



Esquemas de multiservicios en DTMB, basados en técnicas de multiplexación LDM y TDM

Yoania Acosta Cintado, Ernesto Fontes Pupo, Reinier Díaz Hernández

RESUMEN / ABSTRACT

El presente trabajo realiza una propuesta de esquemas de multiservicios basado en el estándar de TV digital DTMB (del inglés Digital Terrestrial Multimedia Broadcast), utilizando las técnicas de multiplexación TDM (del inglés Time Division Multiplexing) y LDM (del inglés Layered Division Multiplexing). Si bien es conocido que TDM constituye una técnica ampliamente difundida y utilizada en múltiples aplicaciones, LDM es una novedosa técnica de multiplexación aceptada como una de las tecnologías esenciales en el desarrollo de la nueva generación de sistemas de TV digital terrestre, dado que posibilita implementar eficientemente esquemas de multi-servicios con diferente robustez y tasa de bits utilizando el mismo canal de radiofrecuencia. Una estructura de dos capas para dos servicios: móvil y fijo, es la propuesta de implementación LDM que se aborda en este trabajo. Han sido definidos tres escenarios de esquemas TDM con el objetivo de realizar un análisis comparativo del desempeño de ambos esquemas para cada uno de los servicios. Finalmente, tomando como base los resultados de las simulaciones realizadas, se identifican los puntos de operación óptimos que presentan cada una de las técnicas de multiplexación empleadas.

Palabras claves: DTMB, TV Digital, LDM, TDM, Multiservicios.

This paper intends to formalize a proposal of multiservice schemes based on the Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB) standard, using the TDM (Time Division Multiplexing) and LDM (Layered Division Multiplexing) techniques. It is a well-known fact, that TDM is a widely used technique, which has been implemented in multiple applications; on the other hand, LDM which grew out from the Cloud Transmission concept, is a new promising multiplexing technique for offering simultaneously stationary and mobile/indoor services with different robustness and bitrates using the same radiofrequency channel. Recently, LDM has been accepted as a baseline technology for the new generation digital terrestrial television standards (ATSC 3.0). The proposed LDM implementation that is addressed in this paper is based on a structure of two layers for the services: mobile and fixed. In the same way, three different scenarios of TDM schemes have been defined, with the aim of performing a comparative analysis of the performance of both schemes. Finally, based on the obtained results of the simulations carried out, for each of the multiplexing techniques were identified the optimal operating points.

Key words: DTMB, Digital TV, LDM, TDM, Multiservices.

“Proposal of multiservice schemes in DTMB, using LDM and TDM multiplexation techniques”

1. -INTRODUCCIÓN

El vertiginoso incremento de la demanda de servicios inalámbricos de banda ancha, constituye uno de los principales desafíos que enfrenta actualmente el ámbito de radiodifusión de TV digital. Según [1] el tráfico de datos móviles ha crecido

18 veces en los últimos 5 años y se prevé que aumentará siete veces hasta 2021. La capacidad y la eficiencia de los enlaces deben aumentar para que los servicios de banda ancha móvil, acceso a datos y video puedan respaldar las tendencias de consumo y mantener los costos de infraestructura móvil bajo control. En este escenario, y motivados por satisfacer los requerimientos antes descritos, diversas voces autorizadas en los asuntos de distribución mundial del espectro, han solicitado parte del espectro tradicionalmente dedicados a la radiodifusión de TV para suplir la demanda de los servicios inalámbricos de banda ancha. La Union Internacional de Telecomunicaciones ITU (del inglés International Telecommunication Union), organización encargada de regular las telecomunicaciones a nivel internacional entre las distintas administraciones y empresas operadoras, ha autorizado la reasignación de los recursos del espectro. De esta forma durante las Conferencias Mundiales de Radiocomunicaciones WRC (World Radiocommunication Conference), celebradas cada tres o cuatro años, han quedado definidas las nuevas normativas. Concretamente en [2] se aprobó la propuesta de asignar la banda de frecuencia 694-790 MHz con carácter co-primario a los servicios móviles. Banda utilizada tradicionalmente en la transmisión televisiva.

Esta tendencia, según todo parece indicar, continuará en los próximos años. Por lo cual, el espectro disponible para la transmisión de TV analógica y digital, disminuirá progresivamente. De acuerdo con esto, y para no ser expulsados del mercado por competidores directos, la industria de la radiodifusión debe proponer soluciones competitivas. Lo que es más, debe estar lista para afrontar los nuevos requisitos del mercado y para ampliar la oferta de servicios tradicionales. [3]. Analizando esta realidad, en [4] se definen algunos de los retos y desafíos más importantes a tener en consideración para así garantizar la continuidad de los servicios de radiodifusión de TV terrestres: necesidad de un uso más flexible del espectro, optimización del desempeño en ambientes móviles e interiores, aumento de la robustez en los sistemas SFN (del inglés Single Frequency Network) para escenarios con multitrayectoria, soporte para las últimas técnicas de codificación de video e incremento de la capacidad de los esquemas para brindar multi-servicios.

Sobre este último punto, versan los aportes del presente trabajo. La idea de brindar servicios móviles, además del tradicional esquema de recepción fijo, no es un concepto nuevo en TV digital. Con este propósito se han definido cinco estándares para transmisión móvil: ATSC-M/H, T-DMB, DVB-H, ISDB-T (1seg) y CMMB. Sin embargo, se considera que la mayoría de ellos no han tenido el grado de implementación esperado. Según [3], esto puede deberse a que la estructura de la capa física sea completamente diferente a los esquemas definidos para la transmisión en escenarios fijos. Partiendo de esta idea, surge entonces una solución más práctica, conocida como multiservicios. La cual consiste en diseñar servicios móviles más robustos que puedan ser entendidos como una capacidad adicional de un sistema heredado ya existente (por ejemplo: servicios fijos). En otras palabras, una capacidad de entrega simultánea que podría proporcionar a los operadores de radiodifusión la ventaja de mantener e incluso aumentar los beneficios con nuevas ofertas, sin la necesidad de cambiar la estructura ya existente. [3]

Diseñar un esquema con multiservicios, permitiría hacer un uso más eficiente del espectro. Puesto que se utiliza el mismo canal de radiofrecuencia para implementar dos o más transmisiones simultáneas de señales con diferente robustez pensadas para diferentes servicios. Por ejemplo servicios en escenarios móviles y/o fijos. Según [4] las últimas investigaciones realizadas en el campo de las técnicas de codificación muestran que la codificación HEVC (del inglés High Efficiency Video Coding) logra una ganancia promedio de compresión de aproximadamente 40% con relación a H.264 para contenidos de alta definición (HD 720p o 1080p). Teniendo en cuenta este y otros elementos, se considera que una tasa de bit entre 2 y 4 Mbps es suficiente para proveer contenido en alta definición (HD) en escenarios móviles, siendo este una de las prioridades y exigencias de las nuevas generaciones de sistemas de TV. De igual forma, se prevé que será necesario tasa de bits entre 15 y 30 Mbps para la radiodifusión de contenidos Ultra HDTV (4K o 8K).

