la repetición de los PP por cada LSA es incluida en estos resultados. Un tamaño de FFT 4K y PP3 han sido seleccionados con el fin de evaluar un modo apropiado para recepción portable y móvil. Mayores ganancias en capacidad de transmisión podrían obtenerse utilizando PP menos densos, sin embargo estos están orientados principalmente a recepción fija con antena en tejados. Como se aprecia en la figura, para un caso realista con un  $\rho_{Local}$  del 50 %, O-LSI ofrece una ganancia de alrededor del 12 % cuando se habilitan cuatro LSA o hasta del 20 % cuando se habilitan siete LSA. Esta ganancia en tasa binaria puede llegar a ser hasta del 40 % cuando se dedica completamente el multiplex a servicios locales y se comparten las sub-portadoras entre siete LSA, el cual es el número máximo de LSA permitidas en DVB-NGH para O-LSI.

### 5.5. Estimaciones de cobertura en un escenario real

Al igual que para DVB-T y DVB-T2 (secciones 3.2.4 y 4.3.4), en esta investigación hemos utilizado el diseño de red TDT del operador público RTVC de Colombia y la respectiva cartografía digital de terreno para la estimación de cobertura de los servicios nacionales y regionales en redes DVB-NGH. Un total de 14 estaciones transmisoras han sido consideradas para 6 canales regionales, divididos en clúster como se muestra en el anexo A. En el escenario, todos

## 5.5 Estimaciones de cobertura en un escenario real

Tabla 5.2: Parámetros de configuración de DVB-NGH para las estimaciones de cobertura de los servicios nacionales y regionales.

parámetro	Solución técnica			
	O-LSI		H-LSI	
	Global	Local	Global	Local
Ancho de banda	6 MHz			
Tamaño de FFT	16K			
Intervalo de guarda	19/256			
Distancia entre Tx SFN	53.2 km			
Modulación	16QAM	16QAM	16QAM	HM-64QAM $\alpha = 1$
Tasa de codificación	7/15	2/3	7/15	7/15
Min. CNR en Rayleigh P1	7.8 dB	10.2 dB	9.8 dB	13.8 dB
$E_{min}$ en recepción portable				
Outdoor 70 % (dBuV/m)	57.4	59.8	59.4	63.4
$E_{min}$ en recepción portable				
outdoor 95 % (dBuV/m)	63.6	66	65.6	69.6

los transmisores forman una red SFN usando ya sea H-LSI u O-LSI para la inserción de contenidos locales.

Los parámetros de configuración del modo de transmisión DVB-NGH utilizado para todas las estimaciones de cobertura presentadas en esta sección es resumido en la tabla 5.2. Además de los parámetros comunes tales como el FFT, el PP y el intervalo de guarda, hemos seleccionado el mismo orden de modulación y tasa de codificación para los servicios globales en las dos técnicas, con el fin de evaluar los efectos de implementación y rendimiento de H-LSI y O-LSI. Como se analizó en la sección anterior, las diferencias en los umbrales de mínima CNR para servicios globales y locales se deben principalmente al efecto de interferencia inter flujos de la modulación jerárquica en H-LSI y a la posibilidad de aumentar la potencia de las sub-portadoras en O-LSI. Los umbrales de CNR presentados en la tabla corresponden a los valores mínimos requeridos en las cercanías de los respectivos transmisores de la LSA. La influencia de las LSA adyacentes han sido tenidos en cuenta en el momento de realizar las estimaciones de cobertura, siguiendo los umbrales mínimos de CNR establecidos en la sección 5.3.

Como punto la partida, la gráfica izquierda de la figura 5.13 muestra las zonas de cobertura en recepción portable outdoor de los canales regionales

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

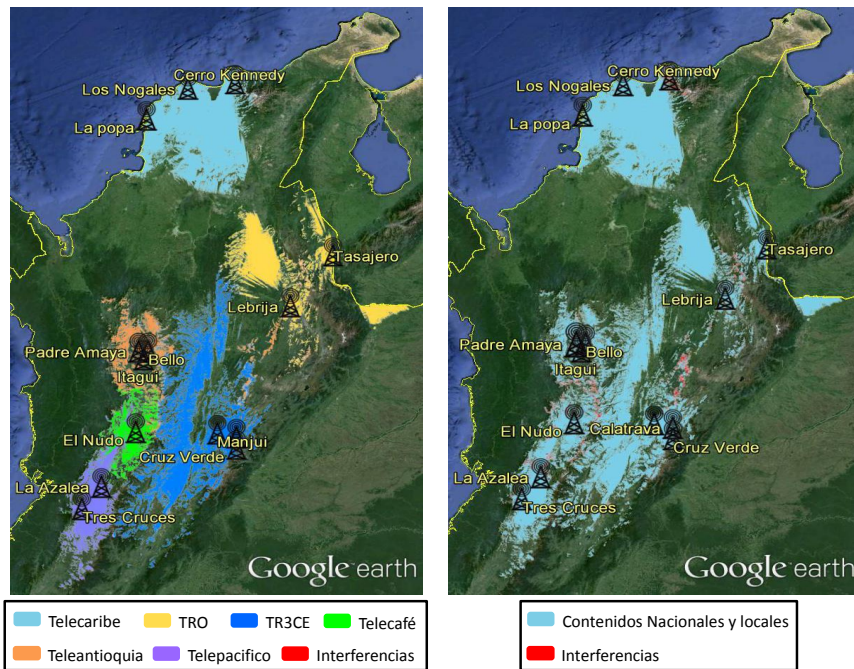


Figura 5.13: Cobertura DVB-NGH de los canales regionales. Utilizando una topología MFN de seis frecuencias (izquierda). Utilizando una topología SFN y el enfoque simulcast (derecha). Recepción portable outdoor (Rayleigh P1).

utilizando una topología MFN con frecuencias independientes. Debido a la no interferencia entre las distintas LSA, los porcentajes de cobertura obtenidos con esta topología serán considerados en esta sección como el porcentaje máximo de población cubierta que un canal puede alcanzar en función únicamente de las características técnicas de cada clúster de transmisores. Estos porcentajes de población cubierta son resumidos en la tabla 5.3.

### Cobertura de los servicios nacionales y locales en una red SFN utilizando la solución clásica simulcast

Con la solución clásica simulcast, los servicios regionales son emitidos desde todos los transmisores SFN y por tanto la cobertura de cada servicio regional se establece directamente de la cobertura general de la red SFN. La gráfica derecha de la figura 5.13 muestra la cobertura de los servicios nacionales y locales utilizando la técnica simulcast. En cada punto del escenario marcado como cu-

## 5.5 Estimaciones de cobertura en un escenario real

Tabla 5.3: Población cubierta con servicios nacionales y locales en recepción portable outdoor 70 % y 95 % de probabilidad de localización, utilizando una red DVB-NGH en topología MFN (6 frecuencias) y topología SFN con la técnica de simulcast.

		MFN (6 frecuencias)		SFN (simulcast)	
		70 %	95 %	70 %	95 %
Locales	TeleAntioquia	4'251.043	3'983.648	97.34 %	98.33 %
	TRECE	8'563.079	7'682.419	97.07 %	98.62 %
	Telepacífico	3'586.403	3'300.258	98.71 %	99.21 %
	Telecaribe	4'548.454	4'166.866	99.8 %	99.9 %
	TRO	1'817.532	1'653.306	99.62 %	99.8 %
	Telecafé	2'691.499	2'276.308	96.84 %	98.5 %
Nacionales		24'222.070	18'800.500	99.42 %	99.74 %

bierto es posible decodificar todos los contenidos nacionales y locales. Las zonas en color rojo representan las área sin cobertura debida a la autointerferencia de la red SFN.

La tabla 5.3 también resume el porcentaje de población cubierta en recepción portable outdoor para cada canal regional con la solución simulcast en una red SFN, normalizado con el caso de referencia donde cada canal regional utiliza una frecuencia independiente. De acuerdo a la tabla, los porcentajes de cobertura de los seis canales regionales en topología SFN simulcast están por encima del 97 % de la obtenida con una topología MFN. Sin embargo, su principal inconveniente es la necesidad de compartir la tasa binaria entre todos los canales regionales y la posibilidad de decodificar cualquier servicio local en toda el área de cobertura de la red SFN, incluso en zonas donde no son de especial interés.

Para el caso de los servicios nacionales, el porcentaje de población cubierta también se encuentra por encima del 99 % del obtenido en una configuración MFN. La leve reducción se debe principalmente a la autointerferencia SFN entre transmisores lejanos (mas allá del intervalo de guarda) propia de este tipo de topologías. El cálculo e inclusión de retardos artificiales en cada transmisor ha sido incluido en la estimación de cobertura para la topología SFN, con el fin de desplazar las autointerferencias a zonas con baja densidad poblacional, maximizando el área de cobertura en este tipo de topología.

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

---

### Cobertura de los servicios nacionales y locales utilizando las soluciones técnicas H-LSI y O-LSI

La técnica H-LSI junto con una multiplexación temporal para la inserción de los contenidos locales y la técnica O-LSI garantizan la no interferencia entre LSA adyacentes. En este sentido las áreas de cobertura de cada LSA dependen de las características técnicas de cada clúster de transmisores y de la robustez del modo de transmisión seleccionado. Siguiendo los resultados de rendimiento presentados en la sección 5.3 para estas dos soluciones, la figura 5.14 representa las zonas de cobertura obtenidas para cada canal regional haciendo uso de H-LSI y O-LSI. La menor cobertura ofrecida por la técnica H-LSI se debe principalmente al mayor nivel de CNR requerido para la decodificación del flujo LP de la modulación jerárquica, comparado con el nivel requerido por los servicios locales en la técnica O-LSI.

La tabla 5.4 resume el porcentaje de población cubierta para cada canal regional y tasa binaria disponible para cada tipo de servicio en una red SFN utilizando simulcast y los enfoques H-LSI y O-LSI. Los porcentajes de población cubierta con servicios nacionales y locales están normalizados con el caso de referencia donde cada canal regional utiliza una frecuencia independiente. En los resultados presentados para servicios locales, se ha asumido un  $\rho_{Local}=33\%$  el cual es el máximo disponible en H-LSI para el orden de modulación seleccionado. En el caso de la solución simulcast, este porcentaje tasa binaria dedicada a servicios locales debe ser compartido entre los seis canales regionales, los cuales son transmitidos en el mismo multiplex y con el mismo grado de robustez.

En el caso de O-LSI, esta fracción también es compartida entre los seis canales regionales, sin embargo estos son transmitidos con una tasa de codificación más alta (CR 2/3) gracias al posible aumento de potencia de las portadoras O-LSI de hasta 2.4 dB. Este aumento de potencia permite una ganancia en capacidad de transmisión total del sistema de 11.23% comparada con la técnica simulcast, mientras mantiene el mismo porcentaje de cobertura para servicios locales y globales. Esta ganancia en capacidad puede ser mayor a medida que se utilizando factores de  $\rho_{Local}$  más altos.

Finalmente, en H-LSI los servicios globales y locales son transmitidos con CR 7/15 y  $\alpha = 1$ . Esta técnica ofrece una ganancia en capacidad de transmisión de aproximadamente el 50% comparada con la técnica simulcast, a costa de un aumento en el nivel de CNR de hasta 6 dB comparada con la requerida para la decodificación de los servicios locales utilizando las otras técnicas. Adicionalmente, con la técnica H-LSI no se reduce la capacidad de transmisión inicialmente dedicada para servicios globales en el momento de insertar los contenidos locales.

