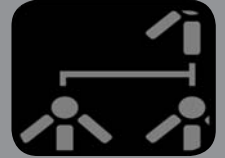


PLANIFICACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE REDES DVB-T PARA LA PROVISIÓN DE SERVICIOS LOCALES Y MÓVILES EN COLOMBIA

PLANNING AND OPTIMIZATION OF DVB-T NETWORKS FOR THE PROVISION OF LOCAL AND MOBILES SERVICES IN COLOMBIA



AUTOR

JAIME LÓPEZ SÁNCHEZ¹
Ing. Electrónico
Universidad Politécnica Valencia -iTEAM
Investigador
Grupo de Comunicaciones Móviles
jailosan@iteam.upv.es
COLOMBIA

AUTOR

DAVID GÓMEZ BARQUERO¹
Dr. Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Valencia -iTEAM
Investigador
Grupo de Comunicaciones Móviles
dagobar@iteam.upv.es
ESPAÑA

INSTITUCIÓN

¹Instituto de Telecomunicaciones y Aplicaciones Multimedia (iTEAM),
Universidad Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n, 46022, Valencia,
España
Phone: +34 963 879 585, Fax: +34 963
879 583
info@iteam.upv.es

AUTOR

CARLOS GARCÍA ACERO¹
Ing. Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Valencia -iTEAM
Investigador
Grupo de Comunicaciones Móviles
cargarac@iteam.upv.es
ESPAÑA

AUTOR

NARCIS CARDONA MARCET¹
Dr. Telecomunicaciones
Universidad Politécnica Valencia -iTEAM
Sub-director
Grupo de Comunicaciones Móviles
ncardona@iteam.upv.es
ESPAÑA

Información de la investigación

Los temas de investigación y las soluciones técnicas descritas en este artículo forman parte de distintos proyectos de cooperación internacional IBEROEKA propuestos por empresas y universidades españolas y colombianas, entre las cuales podemos destacar: Radio Televisión de Colombia - RTVC, Centro de Investigación de Telecomunicaciones - CINTEL, TES-AMERICA, Universidad ICESI, Hispasat, Telefónica, Optiva media, Planet Media, Universidad Politécnica de Valencia-Instituto ITEAM.

Recepción: Octubre 07 de 2009

Aceptación: Diciembre 28 de 2009

Temática: Televisión Digital Terrestre y móvil, Ingeniería telemática y electrónica, sistemas inalámbricos y móviles, comunicaciones satelitales.

Tipo de Artículo: Artículo de Reflexión

RESUMEN

Actualmente, el estándar dominante a nivel mundial para la transmisión de TV digital Terrestre es DVB-T (Digital Video Broadcasting- Terrestrial). La mayoría de redes desplegadas han sido diseñadas para una alta capacidad de transmisión y en configuración de frecuencia única (SFN por sus siglas en inglés). DVB-T se diseñó para transmisión fija, con una capa física que no presenta la suficiente robustez para prestar servicios en movilidad. Adicionalmente, uno de los problemas de las redes SFN es la transmisión de contenidos locales, ya que todos los transmisores deben emitir el mismo contenido sincronizado en tiempo y frecuencia. En países donde aún no ha sido implementada la red de Televisión Digital Terrestre (TDT) como Colombia, se puede planificar la red haciendo uso de los últimos avances tecnológicos para ofrecer servicios de recepción fija y móvil, definir áreas de contenidos locales o regionales (LSA por sus siglas en inglés) en redes SFN y maximizar el nivel de cobertura en el escenario de despliegue. En este artículo se describen las siguientes soluciones técnicas compatibles con DVB-T para planificar y optimizar las redes TDT y se presentan parte de los resultados obtenidos en la investigación: diversidad de antenas, modulación jerárquica, mecanismos de corrección de errores en capa de aplicación (AL-FEC por sus siglas en inglés), codificación de video escalable SVC, time slicing, componente de transmisión satelital y gap-fillers. Adicionalmente, se describe la metodología de evaluación y validación de cada una de las soluciones propuestas. El artículo aborda temas de investigación que permiten la penetración en nuevos escenarios de recepción y nichos de mercado para la TV digital, y abre la oportunidad de establecer convenios de cooperación internacional entre instituciones colombianas y de países que al día de hoy ya han finalizado con éxito la transición de televisión analógica a digital, como es el caso de España.

PALABRAS CLAVES

DVB-T móvil,
Modulación jerárquica,
Diversidad de antenas,
Corrección de errores en capa de aplicación.
Áreas de servicio local

ANALYTICAL SUMMARY

Nowadays, the dominant standard for broadcasting Digital Terrestrial Television (DTT) services on the world is DVB-T (Digital Video Broadcasting- Terrestrial). Most of the DVB-T networks deployed have been designed for high capacity transmission and configured in Single Frequency Network (SFN). DVB-T was designed for fixed rooftop reception using a physical layer with low robustness for mobile services. Further, the transmission of Local Services Area (LSA) is one of the disadvantages of SFN networks, because, all transmitters must broadcast the same content synchronized in time and frequency. In countries like Colombia, where the DTT network has not yet deployed is possible to design the future network using the latest technological advances in order to offer fixed and mobile TV services, defining Local Services Areas in SFN network topologies and maximizing the coverage level on the target scenario. This paper describes the follow technical solutions compatible with DVB-T for planning and optimizing the DTT networks and presents some results obtained: antenna diversity, hierarchical modulation, Application

Layer Forward Error Correction (AL-FEC), Scalable Video Coding (SVC), time slicing, satellite component and gap-fillers. Additionally, it describes the methodology used to evaluate and validate each of the solutions proposed. The paper addresses issues of research that open news reception scenarios and market niches for digital TV, creating opportunities of international cooperation projects between Colombian institutions and countries that have successfully completed the transition from analog to digital TV, like Spain.

KEYWORDS

Mobile DVB-T,
Hierarchical Modulation,
Antenna diversity,
Application Layer Forward Error Correction.
Local Service Area.

INTRODUCCIÓN

La televisión digital se ha convertido en un fenómeno de gran relevancia para el desarrollo de la Sociedad de la Información. Los países más desarrollados han empezado a desplegar infraestructura, diseñar aplicaciones y fomentar las políticas públicas para poder ofrecer a los ciudadanos nuevos y mejores servicios. DVB-T (*Digital Video Broadcasting – Terrestrial*) es el estándar europeo para la transmisión de Televisión Digital Terrestre

(TDT). Este estándar forma la mayor comunidad digital audiovisual del mundo, al estar integrado por más de 120 países de los cinco continentes, entre ellos España y la mayoría de países europeos.

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. Pruebas de campo y laboratorio han demostrado que es posible la recepción de señal de TDT en movilidad si se adopta una robusta configuración de los parámetros de transmisión DVB-T [1]. Un claro ejemplo es la red TDT desplegada en Singapur, la cual proporciona información de entretenimiento y anuncios publicitarios a ferrys, a taxis y a cerca de unos 1500 autobuses urbanos. Esta red está conformada por un transmisor y 9 repetidores en configuración SFN. El modo de transmisión utilizado es el más robusto que permite el estándar, QPSK, FFT 2K, CR 1/2, GI 1/4. Con este modo se consigue una tasa de transmisión de tan solo 4.98 Mbps.