Además de los resultados expuestos en [4], recientemente los autores en [5], [6], [7] y [8] exponen los resultados del desempeño de la novedosa técnica LDM, lo cual valida su utilización como una de las tecnologías bases de la capa física en los sistemas de próxima generación de TV digital. Hasta el momento solo ha sido oficializado como tal el estándar ATSC versión 3.0 [9] desarrollado por el comité ATSC (del inglés Advanced Television System Committee). Esta versión de ATSC es pionera en la incorporación de novedosas tecnologías, destacando la inclusión por vez primera de la estructura LDM como técnica de multiplexación para lograr esquemas de transmisión de múltiples señales de forma simultánea.

Además de mantener las técnicas tradicionales TDM (del inglés Time Division Multiplexing), FDM (del inglés Frequency Division Multiplexing) y TFDM (del inglés Time/Frequency Division Multiplexing). Es válido comentar que los estándares DVB-T2 [10] (del inglés Digital Video Broadcasting Terrestrial) e ISDB-T [11] (del inglés Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial) solo incorporaban propuestas de implementación para multiservicios utilizando las técnicas tradicionales. En el caso de DVB-T2 las señales de los servicios móviles y fijos se multiplexan empleando PLPs (del inglés Physical Layer Pipes) o FEF (del inglés Future Extension Frame) técnicas de división por multiplexación en tiempo y frecuencia. El sistema ISDB-T, por otro lado, utiliza esquemas de multiplexación por división de frecuencia (estructuración de 13 segmentos), 12 segmentos para transmitir en servicios fijos y el segmento central restante (denominado 0 segmento) para el servicio móvil.

Los resultados investigativos que se proponen en el presente trabajo se enfocan precisamente en cómo brindar multiservicios en DTMB utilizando el mismo canal de radiofrecuencia (6 MHz). El estándar DTMB GB_20600-2006 (norma de transmisión de TV digital adoptada en Cuba) presenta una estructura jerárquica de tramas concebida para brindar multiservicios, sin embargo no se especifica en [12] como implementar el uso de estas estructuras, ni se conoce de ninguna implementación práctica de un sistema que emplee estos esquemas para brindar multiservicios. Actualmente en Cuba, se emplea DTMB solo para proveer un tipo de servicio: escenario fijo (modo 6: modo multiportadoras, FEC= 0.6 (del inglés Forward Error Correction), modulación 64QAM, PN= 420 y 720 longitud del interleaver).

El principal objetivo de este artículo es realizar una propuesta de implementación de esquemas de multiservicios de TDT (servicio móvil + servicio fijo) en DTMB empleando las técnicas de multiplexación TDM y LDM, y evaluar el desempeño de cada esquema. Considerando que TDM es una tecnología ampliamente difundida, este trabajo se enfoca principalmente en describir el principio de funcionamiento y las características fundamentales que definen a LDM, la Sección 2 aborda precisamente este contenido. El resto del artículo se organiza de la siguiente forma: la Sección 3 presenta las configuraciones de los parámetros para ambos esquemas TDM y LDM que se proponen. La Sección 4 presenta las validaciones del diseño implementado en Matlab, así como expone un análisis de los resultados de las simulaciones realizadas. Finalmente, la Sección 5 resume las principales conclusiones y contribuciones del artículo.

2.- TÉCNICA DE MULTIPLEXACIÓN LDM. PROPUESTA DE ESQUEMAS DE TRANSMISIÓN (Tx) Y RECEPCIÓN (Rx).

LDM es una técnica de Multiplexación No-Ortogonal (NOM, del inglés Non-Orthogonal Multiplexing), que posibilita implementar eficientemente esquemas de multiservicios con diferente robustez y tasa de bits utilizando el mismo canal de radiofrecuencia [13]. Un sistema LDM, se concibe como una estructura de transmisión en “capas” para transmitir simultáneamente señales con diferentes niveles de potencia y robustez para los diferentes servicios: por ejemplo servicios en escenarios móviles y/o fijos. Aunque la idea original de un sistema de “capas” jerárquico, conocida como Cloud Txn (del inglés Cloud Transmission) introducida por primera vez en [5], teoriza sobre la multiplexación de dos o más “capas”, los autores en [14] y [8], proponen como sistema LDM típico la utilización de una capa superior (UL, del inglés Upper Layer) para proveer servicios en escenarios móviles para receptores interiores, portables y personales, y una capa inferior (LL, del inglés Lower Layer) para prestar servicios a terminales fijos (típicamente sistemas de recepción con antenas exteriores elevadas, de alta ganancia y direccionalidad).

Es importante señalar que en LDM, las “capas” no están sujetas a esquemas únicos. Lo cual se traduce en que no poseen una funcionalidad única e inalterable, sino que varía en dependencia de los esquemas implementados tanto en la capa superior (UL) como inferior (LL). Esta flexibilidad posibilita que pueda modelarse e implementarse un sistema típico como el mencionado anteriormente (UL para servicios móviles y LL para servicios fijos), o intercambiar la asignación de ambos servicios. Este último enfoque constituye la base de investigaciones recientes que han demostrado la factibilidad de emplear técnicas LDM para la inserción del canal local en redes SFN (del inglés Single Frequency Network).

Sin embargo, la propuesta del presente trabajo es basada en el enfoque típico (UL para servicios móviles y LL para servicios fijos). Más adelante en el texto se explicará en detalles.

A diferencia de los sistemas tradicionales TDM/FDM, en un sistema LDM se transmiten múltiples señales de la capa física utilizando el 100% del tiempo los recursos disponibles del espectro. Como se ilustra en la Figura 1, las señales de los diferentes servicios comparten la misma estructura OFDM (3780 portadoras y el mismo intervalo de guarda). En [4] los autores proponen la implementación de esquemas con esta configuración (Figuras 1 y 2) dado que se simplifica la etapa de detección de la señal en el extremo receptor (Figura 2), lo cual se traduce en menor complejidad añadida al sistema y por ende una mayor eficiencia en la implementación de la estructura transmisor/receptor.

Según los requerimientos de tasa de bits y robustez establecidos para cada servicio, la señales de la capa superior (UL) y la capa inferior (LL) se pre-configuran de forma independiente, determinando la codificación de canal (BCH, LDPC) y el esquema de modulación que se determine para cada caso. Relativo a este punto, [13] y [15] coinciden en que para proveer servicios en escenarios móviles con un área de cobertura adecuada, la capa superior (UL) debe ser diseñada con el esquema de modulación más robusto posible que garantice la tasa de bits determinada para este servicio, lo cual asegura un rendimiento aceptable en escenarios móviles, caracterizados por la presencia de múltiples señales de ecos (multitrayecto) y desvanecimientos.

En el caso de la capa inferior (LL), típicamente está concebida para proveer servicios Ultra HDTV o múltiples servicios en alta definición HDTV, para ello se requieren esquema de modulación de mayor tasa de bits y por tanto menor robustez.

Según el esquema propuesto en la Figura 1, en el dominio de frecuencia la señal LDM transmitida: $X(k)$ se genera como resultado de la superposición de las señales provenientes de la capa superior $X_{UL}(k)$ y la capa inferior $X_{LL}(k)$. La Ecuación (1) presentada por los autores en [13] define esta idea. En LDM la multiplexación de señales es implementada mediante la suma de los símbolos provenientes de ambas “capas”.

$$X(k) = X_{UL}(k) + g \cdot X_{LL}(k) \quad (1)$$

Donde $X_{UL}(k)$ y $X_{LL}(k)$ son los símbolos a transmitir de la capa superior (UL) e inferior (LL) respectivamente, $X(k)$ es el símbolo LDM combinado y k indica el índice del sub-canal. El parámetro g define el grado de atenuación que sufrirá la señal de la capa inferior respecto a la capa superior. Este parámetro también referenciado en la literatura como el nivel de inyección (IL, del inglés Injection level) determina la distribución de la asignación total de potencia entre las dos capas.