De acuerdo a los resultados presentados en la tabla 5.4, la población cu-

## 5.5 Estimaciones de cobertura en un escenario real

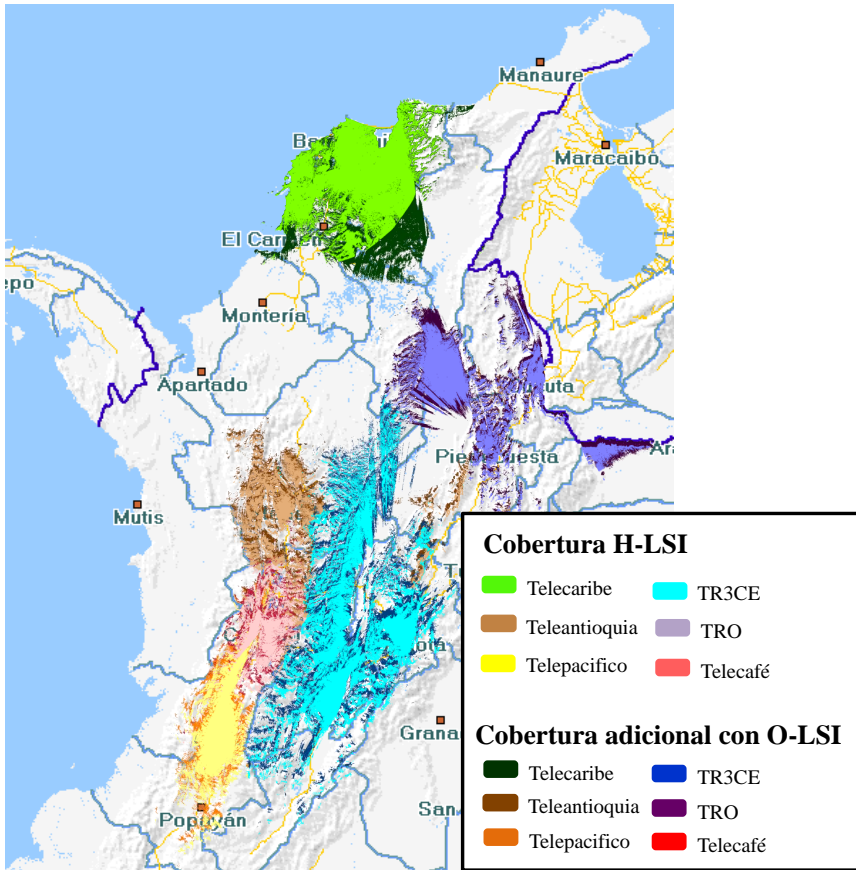


Figura 5.14: Cobertura DVB-NGH de los canales regionales en Colombia utilizando las soluciones técnicas H-LSI y O-LSI. Recepción portable outdoor (Rayleigh P1).

bierta con servicios nacionales es prácticamente la misma con cualquiera de las técnicas, tan solo un 4% de población cubierta con una topología MFN se ve afectado por la penalización del flujo HP de la modulación jerárquica de H-LSI. En cuanto a los porcentajes de cobertura de los canales regionales, la técnica de simulcast sufre una ligera penalización causa principalmente por las autointerferencias SFN generadas aun después de la inserción de los retardos artificiales. La técnica O-LSI obtiene el 100% del porcentaje de cobertura ofrecido por una topología MFN debido a la inserción ortogonal de los servicios locales, donde no existe interferencia entre LSAs. Finalmente, el mayor nivel de

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

Tabla 5.4: Población cubierta con servicios nacionales y locales en recepción portable outdoor 70 %. Tasa binaria disponible para cada tipo de servicio seleccionando un  $\rho = 33\%$ .

		SFN simulcast		O-LSI		H-LSI	
		Cober- tura	Tasa binaria	Cober- tura	Tasa binaria	Cober- tura	Tasa binaria
L O C A L	Antioquia	97.3 %	540 Kbps	100 %	720 Kbps	92.6 %	808 Kbps
	TRECE	97.0 %		100 %		89.7 %	
	Pacifico	98.7 %		100 %		91.4 %	
	Caribe	99.8 %		100 %		90.3 %	
	TRO	99.6 %		100 %		90.1 %	
	Telecafe	96.8 %		100 %		85.2 %	
Nacionales		99.4 %	6.46 Mbps	100 %	6.46 Mbps	96 %	9.7 Mbps
Tasa binaria total sistema			9.7 Mbps		10.79 Mbps		14.5 Mbps

CNR requerido para la decodificación del flujo LP de la solución H-LSI provoca una reducción en el porcentaje de cobertura entre el 8 % y el 15 % para los canales regionales. La figura 5.14 ilustra las áreas de cobertura de cada canal regional para una topología de red DVB-NGH SFN utilizando H-LSI y O-LSI. Las áreas en color claro representan las zonas cubiertas en recepción portable outdoor ofrecida por H-LSI, y las áreas en color oscuros representan las zonas de cobertura adicional ofrecida por la técnica O-LSI.

### 5.6. Conclusiones

La provisión eficiente de servicios locales en redes SFN con el mínimo compromiso de implementación fue uno de los requisitos comerciales del nuevo estándar DVB-NGH. En este capítulo hemos analizado las técnicas H-LSI y O-LSI para la inserción de contenidos locales adoptadas en DVB-NGH, identificando sus principales requerimientos de implementación y las potenciales topologías de red en que pueden ser desplegadas. Ambas soluciones conservan todas las ventajas de la topología SFN para los servicios globales, mientras emite los contenidos locales en sus respectivas áreas de interés únicamente, evitando la auto-interferencia entre LSAs. Cada solución técnica puede ser enfocada a diferentes casos de uso en función del compromiso entre capacidad de



transmisión y el radio de cobertura. Con la estandarización de estas soluciones, DVB-NGH abrirá la posibilidad de explotar la provisión de contenidos locales/regionales en redes SFN de una forma nunca antes realizada. Por ejemplo, una red DVB-NGH podría transmitir contenidos locales desde un transmisor de la red SFN, con cobertura únicamente en su área de interés y con potencialmente el mismo radio de cobertura de los servicios globales ofrecida por ese transmisor. La técnica óptima para la provisión de contenidos locales dependerá entonces de los casos de uso a los que están enfocada la red y de las características de escenario en particular tales como la localización de los transmisores SFN, la potencia de transmisión, la distribución de las LSA, etc.

Complementariamente, en este capítulo hemos evaluado el rendimiento de dichas soluciones técnicas en términos de capacidad de transmisión del sistema y de mínimos niveles de CNR requeridos para correcta decodificación dependiendo de la ubicación del receptor dentro del área de cobertura SFN. De acuerdo con los resultados obtenidos, los contenidos globales y locales emitidos con la técnica H-LSI requieren un mayor nivel de CNR que los requeridos con la técnica O-LSI, utilizando el mismo orden final de modulación y tasa de codificación. Este efecto se debe principalmente a la interferencia inter flujo propia de la modulación jerárquica. La no modulación de un determinado grupo de sub-portadoras en la técnica O-LSI, permite emitir las sub-portadoras dedicadas para la inserción de contenidos locales con un mayor nivel de potencia que las reservadas para contenidos globales. Este aumento de potencia puede ser utilizado para extender el radio de cobertura y mantener la capacidad de transmisión, o aumentar la tasa binaria (usando un modo de transmisión más eficiente espectralmente) y mantener el mismo radio de cobertura de los servicios globales.

El análisis en términos de capacidad de transmisión realizado en esta investigación permitió establecer que la solución técnica H-LSI ofrece una mayor ganancia en la tasa binaria total del sistema que O-LSI, al compararla con la técnica clásica simulcast. La máxima ganancia está cercana al 100% (prácticamente duplicar la capacidad del sistema) cuando se utiliza una modulación jerárquica 16QAM, y se debe principalmente a la inserción de 2 bits por cada sub-portadora dedica a H-LSI y a la no reducción de la tasa binaria reservada para servicios globales. La ganancia ofrecida por O-LSI es menor (ganancia hasta del 40%) debido a que la inserción de contenidos locales penaliza la tasa binaria reservada para los servicios globales y a que el uso de modos de transmisión más eficientes espectralmente para las sub-portadoras O-LSI depende del número de LSA presentes en la SFN, del PP utilizado y de la potencia media de los símbolo P2. Es importante resaltar que en ambas soluciones, la ganancia general del sistema depende del porcentaje de tasa binaria dedicado a servicio locales relativa a la tasa binaria total de servicios globales y locales, definido

## CAPÍTULO 5. INSERCIÓN DE SERVICIOS LOCALES EN REDES DVB-NGH DE FRECUENCIA ÚNICA

---

en esta investigación como  $\rho$ . En O-LSI este valor de  $\rho$  puede ser asignado libremente entre 0 y 100 % del multiplex, reduciendo de forma proporcional el porcentaje de tasa binaria de los servicios globales. En H-LSI este valor de  $\rho$  está limitado a un máximo del 50 % o 33.3 % para las modulaciones jerárquicas 16QAM o 64QAM, respectivamente.

Con base en el rendimiento en cobertura y capacidad de transmisión, y con el fin de evaluar la viabilidad de las soluciones propuestas en un escenario real, hemos realizado un ejercicio de estimación de cobertura de los canales regionales en Colombia. Los resultados indican que en condiciones de recepción portable outdoor y en general para cualquier tipo de recepción, la técnica O-LSI ofrece la misma cobertura obtenida por cada canal regional utilizando una topología MFN con frecuencias independientes. La solución técnica simulcast experimenta una ligera diferencia en los porcentajes de cobertura ofrecida por la topología MFN, generada principalmente por las auto-interferencias de la red SFN aun después de aplicar los retardos artificiales en cada transmisor. Para la solución H-LSI se obtienen coberturas de los servicios regionales entre el 85 y 92 % de la ofrecida con una topología MFN aun después de utilizar una multiplexación temporal en la inserción de contenidos locales para evitar interferencia entre LSAs. Finalmente, la cobertura obtenida para los servicios nacionales es prácticamente la misma utilizando simulcast, O-LSI o una topología MFN de frecuencias independientes, en contraste a una reducción del 4 % obtenido con la solución H-LSI. Las reducciones en los porcentajes de cobertura de los servicios globales y locales con H-LSI se deben principalmente a la interferencia inter flujo propia de la modulación jerárquica.

## Capítulo 6

# Conclusions and design guidelines for fixed/mobile and local insertion services in SFN broadcasting systems

### 6.1. Concluding Remarks

This dissertation has investigated different technical solutions to optimize the current and future broadcasting systems in two key aspects:

- The simultaneous delivery of fixed and mobile services using the same frequency channel in the first and second generation of terrestrial broadcasting system.
- The efficient transmission of global and local services using the same RF channel and network infrastructure.

The technologies used in the proposed solutions are already included in family of terrestrial broadcasting systems standardized by DVB or can be implemented in backwards compatible way with legacy receivers. This includes the first and second generation systems DVB-T and DVB-T2, as well as the next generation system DVB-NGH. Nevertheless, the work carried out in this

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONS AND DESIGN GUIDELINES FOR FIXED/MOBILE AND LOCAL INSERTION SERVICES IN SFN BROADCASTING SYSTEMS

---

dissertation is of generic nature and can be applied to future evolutions of standards such as the Japanese ISDB-T, the FOBTv initiative or the American ATSC 3.0. Laboratory tests, field measurements and full-featured simulators have been used to obtain a more accurate depiction of the performance in DVB systems. The applicability of these solutions has been analyzed in real scenarios, in particular we carried out coverage estimations using professional planning tools and information about the current DTT network deployed in Valencia (Spain) and the DTT network design of the public TV broadcaster of Colombia.

### 6.1.1. Simultaneous provisioning of fixed and mobile services in terrestrial broadcasting systems

In order to improve the reception of mobile broadcasting services in networks planned for fixed reception, we have investigated the combined use of transmission modes that offer services-specific robustness with diversity techniques in the time, frequency, and space domains. The transmission modes with per-service robustness is available in DVB-T by means of the hierarchical modulation, while in DVB-T2, it can be available through of multiples PLP technique or the T2-Lite profile. Time and frequency diversity is generally achieved by means of FEC and interleaving, while space diversity is enabled by means of multiple transmit and/or receive antennas.

#### Fixed and mobile reception in DVB-T networks

DVB-T was not originally envisioned for the provision of mobile services and its main limiting factor is the lack of time interleaving. In order to achieve time diversity in DVB-T systems, we have considered the utilization of UL-FEC techniques in such a way that it is fully compatible with legacy DVB-T receivers. This permits the FEC decoding to be done in generic software processors even on low-complexity devices without any upgrades in hardware.

The gain of AL-FEC depends on the interleaving duration and the code rate selected. According to the simulations results, the utilization of UL-FEC techniques in DVB-T is only interesting for interleaving durations up to several seconds, or when it is not possible to increase the reception robustness at the physical layer by means of lower code rates and constellations. The gain of AL-FEC with interleaving duration around 10 s is approximately 5-10 dB depending on the Doppler.

For space diversity in DVB-T, the investigation was focused in SIMO scheme with two antenna in reception due to compatibility issues with existing networks and systems, whereas the gain of MISO configurations is much more limited

due to the lack of Channel State Information (CSI) at the transmitter site. In the space domain, the utilization of SIMO achieves a 6 dB gain if AL-FEC is not used for time diversity.

Since both AL-FEC and SIMO exploit the diversity caused by multipath propagation, the improvement of using both AL-FEC and SIMO is lower than the individual sum of gains. The combined gain of AL-FEC and SIMO is approximately 9-14 dB. The analysis in terms of link budget reveals that this gain is not sufficient to enable the provision of mobile services with acceptable coverage levels in DVB-T networks planned for fixed reception.

In the case of Hierarchical Modulation (HM), the higher robustness of the HP stream can be used to transmit mobile services, while the LP stream can broadcast services to fixed receiver. However, both the HP and LP streams are transmitted with lower robustness compared to the equivalent constellation in non-HM mode due to the inter-layer interference. The robustness gain achieved with the HP stream depends on the modulation order, CR and  $\alpha$  factor selected. In this way, HM can achieve a gain up to 12 dB in the HP stream by using a more robust configuration (QPSK 1/2) inside of a non-uniform 64QAM 2/3.

