

Laboratory Tests of ATSC M/H Commercial Receivers Performance on SFN Networks

José M. Matías, Flor G. Ortiz, Mario A. Hernández, Carmen H. López, Unai Gil, and Salvador Landeros

Abstract—The Single Frequency Networks (SFN) are widely used in Digital Television transmission networks due to the high spectral efficiency achieved by them. Digital modulation techniques with a cyclic prefix, like OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) are adequate to define and use SFN networks due to their ability to deal with the artificial multipath produced in a SFN network. Nevertheless, the ATSC 1.0 and ATSC M/H standards use the VSB-8 modulation technique, which has no cyclic prefix, so it is very sensitive to multipath. The ATSC 1.0 standard has been recently implemented in Mexico, so the ATSC M/H standard can be used in the next years because it is compatible with ATSC 1.0, meanwhile ATSC 3.0, the newest standard of ATSC, it is not compatible. The performance of the reception with VSB-8 modulation depends strongly on the receiver channel equalizer. For this reason, the objective of this study is to analyze the performance of ATSC M/H commercial receivers in SFN networks. The results of this study will help in the implementation of SFN networks in Mexico and other countries that use ATSC 1.0 and ATSC M/H.

Index Terms—SFN, Single Frequency Network, DTT, ATSC, VSB, Mobile television, Handheld television.

I. INTRODUCCIÓN

La televisión digital está sufriendo cambios profundos en pocos años. En México, actualmente se usa el estándar ATSC A/53 [1], también llamado ATSC 1.0. Un estándar asociado es el estándar ATSC M/H (Mobile / Handheld) A/153, que, como su nombre indica, se diseñó para la recepción en receptores móviles y portátiles [2]. ATSC M/H también se diseñó para ser compatible con ATSC 1.0, de forma que una señal puede tener datos codificados en los dos estándares simultáneamente.

En julio de 2004 México adoptó el estándar ATSC 1.0 para la transmisión digital terrestre [3], pero no fue hasta diciembre de 2015 que se realizó el apagón analógico [4].

Este artículo ha sido desarrollado dentro del Proyecto REFUTV, proyecto apoyado por el Fondo Institucional del CONACYT bajo el Proyecto Conjunto CONACYT-CDTI N° 189235 y gracias a la Beca CONACYT con CVU No. 357544.

J. M. Matías está en la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México (e-mail: matias.unam@gmail.com). F. G. Ortiz, está en la Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España (fdg.ortiz@upm.es). M. A. Hernández está en la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México (marherflor@gmail.com). C. H. López está en la Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, México (carmen.lopez@icat.unam.mx). U. Gil está en la Universidad del País Vasco, Bilbao, España, (unai.gil@ehu.es). S. Landeros está en la Universidad Nacional Autónoma de México, y actualmente es Director General de la Agencia Espacial Mexicana, Ciudad de México, México, slander@unam.mx.

Además, la normativa mexicana permite el uso de cualquier estándar recomendado y aceptado por ATSC compatible con A/53, y específicamente, permite el uso del estándar A/153 (comúnmente llamado ATSC M/H) [4].

Actualmente ya está desarrollado ATSC 3.0 [5][6][7], estándar llamado a sustituir a ATSC 1.0. Sin embargo, el corto tiempo que ha pasado en México desde que se realizó la inversión para actualizar la tecnología de televisión analógica a ATSC 1.0, junto con el hecho de que ATSC 3.0 es incompatible con ATSC 1.0 y ATSC M/H [6][7], hace previsible que la transición a ATSC 3.0 en México sea lejana en el tiempo, es por ello, que se hace importante para México ampliar conocimientos para aprovechar en lo posible las tecnologías ATSC 1.0 y ATSC M/H.

Las Redes en Frecuencia Única o Redes SFN (Single Frequency Network) transmiten la misma señal, en el mismo canal, desde dos o más transmisores en ubicaciones diferentes [8][9][10][11]. Al no requerirse otros canales, esta tecnología permite un uso más eficiente del espectro [12][13]. Pero el correcto funcionamiento de estas redes con ATSC 1.0 y ATSC M/H depende del desempeño del receptor, y especialmente de su ecualizador de canal [10][14][15], por lo cual es esencial conocer el desempeño de los receptores comerciales.

México está en un proceso de optimizar las redes y frecuencias de televisión digital para liberar frecuencias para otros usos, principalmente para redes móviles [16][17], y las redes SFN pueden apoyar en este propósito. El objetivo de este trabajo va en esa línea, ya que se trata de conocer con qué parámetros pueden funcionar las redes SFN (Single Frequency Networks) con ATSC M/H, pero con modelos de canal realistas, tanto para recepción fija como móvil.

El estudio aquí presentado se enmarca dentro un proyecto más amplio que estudia las redes SFN con ATSC. Dentro de este proyecto ya se ha estudiado el desempeño de los receptores comerciales de ATSC 1.0 [18][19][20][21][22], y algunos parámetros de receptores ATSC M/H no relacionados con las redes SFN [23].

El artículo se organiza de la siguiente forma, en el capítulo II se explican los objetivos del estudio y la metodología usada, incluyendo la selección de receptores comerciales, el equipamiento usado, los modos de transmisión y los escenarios de recepción. Los capítulos III a VI explican los resultados obtenidos para cada tipo de recepción, y el capítulo VII las conclusiones del trabajo.

II. OBJETIVOS Y METODOLOGÍA

A. Objetivos del Estudio

Un receptor que se encuentra dentro de una red SFN recibe la misma señal desde dos o más transmisores simultáneamente, de forma que la señal recibida presenta un fuerte multitrayecto. Al multitrayecto producido por una red SFN se le denomina “artificial” ya que no es producido por ecos o reflexiones de la señal en elementos del entorno (p.e. edificios), lo cual es llamado “multitrayecto natural”, sino por los diferentes retardos que experimentan las señales desde los transmisores al receptor [10][24]. En una red SFN ambos tipos de multitrayecto están presentes.

El estándar ATSC M/H es compatible con el estándar ATSC 1.0, de forma que ambas señales pueden ser transmitidas simultáneamente [2][14]. En ambos casos, el desempeño de una red SFN depende fuertemente del desempeño de los receptores, y más concretamente del desempeño del ecualizador de canal frente al multitrayecto.