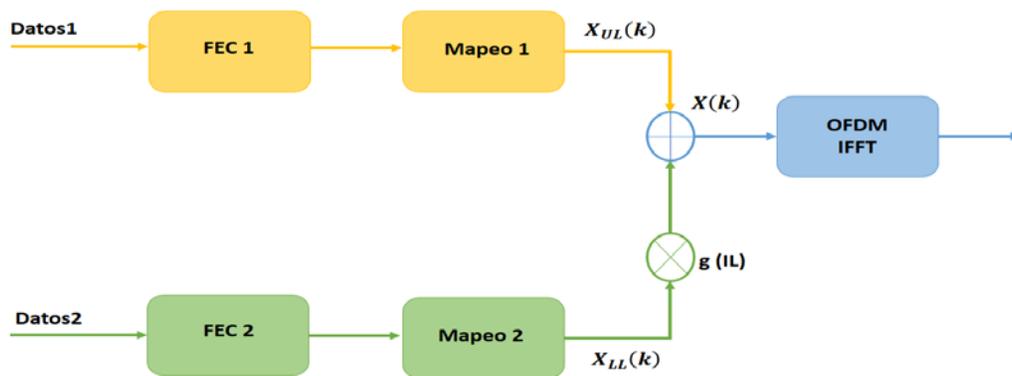


Figura 1
Propuesta de esquema de transmisión para LDM.

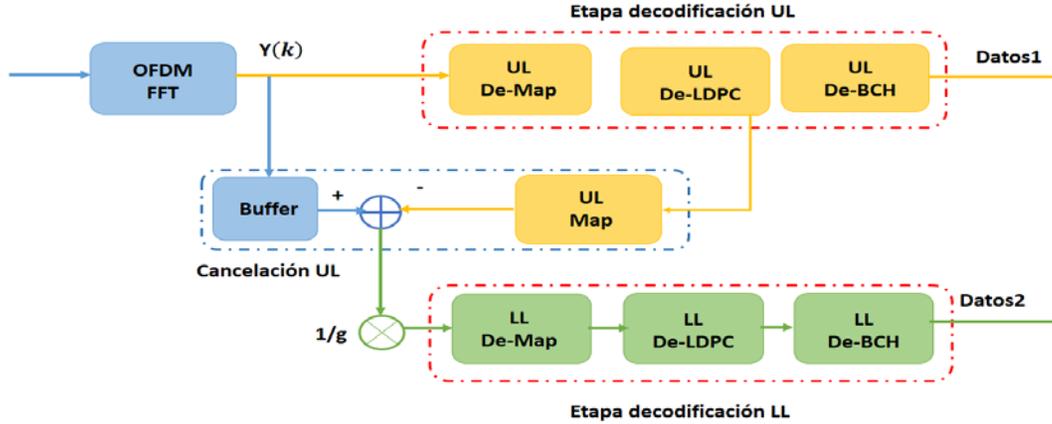


Figura 2
Propuesta de esquema de recepción para LDM.

La implementación del esquema propuesto en la Figura 2, garantiza la decodificación de ambas capas. Sin embargo para obtener cada una de estas señales es necesario aplicar procesos diferentes. Para decodificar la capa superior, basta con implementar el esquema convencional de decodificación de una señal OFDM; siempre y cuando se especifique para estos bloques exactamente los mismos parámetros establecidos en la etapa de transmisión (FEC1 y Mapeo1). En otras palabras, la implementación del esquema de recepción en un dispositivo móvil no añadiría complejidad alguna. Esto se debe a que para recuperar la señal UL no es necesario incorporar ningún bloque funcional específico, puesto que la señal de la capa inferior es asumida como ruido. Sin embargo para recuperar la información del LL, es necesario primero que el receptor almacene la señal total recibida (UL+ LL), decodifique la señal UL, la module nuevamente y por último, la cancele en la señal almacenada, para obtener la información de interés correspondiente a la capa inferior [10]. Este procedimiento se conoce como proceso de cancelación.

La señal LDM recibida para un sub-canal kth, se define en [13], según la Ecuación (2):

$$Y(k) = X_{UL}(k) \cdot H(k) + [g \cdot X_{LL}(k) \cdot H(k) + N(k)] \quad (2)$$

Donde $Y(k)$ se corresponde con el símbolo recibido en el sub-canal kth, $H(k)$ caracteriza la función de transferencia del canal de transmisión y $N(k)$ es la suma del ruido blanco gaussiano (AWGN) y otras interferencias aditivas.

Para decodificar la señal UL, el proceso de equalización se define como:

$$\tilde{X}_{UL}(k) = \frac{Y(k)}{\tilde{H}(k)} = X_{UL}(k) \cdot \frac{H(k)}{\tilde{H}(k)} + \frac{g \cdot X_{LL}(k) \cdot H(k) + N(k)}{\tilde{H}(k)} \quad (3)$$

donde $\tilde{H}(k)$ es la estimación de canal.

Como se evidencia en la Ecuación (3), en la correcta decodificación de la capa superior influyen dos parámetros fundamentales: el valor del nivel de inyección g y la estimación de canal $\tilde{H}(k)$. El impacto de ambos influye directamente en la relación Señal/Ruido mínima requerida para decodificar correctamente la capa superior. En la misma medida que la SNR umbral sea menor, también lo será el impacto de la señal LL. El parámetro nivel de inyección g determina el nivel de potencia de la capa inferior respecto a la capa superior. Típicamente la capa superior se diseña un nivel de potencia mayor, por tanto g toma un valor real entre [0, 1). Evaluando $g = 0$ en la Ecuación (1), el resultado se

corresponde con un modelo típico de una sola capa de transmisión. Por consiguiente a medida que g tienda a tomar valores cercanos a 0, mayor será el impacto negativo en el proceso de recuperar la información transmitida en la capa inferior, pero en la misma medida, menor será el error en la decodificación de la capa superior. Es por esta razón que es imprescindible definir un valor de g entre 0 y 1 (en términos de decibelios, $g = 0$ sería $g = -100dB$ y, $g = 1$ se corresponde con $g = 0dB$) que logre un rendimiento balanceado para cada una de las señales multiplexadas. Típicamente los valores de g se establecen entre 0.316 (-5 dB) y 0.199 (-7 dB), por ejemplo para $g = -5 dB$ el nivel de señal de la capa inferior es 5 dB menos que el nivel en la capa superior, o lo que es lo mismo el 76 por ciento de la potencia de Tx es asignada a la capa superior, y solo el 24 por ciento restante se destina a la capa inferior [13].