Our investigations have shown that the total gain against shadowing and fast fading obtained with the combined use of HM mode with time, frequency and space diversity is approximately 16 dB, offering the same bit rate for mobile services that the more robust transmission mode of DVB-T. This gain can increase up to 25 dB using the more robust HP stream and AL-FEC with long interleaving duration and higher code rate at expense of reduced the useful bit rate of mobile services. The analysis in terms of link budget shows that this gain is sufficient to enable the provision of portable services with acceptable reception and it is very close to overcome the link margin to enable good portable reception and acceptable mobile reception in DVB-T networks planned for fixed reception (around 2 dB of distance). The coverage estimation in real scenarios reveals that the current DTT network deployed in Valencia (Spain) would obtain an coverage level of 95 % for acceptable mobile reception enable the combined use of these technical solutions, while keep the current coverage level for fixed reception.

The main advantage of this combination is the possibility to provide in-band mobile services in DVB-T networks dimensioned for fixed rooftop reception with slight impact in its coverage area. In this sense, this combination required the reservation up to 33 % or 50 % of the total transmission capacity to provide mobile services using hierarchical 64QAM or 16QAM mode, respectively. The main drawback of this combination is an increase of the memory requirements and the zapping time for mobile services, which are generally proportional to the interleaving duration of AL-FEC. Moreover, AL-FEC mechanisms reduce the bit rate due to the transmission of additional parity data.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONS AND DESIGN GUIDELINES FOR FIXED/MOBILE AND LOCAL INSERTION SERVICES IN SFN BROADCASTING SYSTEMS

---

### Fixed and mobile reception in DVB-T2 networks

The utilization of multiple PLP or the T2-lite profile in DVB-T2 allows fixed and mobile services to be multiplexed in time without interfering with each other. The results show that T2-Lite profile has better performance in terms of spectral efficiency if it is compared with a multiple PLP configuration with the same robustness for fixed and mobile services and also the same duration of GI. However, the advantage of T2-Lite dismisses when the transmission of mobile services occupies a higher percentage of the transmission time. Both techniques can achieve a gain up to 16 dB or 20 dB for mobile services using a more robust configuration (QPSK 1/2) inside of a 64QAM or 256QAM constellation oriented to fixed reception, respectively.

In the case of DVB-T2 we have analyzed the use of time interleaving at the physical layer and the tradeoffs that are possible in terms of time diversity and data rate. In addition, we considered the utilization of AL-FEC to overcome the limitations of the physical layer and achieve long time interleaving. The main idea is to combine the powerful protection at the physical layer against noise and fast fading, with the long time interleaving protection that can be provided at upper layers against shadowing. Our investigations reveal that intra-frame interleaving ( $T_{int} \leq 250$  ms) is generally sufficient to compensate the fast fading, whereas the protection against shadowing increase using interleaving durations up to 10 s.

The simulation results have shown that the utilization of SIMO achieves similar gains as in DVB-T, i.e. between 4-6 dB depending on TI, while the combined gain of AL-FEC and SIMO is approximately 9-13 dB. The total gain against shadowing and fast fading obtained with the combined use of transmission modes with per-service robustness with time, frequency and space diversity would be up to 33 dB. The analysis in terms of link budget shows that this gain can enable the provision of portable and mobile services with good reception in DVB-T2 networks planned for fixed reception. An additional advantage of this combination compared with the solutions proposed for DVB-T is that there is no performance degradation between services due to the temporal multiplexing used for multiple PLP or T2-Lite.

As particular case, DVB-T2 is deployed in Colombia with 6 MHz of bandwidth channel. The mobile performance in 6 MHz suffers a penalty due to the lower separation between OFDM sub-carriers compared to the systems with 8 MHz of bandwidth channel. General speaking and do not taking into account the effect of real channel estimation, the maximum Doppler frequency available in a DVB-T2 system with 6 MHz is 75 % of allowed in a system with 8 MHz. On the contrary, both systems require the same minimum CNR level for successful decoding due to it does not depend on the bandwidth channel.

### Fixed and mobile reception in DVB-NGH networks

DVB-NGH is the handheld evolution of the second-generation DTT standard DVB-T2. One of its main advantages compared to first generation mobile broadcasting DVB systems is that can be transmitted in-band with DVB-T2 services oriented to fixed reception. Thanks to the FEFs of DVB-T2, it is possible to efficiently share the capacity of one-frequency channel in a time division manner between DVB-T2 and DVB-NGH. However, the profile T2-Lite has also this feature, and first commercial devices are starting to be available already in 2012.

DVB-NGH includes the latest advanced technologies in wireless communications in order to improve the coverage in the more severe propagation conditions, reduce the network infrastructure investments and achieve efficient power consumption of the receivers to increase the battery life. In this way, DVB-NGH is the first mobile broadcast system that exploits the diversity of the mobile channel in all dimensions: frequency diversity among several RF channels with TFS, time diversity with long time interleaving (in the order to 10 s) at the physical layer with fast zapping support, and space diversity with MIMO. Furthermore, DVB-NGH employs two-dimensional and four-dimensional rotated constellations (also known as signal-space diversity) to increase the diversity order.

#### 6.1.2. Local services insertion in Single Frequency Networks

DTT networks make use of either SFN or MFN topologies. These network topologies are not ideally suited for the delivery of both global and local services in an efficient way. An ideal solution to transmit global and local content in the same RF channel should retain all SFN advantages for global services and the insertion of local services should be spectrally efficient using any subset of sites of the network, while their coverage area (LSA) is restricted to the specific areas where local content is addressed.

In this sense, we have investigated different technical solutions to insert local contents in SFN topologies for DVB-T, DVB-T2 and DVB-NGH. These solutions are based on Hierarchical Modulation (for DVB-T and DVB-NGH) and temporal or frequency multiplexing (for DVB-T, DVB-T2 and DVB-NGH). The investigation was mainly focused to analyze the implementation issues, evaluates the margin protection between wanted and unwanted signal in each LSA, establishes the transmission capacity gain and estimates the population covered offer by each technical solution.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONS AND DESIGN GUIDELINES FOR FIXED/MOBILE AND LOCAL INSERTION SERVICES IN SFN BROADCASTING SYSTEMS

---

### Local services insertion in DVB-T networks

The HM transmission mode and time slicing technique are been evaluated in this dissertation for providing of local and global contents in DVB-T networks. The HM has already been included in the standard and time slicing solution is backwards compatible, in the sense that receivers that have been deployed in the original system can continue receiving data without hardware modifications.

As the global contents are the same in HP stream or slot time dedicated to global services, they take advantage of the SFN gain and increase the total coverage area. On contrary, if local services are emitted simultaneously from all transmitters, the coverage area of each LSA will be limited by the interference perceived from the others LSAs. In this investigation we have evaluated the Margin Protection (MP) between a wanted DVB-T signal in hierarchical and non-hierarchical mode when is interfered by other different DVB-T signal. These MP in dB have been established as function of the receiver's location into the SFN coverage area, which are great used in planning and coverage estimation process of SFN with LSAs. A shared time-division manner can be used for LP streams or the local slots between LSAs in order to minimize the interferences and increasing the coverage area at the expense of a reduction in the transmission capacity.

The main drawback of the HM solution is that both the HP and LP streams are transmitted with lower robustness compared to the equivalent constellation and code rates in time slicing technique (non-HM mode), it is due to the multiplexing of different streams into the same constellation. This penalty means a reduction in the maximum coverage level available for global and local services. According with the results obtained in this investigation for a real scenario in Colombia, this penalty represents a reduction in the population covered for each regional channel up to 7% in fixed reception or up to 4% in portable reception.

The reuse of LP stream or the time slots dedicated to local services offers a transmission capacity gain compared to the simulcast approach. This gain depends on the percentage of data rate assigned to local services relative to the whole data rate of both global and local services ( $\rho_{Local}$ ), and the number of LSA into the SFN ( $n_{LSA}$ ). Time slicing techniques assign with more flexibility (between 0% and 100%) the bit rate dedicated to local services compare with HM, which assigns in fixed way the LP stream in each LSAs (maximum 50% and 66% for hierarchical 16QAM and 64QAM, respectively). Whereas, the available transmission capacity for global services is limited to the maximum available with QPSK modulation. If shared time-division manner is not enable and  $\rho_{Local}$  is 100%, the total transmission capacity of the SFN system available with time slicing technique can be  $n_{LSA}$  times the capacity available



with simulcast approach. However, these high transmission capacity gains are obtained at the expense of reduction of the coverage radius of each LSA.

### Local services insertion in DVB-T2 networks

The technical solutions analyzed in this dissertation for local service insertion in DVB-T2 are based on multiples PLP and the auxiliary streams. With multiples PLP approach, the basic idea is replace a national PLP with local content in each LSA. The second solution inserts different local contents in each LSA using the auxiliary streams of the DVB-T2 signal, it based on the principle of the cell values for auxiliary streams need not be the same for all transmitters in a SFN [3]. Due to each PLP or auxiliary stream is transmitted following a temporal multiplexing schedule, these solutions can be consider as the equivalent to time slicing solution proposed in this dissertation for DVB-T. The main advantage of these solutions compared with the hierarchical modulation proposed for DVB-T is that the insertion of local services do not generate degradation to the coverage level of global services.

As the national PLPs broadcast the same content, they take advantage of the SFN gain and increase the total coverage area. On contrary, if local PLP or auxiliary streams with local content are emitted simultaneously from all transmitters, the coverage of each LSA will be limited by the interference perceived from the others LSAs. Like in DVB-T, we have evaluated the MP between a wanted local PLP and auxiliary stream when is interfered by other different PLP or auxiliary stream, respectively. According with the results, both solutions broadcasting local services simultaneously allow a population covered in portable reception above of 90 % of the offered by a MFN topology. A shared time-division manner can be used between LSAs in order to increase the population covered (up to 100 %) at the expense of a reduction in the transmission capacity.

In a similar way that in DVB-T, the simultaneous use of PLP dedicated to local services in each LSA offers a transmission capacity gain compared to the simulcast approach. The  $\rho_{Local}$  can be freely selected between 0 and 100 % in the multiples PLP solution. However, in the other solution, the auxiliary streams cannot take up more than the 50 % of the DVB-T2 frame. In this way, the total transmission capacity of the SFN system available with the multiples PLP solution can be  $n_{LSA}$  times the capacity available with simulcast approach.

### Local services insertion in DVB-NGH networks

In this dissertation has been evaluated the two complementary techniques adopted by DVB-NGH to transmit local content in SFNs: Hierarchical Modulation (H-LSI) and Orthogonal Local Services Insertion (O-LSI). Either technique

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONS AND DESIGN GUIDELINES FOR FIXED/MOBILE AND LOCAL INSERTION SERVICES IN SFN BROADCASTING SYSTEMS

---

addresses different use cases with a different coverage-/capacity performance trade-off. Both solutions keep preserve the SFN advantage for global services by broadcasting the local content in their respective target areas only, avoiding SFN self-interference between them.

To achieve a good performance with H-LSI, the subtraction of the global stream from the local stream by means of an iterative manner called ISD. Decoding is not possible without ISD even in the presence of a modest regional transmitter signal power. However, with ISD, successful decoding is possible even if the receiver is located just in-between the local and global transmitters. The ISD decoding is not to be mistaken for iterative decoding between QAM demapper and LDPC decoder, which can be used mutually within each ISD iteration. Compared with the classic SFN approach, H-LSI offers a high capacity gain for local services while keeping the data rate of the global stream constant, at the expense of a coverage reduction for both global and local services. In order to avoid interferences between neighboring local areas, the LP stream can be shared in a time-division manner, such that each local area transmits local services at different instants of time.

The main advantage of the O-LSI technique is that there is no interference between transmitters from different LSAs because the inserted local content is orthogonal to each other. This way, local services can potentially have the same coverage area as global services, such that it is possible to receive one local service at any point in the network. Furthermore, the insertion of local services does not affect the coverage of the global services. A further advantage of O-LSI compared to simulcasting comes from the fact that the power of the OFDM carriers devoted to local services can be boosted in order to keep constant the OFDM symbol power in the transmitters. This power boost at the transmitter side can yield improved area coverage for local services. But it can be also translated into a capacity increase using a transmission mode with higher spectral efficiency (higher code rates and/or higher modulation order). Compared to the H-LSI technique, the drawback of O-LSI is that the capacity available for global services is reduced, since the local services are not transmitted on top of the global services. With O-LSI, global and local services share all the available OFDM data carriers.