El estándar europeo para la transmisión de televisión digital a terminales móviles es DVB-H (*Digital Video Broadcasting –Handheld*). DVB-H reutiliza la capa física de DVB-T e introduce una transmisión discontinua del servicio (*Time slicing*) para ahorrar energía de la batería, y una codificación adicional en la capa de enlace para compensar la degradación de la capa física DVB-T en movilidad. Aunque DVB-H mantiene la compatibilidad con DVB-T, DVB-H transmite toda la información sobre paquetes IP, requiere de un canal radioeléctrico específico y el despliegue de una nueva red con mayor número de transmisores, aumentado los costes de implementación. La falta de demanda de licencias para ofrecer este servicio por parte de operadores y un claro modelo de negocios imposibilita a día de hoy un mayor despliegue de DVB-H en el mundo. Sin embargo, el estándar está ya presente en varios países europeos como Finlandia, Suiza, Italia u Holanda, y otros como la India o Vietnam.

Una de las grandes ventajas del estándar DVB-T frente a la TV analógica es la posibilidad de crear redes de frecuencia única SFN, donde varios transmisores sincronizados y repetidores emiten la misma señal a la misma frecuencia. De esta forma, las redes SFN logran una mayor eficiencia en la utilización de recursos radio. Sin embargo, uno de los problemas que presenta es la transmisión de contenidos locales, pues todos los transmisores deben emitir el mismo contenido, en la misma frecuencia y sincronizados en tiempo. Hasta ahora, la inserción de contenidos de carácter local en redes SFN, implica remplazar un servicio global con un contenido local en toda la red, transmitiéndolo en zonas

donde no son necesarios. Se estaría haciendo un uso ineficiente de la red. La capacidad de las redes SFN para proporcionar contenidos diferenciados por zonas de interés local es un tema que no ha sido estudiado todavía y se convierte en un importante aspecto a optimizar en las actuales y futuras redes TDT.

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, orientadas a recepción fija con antenas directivas en los tejados de los edificios. La mayoría de estas configuraciones ofrecen una muy poca cobertura para recepción portable o móvil. En países que aún no han desplegado la red de TDT, como es el caso de Colombia, planificar una única red que contemple desde el inicio la provisión de servicios locales 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 para este tipo de servicios móviles como puede ser DVB-H.

En este artículo se analizan conceptos avanzados del estándar DVB-T para dar servicios móviles en sistemas de transporte público y se evalúan soluciones técnicas compatibles para mejorar la recepción móvil, no contempladas en el estándar como son: la utilización de diversidad de antenas en recepción, codificación de video escalable SVC y AL-FEC. Adicionalmente, se analizan topologías de red basadas en la modulación jerárquica y Time slicing para DVB-T con el fin de proveer contenidos locales a receptores fijos en redes de frecuencia única (SFN), ampliando las posibilidades de explotación de este tipo de redes.

La estructura del artículo es la siguiente: en la Sección 1, se presenta la metodología de planificación y estimación de cobertura de la red TDT para Colombia. En la Sección 2, se analizan los aspectos de optimización y propuesta de nuevos servicios para redes DVB-T describiendo las distintas soluciones técnicas propuestas. En la Sección 3, la metodología de evaluación de cada una de las soluciones técnicas es descrita. Parte de los resultados obtenidos en esta investigación son presentados en la Sección 4. Finalmente, en la Sección 5, se establecen las principales conclusiones.

1. PLANIFICACIÓN DE LA RED DVB-T EN COLOMBIA

El éxito del despliegue de una red TDT depende de una eficiente planificación previa a su implementación. Dimensionar correctamente la infraestructura, optimizar el nivel de cobertura y contemplar la provisión de

servicios locales y móviles desde la fase de diseño, son aspectos que sin duda facilitan el despliegue progresivo de la red en el territorio colombiano, con la menor infraestructura y menor coste.

En general, el objetivo de planificar una red de radiodifusión digital terrestre es proveer suficiente calidad de señal en toda el área de servicio con el mínimo coste, mientras se mantiene el nivel de interferencia por debajo de un umbral específico. En la Fig. 1, se describe el proceso general propuesto para la planificación de la red DVB-T en Colombia, teniendo en cuenta que la planificación de redes con servicios móviles requiere de un enfoque diferente comparado con la planificación de redes con antena en tejados. En redes de televisión móvil, la calidad de servicio experimentada por el usuario depende de la evolución temporal de los errores percibidos, la velocidad y la posición instantánea del receptor. No existe una única y universal solución para la planificación de redes DVB-T que pueda ser usada en todos los países del mundo, pero si existen unos aspectos básicos comunes a ser considerados:



FIGURA 1. Proceso general en la planificación de redes DVB-T para recepción fija y móvil

1.1 ESCENARIO DE DESPLIEGUE

Para realizar la planificación de una red TDT, en primer lugar, es necesario contar con información sobre el escenario de despliegue, los casos de uso de la nueva red TDT y los requerimientos de capacidad de transmisión de cada uno de ellos. En éste caso, el escenario de despliegue para la nueva red TDT será todo el territorio nacional de Colombia, haciendo principal énfasis en la ciudad de Bogotá D.C. por ser la capital del país. El transmisor para esta ciudad estará ubicado en el cerro de Manjui-Facatativá ($4^{\circ} 48' 8.83''$ latitud

Norte, $74^{\circ} 23' 24.88''$ longitud Oeste, 3215 msnm) a 35km aproximadamente del centro de la ciudad de Bogotá, desde donde se estima podrá ofrecer servicios de DVB-T a más de 10 millones de potenciales usuarios en entornos de recepción fija y móvil.

La información geográfica del escenario se obtendrá de mapas digitales de elevación de terreno (Digital Terrain Model) de Colombia con una resolución de 10 m y mapas digitales con alturas de edificios y tipo de entorno de las principales ciudades del país a resolución de 1m. A partir de esta cartografía se estimará el nivel de cobertura en recepción fija para entornos con condiciones geográficas andinas. Posteriormente, se identificarán las principales rutas del sistema de transporte público en Bogotá (Transmilenio o empresas de autobuses locales), sobre las cuales se realizarán simulaciones dinámicas que permitan establecer el nivel de recepción de señal DVB-T y la calidad de servicio en autobuses, como se explica en la Sección 3.3.

Para una correcta estimación de cobertura, es necesario identificar los principales casos de uso de la red TDT en Colombia, cuantificando y caracterizando los perfiles de usuario, las zonas de recepción y estableciendo los requerimientos mínimos para cada caso de uso. Esta caracterización de usuarios y servicios permitirá hacer una estimación de la capacidad de transmisión necesaria para ofrecer la mejor calidad de servicio.

Finalmente, en la definición del escenario de despliegue se delimitarán las zonas donde coexistan servicios globales y locales (LSA), considerando la agrupación de sub-sets de transmisores para LSA's, los efectos de interferencias entre LSA's vecinas y las pérdidas o ganancias SFN en el sub-set y la red global.