Los autores en [13] argumentan que para ser capaces de decodificar la señal de la capa inferior $Y_{LL}(k)$, es necesario efectuar como paso previo, el proceso de cancelación. La ecuación (4) lo describe.

$$\begin{aligned}
 Y_{LL}(k) &= \frac{Y(k) - X_{UL}(k) \cdot \tilde{H}(k)}{g} \\
 &= X_{LL}(k) \cdot H(k) + \frac{X_{UL}(k) \cdot \tilde{\Delta}_H(k) + N(k)}{g} \\
 &= X_{LL}(k) \cdot H(k) + \frac{\tilde{\varphi}_{UL}(k) + N(k)}{g}
 \end{aligned} \tag{4}$$

donde $\tilde{\Delta}_H(k)$ es el error de la estimación de canal y $\tilde{\varphi}_{UL}(k)$ es el residuo del símbolo UL después de la cancelación, lo cual se traduce como ruido adicional en el proceso de obtención de la señal LL. El impacto del residuo del símbolo UL ($\tilde{\varphi}_{UL}(k)$) está determinado por el error cuadrático medio (MSN, del inglés Mean Square Error) de la estimación de canal y el nivel de inyección g . Por lo tanto es de vital importancia para el rendimiento del sistema, determinar correctamente el algoritmo adecuado para la estimación de canal. Según [6] y [16] con la implementación de algoritmos de estimación de canal en dos-dimensiones, basados en filtros DFT en el dominio de la frecuencia y filtros Wiener en el dominio del tiempo, es posible obtener un residuo del símbolo UL después de la cancelación, 30 dB menor comparando con la señal UL original. Es válido comentar que el modelo propuesto en el presente trabajo, supone ideales las etapas de estimación de canal y sincronismo. De igual forma, en el receptor se supone conocido el valor del nivel de inyección g , lo cual permite lograr un rendimiento óptimo del sistema LDM.

3.- PROPUESTA DE ESQUEMAS DE MULTISERVICIOS EN DTMB. ANÁLISIS COMPARATIVO LDM VS TDM.

Tomando como base los requerimientos de tasa de bits mencionados previamente en la Introducción y citados en [4], es posible definir diferentes escenarios para brindar multiservicios en DTMB. En primera instancia, es preciso presentar la Ecuación (5) declarada en [17], la cual es fundamental para el cálculo de la capacidad de un esquema DTMB.

$$C(Mbps) = \frac{3744}{PN+3780} \cdot Ri \cdot Rm \cdot BW \tag{5}$$

La Ecuación (5) permite determinar la tasa de bits (en Mbps). El parámetro PN (secuencia pseudoaleatoria: Pseudorandom o PseudoNoise) define el tamaño de la cabecera de la trama señal (420, 595 ó 945), Ri corresponde a las razones del código

FEC (0.4, 0.6 ó 0.8), Rm define el orden de la modulación (2, 4, 5 ó 6) y BW determina el ancho de banda. En este caso para un canal de 6 MHz, el ancho de banda ocupado es 5.67 MHz. El presente trabajo supone $PN = 420$.

Las diferentes combinaciones de estos parámetros, determinan el rango de capacidades teóricas que es posible alcanzar empleando el estándar DTMB [17]. La Tabla 1, definida en el Anexo H de [12] muestra una síntesis de estos y otros valores calculados empleando la Ecuación (5), para $PN = 420$.

Tabla 1
Velocidad de transferencia de datos del sistema DTMB en Mbps ($PN = 420$).

Longitud Señal	Trama	Trama Señal (4200 símbolos)		
Códigos FEC		0.4	0.6	0.8
Mapping	4 QAM-NR			4.061
	4 QAM	4.061	6.091	8.122
	16 QAM	8.122	12.182	16.243
	32 QAM			20.304
	64 QAM	12.182	18.274	24.365

Teniendo en cuenta todos estos elementos, el presente trabajo propone diversos esquemas que permitirían brindar multiservicios en DTMB, utilizando dos técnicas de multiplexación: LDM y TDM.

Como paso previo a las implementaciones, fue necesario definir los requerimientos del sistema en cuanto a capacidades de transmisión. En el caso de escenarios móviles, se proponen dos tasas de bits: **4.061** y **6.091 Mbps**. Para ambientes de recepción fijos: **12.182**, **18.274** y **24.365 Mbps**. Tomando como premisa estos valores, se implementan dos soluciones diferentes: esquemas basados en LDM y esquemas basados en TDM. La Tabla 2, sintetiza la propuesta realizada.

Propuesta esquema LDM

El sistema LDM propuesto emplea la capa superior (UL) para proveer servicios en escenarios móviles, por tanto C_{UL} (capacidad de la capa superior) coincide con C_m (capacidad del servicio móvil), ver ecuación (6). De forma similar, la capa inferior (LL) ha sido concebida para prestar servicios a terminales fijos, por tanto, C_{LL} (capacidad de la capa inferior) es igual a C_f (capacidad del servicio fijo), ver ecuación (7). Luego, la capacidad total del sistema C_{sist} es la suma de ambos. Esta idea queda definida en la ecuación (8), lo cual coincide con lo expresado en [13].

$$C_{UL} = C_m \quad (6)$$

$$C_{LL} = C_f \quad (7)$$

$$C_{sist} = C_{UL} + C_{LL} \quad (8)$$

Propuesta esquema TDM

A diferencia de la propuesta LDM, el principio básico de TDM es multiplexar la información en el tiempo. Es este recurso el que se comparte entre los diferentes servicios que se deseen brindar. Es evidente, entonces, que mientras mayor sea el espacio de tiempo asignado a un servicio, mayor será la capacidad de información que será capaz de transmitir. El esquema TDM implementado propone tres escenarios diferentes. El primero de ellos (**Caso A**), define que el servicio móvil utilizará sólo el 25% del tiempo disponible para transmitir datos relativos a este servicio. Por consiguiente, el tiempo restante (75%), es asignado para transmitir información correspondiente al servicio fijo. Siguiendo el mismo principio, han quedado definidos el **Caso B** (30%-móvil y 70%-fijo) y el **Caso C** (50%-móvil y 50%-fijo). La Ecuación (9) evidencia este principio de distribución del recurso "tiempo". Donde T_m es la asignación de tiempo para el servicio móvil (25%, 30% ó 50%), T_f es la asignación de tiempo para el servicio fijo (75%, 70% ó 50%) y T_t , es el tiempo total (100%).

$$Tt = Tm + Tf \quad (9)$$

Una vez definidos los posibles valores de Tm y Tf , es evidente que la capacidad disponible para cualquiera de los servicios (móvil o fijo) será directamente proporcional a la asignación de tiempo que se decida. Por tanto el cálculo de la capacidad requerida en el servicio móvil (Cm) está determinado por la Ecuación (10). Donde $Csist$ corresponde a la capacidad total del sistema, Tm , Tf y Tt , han sido previamente definidas en la Ecuación (9). La misma lógica se aplica para determinar la capacidad del servicio fijo (Cf) (Ecuación (11)).

$$Cm = Csist \cdot \frac{Tm}{Tt} \quad (10)$$

$$Cf = Csist \cdot \frac{Tf}{Tt} \quad (11)$$

Ambas ecuaciones ((10) y (11)), resultan claves en la implementación de los esquemas TDM. Puesto que, una vez definidos los valores de Cm y Cf y teniendo en cuenta los posibles valores de Tm y Tf (Casos A, B y C) es posible determinar $Csist$. Conociendo este valor es posible identificar la configuración requerida en el sistema DTMB (parámetros: orden de modulación y razón de código FEC) que garanticen esta capacidad.