Esto es así porque los estándares ATSC 1.0 y ATSC M/H usan la modulación de simple portadora VSB-8 que no tiene prefijo cíclico. Debido a ello, y al contrario de lo que ocurre con señales con modulación OFDM, las señales retardadas no se suman de forma constructiva en el receptor, por lo que es el ecualizador de canal del receptor el encargado de realizar una estimación del multitrayecto sufrido por la señal, para poder demodularla correctamente [10][14][15].

En estudios previos se determinó el desempeño de receptores comerciales actuales ATSC 1.0 frente a condiciones de recepción dentro de una red SFN [18][19][22].

El objetivo del estudio aquí presentado es determinar el desempeño de receptores ATSC M/H dentro de una red SFN y compararlo con lo que ocurre con la tecnología ATSC 1.0.

B. Receptores Bajo Prueba

Para ello, se escogieron 5 receptores comerciales ATSC M/H de diferentes marcas como objeto de estudio. En la tabla I se muestran las principales características de los receptores seleccionados. A estos receptores se les sometió a señales multitrayecto de un solo eco, simulando que el receptor se encuentra dentro de una red SFN de dos transmisores (multitrayecto artificial), tal y como se hace en la recomendación A/74 de ATSC para receptores ATSC 1.0 [25].

Estas condiciones pueden simular un receptor situado en cualquier lugar del área de cobertura. El retardo entre las señales es producido principalmente por la distancia a los transmisores, aunque también puede deberse a la inclusión de retardos en los transmisores. Las diferentes amplitudes permiten simular situaciones variadas dentro de una red SFN, ya que dependen de las potencias de los transmisores, y de las atenuaciones de los trayectos de propagación.

Las combinaciones de retardo y amplitud permiten simular cualquier situación y ubicación de un receptor dentro de una red SFN de dos transmisores, en que no exista multitrayecto natural.

Al eco y a la señal se le añadieron ecos que simulan multitrayecto natural de diferentes tipos de entorno. El

esquema del equipamiento usado durante las pruebas es muy sencillo. Se usó un equipo probador de radiodifusión (SFE de R&S®) para generar señales de ATSC M/H (figura 1). Este equipo cuenta con un simulador de desvanecimientos con el que se pueden controlar diferentes parámetros de señales con multitrayecto. En el equipo se simularon diferentes condiciones de multitrayecto simulando que el receptor está en una red SFN. Si el receptor necesitaba una pantalla, se le conectaba una para evaluar la recepción con observadores entrenados. Para determinar cada punto de la curva (desempeño de un receptor) se somete al receptor a una señal con un eco muy atenuado, y con cierto valor de retardo. Al estar el eco muy atenuado el receptor recibe correctamente.

Posteriormente, se va subiendo la potencia del eco hasta que el receptor deja de recibir, y ese valor es el que se dibuja en la curva. Si se recibe bien con un eco de valor igual a la señal principal, se dibuja en 0 dB. El proceso se repite con diferentes retardos. La recepción correcta se evaluó mediante el umbral de visibilidad o TOV (Threshold of Visibility), el cual es una medida subjetiva utilizada en la evaluación del desempeño de los receptores. Este valor se determina en donde el observador encuentra dos errores por minuto al realizar las pruebas de recepción [26][27].

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DE LOS RECEPTORES COMERCIALES BAJO PRUEBA

Receptor	Descripción	Impedancia de Entrada	Precio (USD)
Rx1	Receptor USB. Se utiliza con una computadora y con un software específico.	75 Ω	\$74.00
Rx2	Receptor para automóvil. Requiere de una pantalla.	50 Ω	\$169.00
Rx3	Receptor para automóvil. Requiere de una pantalla.	75 Ω	\$24.00
Rx4	Receptor para uso exclusivo de iOS.	50 Ω	\$97.00
Rx5	Receptor para uso exclusivo de iOS.	50 Ω	\$60.00

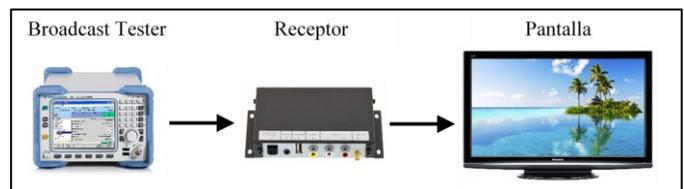


Fig. 1. Equipamiento utilizado durante las pruebas.

C. Configuración de la Señal ATSC M/H

Al contrario de ATSC 1.0, la señal ATSC M/H se puede configurar con varios parámetros, y cada uno de ellos con varias posibilidades. Esto da versatilidad al sistema, pero su desempeño frente al multitrayecto varía en función de estos parámetros. El estándar ATSC-M/H tiene dos métodos de corrección de errores hacia adelante (FEC, ó Forward Error Correction), el primero es conocido como RS-CRC (Reed-Solomon Cyclic Redundancy Check) el cual funciona a nivel

de la capa de enlace; y el segundo es a nivel de capa física, y se conoce como SCCC (Serial Concatenated Convolutional Coder) [2].

TABLA II
CONFIGURACIONES DE FEC USADAS EN LAS PRUEBAS

Nombre de la Configuración de FEC	SCCC				RS-CRC	Bit rate (Mbps) ¹
	A	B	C	D		
C1	Q	Q	Q	Q	48	2.83
C2	H	Q	Q	Q	48	2.01
C3	H	H	H	H	48	1.73

Se utilizaron tres diferentes configuraciones de FEC modificando parámetros del SCCC (Tabla II). Estas configuraciones de FEC fueron seleccionadas basándose en los resultados obtenidos en la Recomendación A/174 de ATSC [28] y en las pruebas de campo realizadas por la CBC Radio-Canadá con el estándar ATSC M/H [29]. El RS-CRC tiene tres posibles longitudes de código (24 bits, 36 bits y 48 bits) por cada paquete de datos. En pruebas publicadas previamente se determinó que la configuración del RS-CRC no es un factor determinante en los resultados [23][29], por lo que se decidió dejarlo en la opción más robusta (48 bits).