1.2 MODELOS DE PROPAGACIÓN EN ENTORNOS ANDINOS

En todos los países de la región Andina en general y en Colombia en particular, las ciudades han crecido sobre terreno montañoso irregular, donde hay presencia de colinas, valles y edificios en un mismo entorno. La propagación radio se ve afectada por cada uno de estos parámetros de forma diferente, lo cual se debe tener en cuenta a la hora de diseñar un modelo para estimar las pérdidas por propagación. Pocos estudios se han llevado a cabo para un ambiente urbano afectado por terreno ondulado, con amplia presencia de colinas. Sin embargo, algunos modelos propuestos son: modelo de traza de rayos y la aproximación de Kirchhoff-Huygens [3], el modelo Xia-Bertoni [4] y el modelo Cost231-Walfisch-Ikegami. Estos dos últimos calibrados y verificados con medidas de campo en entornos andinos [5].

El cálculo de las pérdidas de propagación es un procedimiento demasiado complejo para ser realizado de forma determinista utilizando modelos basados en trazado de rayos y más cuando se aborda la planificación de redes a gran escala, como es el caso de esta red de TDT. Su complejidad básicamente radica en el gran nivel de detalle requerido de los mapas cartográficos y el elevado coste computacional para su cálculo y procesamiento.

Por lo tanto, es conveniente utilizar modelos de propagación semi-deterministas y empíricos, basados los primeros en aproximaciones de las pérdidas por propagación, y los segundos en modelos relativamente sencillos obtenidos a partir de extensas campañas de medidas. La ventaja de los modelos semi-deterministas y empíricos es que son formulados con ecuaciones cerradas dependientes de pocos parámetros fácilmente calculables. Para estimar las pérdidas de propagación de forma óptima, y teniendo en cuenta la gran cantidad de factores que intervienen en la estimación de las pérdidas de propagación (precisión de los mapas cartográficos disponibles, suposiciones y simplificaciones de los diferentes modelos de propagación, variación del tipo de entorno, de la frecuencia, condiciones montañosas, etc.), estos modelos de propagación se calibrarán en base a campañas de medidas que se realizarán en el escenario de despliegue, siguiendo los test bed definidos en el proyecto y los recomendados por el estándar DVB [7].

1.3 ESTIMACIÓN DE COBERTURA

Con el fin de identificar y recomendar las configuraciones de red que mejores prestaciones brindan en entornos andinos, es necesario estimar de forma comparativa los porcentajes de cobertura utilizando los modos más comunes de transmisión de DVB-T y sus mejoras utilizando las soluciones técnicas propuestas para recepción móvil.

Para recepción fija, un punto es considerado cubierto con calidad "aceptable" si la probabilidad de cobertura es superior al 70%, o con calidad "buena" si es superior al 95%. El cálculo de la probabilidad de cobertura requiere evaluar la relación portadora a interferencia más ruido (CINR) en cada punto del escenario. Por lo tanto, se debe identificar y estimar los niveles de las posibles señales interferentes debidas a las condiciones de recepción multitrayecto propias en entornos muy densos y/o montañosos como Colombia, a la transmisión de la misma señal desde varias estaciones base, a la operación de otras redes que utilicen el espectro electromagnético en frecuencias cercanas y a otros factores externos propios del escenario. La CINR en una red SFN se puede calcular según:

$$CINR = \frac{C}{I_{self} + I_{ext} + P_N} = \frac{\sum_i P_{Tx_i} W(t_i - t_o)}{\sum_i P_{Tx_i} \cdot (1 - W(t_i - t_o)) + I_{ext} + P_N} \quad (1)$$

Donde, C es la potencia de la señal útil, I_{Self} es la interferencia producida por la propia red, I_{Ext} son las interferencias externas. P_{Tx_i} y t_i son la potencia recibida y el tiempo de llegada de la señal proveniente del transmisor i de la red, t_o es el instante de sincronización temporal y P_N es la potencia de ruido térmico. La función de peso w , determina en qué medida la señal proveniente del transmisor i contribuye a formar parte de la señal y/o de la interferencia según su tiempo de llegada. Ésta depende de la duración de la parte útil del símbolo OFDM (T_u), el intervalo de guarda (T_g) y el tiempo relativo de llegada (Δt) [8][8]. El criterio de calidad en recepción fija es la mínima CINR requerida para alcanzar un BER de $2 \cdot 10^{-4}$ después del decodificador de Viterbi [9].

En servicios DVB-T móviles, correspondiendo a servicios de transmisión continua, el criterio de evaluación ESR5% (*Erroneous Second Ratio of 5%*) ha demostrado estar altamente relacionado con una buena calidad subjetiva percibida por el usuario. Otro tipo de criterio generalmente utilizado para evaluar el rendimiento DVB-T móvil es el porcentaje de paquetes MPEG-2 erróneos (*TS PER*) después del proceso de decodificación Reed-Salomon, estableciendo el límite de TSPER $>5\%$ como valor máximo permitido para una recepción cuasi libre de errores (*QEF*).

El cálculo de la probabilidad de cobertura en cada LSA puede ser realizado utilizando la ecuación (1), pero considerando como interferencia externa (I_{ext}) la contribución de los transmisores que no conforman la LSA que se está evaluando. El umbral para una correcta recepción depende del modo de transmisión utilizado y del caso de recepción a evaluar.

2. ASPECTOS DE OPTIMIZACIÓN

Las actuales y futuras redes DVB-T pueden ser optimizadas para garantizar un máximo nivel de cobertura con el mínimo coste de implementación, y adicionalmente ofrecer servicios locales y móviles con la misma infraestructura. La difusión de contenidos de TV digital de forma local y en movilidad proporciona un valor añadido respecto a los servicios TDT globales y fijos existentes en la actualidad, abriendo un nuevo abanico de servicios, nichos de mercado y escenarios de recepción no alcanzados hasta el momento. En este artículo se propone la utilización de diferentes soluciones

técnicas compatibles con DVB-T para optimizar las redes TDT en tres básicos aspectos: recepción de servicios en movilidad, transmisión de contenidos locales en redes SFN y maximización de cobertura en el escenario de despliegue.

2.1 SOLUCIONES TÉCNICAS PARA SERVICIOS DVB-T MÓVILES

Los factores más importantes que afectan el rendimiento de un sistema DVB-T en entornos de movilidad son el efecto Doppler, el fast fading y el shadowing. Sin embargo, en los últimos años han surgido una serie de avances en las técnicas de transmisión y recepción que permiten optimizar una red DVB-T para ofrecer servicios en movilidad (especialmente en vehículos). Las soluciones técnicas investigadas son descritas a continuación:

2.1.1 Diversidad de Antenas

Uno de los métodos más eficaces para compensar las variaciones propias del canal móvil, consiste en recibir diferentes señales con la misma información pero que han experimentado desvanecimientos independientes y aplicar distintos métodos de combinación de señales que permitan recuperar una única señal de mejor calidad. El nivel de mejora dependerá del tipo de transmisión DVB-T y del proceso de combinación aplicado. Los resultados que se obtendrán utilizando diversidad en recepción siempre serán positivos comparando con un receptor de una sola antena, pudiendo alcanzar valores de ganancia entre 0 y 8 dB, como se observa en la Fig. 2. Se comparan los métodos más comunes: combinación selectiva donde se escoge la rama con mejor nivel de señal, combinación de igual ganancia donde se suman en fase todas las señales recibidas o combinación de máxima relación donde la señal de salida es la suma de cada una de las señales recibidas multiplicadas por un factor de ponderación de acuerdo al nivel de calidad de la misma [10].