Ejemplo de propuesta (Diferencias en la implementación LDM y TDM)

Para ejemplificar este proceder, supongamos que se ha decidido brindar un servicio para escenarios móviles, fijando en 4.061 Mbps la capacidad del sistema ($Cm = 4.061 \text{ Mbps}$). Será necesario definir entonces las configuraciones pertinentes en cada uno de los esquemas: LDM y TDM para lograr alcanzar esta tasa de bits.

LDM:

En un esquema LDM es posible lograr esta capacidad utilizando un esquema de modulación 4 QAM ($Rm = 2$), con una codificación de 0.4 ($Ri = 0.4$). Bastaría sustituir Ri y Rm en la Ecuación (5) para corroborar que se logra la tasa de bits requerida: 4.061 Mbps. (Ver Tabla 1)

TDM:

En el caso de la propuesta TDM, no es tan simple. La selección de la modulación a utilizar (4 QAM, 16 QAM ó 64 QAM) y la razón de codificación (0.4, 0.6 ó 0.8) dependen exclusivamente del por ciento del tiempo asignado al servicio móvil ($Tm = ?$). Entonces, asumiendo que Tm puede tomar tres valores diferentes de tiempo (25%, 30% ó 50%) y utilizando la Ecuación (10), es posible determinar el valor de $Csist$, recordando que (para este ejemplo) $Cm = 4.061 \text{ Mbps}$.

Una vez calculada $Csist$ (que tomará tres valores, según cada uno de los valores de Tm empleado), es necesario revisar cual es ó cuales son la(s) configuración(es) del estándar DTMB que permiten brindar esa capacidad $Csist$ previamente calculada. La Ecuación (5) permite sustituir el valor de $Csist$ (Mbps) y determinar la combinación de valores Ri y Rm que satisfagan la ecuación.

La Tabla 2, muestra cómo quedaría finalmente las diferentes configuraciones en DTMB para los diferentes escenarios de este ejemplo: **Caso A** ($Csist = 16.2 \text{ Mbps}$, $Ri = 0.8$ y $Rm = 4$), **Caso B** ($Csist = 12.28 \text{ Mbps}$, $Ri = 0.6$ y $Rm = 4$), **Caso C** ($Csist = 8.12 \text{ Mbps}$, $Ri = 0.8$ y $Rm = 2$).

Utilizando un enfoque similar, han sido definidos y resumidas en la Tabla 2, las diferentes tasas de bits propuestas en el trabajo (Móvil: **4.061** y **6.091 Mbps**. / Fijo: **12.182**, **18.274** y **24.365 Mbps**). En la próxima sección, son presentados los resultados de implementación de todas las propuestas.

Tabla 2
Configuración de parámetros para los esquemas LDM y TDM.

Servicio	Tasa de Bits (Mbps)	LDM	TDM		
			Caso A 25-75%	Caso B 30-70%	Caso C 50-50%
			25%	30%	50%
Móvil	4.061	4QAM/0.4	16QAM/0.8	16QAM/0.6	4QAM/0.8
	6.092	4QAM/0.6	64QAM/0.8	64QAM/0.6	16QAM/0.6
			75%	70%	50%
Fijo	12.281	16QAM/0.6	16QAM/0.8	64QAM/0.6	64QAM/0.8
	18.274	64QAM/0.6	64QAM/0.8	--	--
	24.365	64QAM/0.8	--	--	--

De la información mostrada en la Tabla 2 señalar que en el caso de las celdas con "--", aunque fueron determinados los valores de capacidad teóricos necesarios, no existe ninguna combinación de configuración de parámetros en el estándar DTMB que brinde una tasa de bits mayor de 24.365 Mbps para un canal de 6 MHz. Esta particularidad imposibilita la simulación de estos casos, y por consiguiente el análisis de los resultados que hubieran sido obtenidos.

4.- VALIDACIONES DEL DISEÑO IMPLEMENTADO. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS ALCANZADOS.

Una vez establecidas todas las configuraciones teóricas pertinentes tanto para LDM como los tres casos A, B y C de TDM (Tabla 2), fueron implementados y simulados los modelos para un canal AWGN. En el caso del esquema LDM, quedaron definidos 8 escenarios diferentes, determinados por la capacidad tanto del servicio móvil como del servicio fijo (móvil: 4/6 Mbps y fijo: 12/18/24 Mbps). Para cada escenario se validaron los resultados mediante el análisis de las curvas de BER contra SNR, variando el parámetro nivel de inyección (IL ó g). Las gráficas 3.a y 3.b muestran el comportamiento de la razón de bit erróneo (del inglés Bit Error Rate) según la relación señal a ruido (del inglés Signal to Noise Ratio) para el escenario 3 (UL=4.061 Mbps, LL=24.36 Mbps) para IL desde -4 hasta -8 dB. Nótese como en el caso de la capa superior (UL) disminuye el valor SNR mínimo requerido a medida que aumenta la diferencia de asignación de potencia entre ambas capas (mejor caso para IL= -8dB, SNR= 3.6 dB). En el caso de la capa inferior (LL) ocurre el proceso inverso, aumenta la SNR umbral a medida que aumenta la diferencia de potencia (peor caso para IL= -8dB, SNR= 26 dB), estos resultados de simulaciones se corresponden con los resultados teóricos esperados, lo cual valida la funcionalidad de los esquemas propuestos.

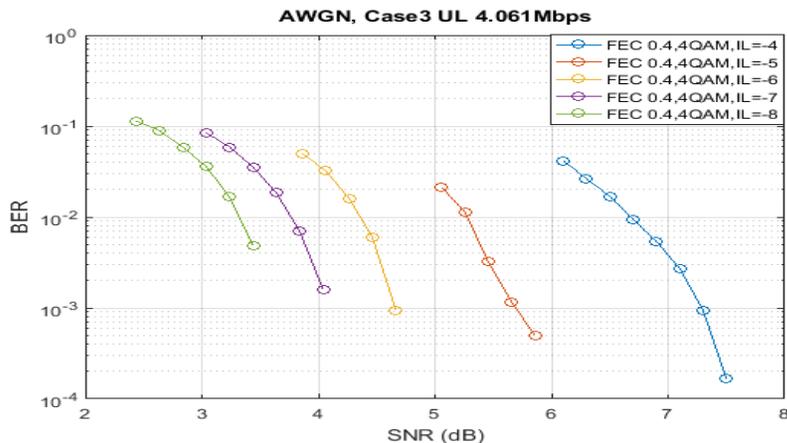


Figura 3 (a)
Desempeños del UL para un canal AWGN, según los valores IL (de -4 hasta -8).