Además, el estándar móvil está compuesto por un turbo-código, el cual es una combinación entre el codificador de Trellis de $\frac{2}{3}$ (éste también es parte del estándar ATSC fijo) y la codificación SCCC (que solo se encuentra en el estándar móvil). El SCCC se puede configurar con una tasa de $\frac{1}{2}$ (H, Half) o de $\frac{1}{4}$ (Q, Quarter) en cada una de las cuatro regiones en las que los datos de M/H se pueden dividir, llamadas "Región A, Región B, Región C y Región D" [2]. En [29] se determinó que la protección de la región A es la más importante, por lo que finalmente, se escogieron para las pruebas las configuraciones de la Tabla II, es decir, la configuración más robusta (QQQQ), la menos robusta (HHHH) y la que ofrece más datos en la región A (HQQQ).

D. Valores de Referencia

Los documentos oficiales de ATSC no dan valores recomendados para el desempeño de receptores ATSC M/H frente al multitrayecto. Por ello, como referencia se toma el desempeño mínimo recomendado de receptores ATSC 1.0 frente a un eco estático [25]. En dicha recomendación se simula la recepción de dos señales con diferente potencia y retardo, lo cual es adecuado para simular la recepción dentro de una red SFN de dos transmisores, sin multitrayecto natural añadido. Es decir, se trata de la prueba de eco estático explicada en el apartado II.B.

En la figura 2 se muestran los valores mínimos recomendados para ATSC 1.0. La línea roja indica la amplitud máxima del eco, con respecto a la señal principal, para diferentes retardos del eco, con los cuales el receptor debería recibir correctamente. El valor D/E indica la diferencia de potencias entre la señal principal (D, Directa), que se considera siempre la de mayor potencia, y la señal eco (E).

Para ecos de menor amplitud que la dada por la curva (para cada retardo), no debe haber problemas de recepción. Por tanto, ecos débiles no perturban la recepción, mientras ecos fuertes la impiden. Cuanto mayor sea el valor del retardo del eco, menor deberá ser su amplitud para que el receptor reciba correctamente. Sin embargo, retardos pequeños también pueden ocasionar problemas si el eco es fuerte, por ello, es importante estudiar toda la curva, ya que todos esos efectos se producirán en diferentes lugares del área de cobertura. Lo ideal sería que la curva estuviera en 0 dB para todo retardo, eso indicaría que el receptor recibe correctamente en cualquier situación.

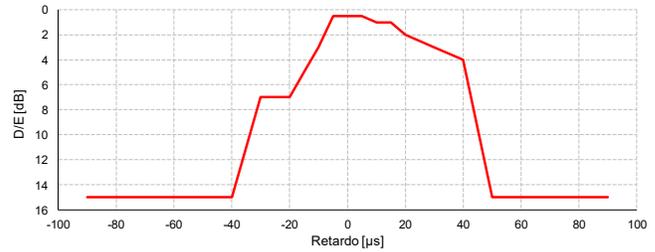


Fig. 2. Respuesta mínima recomendada de los receptores ATSC 1.0 [25].

Dado que ATSC M/H se diseñó para tener mayor robustez que ATSC 1.0, los receptores ATSC M/H deberían tener un desempeño superior al recomendado para ATSC 1.0 [25].

Previamente ya se publicaron los resultados del desempeño de receptores ATSC M/H comerciales frente a un eco estático [23], sin embargo, en el estudio aquí presentado se incluyó multitrayecto natural, usando modelos de canal realistas que simulan diferentes condiciones de recepción, siempre para una red SFN de dos transmisores. En [23] se concluyó que todos los receptores ATSC M/H recibirían correctamente con retardos del eco entre $-60\mu\text{s}$ y $+60\mu\text{s}$. En este estudio se trata de comprobar si entornos realistas (multitrayecto natural) tienen efecto sobre el desempeño de los receptores.

Para ello, se han seleccionado varios modelos de canal que se describen a continuación.

E. Escenarios a Simular

El simulador de desvanecimiento del equipo generador de radiodifusión usado tiene la posibilidad de programar 12 paths, trayectorias o ecos diferentes, separados en dos grupos de 6 ecos, lo cual es suficiente para los modelos de canal que se desean usar, y que se describen a continuación.

Se escogieron cuatro entornos o situaciones de recepción:

- Recepción fija en exteriores
- Recepción fija en interiores
- Recepción en movimiento en área rural
- Recepción en movimiento en zona urbana

A cada eco de la red SFN de dos transmisores (señal directa y eco) se le asigna un modelo de canal que simule una de las cuatro condiciones descritas, de tal forma que, si el modelo consta de 6 paths, la señal simulada dentro de la red SFN tendrá 12 paths (seis trayectorias por cada transmisor).

El modelo de canal "Brasil A" es el seleccionado para simular la recepción fija en exteriores con una antena directiva

¹ El bit rate está calculado para una señal de video de 535 kbps

en la azotea apuntando al transmisor, con línea de vista al mismo [30]. Los datos del modelo (atenuación y retardo de cada eco) se muestran en la Tabla III. Como se puede observar, es un modelo benigno donde todos los ecos de multitrayecto natural están muy atenuados con respecto a la señal directa (eco 1).