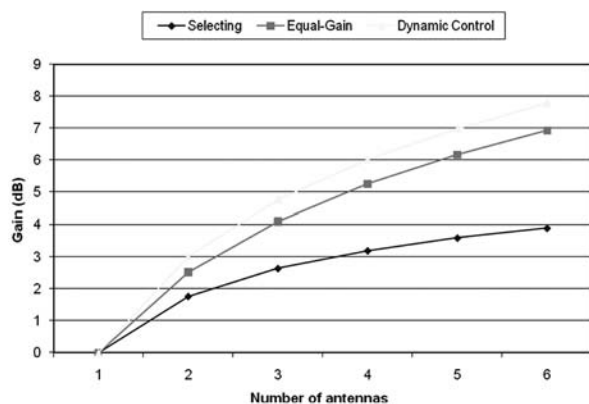


FIGURA 2. Ganancia por Diversidad de Antenas

La diversidad de antenas no solo reduce la CNR mínima necesaria, sino que a su vez la mantiene constante para incrementos del Doppler hasta el máximo permitido. La máxima ganancia para frecuencia Doppler (máxima velocidad) es también muy significativa pero depende más de la tecnología del receptor, sin embargo esta ganancia es aproximadamente del 100% en perfiles urbanos y cerca del 150% en perfiles rurales [11]. La implementación de varias antenas en teléfonos móviles no es un caso práctico debido a sus cortas dimensiones, pero sí lo es en vehículos o autobuses donde se cuenta con el espacio suficiente para la separación de las antenas receptoras.

2.1.2 Modulación Jerárquica

La modulación jerárquica es un modo de transmisión que permite el estándar DVB-T, donde el flujo de información es dividido en dos flujos como se muestra en la Fig. 3. Un flujo de alta prioridad (HP) con baja tasa de transmisión y alta protección frente a ruido e interferencias, y otro de baja prioridad (LP) de mayor tasa de bits pero menos robusto. Son tres los parámetros necesarios para definir un esquema de modulación jerárquica en DVB-T: el factor (α), y las tasas de codificación de los flujos HP y LP. El factor (α) es la relación entre la distancia entre dos símbolos adyacentes de distinto cuadrante y la distancia entre símbolos adyacentes del mismo cuadrante, puede tomar valores de 1, 2 ó 4 [9].

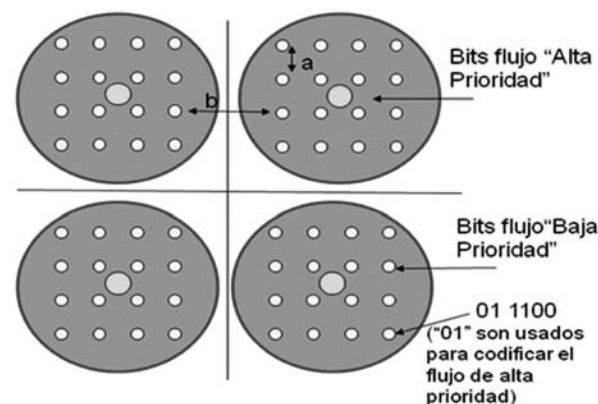


FIGURA 3. Modulación jerárquica.

Cuando un receptor demodula el flujo HP, la desviación dada al símbolo por el flujo LP es visto como un ruido adicional dentro del cuadrante. Por tanto, el flujo HP sufre una degradación en términos de CNR mínima requerida con respecto a una modulación QPSK convencional. Esta penalización es un incremento en CNR de hasta 6.8 dB dependiendo del tipo de modulación jerárquica, la tasa de codificación y el

tipo de canal [9]. Existen dos formas de compensar o reducir esta penalización: la primera, es aumentar la robustez del flujo HP protegiéndolo con una tasa de codificación mayor, proporcionándole así mayor protección contra errores a costa de una reducción en la capacidad de transmisión del flujo. La segunda, es incrementar el factor α . Aumentando el valor de α se incrementa la robustez del flujo de alta prioridad (HP), siempre a costa de la robustez del flujo de baja prioridad (LP).

Una de las aplicaciones de la modulación jerárquica es aprovechar la ganancia de CNR del flujo HP para brindar servicios de movilidad, mientras que el flujo LP podría simultáneamente proveer servicio a receptores fijos en la zona más próxima al transmisor. El flujo HP estará sometido a los efectos del canal móvil, por lo tanto, es necesario protegerlo con las tasas de codificación más robustas que permite el estándar (1/2,2/3). A día de hoy, la implementación de esta solución para TDT móvil en redes comerciales, ha estado relegada por la complejidad del receptor y la necesidad de una capacidad de transmisión dedicada a los contenidos móviles, a costa de una reducción en la capacidad de los contenidos para recepción fija. Sin embargo, la combinación de este modo de transmisión con otras soluciones como SVC o AL-FEC descritas anteriormente, retoma la viabilidad de implementar modulación jerárquica a nivel comercial.

2.1.3 Codificación de Vídeo Escalable SVC

La codificación de vídeo escalable consiste en proporcionar múltiples versiones de un mismo vídeo original en términos de su resolución de amplitud, resolución espacial, resolución temporal, o una combinación de estos tipos. La primera capa (también llamada capa base) se obtiene al aplicar un cuantificado grueso a la imagen original o en su dominio de transformada (por ej. DCT). La segunda capa contiene la diferencia de cuantificación entre la imagen original y aquella reconstruida desde la primera capa usando un cuantificador más fino que el de la capa inicial. La técnica de codificación SVC es una extensión incluida en el estándar de compresión de vídeo H.264/MPEG4-AVC, estándar que ha sido adoptado para DVB-T en algunos países como Francia, Polonia, Noruega entre otros.

Un método alternativo actualmente utilizado para manejar capacidades de canal variables distintos tipos de receptor es el simulcast, donde se codifica el mismo vídeo muchas veces, cada una con una diferente calidad y resolución. A pesar de su sencillez, es muy ineficiente comparado con SVC, dado que un flujo de datos con mayor calidad y resolución repetirá esencialmente la misma información existente en un flujo de menor calidad, junto con información adicional. Por otra parte,

para proveer funcionalidad de escalado, el codificador deberá sacrificar una cierta cantidad de eficiencia en la codificación en comparación con los codificadores no escalables actuales. Aunque SVC es posterior a DVB-T, la modulación jerárquica se convierte en una gran alternativa para la transmisión de este tipo de codificación de vídeo. Se propone la utilización de SVC para codificar una capa base de la señal de vídeo fuente y transmitirla en el flujo HP. Gracias a la robustez del flujo HP, receptores tanto fijos como portables y móviles, recibirán una primera versión del vídeo en baja calidad en una mayor área de cobertura comparada con el flujo LP o la modulación no jerárquica. Por su parte, las capas de mejora serán transmitidas utilizando el flujo LP. La cobertura del flujo LP corresponde prácticamente con el área cubierta por la modulación no jerárquica. Decodificar las capas de mejora incrementa la calidad de la imagen reconstruida hasta el nivel más alto y depende únicamente de las mejores condiciones de recepción en las que se encuentre el usuario.