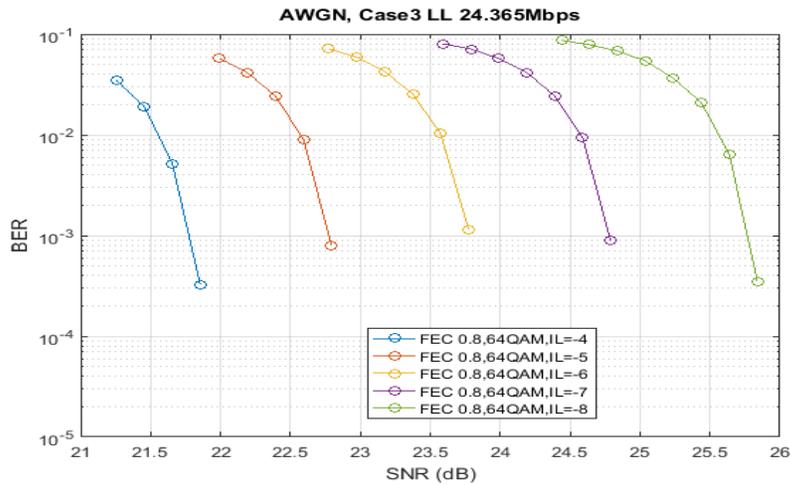


Figura 3 (b)
Desempeños del LL para un canal AWGN, según los valores IL (de -4 hasta -8).

La figura 4, compara el desempeño de los esquemas LDM y TDM para el servicio móvil a) y el servicio fijo b), la base del análisis comparativo es la capacidad, o sea especificando una tasa de bits (por ejemplo 4 Mbps) se evalúa cual es la SNR mínima necesaria en los esquemas LDM (para IL= -5 y -6dB) y los tres casos de TDM (Casos A, B y C). De la información mostrada en 4 a), se evidencia un desempeño similar ($SNR \approx 6dB$) para LDM (IL= -5) y TDM (Caso C), sin embargo en el resto de los Casos B y C de TDM, se ven superados por el desempeño de ambos esquemas LDM, por un margen considerable de 4 a 6 dB para LDM (IL= -5dB), siendo incluso superior para IL= -6dB.

Por otro lado, en el caso del servicio fijo (figura 4. b), se definieron 3 tasa de bits específicos (12.28, 18.27 y 24.36 Mbps) siendo consecuentes con la información mostrada en Tabla 2. Para C= 12.28 Mbps se observa un desempeño equivalente ($SNR \approx 15dB$) para TDM (Caso B) y LDM (IL= -6dB), siendo el mejor desempeño de $SNR= 12dB$ para TDM (Caso A), ello se corresponde con el resultado esperado dado que para este caso la asignación de tiempo en el servicio fijo alcanza su valor máximo (75%). Es válido comentar además, que para ofrecer C= 18.27 Mbps solo es posible implementar el caso A en TDM, y para C= 24.36 Mbps no es aplicable ninguno de los casos TDM, resultando imposible compararlos con los esquemas LDM. La Tabla 3 muestra un resumen preciso de todos los resultados obtenidos.

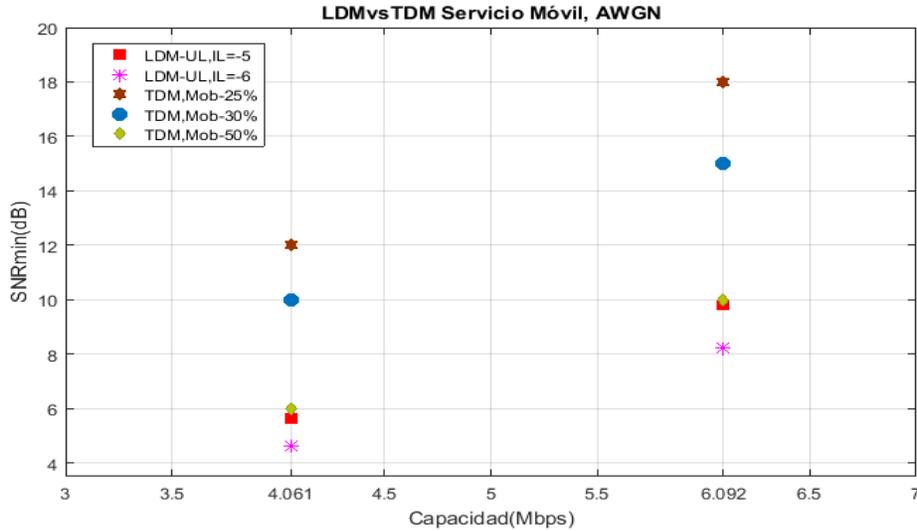


Figura 4 (a)

Desempeño de los esquemas LDM y TDM en el servicio móvil para diferentes valores de capacidad.

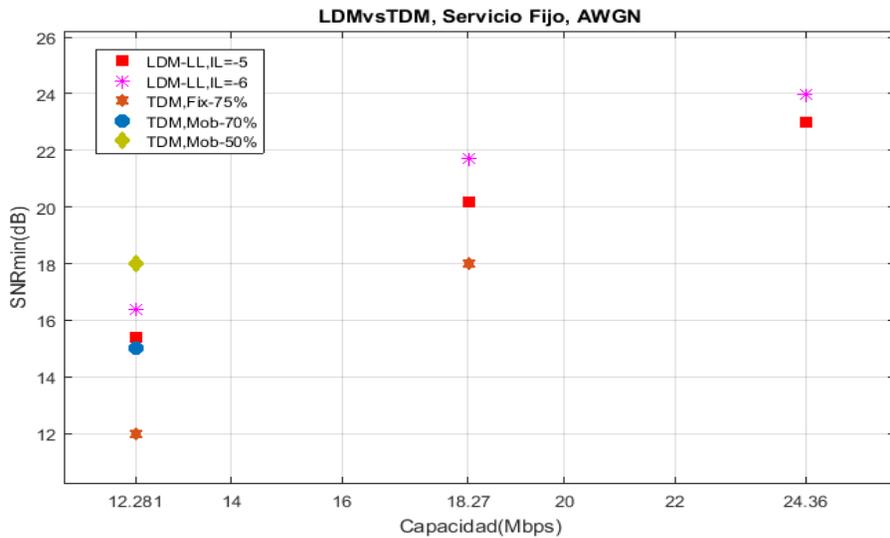


Figura 4 (b)

Desempeño de los esquemas LDM y TDM en el servicio fijo para diferentes valores de capacidad.

Tabla 3
 SNRs mínimas requeridas en los esquemas LDM y TDM para un canal AWGN.

Servicio	Tasa de Bits (Mbps)	LDM (IL=-5)	LDM (IL=-6)	TDM		
				Caso A 25-75%	Caso B 30-70%	Caso C 50-50%
Móvil	4.061	4QAM/0.4	4QAM/0.4	16QAM/0.8	16QAM/0.6	4QAM/0.8
		5.638 dB	4.638 dB	12 dB	10 dB	6 dB
	6.092	4QAM/0.6	4QAM/0.6	64QAM/0.8	64QAM/0.6	16QAM/0.6
				75%	67%	50%

Fijo	12.281	<i>16QAM/0.6</i> 15.39 dB	<i>16QAM/0.6</i> 16.37 dB	<i>16QAM/0.8</i> 12 dB	<i>64QAM/0.6</i> 15 dB	<i>64QAM/0.8</i> 18 dB
	18.274	<i>64QAM/0.6</i> 20.19 dB	<i>64QAM/0.6</i> 21.7 dB	<i>64QAM/0.8</i> 18 dB	--	--
	24.365	<i>64QAM/0.8</i> 22.99 dB	<i>64QAM/0.8</i> 23.97 dB	--	--	--

4.1.- ANÁLISIS GENERAL DE LOS ESQUEMAS DE MULTISERVICIOS PROPUESTOS.