TABLA III
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CANAL "BRASIL A"

Eco	Atenuación [dB]	Retardo [μ s]
1	0.0	0.0
2	13.8	0.15
3	16.2	2.22
4	14.9	3.05
5	13.6	5.86
6	16.4	5.93

TABLA IV
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CANAL "BRASIL D"

Eco	Atenuación [dB]	Retardo [μ s]
1	0.1	-5.71
2	3.8	-5.23
3	2.6	-3.64
4	1.3	-2.81
5	0.0	0.00
6	2.8	0.07

TABLA V
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CANAL "RURAL AREA 6" (RA-6)

Eco	Atenuación [dB]	Retardo [μ s]	Distribución de Probabilidad
1	0.0	0.0	Rice
2	4.0	0.1	Rayleigh
3	8.8	0.2	Rayleigh
4	12.0	0.3	Rayleigh
5	16.0	0.4	Rayleigh
6	20.0	0.5	Rayleigh

TABLA VI
PARÁMETROS DE SIMULACIÓN DEL MODELO DE CANAL "TYPICAL URBAN 6" (TU-6)

Eco	Atenuación [dB]	Retardo [μ s]	Distribución de Probabilidad
1	3.0	-0.2	Rayleigh
2	0.0	0.0	Rayleigh
3	2.0	0.3	Rayleigh
4	6.0	1.4	Rayleigh
5	8.0	2.1	Rayleigh
6	10.0	4.8	Rayleigh

El modelo de canal "Brasil D" simula una recepción en el interior de un edificio con una antena pequeña no-directiva (Tabla IV) [30]. Lógicamente, este modelo de canal es mucho más agresivo que el "Brasil A". Se demuestra por el hecho de que la señal directa o principal, no es la primera que llega al receptor, sino la quinta (eco 5). Además, todos los ecos tienen atenuaciones bajas con respecto a la señal principal.

La recepción en movimiento en área rural se simula con el modelo de canal "Rural Area 6" (RA-6), que representa un receptor moviéndose a una velocidad de 120 km/h en una zona rural sin montañas [31][32]. La velocidad de 120 km/h introduce un desplazamiento Doppler importante en la señal (p.e. toma un valor de 55 Hz para el canal 18, frecuencia central 497 MHz). Los parámetros de modelo RA-6 se muestran en la Tabla V. Como se puede observar, el primer eco tiene una distribución de probabilidad Rice, lo cual significa que existe visión directa al transmisor.

Finalmente, la recepción en movimiento en zona urbana se simuló con el modelo de canal "Typical Urban 6" (TU-6) a la velocidad de 50 km/h [32][33]. Los parámetros del modelo TU-6 son los de la Tabla VI. En este caso se observa que un eco (eco 1) llega al receptor antes que la señal principal (eco 2). La señal principal, al igual que el resto de ecos, tiene una distribución de probabilidad de Rayleigh, indicando que no existe visión directa al transmisor.

III. RECEPCIÓN FIJA EN EXTERIORES

El modelo de canal "Brasil A" simula la recepción de una señal de televisión con una antena directiva situada en la azotea de un edificio. La antena apunta al transmisor con el que tiene línea de vista [30]. Esto hace que el receptor reciba la señal directa en primer lugar y con mayor potencia que los ecos que recibe de otras direcciones. Es por ello que se considera un modelo de canal con un multitrayecto benigno.

Esta situación es muy común en edificios con antena comunitaria en la azotea.

Los resultados de la respuesta de los receptores ante una red SFN de dos transmisores se muestran en la figura 3 para la configuración C1, en la figura 4 para la C2, y en la figura 5 para la C3. En todas las figuras se muestra la referencia recomendada para receptores ATSC 1.0 [25].

Lo primero que se puede observar es que la respuesta de los receptores ATSC M/H es casi simétrica para retardos positivos o negativos, al contrario de lo que ocurre con receptores ATSC 1.0, en los cuales el pre-eco (retardos negativos) es mucho más dañino [18][22].

También se puede observar que la respuesta de los receptores ATSC M/H, comparando con su respuesta al eco estático [23] (sin multitrayecto natural), se degrada ligeramente para retardos cercanos a $\pm 60\mu$ s. La configuración C1, la más robusta, prácticamente permite señales retardadas en el rango de $(-60\mu$ s a $+60\mu$ s) sin ningún problema. Es decir, su respuesta es similar a la del eco estático, por lo que el modelo de canal Brasil A prácticamente no afecta a la recepción, aunque dos receptores sí ven reducido su rango a $(-45\mu$ s a $+50\mu$ s). Las configuraciones C2 y C3, menos robustas que C1, reducen el rango de recepción a $(-45\mu$ s a $+50\mu$ s) en todos los receptores.

Otro dato importante es la tolerancia de los receptores a ecos fuera del rango $(-60\mu$ s a $+60\mu$ s). Mientras que para la configuración C1 los receptores solo requieren de una atenuación de 6 a 8 dB en la señal eco, para la configuración C2 se requieren entre 9 y 11 dB según el modelo de receptor, y para la C3, entre 10 y 12 dB. Es decir, al reducir la

protección del Bloque A, el receptor necesita 3 dB más de atenuación en el eco, pero al reducir la protección en los otros tres bloques simultáneamente, solo se requiere 1 dB más de atenuación. En [29] se sugiere bajar la protección del Bloque A en el SCCC debido a que, por definición del estándar, es la zona más robusta de la señal, sin embargo, los resultados aquí presentados indican que la reducción de protección del bloque A dificulta la recepción fija en exteriores.

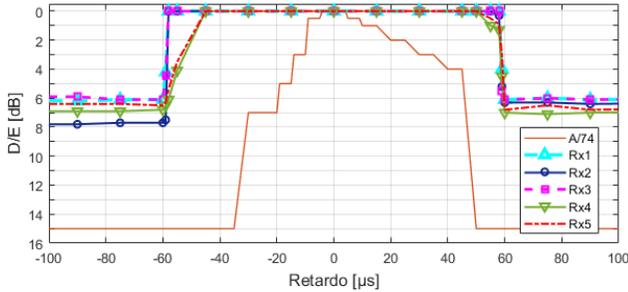


Fig. 3. Resultados de la configuración C1 con el modelo de canal Brasil A.

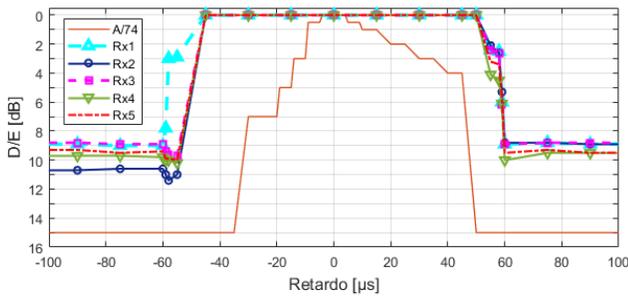


Fig. 4. Resultados de la configuración C2 con el modelo de canal Brasil A.