Since the receivers need to demodulate each transmitter independently of the other transmitters, each transmitter must include its own pilot pattern. These additional pilots reduce the useful data capacity and depend on the  $n_{LSA}$  into the SFN. Using H-LSI and a shared time-division manner to insert local services, only one pilot pattern must be added. However, in O-LSI the scattered pilot pattern is repeated for each LSA with a number of cells being frequency shifted, such that the different patterns are orthogonal.

The applicability of both solutions was analyzed in a real scenario. In par-

## **6.2 Recommendations for the provisioning of fixed/mobile and local insertion services in SFN broadcasting systems**

---

ticular, we estimated the coverage population of regional channels in Colombia using the current TDT design of the public broadcaster. According to the coverage results, the national coverage using MFN topology, classic SFN and O-LSI are basically the same, since the streams are transmitted with a similar DVB NGH transmission mode. Slight different level was obtained for classic SFN approach, due to the self-interferences, even after to insert artificial delays. Using the same order modulation for the HP stream of the H-LSI solution, the national coverage suffers a slight (4%) reduction due to the inter-layer interference of the HM.

For local services, the same coverage level is obtained with MFN topology and O-LSI approach, due to its orthogonal transmission mode eliminating the SFN self-interferences between the clusters. The higher increased CNR required for local stream decoding for H-LSI compared with the other solutions generates a reduction in the coverage level of local services between 8% and 15% for portable reception.

## **6.2. Recommendations for the provisioning of fixed/mobile and local insertion services in SFN broadcasting systems**

### **6.2.1. On the provisioning of mobile services in-band with fixed services**

This dissertation shows that the simultaneous delivery of fixed and mobile services in terrestrial broadcasting networks using the same RF channel is possible. The combined use of diversity techniques and transmission modes with services-specific robustness in the same OFDM signal can be used to updated DVB-T and DVB-T2 systems in order to provisioning mobile services with the infrastructure already deployed. Furthermore, the next generation of mobile broadcasting systems should prioritize the use of diversity at the physical layer in order to achieve the highest performance.

In order to optimize the TDT system performance, the interleaving duration at the physical layer should be in the order of hundreds of milliseconds, whereas long time interleaving up to several seconds should be provided at Upper Layers.

In DVB-T, service-specific robustness can be possible enabling the hierarchical transmission mode available in this standard. The inter-layer interference of hierarchical modulation can be adjusted by increasing the spacing between HP constellation states ( $\alpha$ ) or the code rates of each stream, at expense of reducing coverage or available capacity.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONS AND DESIGN GUIDELINES FOR FIXED/MOBILE AND LOCAL INSERTION SERVICES IN SFN BROADCASTING SYSTEMS

---

For DVB-T2, network operators can decide the use of multiple PLPs or the T2-Lite profile in order to multiplex fixed and mobile services in the same RF channels. If the DVB-T2 network is addressed to portable reception employed smaller FFT size and dense PP, the multiple PLP can be used to transmit mobile services. However, if the DVB-T2 network is oriented to fixed reception with highest useful data rate (generally using larger FFTs and sparse PPs), it should use T2 profile to provide mobile services in the same RF channel with good performance and totally independent of the basic T2 frame. Furthermore, T2 profile has higher spectral efficiency than multiple PLP technique (comparing configuration with the same robustness for fixed and mobile services and the same guard interval), when low percentage of time that is dedicated to the transmission of mobile services is chosen.

Finally, next generation systems should mandate or at least encourage the implementation of multiple antennas in receivers. This provides very large gains with cross-polarized or co-polarized antennas even if the transmitters are equipped with a single antenna. While a pair of cross-polarized antennas is better suited to handheld devices at UHF frequencies, multiple co-polarized antennas can be easily fitted in vehicular receivers. In contrast, the implementation of multiple antennas in transmitters for MISO purposes is not recommended in mobile broadcasting systems. The performance of MISO techniques in mobile scenarios is limited, and generally, it does not justify the implementation of multiple transmit antennas. Distributed MISO techniques are still recommended, as in this case, better diversity is achieved without any modification in the existent network infrastructure. In case of DVB-T2, the distributed MISO Alamouti offers a gain around of 2 dB in the link budget at expense of the transmission of additional pilots for channel estimation.

### 6.2.2. Local services insertion in TDT Single Frequency Networks

For DVB-T systems, the time slicing technique is recommended due to it offers potentially the same coverage area for global and local services. On contrary, the hierarchical solution can affect slightly the coverage area or the useful data rate of the global services. Furthermore, time slicing techniques assign with more flexibility (between 0% and 100%) the bit rate dedicated to local services compare with hierarchical modulation. Slots of time with duration up to 250 ms should be used for time slicing solutions in order to guarantee the continuity of the services and do not overflow the buffers in the receivers.

Local insertion in DVB-T using time slicing is made in the application layer, therefore this multiplexing is made either in the national or regional head-end. In order to bandwidth save in the distribution networks, it should be in the

## 6.2 Recommendations for the provisioning of fixed/mobile and local insertion services in SFN broadcasting systems

---

regional head end, due to does not duplicate the national content from the national head-end to the each regional head-end. Then, the multiplex with national and local contents is delivery to respective LSA transmitter using a regional distribution network. In case of hierarchical solution, the insertion of local services is quite made in the DVB-T modulator of each site. From this point of view, the hierarchical modulation solution save more bandwidth due to it not requires duplicate the national content in none of the distribution networks.

In DVB-T2, there are two technical solutions to insert local contents: multiple PLPs or auxiliary streams. Although the performance of both solutions is quite similar, multiple PLP are fully signaled in the L1 signaling of physical layer and therefore can be decoded with the current commercial receivers.

On one hand, the auxiliary streams are sequence of cells carrying data of as yet undefined modulation and coding, therefore the successful decoding of local services can be require additional software implementation in the current and future receivers. Furthermore, the auxiliary streams cannot take up more than the 50% of the DVB-T2 frame. On the other hand, in multiples PLP the percentage of data rate dedicated to local services can be selected between 0 and 100% freely. The advantage that the auxiliary streams are not fully standardized is that local insertion can be implemented in orthogonal manner like O-LSI of DVB-NGH. In this case, the coverage performance and capacity gain will be the same that the analyzed in this dissertation for O-LSI.

For DVB-NGH, it is recommended to use O-LSI if the transmitters of different LSAs are closed, due to the orthogonal transmission avoid totally the interferences between them. Furthermore, O-LSI does not affect the coverage of the global services and the percentage of the data rate dedicated to local services can be selected freely. The boosted power available in this technique must be enable always in order to increase the coverage area of the local services or increase the useful data rate. Sparse pilot patterns must be selected for O-LSI in order to reduce the penalty in the useful data rate generated by the additional PP in each LSA. On contrary, if the transmitters of different LSAs are far, the H-LSI can be used without shared division-time manner in order to maximize the transmission capacity of the system. As in DVB-T, the inter-layer interference can be adjusted with the  $\alpha$  factor and the code rates of each stream.

The main advantage of the O-LSI technique adopted in DVB-NGH is that there is no interference between transmitters from different LSA because the inserted local content is orthogonal to each other. For the remains technical solutions proposed in this dissertation, the insertion of local services should be shared in a time-division manner in order to avoid interferences between neighboring local areas.

## CAPÍTULO 6. CONCLUSIONS AND DESIGN GUIDELINES FOR FIXED/MOBILE AND LOCAL INSERTION SERVICES IN SFN BROADCASTING SYSTEMS

---

Finally, we have analyzed three different kinds of architectures (national, regional or local). These architectures have their own advantages and disadvantages, which depend on several factors, such as country geography, distribution network topology and cost, service type and so on. However, the local architecture offers a higher bandwidth saving due to does not duplicate the national content in the distribution networks, which reduce the OPERating EX-pense (OPEX) of the content delivery to the transmitter sites.

### 6.2.3. Transition from DVB-T to DVB-T2 networks. Especial case of Colombia.

The transition from DVB-T to DVB-T2 was analyzed in this dissertation, as starting point for the efficient provisioning of local contents using the DTT network design of the public broadcaster of Colombia RTVC. The case of Colombia is very special due to it will be the first country to deploy DVB-T2 with 6 MHz channelization and because the DVB-T2 networks will be deployed from scratch without any constraint imposed by existing DVB-T infrastructure. Our investigations show that compared to the reference DVB-T mode planned to be deployed by RTVC, DVB-T2 can provide a coverage gain of more than 5 dB for the same capacity, or a capacity gain of 70 % for the same coverage. Furthermore, our results show that it is feasible to deploy a national SFN covering the whole country with a single frequency instead of requiring two frequencies as the original MFN design for DVB-T.

The single frequency network of Colombia would be the largest of the world, with a maximum distance between transmitters between 180 and 212 km. In this way, we recommend a DVB-T2 transmission mode with FFT size of 32KE, GI 1/8, 64QAM, CR 3/5 and PP2 which offer a distance between transmitters of 180 km. Our results have indicated that this separation is enough for the geographic distribution of the planned transmitters, achieving in this case a capacity gain of 45 % and keeping the same coverage level than the initial DVB-T design. Additionally, artificial signal delays at each transmitter should be efficiently calculated in order to minimize the percentage of interfered population due to SFN self-interference. After that, the low percentage of population without coverage due to the self-interference can be covered using gap-fillers or repeaters of low power. The only drawback of the DVB-T2 modes that maximize the coverage, capacity, or SFN size is that they require the use of a FFT size of 32K, which has poor mobility performance.

## 6.3. Future Research topics

Channel estimation is an important topic in the context of mobile performance and decoding of local services. While the work presented in this dissertation has assumed ideal channel estimation, the mobile performance is conditioned by the quality of the channel estimates [74]. In this sense, it would be very interesting to evaluate the impact of real channel estimation, and to devise new pilot patterns optimized for SISO, MISO and MIMO systems in terms of reception robustness and pilot overhead. Furthermore, it is important to evaluate the performance in terms of minimum CNR required for successful decoding of the local services taking in account the effect of real channel estimation and the influence of the pilot carriers from the other LSAs.

Field measurements are the most accurate way to measure the actual performance of any wireless communication system. Ideally, transmitter and receiver equipment and necessary resources are available, and performance analyses can be accomplished in field conditions. Additionally, field measurements can be complemented with laboratory measurements using a channel emulator. An interesting research topic is to validate the results obtained in this dissertation for local service insertion with field measurements in real scenarios. It will allow establish real margins protection for commercial receivers and estimates the real radius coverage of each LSA when is influenced for adjacent LSAs. Furthermore, these field measurements will take into account the SFN synchronization of DVB standards in real scenarios, which can be used to calibrate a special propagation model for SFN topologies.

In order to evaluate the actual advantage of long TI in terms of network planning, it was necessary to perform dynamic system level simulations that take into account the user mobility in a realistic manner. While this kind of investigations was performed in the context of DVB-T, it has yet to be extended to the case of DVB-T2 and DVB-NGH. Here, it is interesting to evaluate the network gains of long TI at the physical layer and in terms of coverage population, in order to determine the better transmission modes that enable the provision of mobile services with good coverage levels in DVB-T2 networks planned for fixed reception.

In this thesis, we have analyzed different solutions to offer services-specific robustness in the same OFDM signal in order to broadcast fixed and mobile service in the same RF channel. If the content to fixed and mobile receivers is similar, SVC can be nicely combined in order to improve the quality of services experiment by the users. One important consideration about this research topic is that it may be backwards-compatible with DVB-T, and thus it may further contribute to the provisioning of more affordable mobile TV services. The cross-layer FEC optimization at the physical, upper (link or application) and stream

## **CAPÍTULO 6. CONCLUSIONS AND DESIGN GUIDELINES FOR FIXED/MOBILE AND LOCAL INSERTION SERVICES IN SFN BROADCASTING SYSTEMS**

---

levels used by the solutions proposed in this thesis is a very challenging problem to solve.

All solutions proposed in this dissertation for in-band fixed and mobile services and local services insertion in SFN can be evaluated for the others DTT standards. Although Local Services Insertion (LSI) was not included as commercial requirement for ATSC 3.0 in its call for technology, the proposal for physical layer submitted by DVB consortium is based on the novel solutions evaluated for DVB-NGH including LSI. As response to this call for technology, the National Engineering Research Center of Digital Television (NERC) of china also proposes LSI based on a distributed MIMO configuration. In the proposed system, global and local head-ends coordinate in pilot and control message generation to facilitate MIMO detection. The comparison and study of viability of combine these proposed solution is an interesting topic in order to identify more efficient solutions for LSI in future broadcasting networks. Finally, the development of new algorithms that reduce the complexity and improve the performance of decoding global and local contents received in the same time and frequency is an additional research topic identified in this dissertation.