Para un mejor entendimiento del comportamiento de ambos esquemas (LDM y TDM), los resultados obtenidos deben ser analizados de conjunto. La figura 5 muestra las ganancias de un sistema respecto al otro (LDM, a) $IL = -5\text{dB}$ y b) $IL = -6\text{dB}$ fijando la capacidad del servicio móvil en 4 Mbps y la capacidad del servicio fijo en 12.28 Mbps. Se evidencia que el sistema móvil LDM es superior en todos los casos que TDM. Para $IL = -5\text{dB}$ (figura 5.a), la ganancia mínima equivale a 0.4dB, (TDM Caso C, 50-50%) y la ganancia máxima es igual a 6.4dB (TDM Caso A, 25-75%); por otra parte para el servicio fijo, se evidencian resultados superiores para TDM Caso A, (ganancia= 3.4dB).

En sentido general se demuestra que para los esquemas de multiservicios propuestos, LDM es la alternativa más eficiente, dado que optimiza el rendimiento del servicio móvil. A su vez, la SNR mínima requerida para la recepción del servicio fijo, en el peor de los casos, no se afecta considerablemente.

En sentido general diferentes investigaciones [4], [6], [18] constatan resultados similares, particularmente en [4], los autores proponen y evalúan el desempeño de esquemas multiservicios para el estándar ATSC 3.0 empleando esquemas TDM y LDM. Identificando las principales características y escenarios comunes (o al menos similares) es posible analizar y comparar los resultados allí expuestos con los obtenidos en el presente trabajo. Considerando un canal AWGN, para nivel de inyección $g = -5\text{ dB}$ y fijando valores de capacidad de 4.1 Mbps para el servicio móvil y 14.3 Mbps para el servicio fijo, el desempeño evidenciado en [4] del sistema LDM respecto a las soluciones TDM, fue superior para el servicio móvil (ganancia de 2 a 6 dB). En el caso del desempeño en escenarios fijos, se evidencian resultados superiores del esquema TDM en dos de los tres escenarios implementados (Caso B, 40-60% y Caso C, 30-70%) siendo la ganancia máxima de 2.2 dB. En sentido general analizando el desempeño de ambas propuestas, para una capacidad total aproximadamente igual a 18.4 Mbps (4.1Mbps en el UL + 14.3 Mbps para el LL), y estableciendo $IL = -5\text{ dB}$, el desempeño del esquema LDM presenta una ganancia mínima equivalente a 2.2 dB (TDM Caso B, 40-60%) y una ganancia máxima igual a 4.8dB (TDM Caso C, 30-70%).

Por consiguiente, el desempeño general de los esquemas propuestos en el presente trabajo, se corresponde con los valores teóricamente esperados, así como con los resultados de las últimas investigaciones realizadas en este tema. Todo ello permite validar la implementación propuesta.

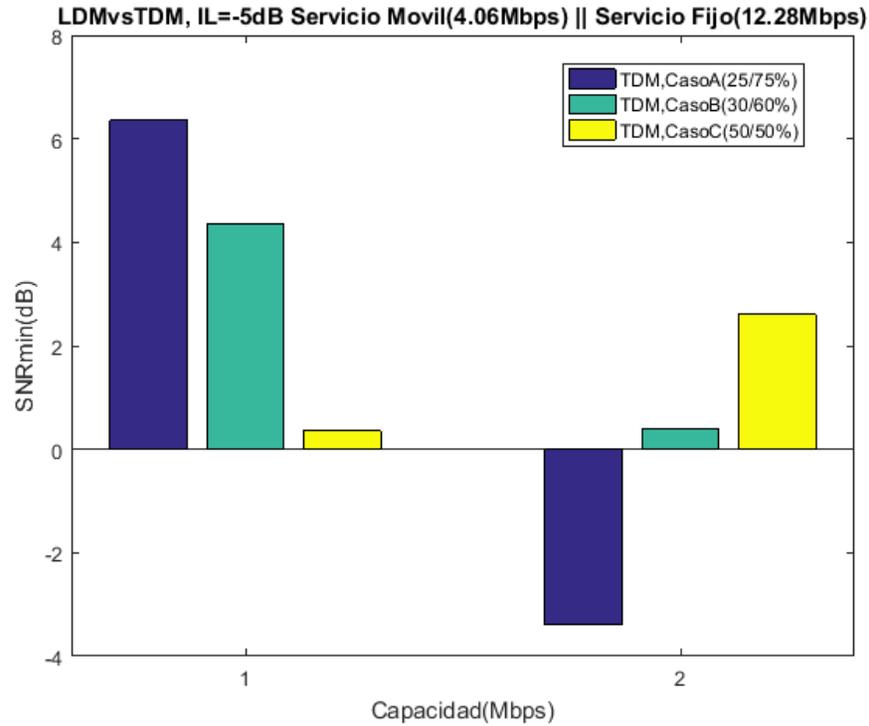


Figura 5 (a)
 Comparación de los esquemas TDM en ambos servicios, respecto al sistema LDM para IL= -5

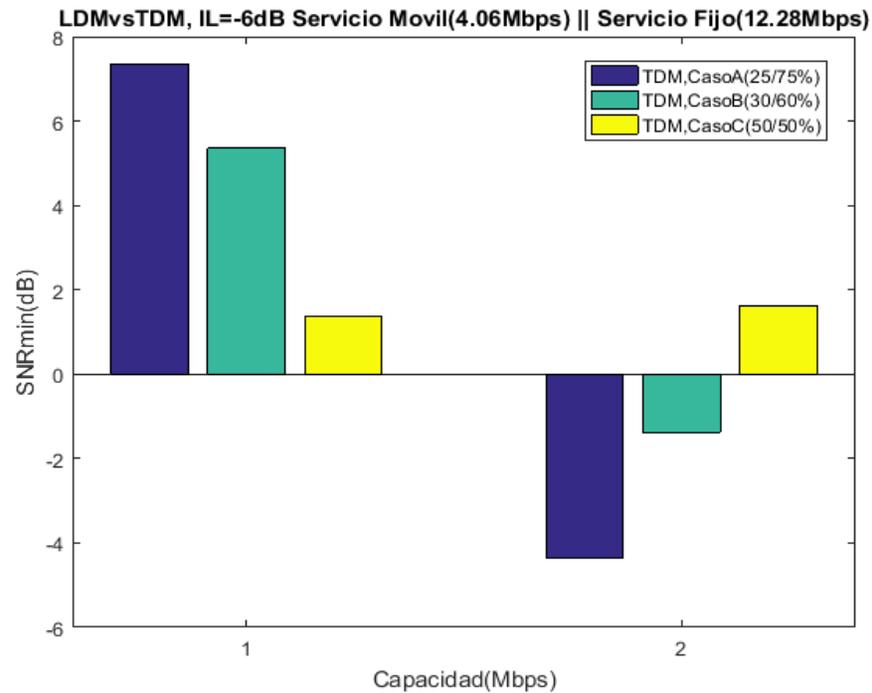


Figura 5
 Comparación de los esquemas TDM en ambos servicios, respecto al sistema LDM para IL=-6

5.- CONCLUSIONES

Los modelos tradicionales de radiodifusión de TV digital terrestre han evolucionado radicalmente. La concepción del sistema televisivo como un esquema tradicional solo para transmisión pasiva está cambiando. El desarrollo e incorporación de nuevas tecnologías han potenciado la diversificación de los servicios de radiodifusión. En este escenario, conceptos como “multiservicios” definen nuevas formas de entender la difusión de contenido audiovisual; posibilitando un uso más eficiente y flexible del espectro y la optimización del desempeño en ambientes móviles e interiores. Durante el presente artículo han quedado formalmente propuestos dos esquemas diferentes para ofrecer simultáneamente, servicios en escenarios fijos y en escenarios móviles, utilizando el estándar DTMB.