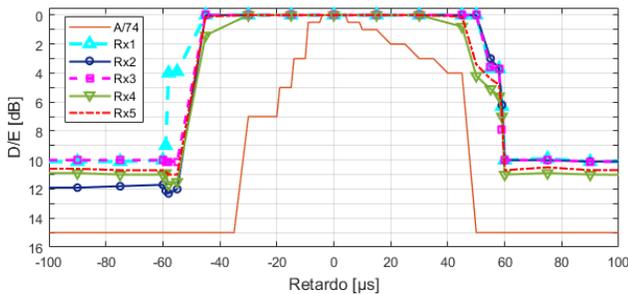


Fig. 5. Resultados de la configuración C3 con el modelo de canal Brasil A.

IV. RECEPCIÓN FIJA EN INTERIORES

Como se comentó previamente, el modelo de canal "Brasil D" simula la recepción en interiores con una antena no directiva de pequeño tamaño [30]. Este escenario de propagación es mucho más complicado que la recepción en exteriores por varios motivos. La señal suele llegar más atenuada debido a que ha atravesado muros. Es posible que la señal que llega directa del transmisor no sea la más potente porque puede haber sufrido más atenuación que otras señales reflejadas. Además, suele haber muchas señales reflejadas, debido a la reflexión en las paredes del edificio o de otros edificios. Es por ello, que se suele considerar un escenario complicado para la recepción.

Sin embargo, de acuerdo con los resultados mostrados en

las figuras 6 a 8, la señal ATSC M/H parece suficientemente robusta como para lidiar con esta situación.

A pesar de que el desempeño de los receptores se degrada con respecto al desempeño mostrado frente a la recepción en exteriores, la degradación es leve, y la mayoría de los receptores recibe correctamente en el margen de retardos ($-50\mu\text{s}$ a $+50\mu\text{s}$) para las tres configuraciones.

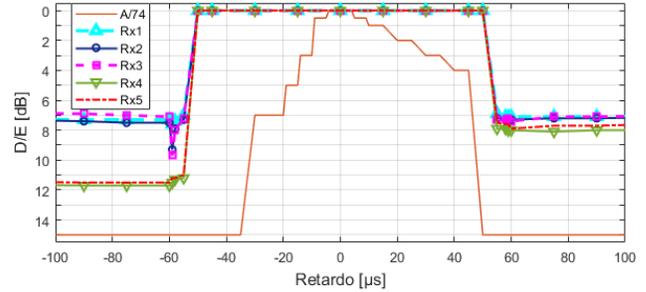


Fig. 6. Resultados de la configuración C1 con el modelo de canal Brasil D.

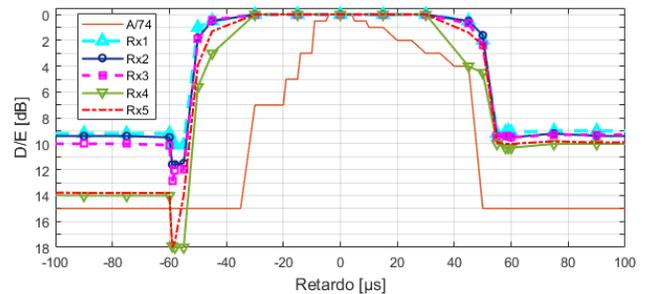


Fig. 7. Resultados de la configuración C2 con el modelo de canal Brasil D.

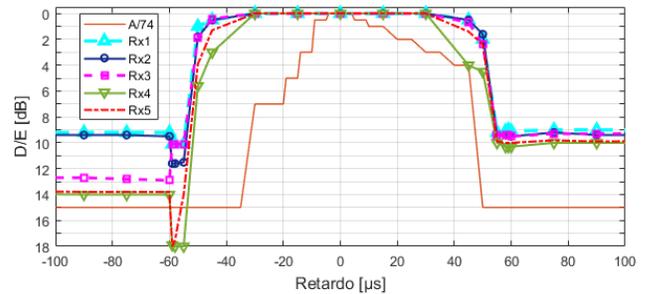


Fig. 8. Resultados de la configuración C3 con el modelo de canal Brasil D.

Hay un dato que sorprende, y es la atenuación que se requiere en el eco para retardos menores a $-60\mu\text{s}$. El hecho es que mientras que unos receptores reciben correctamente con ecos fuertes (p.e. entre 7 y 8 dB menos que la señal principal para la configuración C1), otros requieren que el eco esté más atenuado (11.5 dB para el mismo caso). Esto demuestra la importancia de la implementación del receptor. Llama la atención que no ocurre lo mismo con ecos mayores a $60\mu\text{s}$, donde el desempeño de los receptores es similar. Esto facilita la implementación de redes SFN, ya que usualmente no existen ecos con retardos negativos muy grandes, pero sí pueden existir ecos con retardos positivos grandes.

V. RECEPCIÓN EN MOVIMIENTO EN ÁREA RURAL

Los modelos de canal "Rural Area" y "Typical Urban"

describen dos situaciones típicas de recepción en movimiento, en carreteras entre ciudades y dentro de ciudades respectivamente [31][32]. Estos dos modelos de canal no se probaron con el estándar ATSC 1.0 porque dicho estándar no está diseñado para recibir en movimiento, lo cual se demostró con pruebas sencillas de recepción con desplazamiento Doppler [18][21]. De todas formas, no supone ningún problema porque ATSC 1.0 no se diseñó para recepción en movimiento [1][34].

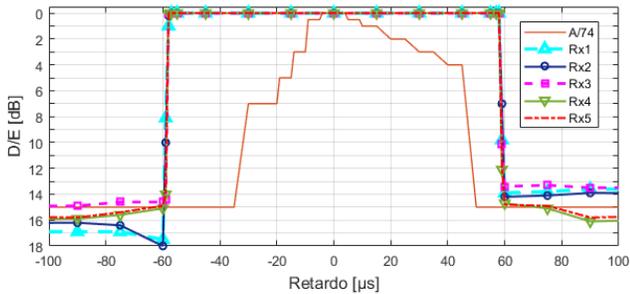


Fig. 9. Resultados de la configuración C1 con el modelo de canal "Rural Area".