# Apéndice A

## Metodología

Siguiendo un enfoque investigativo, la metodología utilizada en el desarrollo de esta tesis doctoral contemplaba en primer lugar simulaciones computacionales de capa física y capas superiores de los estándares DVB-T/T2/NGH. Estas simulaciones permitieron analizar y comprender en primera instancia el funcionamiento de cada uno de estos estándares, así como validar las diferentes soluciones técnicas propuestas. Posteriormente se realizaron pruebas de laboratorio con equipos profesionales DVB-T/T2 que permitieron evaluar el rendimiento en condiciones reales y controladas. Adicionalmente, se realizaron campañas de medidas de campo que permitieron contrastar el rendimiento de dichos estándares en escenarios reales de recepción fija, portable y móvil. Estas campañas de medidas también permitieron calibrar los diferentes módulos utilizados en la etapa de simulación y estimación de cobertura. A continuación se describen en más detalle las diferentes etapas desarrolladas en esta tesis doctoral para evaluar el rendimiento de los servicios de TDT en movilidad y de los servicios globales y locales en redes SFN.

### **A.1. Simulaciones Computacionales de Capa Física Extremo a Extremo**

En esta tesis doctoral se desarrollaron y complementaron plataformas software que emulan el funcionamiento de cada uno de los módulos y tecnologías que conforman un estándar tanto en la etapa de transmisión como de recepción. Estas plataformas permitieron evaluar el rendimiento de dichos estándares en diferentes canales de propagación tales como: Additive White Gaussian Noise (AWGN), Rice, Rayleigh, TU6, etc. Las plataformas fueron validadas con los

resultados de rendimiento presentados en las guías de especificaciones de cada uno de los estándares. En particular, la plataforma de DVB-NGH es propiedad del grupo de comunicaciones de la Universidad de Braunschweig- Alemania, la cual fue validada durante el proceso de estandarización de DVB-NGH.

Para el desarrollo de esta tesis, la principal ventaja de las plataformas de simulación fue la posibilidad de controlar cualquier módulo y/o tecnología que conforman los estándares DVB para proponer y evaluar soluciones técnicas compatibles que optimicen la provisión de servicios de TV digital móvil y contenidos locales/regionales en las futuras redes de TDT. En particular, estas simulaciones permitieron evaluar el rendimiento en movilidad de AL-FEC emulando la codificación en transmisión y la decodificación en recepción. Adicionalmente, estas simulaciones permitieron evaluar las soluciones técnicas O-LSI y H-LSI para la inserción de contenidos locales en redes DVB-NGH.

## **A.2. Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios de TDT en movilidad**

### **A.2.1. Medidas de campo**

Las campañas de medidas de campo son la forma más precisa de medir el rendimiento de cualquier sistema de comunicaciones inalámbricas. Idealmente es necesario controlar tanto la etapa de transmisión como la de recepción, así como utilizar una sistema profesional de medida que garantice un adecuado registro de la información. Las medidas de campo pueden ser complementadas y analizadas con mayor detalle a través de pruebas de laboratorio. La información registrada en las campañas de medida no solo permite evaluar el rendimiento real del sistema de comunicaciones sino que a su vez permite la calibración de los modelos de propagación y de rendimiento de capa física del estándar para su posterior utilización en simuladores dinámicos como en descrito en la sección A.2.3. En esta investigación se llevaron a cabo diferentes campañas de medidas de campo a partir del piloto de transmisión TDT ubicado en el campus de la Universitat Politècnica de València (UPV), la red comercial de TDT del canal Nou actualmente desplegada en Valencia-España y la participación en proyectos de carácter nacional e internacional. Estas medidas estuvieron principalmente enfocadas a la evaluación del rendimiento de los estándares DVB-T/T2 y de las soluciones técnicas propuestas en esta tesis, bajo condiciones y entornos de recepción reales.

## A.2 Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios de TDT en movilidad

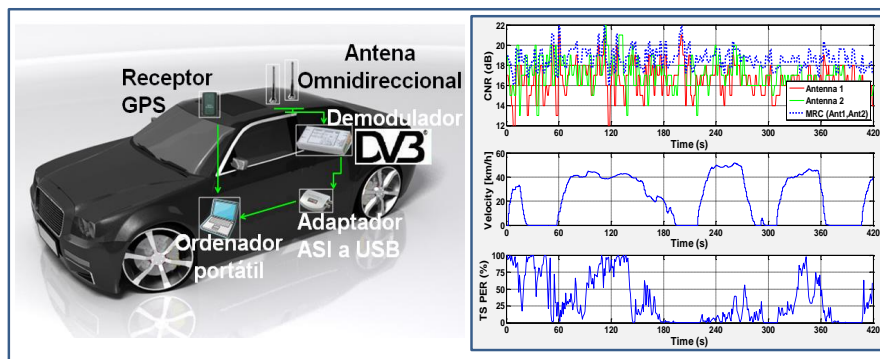


Figura A.1: Sistema automatizado de medida y ejemplo de las medidas registradas en las campañas de medidas de campo.

### Sistema automatizado de medida

Para las medidas de campo se utilizó un sistema automatizado de medida desarrollado por el instituto iTEAM, representado de forma general en la parte izquierda de la figura A.1. Básicamente esta formado por receptores profesionales DVB-T y DVB-T2 con la opción de una o dos antenas externas de recepción, un receptor GPS para registrar la posición y velocidad de desplazamiento del usuario, un convertor ASI a USB que permite trasladar todos los paquetes TS MPEG-2 recibidos al ordenador central del sistema de medida. En este ordenador se encuentra un software desarrollado por el iTEAM que permite controlar de forma centralizada todo el sistema de medida, sintonizando el receptor al canal RF deseado y almacenando diferentes parámetros de calidad de la señal DVB y de capa de aplicación tales como: Received Signal Strength Indicator (RSSI) en dBm, BER, MER, TEI el cual indica si los paquetes MPEG-2 han sido recibidos correctamente o no. Un ejemplo de estos parámetros registrados por el sistema de medida es mostrado en la parte derecha de figura A.1 donde se puede observar la velocidad instantánea del móvil, la potencia recibida y la cantidad de paquetes erróneos recibidos en cada instante de tiempo. Una resolución de 250 ms es generalmente utilizada para el registro de esta información, correspondiendo aproximadamente con la duración de una trama DVB-T o DVB-T2. La velocidad máxima de desplazamiento del usuario estuvo limitada a 60 km/h. De forma complementaria, esta información almacenada permitió un posterior análisis de la calidad de servicio experimentada por el usuario, así como la calibración de modelos de propagación y módulos de rendimiento utilizados en las simulaciones dinámicas descritas en la siguiente sección.

## APÉNDICE A. METODOLOGÍA

Tabla A.1: Parámetros estadísticos del error entre las medidas registradas y las predicciones utilizando el modelo Xia-Bertoni. Valores en dB.

Ruta	No Calibrado			Calibrado		
	Error medio	Desv. Std.	Factor correlación	Error medio	Desv. Std.	Factor correlación
Ruta 1	18.2	6.8	0.23	1.4	3.5	0.77
Ruta 2	14.6	9.3	0.01	0.3	5.1	0.71
Ruta 3	17.1	6.5	0.36	0.1	3.8	0.86
Ruta 4	16.2	5.2	0.41	0.2	5.4	0.69
Ruta 5	11.1	8.3	0.18	0.0	4.0	0.87
<i>Promedio</i>	15.4	6.0	0.23	0.4	4.7	0.78

### Calibración del modelo de propagación

A partir de las medidas de campo llevadas a cabo en la ciudad de Valencia-España, se realizó un proceso de calibración del modelo de propagación con el fin de obtener una mayor precisión en las pérdidas de propagación y por tanto en las estimaciones de cobertura. De acuerdo a [75], cuando la altura del transmisor es del orden de la altura promedio de los edificios presentes en el escenario, se recomienda el uso del modelo de propagación Xia-Bertoni [76]. Como procedimiento de calibración de este modelo a partir de las medidas de campo se ha utilizado un algoritmo LMS (Least Mean Square) basado en la resolución de un sistema de ecuaciones de regresión múltiple. La tabla A.1 muestra los valores estadísticos del error obtenido entre las medidas registradas en 5 rutas de transporte público diferentes en la ciudad de Valencia y las predicciones utilizando el modelo de propagación después de la calibración. Se puede observar que el modelo de propagación ofrece una adecuada precisión en las predicciones con un error medio de 0.4 dB, una desviación estándar de 4.7 dB y un factor de correlación de 0.78. Este último factor indica la relación entre la variabilidad de las señales medidas con la variabilidad de las señales simuladas. A manera de ejemplo, la parte izquierda de la figura A.2 compara los niveles de potencia en dBm de las señales medidas y las predicciones con el modelo de propagación Xia-Bertoni calibrado.

### Calibración del modelo de rendimiento de capa física

La cantidad de paquetes erróneos recibidos en movilidad depende de la velocidad instantánea del receptor y de la potencia recibida en cada punto del

## A.2 Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios de TDT en movilidad

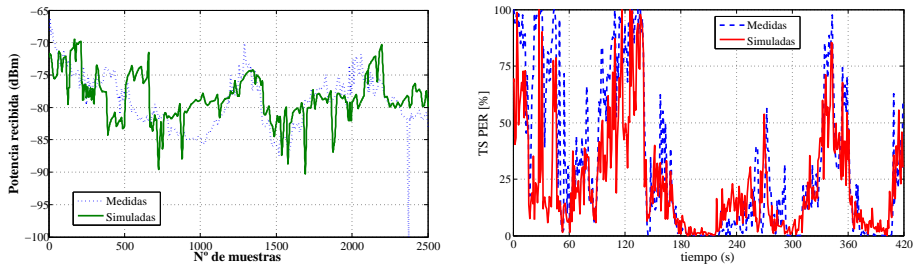


Figura A.2: Ejemplo comparativo entre las medidas registradas en las medidas de campo y las simuladas. Potencia recibida y emulada con el modelo de propagación Xia-Bertoni calibrado (izquierda). Porcentaje de paquetes MPEG-2 TS erróneos (derecha).

escenario por donde circula. Este comportamiento de paquetes recibidos errónea o correctamente puede ser emulado mediante un modelo de rendimiento de capa física basado en cadenas de Markov de cuatro estados, el cual fue originalmente propuesto en [77]. El modelo emula la longitud de las ráfagas de paquetes correctos e incorrectos, logrando no solo la misma media de paquetes erróneos sino también el primer orden estadístico de la longitud de las secuencias. Este modelo de rendimiento de capa física para DVB-T ha sido desarrollado en el instituto iTEAM. La precisión de este modelo fue calibrada y validada con medidas de campo vehiculares desarrolladas en esta investigación, comparando las trazas de errores registradas en las medidas con las generadas por el modelo de rendimiento DVB-T. En este caso los parámetros de entrada al modelo de rendimiento fueron los niveles de potencia y velocidad instantánea registrados por el sistema de medida. A manera de ejemplo, la parte derecha de la figura A.2 muestra la comparación entre la traza de errores medida y la emulada. Podemos observar, que después del proceso de calibración del modelo de rendimiento de capa física, las trazas emuladas siguen con una alta precisión el comportamiento de las trazas medidas, para los mismos valores de potencia recibida y velocidad instantánea.

### A.2.2. Medidas de laboratorio

Las medidas de laboratorio que se llevaron a cabo en este proceso de investigación consistían en utilizar equipos profesionales de transmisión y recepción de los estándares DVB-T/T2 con el fin de contrastar y calibrar los resultados obtenidos en la etapa previa de simulación computacional. Para el caso particular de los servicios de TDT en movilidad, se evaluó el rendimiento de los estándares DVB-T/T2 en un canal TU6 con efecto Doppler. El esquema general del montaje utilizado para las medidas de laboratorio es el presentado en

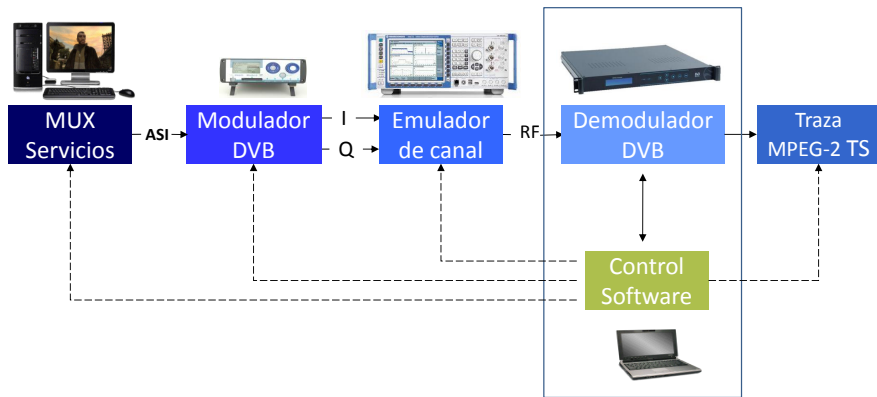


Figura A.3: Arquitectura general del montaje de laboratorio utilizado en la evaluación del rendimiento de DVB-T/T2 en movilidad.

la figura A.3. Este montaje contempla toda la cadena de transmisión, canales de propagación y recepción. En particular, para la evaluación de la solución técnica SIMO se utilizó la opción del emulador de canal que permite establecer dos canales de propagación con cualquier grado de correlación entre ellos.