2.1.4 AL-FEC

Los mecanismos FEC se basan en la transmisión de información adicional redundante para recuperar en recepción las posibles pérdidas de datos producidas durante la transmisión. El estándar DVB-T implementa un mecanismo FEC en la capa física que corrige errores dentro de los paquetes MPEG-2 Transport Stream (MPEG-2 TS). La pérdida de paquetes MPEG-2 en la capa física puede ser recuperada en capas superiores (capa de enlace o capa de aplicación). El estándar DVB-H implementa un mecanismo de correcciones en la capa de enlace (MPE-FEC), y encapsula los datos en paquetes IP. El problema es que los receptores convencionales DVB-T no son capaces de decodificar paquetes IP. Para poder ser compatible con el estándar DVB-T, se puede implementar un mecanismo AL-FEC, que sea capaz de recuperar paquetes MPEG-2 TS erróneos o perdidos. Esta protección es añadida mediante software, tanto en el transmisor como en el receptor que quiera implementar este tipo de protección sin alterar la compatibilidad con los receptores convencionales de DVB-T [12].

La protección ofrecida por AL-FEC, depende de la duración de los paquetes de audio y vídeo que se desean codificar en forma conjunta, conocido como periodo de protección, y del porcentaje de datos de paridad FEC que se desea utilizar, conocido como FEC overread. Altos periodos de protección toman ventaja de la diversidad espacial y temporal derivada de la movilidad del receptor, para incrementar la cantidad de información recuperada. El tiempo de cambio de canal (zapping), los requerimientos de memoria y la cantidad de información a ser almacenada antes de la decodificación y reproducción están definidos por el

periodo de protección utilizado, generalmente limitado a unos pocos segundos para terminales móviles de mano.

Sin embargo, éste no es el caso de los receptores en autobuses o sistemas de transporte público, pues los valores del periodo de protección pueden ser configurado a valores por encima del límite de los terminales móviles, debido a que la información será transmitida por un único canal y por lo tanto no requiere de cambios de canal de televisión durante su recorrido. Las características de memoria no es un aspecto crítico en receptores para vehículos o autobuses, dado que generalmente es posible implementar una mayor cantidad de memoria comparado con los pequeños terminales de mano.

2.2 SOLUCIONES TÉCNICAS PARA SERVICIOS DE ÁREA LOCAL EN REDES DVB-T

Otra novedosa optimización de las redes TDT es la emisión de contenidos de área local en redes SFN. Las soluciones técnicas propuestas en este artículo para la transmisión de contenidos globales y locales son: utilización de time slicing en DVB-T y modulación jerárquica en los transmisores que desean implementar LSA.

2.2.1 Contenidos Locales utilizando Time Slicing

El time slicing es una técnica de multiplexación temporal utilizada en DVB-H. Esta técnica define dos periodos temporales, uno para contenidos globales y otro para contenidos locales, como se muestra en la Fig. 4. Todos los transmisores transmitirán los mismos contenidos durante el periodo de contenidos globales, con lo cual obtendremos las ventajas de las redes SFN. Durante el periodo destinado a contenidos locales, cada uno de los transmisores transmitirá la información correspondiente a los contenidos locales pertenecientes a su LSA.

Debido al entrelazado en capa física que se realiza en DVB-T, es necesaria la inserción de unos periodos de adaptación entre los servicios globales y locales. Durante estos periodos en toda la red se transmitirán paquetes TS null. De esta forma se consigue evitar el entrelazado de información perteneciente a servicios globales y locales. El tamaño de los periodos de adaptación depende de los parámetros de transmisión.

Otro de los puntos más interesantes es cómo poder señalar correctamente estos servicios, para ello, se está evaluando la necesidad de utilizar o definir algún descriptor o campo de información dentro de las tablas de señalización de DVB-T. Por último, también es importante tener en cuenta que hay zonas en las que sólo se requieren servicios globales. Un receptor que se encuentre en estas zonas es posible que reciba

información local de los LSAs más próximos, esto es interpretado por el receptor como paquetes erróneos. Estos errores serán normales y no deben ser interpretados como que el receptor está mal sincronizado, con el fin de evitar pérdida de información del contenido global por intentar resincronizarse continuamente.

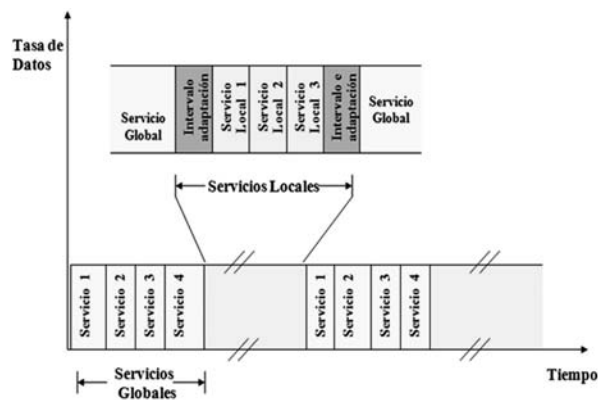


FIGURA 4. Time Slicing

2.2.2 Contenidos Locales en el Flujo LP

En esta configuración el contenido global es transmitido sobre el flujo HP, mientras que el servicio local en el flujo LP. El contenido local puede ser accedido únicamente si la calidad de la señal recibida en términos de CNR es lo suficientemente alto. Esto se consigue solo en la zona más próxima al transmisor y por tanto se estaría delimitando correctamente el alcance de este tipo de servicios. Bajo esta topología, un transmisor con contenidos locales pasa de utilizar un esquema de modulación QAM a uno de modulación QAM de un orden más alto. Por ejemplo de QPSK (servicios globales) a 16QAM (servicios globales + locales), 16QAM (servicios globales) a 64QAM (servicios globales + locales), o QPSK (servicios globales) a 64QAM (servicios globales + locales). Finalmente, un transmisor de la SFN que no desea emitir contenido local, transmitirá los contenidos de carácter global en el mismo esquema de modulación utilizado por el flujo HP de los transmisores que sí lo emite.