Se evidencia el desempeño superior de los esquemas LDM respecto a las soluciones tradicionales TDM, especialmente si es objetivo optimizar el servicio móvil. En sentido general analizando el desempeño de ambas propuestas, para una capacidad total aproximadamente igual a 16 Mbps (4 Mbps en el UL + 12 Mbps para el LL), y estableciendo $IL = -5$ dB, el desempeño del esquema LDM presenta una ganancia mínima equivalente a 3dB (TDM Caso A, 25-75%) y una ganancia máxima igual a 4.8dB (TDM Caso B, 30-70%).

Es válido señalar también, que la implementación de los esquemas TDM propuestos constituyen una alternativa interesante para brindar multiservicios en DTMB. Máxime cuando, hasta el momento, no se conoce ninguna otra solución diferente a las dos implementaciones desarrolladas en este trabajo.

REFERENCIAS

1. Corporation C. Cisco Visual Networking Index: Global Mobile Data Traffic Forecast Update, 2016–2021. Report. CISCO, Document ID: 1454457600805266. February 7, 2017. Available from: <https://www.cisco.com/c/en/us/solutions/collateral/service-provider/visual-networking-index-vni/mobile-white-paper-c11-520862.html>;
2. (WMO) WMO, editor. World Radiocommunication Conference 2012 (WRC-12) Results on Meteorological Issues and Preparation to WRC-15. World Meteorological Organization; 2012 March 2012; Geneva: ITU-R; 2012. Available from: <https://www.itu.int/net/ITU-R/index.asp?category=conferences&mlink=wrc-12&lang=en&expand=all>
3. Sanchez JM. “Solutions for New Terrestrial Broadcasting Systems Offering Simultaneously Stationary and Mobile Services”. Ph.D Thesis. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Bilbao: Universidad del País Vasco; 2014. Available from: <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/15925/231-9-MontalbanTH.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
4. Montalban J, Regueiro C, Vélez M, Zhang L, Wu Y, Li W, et al., editors. LDM and TDM performance evaluation for next generation broadcasting system use cases. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Ghent, Belgium, 2015.
5. Wu Y, Rong B, Salehian K, Gagnon G. Cloud transmission: A new spectrum-reuse friendly digital terrestrial broadcasting transmission system. IEEE Transactions on Broadcasting. 2012;58(3):329-37.
6. Zhang L, Li W, Wu Y, Salehian K, Angueira P, Montalban J, et al., editors. Two-layer mobile service performance in LDM-based ATSC 3.0 system. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Nara, Japan, 2016.
7. Montalban J, Rong B, Wu Y, Zhang L, Angueira P, Velez M, editors. Cloud transmission frequency domain cancellation. Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2013 IEEE International Symposium on; London, United Kingdom 2013.
8. Montalbán J, Zhang L, Gil U, Wu Y, Angulo I, Salehian K, et al. Cloud transmission: System performance and application scenarios. IEEE Transactions on Broadcasting. 2014;60(2):170-84.
9. Committee ATS. ATSC Candidate Standard: ATSC 3.0 System (A/300). 2017. Available from: <https://www.atsc.org/standards/atsc-3-0-standards/>
10. E.T.S.I., EN 300 744 V1.6.1. Digital Video Broadcasting (DVB); Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television. European Telecommunications Standards Institute. 2009. Available from: <https://www.dvb.org/standards>
11. ABNT, NBR 15601 Digital Terrestrial Television - Transmission System. Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2008. Available from: http://www.arib.or.jp/english/html/overview/sb_ej.html.

12. (SAC), S.A.o.t.P.s.R.o.C., Chinese Standard GB20600-2006: Framing structure, channel coding and modulation for digital television terrestrial broadcasting system., Standarization Administration of the People's Republic of China. 2007. Available from: <https://web.archive.org/web/20070115061353/http://www.sac.gov.cn/cgi-bin/bulletin/showbulgb.asp?id=904&year=2006&num=8&tnums=95&cnt=161&pdate=2006-8-24>
13. Zhang L, Li W, Wu Y, Wang X, Park S-I, Kim HM, et al. Layered-division-multiplexing: Theory and practice. IEEE Transactions on Broadcasting. 2016;62(1):216-32.
14. Zhang L, Wu Y, Li W, Kim HM, Park S-I, Angueira P, et al., editors. Channel capacity distribution of Layer-Division-Multiplexing system for next generation digital broadcasting transmission. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Beijing, China, 2014.
15. Park SI, Wu Y, Zhang L, Montalban J, Lee J-Y, Angueira P, et al., editors. Low complexity layered division multiplexing system for the next generation terrestrial broadcasting. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Ghent, Belgium, 2015.
16. Zhang L, Li W, Wu Y, Hong Z, Salehian K, Wang X, et al. Performance characterization and optimization of mobile service delivery in LDM-based next generation DTV systems. IEEE Transactions on Broadcasting. 2015;61(4):557-70.
17. Jian S. DTMB, DTMB-A, and the Extended Applications. DTV Technology R&D Center, Department of Electronic Engineering, Tshinghua University, China. 2013.
18. Zhang L, Wu Y, Li W, Hong Z, Salehian K, Kim HM, et al., editors. Mobile and indoor reception performance of LDM-based next generation DTV system. IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), Ghent, Belgium, 2015.

AUTORES

Yoania Acosta Cintado: Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, graduada en 2013 en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). Desde septiembre 2013 se desempeña como investigadora en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones, **LACETEL**, radicado en La Habana, Cuba; en agosto de 2016 obtiene la categoría de “Aspirante a Investigador”. Actualmente cursa la X edición de la Maestría en Sistemas Digitales. Las principales temáticas de investigación que desarrolla están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión. **Correo electrónico:** yoania@lacetel.cu

Ernesto Fontes Pupo: Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado en 2014 en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). Desde septiembre 2014 se desempeña como investigador en el Instituto de Investigación y Desarrollo de Telecomunicaciones, **LACETEL**, radicado en La Habana, Cuba. Actualmente cursa la X edición de la Maestría en Sistemas Digitales. Las principales temáticas de investigación que desarrolla están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión. **Correo electrónico:** fontes@lacetel.cu

Reinier Díaz Hernández: MsC, Ing. en Telecomunicaciones y Electrónica, graduado en 2007 en la Universidad Tecnológica de La Habana (CUJAE). Se desempeña como investigador en **LACETEL**, La Habana, Cuba, desde octubre 2009; en agosto de 2016 obtiene la categoría de “Investigador Agregado”. En febrero de 2017 concluye su tesis de Maestría y obtiene la categoría que lo acredita como Máster en Ciencias (MsC). Las principales temáticas de investigación que desarrolla están relacionadas con las comunicaciones digitales y el procesamiento digital de señales en sistemas de radiodifusión. **Correo electrónico:** reinier@lacetel.cu



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License