De esta forma, los resultados obtenidos corresponden al rendimiento de equipos reales en condiciones de propagación controladas en laboratorio y fueron el punto de partida para las estimaciones de cobertura a desarrollar mediante software profesional de planificación de redes TDT y las simulaciones dinámicas explicadas en la siguiente sección.

### A.2.3. Simulaciones Dinámicas

A diferencia de los estudios estadísticos para redes analógicas y digitales de televisión en recepción fija, el estudio de redes de DVB para recepción en movimiento, requiere de análisis dinámicos al igual que las redes celulares de telefonía móvil. Estos análisis dinámicos consisten en evaluar la calidad de servicio experimentada por el usuario a medida que se desplaza por el escenario en función de los parámetros de transmisión, la posición y la velocidad instantánea. En el desarrollo de esta tesis doctoral, las simulaciones dinámicas permitieron estimar el porcentaje de cobertura en recepción móvil dado el escenario de despliegue de una red DVB y evaluar la calidad de servicio ofrecida a los usuarios en movimiento. Como se muestra en la figura A.4, el simulador dinámico es una herramienta que integra cuatro bloques principales, calibrados y validados a partir de medidas de campo y laboratorio anteriormente descri-

## A.2 Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios de TDT en movilidad

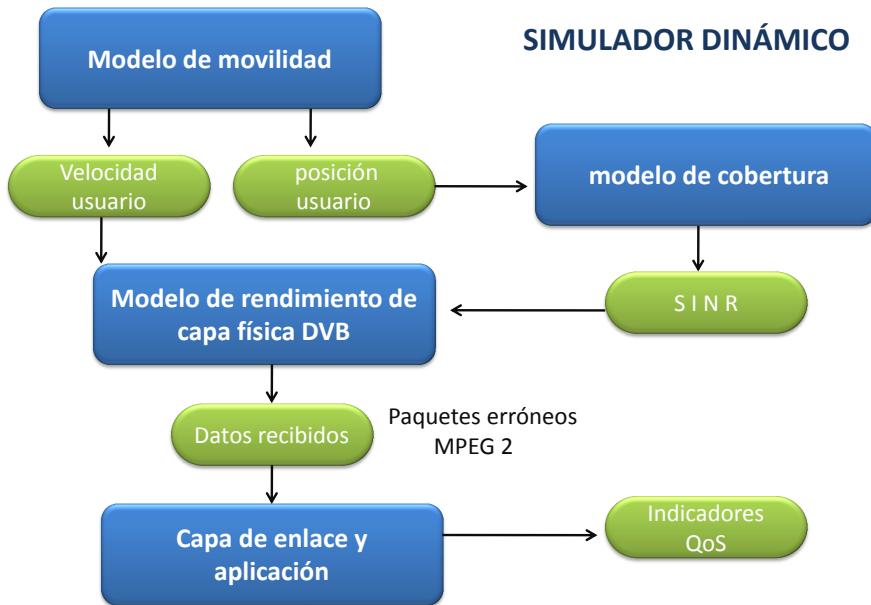


Figura A.4: Arquitectura general del simulador dinámico.

tas: bloque de movilidad, bloque de propagación, modelo de rendimiento de capa física DVB y el bloque de capa de enlace y aplicación.

El bloque de movilidad define los patrones de movimiento y calcula la velocidad instantánea de los usuarios dentro del área de servicio, en función de los semáforos, el factor de congestión de la vía, la proximidad a otros vehículos u obstáculos, el tiempo de servicio y el tiempo de muestreo. El bloque de propagación calcula la CNR media que experimenta el receptor en cada uno de los puntos del recorrido. Esta estimación se hace mediante el cálculo de las pérdidas de propagación en el trayecto del transmisor hacia el móvil teniendo en cuenta el perfil del terreno, la presencia de obstáculos tales como edificios, árboles o montañas, que se obtiene a partir de mapas cartográficos de la zona. El modelo de rendimiento de capa física parametriza cada modo de transmisión DVB, aproximando las longitudes de las secuencias de paquetes recibidos correcta e incorrectamente en función de los valores de CNR y velocidad del terminal. Como se describo en la sección anterior, este bloque fue previamente calibrado con las medidas de campo desarrolladas en Valencia. Finalmente, el bloque de capa de enlace y aplicación, emula el protocolo de decodificación de los paquetes TS recibidos.

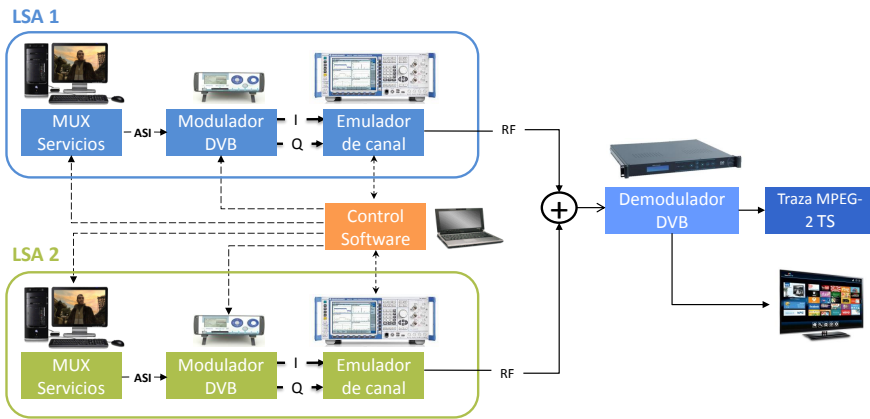


Figura A.5: Arquitectura general del montaje de laboratorio utilizado para evaluar el rendimiento de la inserción de contenidos locales en redes SFN.

### A.3. Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios locales en redes SFN

#### A.3.1. Medidas de laboratorio

Al igual que las medidas de laboratorio desarrolladas para los servicios de TDT en movilidad, en esta etapa de medidas se evaluó el rendimiento de una red SFN emitiendo diferentes servicios locales desde cada uno de sus transmisores. EL esquema general del montaje de medida es presentado en la figura A.5. Básicamente está conformado por dos transmisores sincronizados en tiempo y frecuencia emitiendo contenidos globales comunes para los dos transmisores y contenidos locales diferentes en cada uno de ellos. Las técnicas de inserción de los contenidos locales se realizaron siguiendo las diferentes soluciones técnicas propuestas en esta tesis.

El objetivo principal de estas medidas de laboratorio era establecer los márgenes de protección entre señales útiles de una LSA interferida por una señal del mismo estándar procedente de otra LSA. Estos márgenes de protección fueron establecidos siguiendo la metodología descrita en CITE, y en función de diferentes niveles de potencia tanto de la señal útil como de la interferente. Los márgenes de protección fueron posteriormente el parámetro de entrada para las estimaciones de cobertura de cada LSA mediante el software profesional ICS Telecom.



#### A.3.2. Estimación de cobertura de las LSA

##### Derivación de las Relaciones Portadora a Ruido (CNR) Utilizadas en Planificación

Los umbrales mínimos de CNR en dB requeridos para una correcta decodificación son resumidos en las guías de implementación de la ETSI [9] y [41] para distintos canales de recepción. Debido a la ausencia de medidas de rendimiento de receptores reales, los valores de CNR han sido obtenidos a partir de simulaciones computacionales. En las recomendaciones [8] se propone una metodología de corrección de dichos valores de CNR con el ánimo de describir el comportamiento promedio de los receptores reales los cuales son utilizados en procesos de planificación de redes de TDT. Estas recomendaciones están enfocadas a DVB-T2 por ser a día de hoy el estándar comercial más reciente, sin embargo pueden ser aplicadas de forma general para su antecesor DVB-T y para la nueva versión del estándar DVB-NGH. Posteriormente, a estos valores se agrega los siguientes cinco factores de corrección que permitan emular el rendimiento de un receptor real:

- Los valores de CNR han sido calculados para un BER=  $10^{-6}$  después del codificador BCH, por tanto se debe sumar 0.1 dB para conseguir un BER= $10^{-7}$  después del LDPC.
- Un factor de corrección por ajuste de potencia de las portadoras piloto. (Tabla 2.10 de la [8]) que depende del PP que se quiere utilizar.
- Un factor de corrección por estimación real del canal y márgenes de diseño en la fabricación de los receptores reales (Tabla 2.10 de la [8]).
- Factor para compensar el nivel back-stop noise a -33 dBc generado principalmente por el ruido de sintonización de fase y el ruido de ecualización (Tabla 2.11 de la [8]).
- Delta para ajuste a canales Rice y Rayleigh (Tabla 2.13 de la [8]).

##### Intervalo de Ecualización (IE) y Función de Ponderación de Acuerdo al Tiempo de Llegada

El intervalo de ecualización (IE) es considerado como el intervalo de tiempo en el cual las señales DVB terrestre que arriban al receptor pueden ser correctamente ecualizadas. El límite teórico de este intervalo de ecualización o máximo tiempo de retardo que una señal puede tener con respecto a la primera señal en llegar al receptor para contribuir constructivamente es conocido como el tiempo de Nyquist  $T_p$ . En DVB-T2 este tiempo de Nyquist y la posición

## APÉNDICE A. METODOLOGÍA

---

de inicio del IE dependen del patrón de portadoras pilotos seleccionado y del método de interpolación implementado en el receptor (interpolación en tiempo y frecuencia o solo en frecuencia). En DVB-T el patrón de portadoras es fijo y por lo tanto la duración del IE también es fija ( $T_u/3$ , donde  $T_u$  es el tiempo útil del símbolo OFDM).

Es importante resaltar que el IE es un intervalo y no un valor y por lo tanto puede ser considerado como una "ventana de ecualización". Las señales que llegan al receptor con un tiempo de retardo relativo ( $t$ ) dentro del IE contribuyen constructivamente a la decodificación de la información, por el contrario las señales que llegan por fuera del este intervalo son consideradas totalmente interferentes. La función de ponderación  $W_i(t)$  que establece la contribución útil o interferente de una  $i$ -ésima señal dependiendo de su tiempo relativo de llegada  $t$  es definido en la siguiente ecuación:

$$W_i(t) = \begin{cases} 0, & \text{si } t \notin IE \\ \left(\frac{T_u+t}{T_u}\right)^2, & \text{si } t \in IE \quad \& \quad t < 0 \\ 1, & \text{si } t \in IE \quad \& \quad 0 \leq t < T_g \\ \left(\frac{T_u+T_g-t}{T_u}\right)^2, & \text{si } t \in IE \quad \& \quad t > T_g \end{cases} \quad (\text{A.1})$$

Donde IE es el intervalo de ecualización (la duración máxima es el tiempo de Nyquist  $T_p$ ),  $T_u$  es el tiempo útil del símbolo OFDM y  $T_g$  es el tiempo del intervalo de guarda.

### Calculo de la Relación Portadora a Ruido más Interferencia (CINR)

Un receptor DVB-T/T2/NGH puede operar satisfactoriamente en una localización determinada cuando la relación Portadora a Ruido más Interferencia (CINR) es mayor o igual a la mínima CNR requerida por el sistema. Por lo tanto para propósitos de planificación y estimación de cobertura de una red TDT es necesario evaluar el valor de CINR en cada punto del escenario objetivo. La ecuación A.2 define la CINR en cada punto de test en función de potencia recibida de cada transmisor  $PT_{xi}$  de la red SFN y de su aporte constructivo o destructivo dependiendo del retardo relativo de llegada y descrito por la función de ponderación  $W_i(t)$ .

$$CINR = \frac{C}{I_{self} + I_{ext} + P_N} = \frac{\sum_i P_{Txi} \times W(t_i - t_o)}{\sum_i P_{Txi} \times [1 - W(t_i - t_o)] + I_{ext} + P_N} \quad (\text{A.2})$$

Donde,  $C$  es la potencia útil,  $I_{Self}$  es la interferencia producida por la propia red,  $I_{Ext}$  son las interferencias externas.  $PT_{xi}$  y  $t_i$  son la potencia recibida y el

### A.3 Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios locales en redes SFN

---

tiempo de llegada de la señal proveniente del transmisor  $i$ -ésimo de la red,  $t_0$  es el instante de sincronización temporal y  $P_N$  es la potencia de ruido térmico.