2.2.3 Contenidos Locales en el Flujo HP.

La topología descrita anteriormente envía el contenido global sobre el flujo HP, y por tanto, siguiendo las especificaciones del estándar DVB-T, estos servicios estarían limitados a una modulación QPSK. Para evitar esta limitación en capacidad y escalabilidad del modo de transmisión, se ha analizado la transmisión de los

contenidos globales en el flujo LP y los contenidos locales en el flujo HP. En esta topología el flujo HP es protegido con una tasa de codificación muy bajo (3/4,5/6) con el fin de limitar el alcance en cobertura de los contenidos locales. Esta baja protección, beneficia la cantidad de tasa de bits útil disponible para el servicio a transmitir. Por su parte, el flujo LP será protegido con valores de tasa de codificación más robustos (1/2, 2/3) con el fin de reducir el nivel de CNR mínimo requerido, aumentar el nivel de cobertura e intentar que sea lo más cercana al área de cobertura del flujo HP.

En esta topología, la cobertura de los contenidos locales emitidos por cada transmisor está delimitada por la cobertura alcanzada con el flujo HP. Los flujos HP provenientes de otros transmisores son considerados como interferencia únicamente. Los contenidos globales emitidos en el flujo LP son iguales para todos los transmisores, por lo tanto en aquellas zonas con recepción proveniente de múltiples transmisores se presenta ganancia SFN, ofreciendo una mayor calidad de recepción comparada con el enfoque MFN.

2.3 SOLUCIONES TÉCNICAS PARA MAXIMIZAR EL NIVEL DE COBERTURA DE LAS REDES DVB-T

En la planificación de redes de radiodifusión, el objetivo siempre es dimensionar adecuadamente la infraestructura para maximizar el nivel de cobertura en el área objetivo, con el mínimo coste de implementación y con la posibilidad de realizar un despliegue progresivo. Sin embargo en países como Colombia, el cumplimiento de este objetivo se ve afectado por las condiciones iniciales de la red de difusión de televisión, por la distribución poblacional y por las características orográficas propias de la región andina.

Las alternativas propuestas en este artículo para garantizar la penetración de la televisión digital en todo el territorio colombiano son: la planificación de gap-fillers y el despliegue de una red híbrida terrestre-satelital.

2.3.1 Planificación de gap-fillers.

Al trabajar con señales de TV digitales, la recepción de la señal es perfecta o nula, y esto, unido a la complicada orografía del terreno hace que aparezcan zonas de sombra. Los Gap-Fillers son emisores destinados a cubrir "huecos" en la cobertura de un emisor de mayor categoría. Mientras que los transmisores recogen la señal en banda base a través de una red de distribución y la modulan, amplifican y transmiten, los gap-fillers captan la señal RF mediante una antena directiva de emisores de la propia red, la amplifican y la retransmiten en la misma frecuencia pero con una potencia generalmente menor y limitada.

La principal ventaja que presentan los gap-fillers es su menor coste y complejidad. De esta forma, no se requiere de modulador ni de sincronismo ni de llevar la señal en banda base hasta él. No obstante, los gap-fillers son un sistema realimentado lo que redundante en la limitación de la potencia transmitida y por tanto del nivel de cobertura.

En general, la característica técnica más importante a resaltar sobre el uso de gap-fillers es el acoplo entre las antenas de TX y RX. Dado que las dos antenas están cercanas entre sí, habrá que tener especial cuidado con la realimentación de la señal de salida a la entrada ya que el amplificador podría entrar en oscilación. Para la caracterización de la realimentación del gap-filler se utiliza el parámetro Margen de Ganancia (MG), definido como la diferencia entre el aislamiento entre antenas y la ganancia del gap-filler. La estabilidad del gap-filler sólo se garantiza cuando la ganancia del lazo es menor que la unidad. Es decir, cuando la ganancia es menor que el aislamiento ($MG < 0$ dB).

Esta condición implica que se ha de establecer un valor mínimo de Margen de Ganancia que garantice el correcto funcionamiento del GF. Pruebas de laboratorio han determinado que la ganancia debe ser como mínimo 10 dB inferior al aislamiento lo que supondría una gran limitación de la potencia máxima transmitida y, por consiguiente, la cobertura.

Las prestaciones de los GF pueden mejorarse mediante la implementación de canceladores de ecos que obtienen una respuesta impulsional más limpia y un rizado en el espectro mucho menor consiguiéndose potencias de transmisión mayores.

2.3.2 Red híbrida terrestre-satelital.

Las arquitecturas de red satelital se caracterizan por dar una cobertura extensa, alta rapidez de instalación y despliegue, y un coste asociado independiente de la distancia dentro de la zona cubierta. Los satélites poseen capacidades de transmisión de cientos de Mbps, donde la capacidad depende de las características de cada sistema y en particular del tamaño de las antenas.

En aquellas situaciones en que se valora que el mercado no podrá lograr el desarrollo de la TDT y en situaciones de baja demanda dispersa que haga inviable económicamente el despliegue de una infraestructura adecuada, la solución de una componente satelital se convierte en una gran alternativa. Adicionalmente, la utilización de una componente satelital como complemento al despliegue de la red TDT en Colombia, no solo garantizará una total cobertura en la zona objetivo, sino que a su vez permitirá ofrecer servicios de televisión

digital móvil. Para ello, se propone analizar modelos de intervención complementaria a la TV digital terrestre que den cobertura en zonas donde la recepción de la señal terrestre sea deficiente mediante una componente satelital DVB-S/S2. Así mismo, es conveniente analizar la utilización de la componente satelital para establecer radioenlaces con los transmisores terrestres.

El diseño de esta red híbrida, requiere definir las especificaciones de integración de las componentes de TV digital terrestre DVB-T y satelital DVB-S/S2 abarcando toda la cadena de valor: la transmisión desde el punto de vista de infraestructura, señalización, adaptación hardware y software; la recepción desde el punto de vista de especificaciones de los terminales, combinación de señales y entornos de recepción.

3. METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN

3.1 MEDIDAS DE CAMPO

Las medidas de campo son, sin duda, el método más preciso para medir el rendimiento de cualquier sistema de radiocomunicaciones. Estas medidas permiten conocer los niveles de señal reales sobre el terreno, estimar la cobertura de la red desplegada y calibrar los modelos de pérdidas de propagación y de rendimiento de la capa física del estándar DVB-T y DVB-S.

Para el almacenamiento de las medidas en tiempo real se utilizará un sistema automatizado de medida desarrollado por el iTEAM-UPV y conformado por un receptor profesional DVB-T/H de dos señales de entrada RF, antenas externas comunes, un receptor GPS, y software propio de control y registro de datos. Básicamente el sistema de medida proporciona parámetros de capa física como RSSI (nivel de potencia), CNR (relación señal a ruido), así como indicadores de errores como BER (*Bit Error Ratio*), MER (*Modulation Error Ratio*) o PER (*Packet Error Ratio*). Adicionalmente, captura el flujo de paquetes de transporte (MPEG-2 TS) a la salida del demodulador. A partir de estas trazas, es posible emular el funcionamiento de la capa física de DVB-T y las capas superiores (ej. AL-FEC).

3.2 PRUEBAS DE LABORATORIO

Las pruebas de laboratorio tienen como objetivo caracterizar el comportamiento de los distintos modos de transmisión. Mediante un modulador DVB-T se puede controlar los parámetros de transmisión como tipo de modulación, tasa de codificación, intervalo de guarda, tamaño FFT y modulación jerárquica.