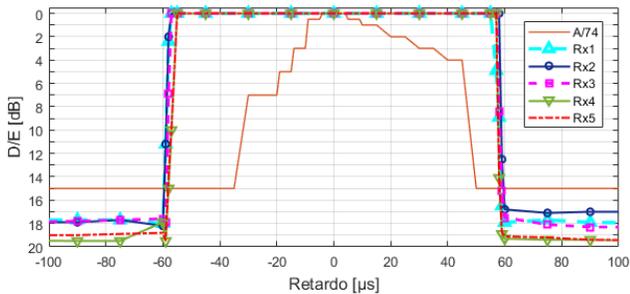


Fig. 10. Resultados de la configuración C2 con el modelo de canal "Rural Area".

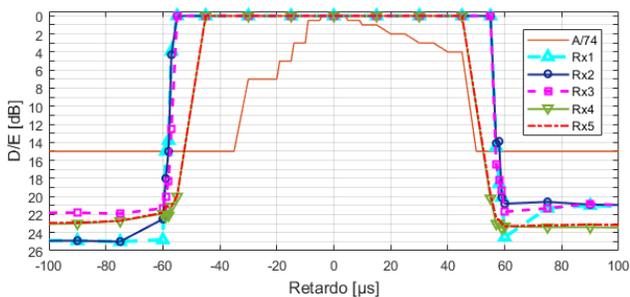


Fig. 11. Resultados de la configuración C3 con el modelo de canal "Rural Area".

En este apartado se describen los resultados de recepción ATSC M/H para la recepción en un entorno rural a la velocidad de 120 km/h para lo cual se usa el modelo de canal "Rural Area 6" [32][33]. Este es un modelo de canal benigno con señales de eco muy atenuadas, ya que se considera que hay vista directa al transmisor, y los ecos son leves y lejanos (grandes retardos). El principal desafío es el desplazamiento Doppler producido por la velocidad del receptor. Las figuras 9 a 11 muestran los resultados para cada una de las tres configuraciones de transmisión utilizadas.

Aún siendo un resultado esperado, la conclusión más

importante es que todos los receptores son capaces de recibir correctamente a pesar de la alta velocidad de 120 km/h. Es más, los resultados muestran que no existe ningún problema de recepción en el rango de $(-55\mu\text{s}$ a $+57\mu\text{s})$, para ningún receptor. Estos resultados son incluso ligeramente mejores que para la recepción fija en exteriores.

La parte negativa es que fuera de esos valores se requieren atenuaciones del eco muy grandes, incluso mayores a los 15 dB de la referencia dada por el A/74 para ATSC 1.0 [25]. Para la configuración C1 el eco debe estar atenuado entre 15 y 18 dB, para la configuración C2 entre 18 y 20 dB, y para la configuración C3 entre 22 y 26 dB.

VI. RECEPCIÓN EN MOVIMIENTO EN ZONA URBANA

El último tipo de recepción probado es la recepción en movimiento en entorno urbano. Para ello se seleccionó el modelo de canal "Typical Urban" a la velocidad de 50 km/h [32][33].

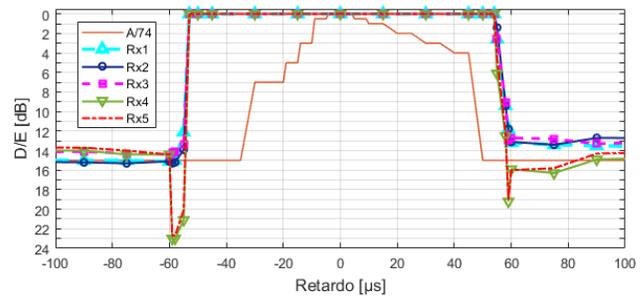


Fig. 12. Resultados de la configuración C1 con el modelo de canal "Typical Urban" a 50 km/h.

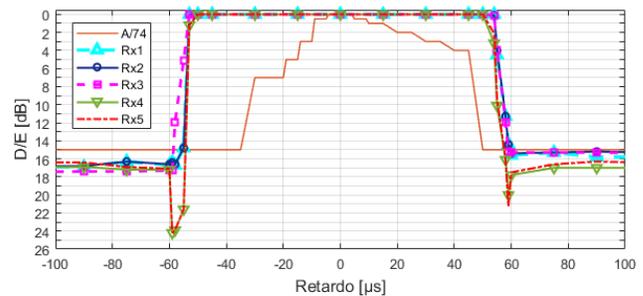


Fig. 13. Resultados de la configuración C2 con el modelo de canal "Typical Urban" a 50 km/h.

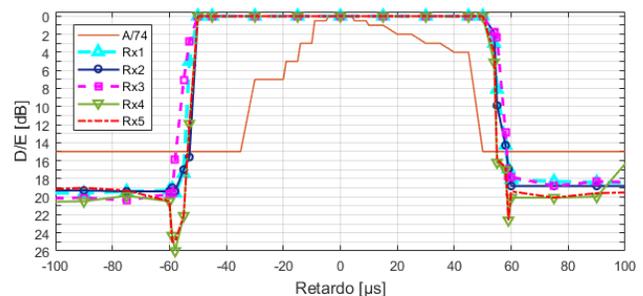


Fig. 14. Resultados de la configuración C3 con el modelo de canal "Typical Urban" a 50 km/h.

Los resultados mostrados en las figuras 12, 13 y 14 muestran un desempeño muy similar entre sí, donde la

recepción no presenta ningún problema con retardos del eco en el rango de (-50 μ s a +50 μ s) para ningún receptor y ninguna de las tres configuraciones. Para la configuración C1 el rango se amplía a (-55 μ s a +55 μ s).

Se observa un comportamiento anómalo en el rango (-60 μ s a -55 μ s) en donde la recepción es problemática y se requiere de atenuaciones de la señal eco de hasta 26 dB. No debe afectar en gran medida al funcionamiento de las redes SFN por ser un rango de tiempos muy específico, negativo, y limitado. Pero sería conveniente que los fabricantes de receptores pudieran solucionar este problema.