#### Link budget

El balance de enlace de potencias son las ganancias y pérdidas que se experimentan entre el transmisor y el receptor en un sistema de telecomunicaciones. El objetivo de este balance de enlace es contemplar todos los posibles factores que afectan el sistema de comunicación y en este caso particularmente a un sistema TDT. La potencia a la entrada del receptor se expresa de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$P_{rx} = P_{tx} - L_{tx} - L_{fs} - L_o + G_{tx} - L_{rx} + G_{rx} \quad (\text{A.3})$$

Donde  $P_{rx}$  es la potencia recibida,  $P_{tx}$  representa la potencia transmitida,  $L_{tx}$  significa las pérdidas en el transmisor,  $L_{fs}$  son las pérdidas en espacio libre,  $L_o$  representa otras pérdidas,  $G_{tx}$  indica la ganancia de la antena transmisora,  $L_{rx}$  son las pérdidas en el receptor y  $G_{rx}$  es la ganancia del receptor. Para el balance de potencias se tendrán en cuenta la recomendación [8]. Dicho balance permite conocer el valor medio de intensidad de campo mínimo ( $E_{min}$ ) a la entrada del receptor para hacer la estimación de cobertura. La estimación de cobertura de una red TDT se basa en estimar la cantidad de usuarios o puntos del escenario donde se superan los umbrales mínimos de intensidad de campo eléctrico en ciertas condiciones de recepción y con una determinada probabilidad. El cálculo de la  $E_{min}$  se realizó siguiendo las recomendaciones [8].

#### Modelo de propagación

El modelo de propagación utilizado en las estimaciones de cobertura de las redes SFN transmitiendo servicios globales y locales fue el UIT-R 1546 [78]. Este modelo de propagación está indicado para la predicción de punto a zona de la intensidad de campo en los servicios de radiodifusión, móvil terrestre y móvil marítimo en la gama de frecuencias de 30 a 3.000 MHz y para distancias de 1 km a 1.000 km. La gran ventaja de este modelo es su amplia utilización por todas las entidades implicadas en la planificación de sistemas DVB. De hecho, la Unión de Radiodifusores Europeos, EBU (European Broadcasting Union), emplea el modelo UIT-R 1546 para la planificación de las futuras redes DVB-T2 [8].

#### Calculo de los retardos artificiales de cada transmisor SFN

Los retardos artificiales en cada transmisor de la red SFN pueden ser insertados con el fin de mover las autointerferencias a zonas con baja densidad de

población con el fin de maximizar el porcentaje de cobertura de la red. Esta es una técnica de optimización de las redes SFN debido a que su implementación no significa ningún costo para el operador. Para redes SFN compuestas por un elevado número de transmisores, el cálculo manual de estos retardos se convierte en una compleja y poco efectiva tarea. En esta tesis doctoral se ha seguido un proceso computacional iterativo que parte del máximo retardo relativo ( $\delta$ ) identificado en las zonas de solapamiento. Los valores de retardo relativo son evaluados en cada punto del escenario mediante la herramienta profesional de planificación ICSTelecom, la cual calcula los tiempos de propagación de las señales desde cada uno de los transmisores SFN. Retardos artificiales en el rango  $(-\delta, \delta)$  son asignados iterativamente a cada uno de los transmisores, evaluando todas las posibles combinaciones y estimando las respectivas auto interferencias SFN. Este proceso se repite computacionalmente hasta encontrar la mejor combinación de retardos artificiales que maximice el nivel de cobertura de la red SFN.

### Escenario de evaluación

El diseño de red TDT del operador público RTVC de Colombia ha sido el escenario utilizado para la estimación de cobertura de los servicios globales y locales en redes TDT utilizando las diferentes soluciones propuestas para DVB-T, DVB-T2 y DVB-NGH. Para ello, hemos utilizado la información pública de la primera fase de transición analógica a digital proyectada por RTVC y disponible [69]. En esta primera fase, la red estará formada por 14 estaciones de alta potencia distribuidas a lo largo de todo el territorio nacional con el objetivo de conseguir un 50% de cobertura poblacional para los servicios nacionales utilizando una topología MFN de dos frecuencias (482 MHz y 524 MHz). A su vez, estas estaciones serán utilizadas para emitir los contenidos de los seis canales regionales más importantes del país utilizando una frecuencia adicional en las respectivas áreas de interés (frecuencia en el rango de los canales 18 a 24 pendientes de asignación a la fecha de redacción de este documento). La figura A.6 muestra la distribución geográfica de los distintos transmisores de la fase I y la división en clúster para la provisión de los contenidos regionales. La tabla A.2 resume los principales parámetros de las estaciones que se proyectan desplegar en la Fase I por parte de RTVC, los cuales fueron fuentes de entrada para el software profesional de planificación ICSTelecom utilizado en esta tesis.

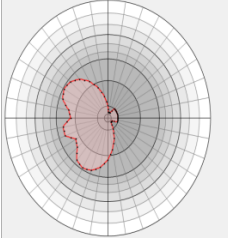
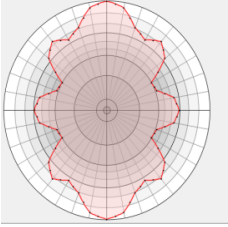
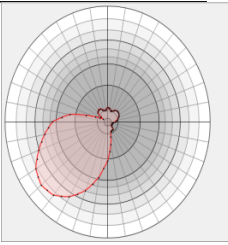
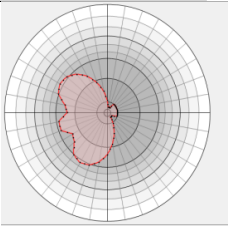
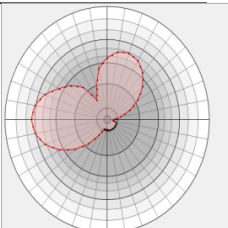
LSAColombia

### A.3 Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios locales en redes SFN



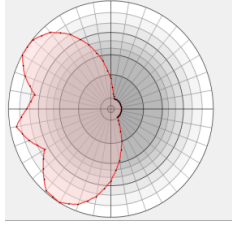
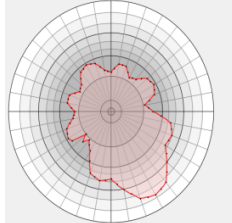
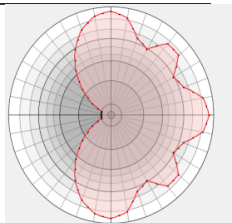
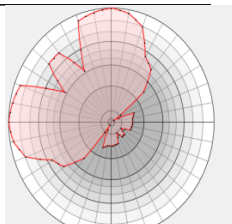
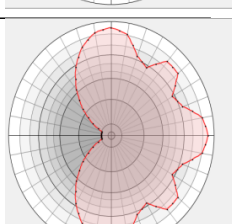
Figura A.6: Distribución geográfica de los transmisores de RTVC fase I y la división en clústeres para los canales regionales.

## APÉNDICE A. METODOLOGÍA

Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	Potencia (wattios)	Diagrama Radiación H
Bello	06 16 56.8 N	75 32 01.8 O	2000	
Calatrava	04 43 37.4 N	74 04 50.2 O	2000	
Cerro Kennedy	11 06 46.4 N	74 02 11.0 O	5000	
Cruz Verde	04 31 16.0 N	74 04 27.2 O	2000	
Itagüi	06 08 36.2 N	75 36 05.4 O	2000	

Continúa en la página siguiente.

### A.3 Metodología para la evaluación del rendimiento de los servicios locales en redes SFN

Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	Potencia (wattios)	Diagrama Radiación H
La Azalea	03 52 04.2 N	76 14 39.7 O	5000	
La Popa	10 25 13.0 N	75 31 33.0 O	5000	
Lebrija	07 04 34.4 N	73 11 48.2 O	5000	
Manjui	04 48 11.1 N	74 23 36.5 O	5000	
Los Nogales	10 59 39.6 N	74 49 48.0 O	2000	

Continúa en la página siguiente.

## APÉNDICE A. METODOLOGÍA

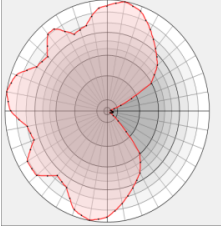
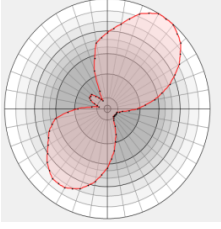
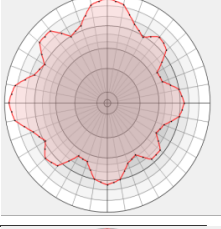
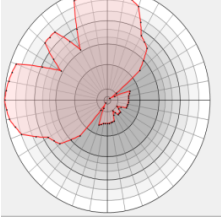
Estación	Latitud (gg mm ss)	Longitud (gg mm ss)	Potencia (wattios)	Diagrama Radiación H
Padre Amaya	06 16 47.8 N	75 41 10.3 O	5000	
Tasajero	07 59 31.3 N	72 27 43.9 O	1000	
Tres Cruces	03 28 04.7 N	76 32 45.2 O	1000	
El Nudo	04 50 50.5 N	75 42 52.8 O	2000	

Tabla A.2: Principales parámetros de configuración de las estaciones de RTVC, Fase I.

### A.4. Conclusiones

En este anexo se ha descrito la metodología seguida en esta tesis doctoral para la evaluación de las diferentes soluciones técnicas propuestas para la



transmisión simultánea de servicios fijos y móviles y la eficiente inserción de contenidos locales en redes SFN. Los resultados han sido obtenidos en primer lugar a partir de simulaciones extremo a extremo de capa física donde es posible controlar cualquier módulo y/o tecnología que conforman los estándares DVB. En particular, estas simulaciones permitieron evaluar el rendimiento de tecnologías aun no implementadas en transmisores o receptores comerciales tales como AL-FEC o toda la capa física del estándar DVB-NGH.

Para el caso de DVB-T y DVB-T2 donde si se dispone a día de hoy equipamiento profesional y comercial, se realizando medidas de campo y laboratorio que permitieron por un lado evaluar el rendimiento de las soluciones técnicas en escenarios reales y por otro calibrar los diferentes módulos utilizados en las simulaciones dinámicas y estimaciones de cobertura. En particular, se realizó un proceso de calibración del modelo de propagación y modelo de rendimiento de capa física de DVB-T a partir de las medidas de campo realizadas en Valencia-España. Estos modelos calibrados fueron utilizados en las simulaciones dinámicas de la red TDT comercial de canal Nou desplegada en Valencia.

Los estudios de rendimiento de las soluciones técnicas propuestas para inserción de contenidos locales en redes SFN de DVB-T y DVB-T2 fueron evaluadas mediante medidas de laboratorio. Estas medidas permitieron evaluar el rendimiento en receptores reales comercial disponibles en el mercado a día de hoy, lo cual confirma la compatibilidad de las soluciones propuestas. Para el caso del estándar DVB-NGH se utilizaron simuladores de capa física validados durante el proceso de estandarización, debido a que a la fecha de redacción de este documento no se dispone en el mercado de equipos de transmisión ni recepción. Finalmente la viabilidad de uso de las soluciones para insertar contenidos locales en redes SFN fue validada a partir de estimaciones de cobertura en un escenario real. En concreto para el diseño de red TDT del operador público RTVC de Colombia quien a su vez administrará la infraestructura de red de los canales regionales del país. Información real de las estaciones base, tales como ubicación, potencia de transmisión, patrón de radiación, altura de antena, etc. han sido utilizada para dar mayor precisión a los resultados obtenidos.



# Referencias

- [1] *Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television*, ETSI Std. EN 300 744, Rev. 1.6.1, 2009.
- [2] “DVB-T – digital terrestrial television,” DVB Fact Sheet, 2010.
- [3] *Frame structure channel coding and modulation for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*, ETSI Std. EN 302 755, Rev. 1.3.1, 2012.
- [4] A. Bria and D. Gómez-Barquero, “Scalability of DVB-H deployment on existing wireless infrastructure,” in *IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'05)*, Berlin, Germany, Sep. 2005.
- [5] G. Pousset, Y. Lostanlen, and Y. Corre, “Positioning mobile TV standards DVB-T vs DVB-H,” White Paper, Dibcom, 2008.
- [6] “Licensing local DTT services in the UK,” DigiTAG, Web Letter, 2012.
- [7] F. Selgert, “Commercial requirements for DVB-NGH,” DVB Document CM-NGH015R1, 2009.
- [8] “Frequency and network planning aspects of DVB-T2,” European Broadcasting Union, Report, 2012.
- [9] *Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects*, ETSI Std. TR 101 190, Rev. 1.3.2, 2011.
- [10] *Transmission system for handheld terminals*, ETSI Std. EN 302 304, Rev. 1.1.1, 2004.
- [11] D. Gozálvez-Serrano, “Combined time, frequency and space diversity in multimedia mobile broadcasting systems,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Valencia, 2012.