Además, con un emulador de canal se puede simular un canal móvil controlando el Doppler que introduce. En recepción, a la salida del demodulador es posible monitorizar el bit TEI (Transport Error Indicator), que indica la correcta recepción de cada paquete MPEG-2 TS. De esta manera, podemos obtener los estadísticos de error de paquete, así como la media de paquetes erróneos en función de la CNR recibida, y para distintas condiciones de canal (Doppler).

3.3 SIMULACIONES DINÁMICAS PARA DVB-T

El estudio de redes de DVB-T para recepción en movimiento, requiere de análisis dinámicos al igual que las redes celulares de telefonía móvil. Debido a que la calidad del servicio (*QoS*) percibida por los usuarios depende de la cantidad total de errores de transmisión así como de su evolución temporal. Las simulaciones dinámicas permiten, dado un escenario para una red DVB-T, evaluar la calidad de servicio ofrecida a los usuarios en movimiento en función de los parámetros de transmisión, de la velocidad y posición del receptor. Mediante el uso de un visualizador que emule la reproducción de servicio, las simulaciones dinámicas, adicionalmente, permiten hacer un estudio de la calidad subjetiva percibida por los usuarios de video streaming.

En el simulador dinámico para recepción en autobuses desarrollado por el iTEAM-UPV, se han identificado cuatro bloques principales a nivel de sistema, los cuales deben ser calibrados y validados a partir de medidas de campo y laboratorio: bloque de movilidad, bloque de propagación, modelo de rendimiento de capa física DVB-T y el bloque de capa de enlace y aplicación [6], como se muestra en la Fig. 5.

El módulo 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 y el factor de congestión de la vía, la proximidad a otros vehículos u obstáculos, el tiempo de servicio y el tiempo de muestreo. El módulo de radio propagación calcula la relación señal a interferencia más ruido (SINR) media durante la recepción de un servicio por cada usuario. El módulo de rendimiento DVB-T basado en procesos de Markov de cuatro estados [12][13], calcula el porcentaje de paquetes TS (*Transport Streaming*) recibidos correctamente por cada usuario, utilizando la información de velocidad y SINR proporcionada por los otros dos módulos. Finalmente el módulo de AL-FEC que emula el protocolo de desencapsulación, el proceso de decodificación FEC en capas de aplicación y la evaluación de la calidad de servicio experimentada por el usuario.

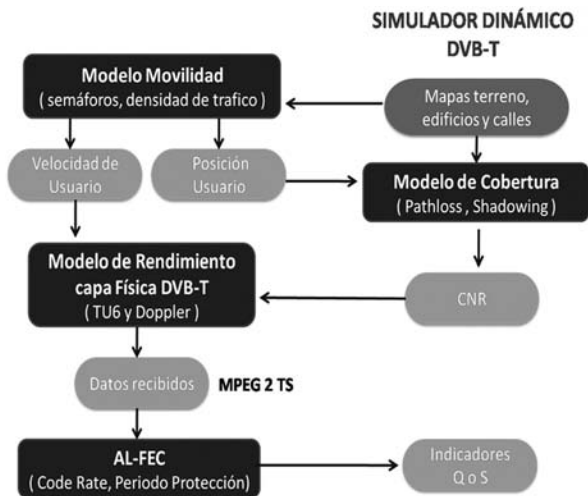


FIGURA 5. Arquitectura del simulador dinámico

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

Un ejemplo de simulación dinámica fue desarrollado en condiciones de recepción vehicular a través de las cuatro rutas del sistema de transporte MIO de Cali. Se ha utilizado como criterio de calidad el indicador ESR 5% para considerar cubierto o no cubierto un punto de test de la ruta, Fig. 6. En este ejemplo se ha utilizado el modelo de rendimiento de capa física DVB-T del modo de transmisión seleccionado en España (8k 64QAM CR 2/3 GI 1/4), frecuencia de operación 770 MHz y modelo de canal TU6. El área de cobertura ha sido estimada reutilizando las tres estaciones de televisión analógica actualmente instaladas en la ciudad de Cali con una PIRE total de transmisión de 15.4 Kw. Dos de estas estaciones están ubicadas en las cercanías de la ciudad, una en el cerro Cristo Rey (3° 26' 10.6" N, 76° 33' 54" W, 1400 msnm) y la otra en el cerro Terrón Colorado (3° 27' 23" N, 76° 34' 9.1" W, 1323 msnm). Finalmente la tercera estación a unos 50 Km de la ciudad, ubicada en el cerro la Flora (3° 51' 55.5" N, 76° 15' 4.7" W, 1710 msnm).



FIGURA 6. Cobertura DVB-T móvil 64QAM CR 2/3 en las rutas del sistema de transporte MIO-Cali.

Esta simulación dinámica, permite analizar la calidad de servicio percibida por cada usuario a medida que se desplaza por la zona de cobertura de la futura red DVB-T. Como se observa en la Fig. 6, el nivel de cobertura alcanzado es del 47.05% con el modo

DVB-T para alta capacidad de transmisión utilizando en actualmente en España. En el mismo escenario, utilizar un modo de transmisión menos robusto como sería 16QAM CR 1/2 aumentaría la cobertura a un 59.09%. Estos bajos porcentajes de cobertura son debidos a la

baja relación CNR a nivel del suelo y a las condiciones propias del canal móvil que incrementan el porcentaje de errores (TS PER).

Una solución inmediata para aumentar éste porcentaje de cobertura de DVB-T móvil, es incrementar drásticamente el nivel de potencia de transmisión. Si se desea llegar a un porcentaje de cobertura del 97% en recepción móvil, sería necesario incrementar la mínima PIRE de transmisión a 110 KW para el modo 16QAM CR 1/2 y a 232 KW para 64QAM CR 2/3. Ésta es una solución claramente inviable, tanto por costes e infraestructura necesaria como por los niveles de exposición electromagnética en las cercanías de los transmisores. El uso en forma conjunta de las otras soluciones técnicas como diversidad de antenas,

modulación jerárquica y AL-FEC reduce la mínima PIRE de transmisión necesaria para garantizar una buena calidad de servicio DVB-T fijo y móvil experimentada por los usuarios. Continuando con el ejemplo de simulación dinámica en la ciudad de Cali, la Fig. 7, resume la PIRE total mínima necesaria para distintos modos de transmisión DVB-T y su reducción utilizando las distintas soluciones técnicas propuestas en este artículo. La primera barra (azul) representa el nivel de PIRE requerido para una cobertura del 95% en recepción fija. Las demás barras indican la mínima PIRE total de transmisión para una cobertura del 97% del trazado de las rutas utilizando las distintas soluciones técnicas propuestas para mejorar la cobertura en recepción móvil. El valor de α utilizado en el modo 16QAM CR 1/2 fue $\alpha = 2$, mientras que para el modo 64QAM CR 2/3 se utilizó $\alpha = 1$.