La principal diferencia entre el desempeño de los receptores a las diferentes configuraciones de transmisión es la atenuación requerida en el eco para retardos menores a -60 μ s y mayores a +60 μ s. Para la configuración C1 los receptores requieren de atenuaciones entre 13 y 16, para la configuración C2, la atenuación requerida está entre 15 y 18 dB, y para la configuración C3 entre 18 y 21 dB. En todos los casos, hay excepciones en los que se requiere mayor atenuación en el eco. Estas excepciones se limitan a dos receptores en retardos muy concretos.

De todos estos resultados la principal conclusión que se puede dar es que el estándar ATSC M/H funciona correctamente en redes SFN para entorno urbano en movimiento (50 km/h), en el rango de retardos del eco de -50 μ s a +50 μ s.

VII. CONCLUSIONES

El estudio aquí presentado tiene el objetivo de conocer el desempeño de receptores comerciales de ATSC M/H en redes SFN. Los resultados del estudio permiten dimensionar y prever el funcionamiento de las redes SFN con el estándar ATSC M/H.

El primer resultado de relevancia es que el desempeño de los receptores es, prácticamente independiente del signo del retardo, es decir, los resultados son muy similares si el retardo del eco es negativo (pre-eco), o si es positivo (post-eco). Este resultado es muy importante ya que es diametralmente contrario al desempeño de los receptores ATSC 1.0, donde el pre-eco es mucho más dañino que el post-eco. Esto también significa que la sincronización entre transmisores es más sencilla y ofrece más posibilidades con ATSC M/H que con ATSC 1.0.

El segundo resultado, también de relevancia, es que el desempeño de los receptores es bueno en el rango de retardos de -50 μ s a +50 μ s, prácticamente con todos los receptores, con todos los modelos de canal y con las 3 configuraciones de transmisión usadas. Lo cual define muy claramente los límites de las redes SFN con ATSC M/H. Dado que todos los receptores tienen un desempeño similar, sería relativamente sencillo crear una normativa de desempeño mínimo para receptores ATSC M/H.

También se ha demostrado el buen desempeño del estándar ATSC M/H en condiciones de recepción en movimiento, donde el desempeño es muy bueno.

Un elemento que puede tener importancia en ciertas condiciones de las redes SFN es que la atenuación de la señal

eco fuera del rango de funcionamiento, es decir con retardos menores a -60 μ s y mayores a 60 μ s, depende fuertemente de la configuración de la señal ATSC M/H (robustez), y en menor medida del receptor.

En definitiva, las redes SFN con ATSC M/H se pueden diseñar sin problemas siempre y cuando los retardos esperados entre señales de los transmisores estén en un rango de -50 μ s a +50 μ s. Si la red incluye simultáneamente ATSC 1.0 con ATSC M/H, se debe diseñar en base a las restricciones de ATSC 1.0.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio ha sido posible gracias a la colaboración de EGATEL S.L., Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V., TV UNAM y la Facultad de Ingeniería de la UNAM, socios del Proyecto REFUTV. Por ello, los autores desean agradecer a todo el personal de estas instituciones que han participado en el proyecto REFUTV, y han permitido la realización de este trabajo.

REFERENCIAS

- [1] ATSC Digital Television Standard – Part 2: RF/Transmission System Characteristics. Doc. A/53 Part 2:2011. Advanced Television Systems Committee. Dec. 15, 2011.
- [2] ATSC Mobile DTV. Standard: A/153 Part 1-10. Advanced Television Systems Committee. Washington, D.C., December 2011.
- [3] Diario Oficial de la Federación. “Acuerdo por el que se Adoptó el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre en México”. México, 2 de Julio, 2004.
- [4] Diario Oficial de la Federación. “Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre”. México, 11 de Septiembre, 2014.
- [5] ATSC Standard: ATSC 3.0 System. Doc. A/300:2017. Advanced Television Systems Committee. Washington, D.C., October 2017.
- [6] R. Chernock, D. Gomez-Barquero, J. Whitaker, Sung-Ik Park and Yiyang Wu. “ATSC 3.0 Next Generation Digital TV Standard - An Overview and Preview of the Issue”. *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 154-158, March 2016.
- [7] L. Fay, L. Michael, D. Gomez-Barquero, N. Ammar, M. W. Caldwell. “An Overview of the ATSC 3.0 Physical Layer Specification”. *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 62, no. 1, pp. 159-171, March 2016.
- [8] D. Plets, W. Joseph, L. Verloock, L. Martens, P. Angueira, J. A. Arenas. SFN Gain in Broadcast Networks. Presented at BMSB 2011, Nuremberg, Germany, 8-10 Jun. 2011. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5954876>
- [9] M. V. Guerra, C. V. Rodriguez Ron, L. da Silva Mello. Experimental Characterization of a SFN Digital Broadcast Channel. Presented at LATINCOM 2012. Cuenca (Ecuador), 7 – 9 Nov. 2012. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/6506011>
- [10] A. Mattsson. “Single Frequency Networks in DTV”. *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 51, no. 4, Dec. 2005.
- [11] Standard A/110: ATSC Standard for Transmitter Synchronization. Advanced Television Systems Committee. Washington, D.C., April. 2011.
- [12] R. Bettancourt, J.M. Peha “Reducing spectrum use in traditional and SFN-based television for uniform and non-uniform deployments”. *Telecommunications Policy*, vol. 41, issues 5-6, pp 498-517, June 2017.
- [13] “Digital terrestrial broadcasting: Design and implementation of single frequency networks (SFN)”, Report ITU-R BT.2386-2 (04/2019), ITU. Available: <https://www.itu.int/pub/R-REP-BT.2386>.
- [14] Mohammed El-Hajjar et al., “A Survey of Digital Television Broadcast Transmission Techniques”. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, Fourth Quarter, 2013.
- [15] ATSC Recommended Practice: Design of Multiple Transmitters Networks. Doc. A/111:2009. Advanced Television Systems Committee, Sep. 2009.
- [16] Comisión Federal de Telecomunicaciones. “Opciones Regulatorias para el Uso Óptimo de la Banda de 700 MHz en México”. Mayo 2013.