## REFERENCIAS

---

- [12] D. Gomez-Barquero *et al.*, *Next generation mobile broadcasting*. CRC press, 2013.
- [13] P. P. R. Burow and P. Christ, “Mobile reception of DVB-T,” EU motivate project, Deliverable on-line.
- [14] U. Ladebusch and C. A. Liss, “Terrestrial DVB (DVB-T): A broadcast technology for stationary, portable and mobile use,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 94, no. 1, pp. 183–193, 2006.
- [15] M. Poggioni, L. Rugini, and P. Banelli, “DVB-T/H and T-DMB: Physical layer performance comparisons in fast mobile channels,” vol. 55, no. 4, pp. 719–730, 2009.
- [16] R. Burrow *et al.*, “On the performance of the DVB-T system in mobile environments,” in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’98)*, Sidney, Australia, Nov. 1998.
- [17] J. Ong, S. Rao, G. Shanmugam, and Y. Hong, “Spatial variation of mobile DTV signals in singapore,” in *RF and Microwave Conference, 2004. RFM 2004. Proceedings*, oct. 2004, pp. 28 – 32.
- [18] A. Roy and C. Liss, “Mobilempfang von DVB-T-Signalen—Messungen und stand der empfangertechnik,” in *Fernseh und Kinotechnik (FKT)*, vol. 56, Mar. 2002, pp. 112–115.
- [19] *Implementation guidelines for DVB handheld services*, ETSI Std. TR 102 377, Rev. 1.4.1, 2009.
- [20] D. Plets *et al.*, “Influence of reception condition, MPE-FEC rate and modulation scheme on performance of DVB-H,” vol. 54, no. 3, pp. 590–598, 2008.
- [21] G. Pousset, “Advantages of diversity implementations on mobile and portable TV receivers,” White Paper, Dibcom, 2008.
- [22] L. Angrisani, R. Cavaliere, M. Farias, and D. Izzo, “On the use of antenna diversity measurements for mobile DVB-T performance assessment,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 61, no. 7, pp. 1883 –1895, july 2012.
- [23] A. Dammann and S. Kaiser, “Standard conformable antenna diversity techniques for OFDM and its application to the DVB-T system,” in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM’01)*, vol. 5, San Antonio, USA, Nov. 2001, pp. 3100–3105.

- [24] R. D. Bari *et al.*, “Laboratory measurement campaign of DVB-T signal with transmit delay diversity,” vol. 54, no. 3, pp. 532–541, 2008.
- [25] Y. Zhang, J. Cosmas, M. Bard, and Y. Song, “Diversity gain for DVB-H by using transmitter/receiver cyclic delay diversity,” vol. 52, no. 4, pp. 464–474, 2006.
- [26] Y. Zhang, J. Cosmas, K.-K. Loo, M. Bard, and R. D. Bari, “Analysis of cyclic delay diversity on DVB-H systems over spatially correlated channel,” vol. 53, no. 1, pp. 247–254, 2007.
- [27] C. Weck and A. Schertz, “Hierarchical modulation — the transmission of two independent dvb-t multiplexes on a single frequency,” EBU, Technical Review, 2003.
- [28] H. Jiang and P. Wilford, “A hierarchical modulation for upgrading digital broadcast systems,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 2, pp. 223 – 229, june 2005.
- [29] G. Faria, “DVB-T hierarchical modulation: An opportunity for new services?” White Paper, ITIS-France, 2009.
- [30] D. Gómez-Barquero and A. Bria, “Application Layer FEC for improved mobile reception of DVB-H streaming services,” in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC’06)*, Montreal, Canada, Sep. 2006.
- [31] D. Gómez-Barquero, D. Gozálvéz, and N. Cardona, “Application layer FEC for mobile TV delivery in IP datacast over DVB-H systems,” vol. 55, no. 2, pp. 396–406, 2009.
- [32] *IP Datacast over DVB-H: Content Delivery Protocols*, ETSI Std. TS 102 472, Rev. 1.3.1, 2009.
- [33] A. Shokrollahi, “Raptor codes,” vol. 52, no. 6, pp. 2551–2567, 2006.
- [34] J. Lopez-Sanchez, D. Gomez-Barquero, D. Gozalvez, and N. Cardona, “On the provisioning of mobile digital terrestrial tv services to vehicles with DVB-T,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 4, pp. 642–647, Dic. 2012.
- [35] J. López-Sánchez, C. Acero, D. Gómez-Barquero, and N. Cardona, “Latincon13 - planning a mobile DVB-T network for colombia,” *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 8, no. 4, pp. 444–453, aug. 2010.

## REFERENCIAS

---

- [36] C. A. Nour and C. Douillard, "Rotated QAM constellations to improve BICM performance for DVB-T2," in *IEEE International Symposium on Spread Spectrum Techniques and Applications (ISSSTA'08)*, Bologna, Italy, Aug. 2008.
- [37] D. Gozálvéz, D. Vargas, D. Gómez-Barquero, and N. Cardona, "Performance evaluation of DVB-T2 time interleaving in mobile environments," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'10)*, Ottawa, Canada, Sep. 2010.
- [38] D. Gozálvéz, D. Gómez-Barquero, D. Vargas, and N. Cardona, "Time diversity in mobile DVB-T2 systems," vol. 57, no. 3, pp. 617–628, 2011.
- [39] T. Jokela and J. Paavola, "Robustness analysis of physical layer signaling transmission in DVB-T2," in *IEEE Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB'09)*, Bilbao, Spain, May 2009.
- [40] T. Jokela, M. Tupala, and J. Paavola, "Analysis of physical layer signaling transmission in DVB-T2 systems," vol. 56, no. 3, pp. 410–417, 2010.
- [41] *Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*, ETSI Std. TR 102 831, Rev. 0.10.4, 2010.
- [42] N. Cornillet, M. Crussiere, and J. F. Helard, "Performance of the DVB-T2 system in a single frequency network: Analysis of the distributed Alamouti scheme," in *IEEE Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB'11)*, Nuremberg, Germany, Jun. 2011.
- [43] M. Tormos, C. Tanougast, P. Kasser, P. Bretilon, and A. Dandache, "Performance evaluation for different MISO - SFN network combinations for DVB-T2 standard," in *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2011 IEEE International Symposium on*, june 2011, pp. 1–4.
- [44] P. Antanes *et al.*, "MIMO performance of the next generation DVB-T," in *IEEE Vehicular Technology Conference (VTC'09)*, Barcelona, Spain, Apr. 2009.
- [45] C. Gómez-Calero, L. C. Navarrete, L. de Haro, and R. Martínez, "A 2x2 MIMO DVB-T2 system: Design, new channel estimation scheme and measurements with polarization diversity," vol. 56, no. 2, pp. 184–192, 2010.
- [46] D. Gozálvéz, J. López-Sánchez, D. Gómez-Barquero, J. J. Giménez, and N. Cardona, "Combined time and space diversity for mobile reception in

- DVB-T and DVB-T2 systems,” *Vehicular Technology Magazine, IEEE*, vol. 7, no. 4, pp. 114–121, 2012.
- [47] “Technical delivery options for local television services in the uk- a comparison of approaches,” OFCOM, Research Document, 2010.
- [48] G. May and P. Unger, “A new approach for transmitting local content within digital single frequency broadcast networks,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 53, no. 4, pp. 732 –737, dec. 2007.
- [49] H. Jiang and P. Wilford, “A hierarchical modulation for upgrading digital broadcast systems,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 51, no. 2, pp. 223 – 229, june 2005.
- [50] H. Jiang, P. Wilford, and S. Wilkus, “Providing local content in a hybrid single frequency network using hierarchical modulation,” *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol. 56, no. 4, pp. 532 –540, dec. 2010.
- [51] J. Sanchez, C. Ruescas, D. Barquero, and N. Cardona, “On transmitting of global and local contents within DVB-T single frequency networks,” *Latin America Transactions, IEEE (Revista IEEE America Latina)*, vol. 9, no. 5, pp. 673 –680, sept. 2011.
- [52] J. Lopez-Sanchez, C. Ruescas, D. Gomez-Barquero, and N. Cardona, “Provision of local and mobile services in DVB-T networks,” in *Communications (LATINCOM), 2010 IEEE Latin-American Conference on*, sept. 2010, pp. 1 –6.
- [53] J. Zoellner, J. Robert, S. Atungsiri, and M. Taylor, “Local service insertion in terrestrial single frequency networks based on hierarchical modulation,” in *Consumer Electronics (ICCE), 2012 IEEE International Conference on*, jan. 2012, pp. 616 –617.
- [54] “Structure and modulation of optional transmitter signatures (T2-TX-SIG) for use with the DVB-T2 second generation digital terrestrial television broadcasting system,” DVB Document A150, 2010.
- [55] *Framing Structure, channel coding and modulation for Satellite Services to Handheld devices (SH) below 3 GHz*, ETSI Std. EN 302 583, Rev. 1.1.2, 2010.
- [56] *Multimedia Broadcast/Multicast Service (MBMS); Protocols and Codecs*, 3GPP Std. TS 26.346, Rev. 9.4.1, 2011.

## REFERENCIAS

---

- [57] D. Gómez-Barquero *et al.*, “DVB-NGH, la nueva generación de televisión digital móvil,” in *XXI Jornadas Telecom I+D*, 2011, pp. 1–8.
- [58] S. Saunders and A. Aragón-Zabala, *Antennas and Propagation for Wireless Communications Systems*. 2nd ed. Wiley, 2007.
- [59] T. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [60] J. Ramsey, “Realization of optimum interleavers,” *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 16, no. 3, pp. 338–345, 1970.
- [61] D. Gómez-Barquero, “Cost efficient provisioning of mass mobile multimedia services in hybrid cellular and broadcasting systems,” Ph.D. dissertation, Universidad Politécnica de Valencia, 2009.
- [62] H. Fuchs and N. Farber, “Optimizing channel change time in IPTV applications,” in *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting, 2008 IEEE International Symposium on*, 2008, pp. 1–8.
- [63] T. Rahrer, R. Fiandra, S. Wright, D. Allan, and D. Thorne, “Triple-play services quality of experience (QoE) requirements,” DSL Forum, TR-126, Dec. 2006.
- [64] A. J. Paulraj, D. A. Gore, R. U. Nabar, and H. Bolcskei, “An overview of MIMO communications - A key to gigabit wireless,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 92, no. 2, pp. 198–218, 2004.
- [65] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2005.
- [66] S. Kaiser, “Spatial transmit diversity techniques for broadband ofdm systems,” in *IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM'00)*, vol. 3, San Francisco, USA, Aug. 2000, pp. 1824–1828.
- [67] *Digital Video Broadcasting (DVB); IP Datacast: Program Specific Information (PSI)/Service Information (SI); Part 2: IP Datacast over DVB-SH*, ETSI Std. TS 102 472-2, Rev. 1.2.1, 2011.
- [68] COST207, “Digital land mobile radio communications (final report),” in *Commission of the European Communities, Directorate General. Communications, Information Industries and Innovation*, 1989, pp. 135–147.
- [69] “Anexo 2 especificaciones técnicas mínimas 04102012,” Documentos en web licitación RTVC-SP 07 2013, RTVC Colombia, 2012.



- [70] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *SIGMOBILE Mob. Comput. Commun. Rev.*, vol. 5, no. 1, pp. 3–55, Jan. 2001.
- [71] *Digital Video Broadcasting (DVB); Specification for Service Information (SI) in DVB systems*, ETSI Std. EN 300 468, Rev. 1.7.1, 2006.
- [72] *Directivity and polarization discrimination of antennas in the reception of television broadcasting*, ITU Std. BT.419-3, 1992.
- [73] *Digital Video Broadcasting (DVB); Structure and modulation of optional transmitter signatures (T2-TX-SIG) for use with the DVB-T2 second generation digital terrestrial television broadcasting system*, ETSI Std. TS 102 992, Rev. 1.1.1, 2010.
- [74] P. Fertl, "Performance limits and channel state information in wireless MIMO communication systems," Ph.D. dissertation, Technischen Universitat Wien, 2009.
- [75] D. G.-B. A. Saliato, G. Roig and N. Cardona, "radio propagation models for dvb-h networks", in *European Conference on antennas and propagations*, Barcelona, Spain, 2010.
- [76] H. Xia and H. L. Bertoni, "Diffraction of cylindrical and plane waves by an array of absorbing half-screens," *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on*, vol. 40, no. 2, pp. 170–177, 1992.
- [77] J. Poikonen, J. Paavola, and V. Ipatov, "Aggregated renewal markov processes with applications in simulating mobile broadcast systems," *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 58, no. 1, pp. 21–31, 2009.
- [78] *Métodos de predicción de punto a zona para servicios terrenales en la gama de frecuencias de 30 a 3 000 MHz*, ITU Std. UIT-R 1546-4, 2009.