5. CONCLUSIONES

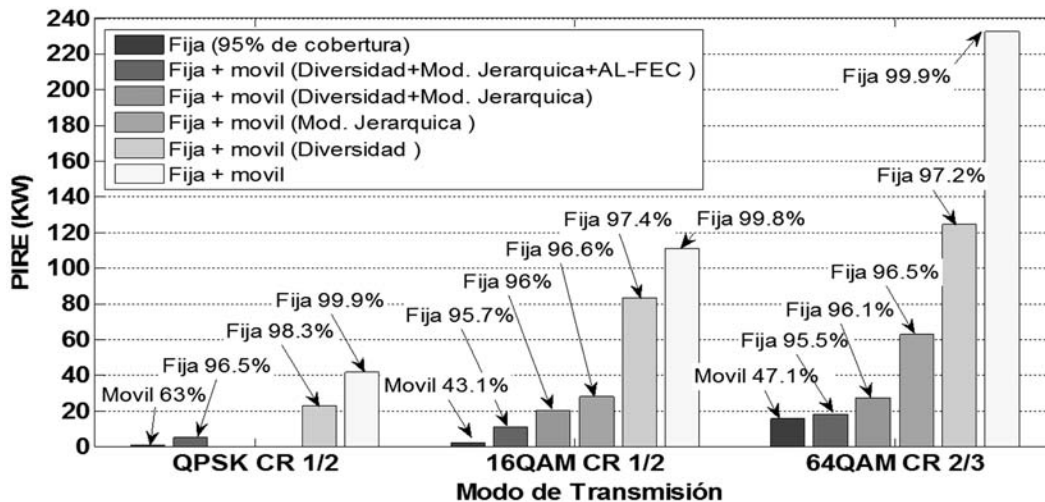


FIGURA 7. Mínima PIRE de transmisión para cobertura en recepción fija y móvil utilizando distintas soluciones técnicas.

Las enormes ventajas que trae la Televisión Digital Terrestre han hecho que la transición de televisión analógica a digital ya sea una realidad en muchos países del mundo. Colombia ha iniciado esta transición, y se espera que para mitad de 2011 gran parte de la población ya pueda disfrutar de los nuevos servicios de TDT. Contemplar desde la fase de diseño de la nueva red TDT para Colombia la prestación de servicios locales y móviles permite optimizar el rendimiento de esta red, haciendo un mejor uso de la capacidad de transmisión disponible.

Analizar las prestaciones de movilidad logradas con el estándar DVB-T y sus mejoras utilizando soluciones técnicas que no fueron tenidos en cuenta en el momento de implementación de las redes comerciales en Europa, como mecanismos de corrección de errores, diversidad de antenas, codificación de vídeo escalable y/o modulación jerárquica, permitirá que la señal de televisión TDT pueda ser recibida en un nuevo sector del mercado nunca antes alcanzado por la televisión. La recepción móvil de DVB-T convierte a este estándar en una tecnología capaz de proporcionar servicios

multimedia a equipos portables en todo momento y en cualquier lugar, empleando una única estructura de red DVB-T y evitando la inmediata construcción de una red dedicada DVB-H o similar para brindar servicios a terminales en movimiento.

La capacidad de las nuevas redes TDT para proporcionar de manera eficiente contenido diferenciado según zonas de interés, es una potencialidad que no ha sido explotada todavía. Estas capacidades se podrían aprovechar, por ejemplo, para ofrecer contenido multimedia turístico basado en localización. Soluciones propuestas hasta el momento como la utilización de redes MFN son poco eficientes espectralmente. Las características técnicas del estándar DVB-T permiten insertar contenidos locales en redes de frecuencia única SFN (Single Frequency Networks). La estimación de cobertura de servicios de área local LSA en redes SFN depende de la topología de red seleccionada en el caso de utilizar modulación jerárquica, o de las características propias del receptor convencional para soportar pequeños cortes en la transmisión de la señal en el caso de utilizar la técnica de time slicing. El máximo radio permitido para cada servicio en una red SFN depende de la interferencia generada entre distintas LSA, el modo de transmisión y la potencia radiada en cada transmisor.

Por otra parte, la reutilización de la infraestructura de la red analógica de televisión, la planificación de gap-fillers en las zonas de sombra y la utilización de la red satelital actualmente desplegada en Colombia, permitirá llevar todos los beneficios de la nueva televisión digital de una forma casi inmediata a todas las zonas del país, y principalmente a aquellas donde la red terrestre DVB-T no diera cobertura.

6. REFERENCIAS

- [1] U. LADEBUSCH AND C. LISS, "Terrestrial DVB (DVB-T): A Broadcast Technology for Stationary Portable and Mobile Use," *Proc. of the IEEE*, vol. 94, no. 1, pp. 183-193, Jan. 2006.
- [2] ETSI TR 102 377 v1.2.1, "DVB-H, Implementation Guidelines," May. 2005.
- [3] PIAZZI Leonard AND BERTONI Henry L., "Effect of Terrain on Path Loss in Urban Environments for Wireless Aplicatios", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, vol. 46, no. 8, Aug. 1998.
- [4] H. H XIA AND H. L. BERTONI, "Diffraction of Cylindrical and Plane Waves by an Array of Absorbing Half-Screens," *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*, vol. 40, no. 2, pp. 170-177, Feb. 1992.
- [5] A. P. GARCIA, H. ORTEGA, A. NAVARRO, A. RODRIGUEZ, "Effect of Terrain on Electromagnetic Propagation in Urban Environments on the Andean Region, Using the COST 231- Walfisch-Ikegami Model and GIS Planning Tools", *IEEE Proceedings Ish, Gran Bretaña 2003* vol:1 pp. 270 – 275.
- [6] D. Gómez-Barquero, "Cost Efficient Provisioning of Mass Mobile Multimedia Services in Hybrid Cellular and Broadcasting Systems" Ph.D. thesis, Polytechnic University of Valencia, Spain 2009.
- [7] ITU-R Recommendation SM.1708, "Field-strength measurements along a route with geographical coordinate registrations", 2005.
- [8] R. BRUGGER Y D. HEMINGWAY, "OFDM receivers – Impact on Coverage of Inter-Symbol Interference and FFT Window Positioning", *European Broadcasting Union (EBU) Technical Review*, Julio 2003.
- [9] ETSI TR 101 190 v1.2.1, "Digital Video Broadcasting (DVB), Implementation Guidelines for DVB Terrestrial Services; Transmission Aspects," Nov. 2004.
- [10] DiBcom, "Advantages of diversity implementation on mobile & portable Tv receivers", white paper No.3 (sep. 2007)
- [11] G. FARIA, "Mobile DVB-T using antenna diversity receivers", *IBC 2001*, Amsterdam, September 2001.
- [12] D. GOZÁLVEZ, D. GÓMEZ-BARQUERO, AND T. STOCKHAMMER, "Mobile Reception of DVB-T Services by means of Application Layer FEC Protection," *Proc. IEEE Broadband Multimedia Systems and Broadcasting*, Bilbao, Spain, 2009.
- [13] Poikonen and D. Gómez-Barquero, "Validation of a DVB-H Dynamic System Simulator using Field Measurements," *Proc. IEEE BMSB*, Las Vegas, USA, 2008.