- [17] Instituto Federal de Telecomunicaciones. "Comunicado de Prensa N°25/2018, México se Convertirá en el Primer País del Mundo en Liberar la Banda de 600 MHz para 5G". Marzo 2018.
- [18] J. M. Matías, M. A. Hernández, J. Cuéllar et al. "Resultados de las Pruebas de Laboratorio de Receptores ATSC". Facultad de Ingeniería de la UNAM, México, 15 Oct. 2017.
- [19] J. Huerta, M. A. Hernández, J. M. Matías, R. A. Zavaleta, A. Ipiña. Parámetros de Desempeño de Receptores ATSC 8-VSB Bajo los lineamientos de la Recomendación A/74 de ATSC. Presentado en COMTEL 2015. Lima (Perú), Sept. 23-26, 2015.
- [20] R. A. Zavaleta, J. Huerta, M. A. Hernández, J. M. Matías. "Planning Laboratory Tests and Field Trials for Evaluating ATSC DTV on SFN networks in Mexico City". Presented at LATINCOM 2015. Arequipa (Perú), Nov. 4-6, 2015. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7430140>
- [21] A. Ipiña, M. A. Hernández, J. Huerta, J. M. Matías. "Resultados de Laboratorio de Desempeño de Receptores ATSC frente al Desplazamiento Doppler". Presentado en COMTEL 2016. Lima (Perú), Sept. 21-23, 2016.
- [22] M. A. Hernández, J. Huerta, V. García and J. M. Matías. "Laboratory Tests of Single Frequency Networks with ATSC on Commercial Receivers". *IEEE Latin America Transactions*, vol. 16, No. 3, pp. 754-763. March 2018.
- [23] F. G. Ortiz, C. López, M. A. Hernández, A. Miranda, J. M. Matías. "Laboratory tests of ATSC M/H commercial receivers". Presented at WD 2016 Wireless Days. Toulouse (France), March 23-25, 2016. Available: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7461503>
- [24] M. J. Rahman, "Multi-Frame Synchronization for a DTV Receiver: CFO, SFO, and Error Performance Analysis". *IEEE Systems Journal*, vol. 13, no. 3, pp. 2888-2897, Sept. 2019.
- [25] ATSC Recommended Practice A/74: Receiver Performance Guidelines. Advanced Television Systems Committee. Abr 2010.
- [26] S.M. Weiss, "Reception Considerations for Distributed Transmission in ATSC Systems", *JCCCE, 2005*, Las Vegas, USA, 2005. Pages 477-478.
- [27] Khailil S., Yiyan W., Gilles G., "Performance of the Consumer ATSC - DTV Receivers in the Presence of Single or Double Interference on Adjacent / Taboo Channels", *IEEE Transactions on Broadcasting*, Vol. 56, No. 1, March, 2010.
- [28] ATSC Recommended Practice A/174: Mobile Receiver Performance Guidelines. Advanced Television Systems Committee. Sep. 26, 2011.
- [29] "Engineering Report ER12-041 Mobile DTV (ATSC M/H) Field Testing and Measurements". CBC, Radio-Canada. Toronto, Nov 30, 2012.
- [30] ABERT Mackenzie and SET. General Description of Laboratory Tests, "DTV Field Tests Report in Brazil". July, 2000
- [31] "Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Radio Transmission and Reception (3GPP TS 05.05 version 8.20.0 Release 1999)", ETSI TS 100 910 V8.20.0 (2005-11) Technical Specification, Page 74.
- [32] "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Networks; Deployment aspects (Release 6)", 3GPP TR 25.943 V6.0.0 (2004-12), Technical Report, pp 6.
- [33] "Digital land mobile radio communications", 1989. COST 207 (Commission of the European Communities). Pages 141-146.
- [34] Y. Wu, E. Pliszka, B. Caron, P. Bouchard and G. Chouinard, "Comparison of Terrestrial DTV Transmission Systems: The ATSC 8-VSB, the DVB-T COFDM, and the ISDB-T BST-OFDM". *Transactions on Broadcasting*, vol. 46, no. 2, Jun. 2000.



José M. Matías received the Ph.D. degree in Information Technologies in the University of the Basque Country (UPV-EHU), Bilbao, in 2009.

From 1994 to 2002 he worked in different private companies as software and firmware developer. From 2002 to 2009 he was assistant professor at the (UPV-EHU). Since 2009 he is with the National

Autonomous University of Mexico (UNAM), where he is currently an assistant professor.



Flor G. Ortiz received a BS in Telecommunications Engineering and a MS in Electrical-Telecommunications Engineering from the Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), in 2015 and 2016, respectively. From 2013 to 2016, she worked on projects at the Faculty of Engineering of UNAM, especially in the Broadcasting area. She is currently a PhD candidate and has joined the Radiation Group of the Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain. Flor is working in the area of satellite communications.



Mario A. Hernández received the B. degree in Telecommunications Engineering and the M. degree in Electrical Engineering from the National Autonomous University of Mexico, in 2010 and 2012, respectively. Since 2014, he has been with the same university as professor and as student in the Ph.D. Program of Electrical Engineering. His current research interests focus on new digital broadcasting technologies and single frequency networks.



Carmen H. López received the B.Eng. degree in Telecommunications Engineering from the National Autonomous University of Mexico (UNAM), in 2018. She is currently a student in the M.Eng. Program in Electrical Engineering at the Applied Sciences and Technology Institute, UNAM. Her current research interests focus on magnetic materials for high frequency applications.



Unai Gil received the M.Sc. and Ph.D. degrees in telecommunication engineering from the University of the Basque Country, in 2004 and 2011, respectively. He was at the University of the Basque Country, where he was involved in several research projects in digital terrestrial TV and digital radio broadcasting. His current research interests include several aspects of new digital broadcasting technologies, such as DRM, DVB-T2, and DVB-NGH standards and the new LDM technique.



Salvador Landeros received his B.S. degree in Electrical Engineering from UNAM, M.S. degree from University of Pennsylvania, USA, and Ph.D. degree from National Autonomous University of Mexico (UNAM). He is currently Research Professor at Faculty of Engineering, UNAM, Mexico. His current research interest areas are Satellite Networks, Architectures, Markets and Satellite Backhaul.