



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA ELÉCTRICA – TELECOMUNICACIONES

**“PRUEBAS DE LABORATORIO DE TELEVISIÓN DIGITAL ATSC EN REDES EN
FRECUENCIA ÚNICA”**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA

PRESENTA:
JAIME HUERTA MEDINA

TUTOR:
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI
FACULTAD DE INGENIERÍA

MÉXICO, D.F., ENERO 2016

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rangel Licea Víctor
Secretario: Dr. García Ugalde Francisco
Vocal: Dr. Matías Maruri José María
1er. Suplente: Dr. Landeros Ayala Salvador
2do. Suplente: Dr. García Garduño Víctor

Lugar donde se realizó la tesis:

México, D.F., Facultad de Ingeniería, UNAM

TUTOR DE TESIS

Dr. José María Matías Maruri

FIRMA

Gracias Dios, porque tú lo eres todo en mi vida. Padre, a ti te debo esto y mucho más, todas tu enseñanzas, apoyo y amor incondicional están grabados en mi corazón. Madre, tú gran amor incondicional sigue grabado en mi corazón. Ivan gracias por ser mi gran compañero de vida. Osmar gracias por enseñarme lo que es un amor puro. Blanquita y David, gracias por su cariño.

El da esfuerzo al cansado, y multiplica las fuerzas al que no tiene ningunas. Los muchachos se fatigan y se cansan, los jóvenes flaquean y caen; pero los que esperan a Jehová tendrán nuevas fuerzas; levantarán alas como las águilas; correrán, y no se cansarán; caminarán, y no se fatigarán. Isaías 40: 29-31.

Agradecimientos

Le agradezco Dr. José María Matías Maruri por haberme dado la oportunidad y confianza de trabajar junto con usted en esto. Gracias por sus apoyo, enseñanzas, paciencia y consejos que me dio a lo largo de este tiempo.

A Álvaro, Marcela , Saraí y Jesed por abrirme las puertas de su casa y el apoyo dado durante este proceso de mi vida.

A Abraham por tu amistad, tu apoyo, explicaciones y trabajo en equipo que tuvimos durante toda la maestría. En verdad gracias por todo.

A Mario por tu tiempo y apoyo fundamental en la realización de este trabajo.

A Flor, Andrés, Abraham I., Alejandro, Daniel, Eduardo, Viridiana, Jeniffer, Berenice, David y Luis que formaron parte de este proyecto, y que por su dedicación y tiempo ahora pueden verse los resultados.

A a los Doctores Víctor Rangel Licea, Francisco García Ugalde, Salvador Landeros Ayala y Víctor García Garduño por el tiempo dedicado en la revisión de este trabajo.

A mis amigos Luis M., Alejandro, Pedro, Ximena, Lulú, Víctor, Kristel y Alfredo por sus ánimos que me dieron para la culminación de este proceso.

Al CONACYT, por la beca que me brindó durante mis estudios de maestría.

Al Posgrado en Ingeniería de la UNAM, por el apoyo que recibí para la presentación del artículo en Perú.

Ahora he cumplido un sueño y una meta más en mi vida, y esto es gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México, por haberme permitido ser parte de tus alumnos y aprender del gran conocimiento de tus académicos.

Resumen

En la presente tesis se dan a conocer los resultados obtenidos de la evaluación de seis receptores digitales ATSC (Advanced Television Systems Committee) que se llevaron a cabo bajo condiciones controladas de laboratorio. Las evaluaciones corresponden principalmente a determinar los valores límite de funcionamiento de estos receptores ante la sensibilidad, umbral de C/N (Carrier to Noise), multitrayecto, desplazamiento Doppler y desempeño dentro de una Red en Frecuencia Única de dos Transmisores.

Esta evaluación toma importancia debido a que en México, en el año 2015 se llevó a cabo la transición de la señal analógica a la digital, es decir, se dejó de transmitir señales analógicas de televisión, para solo transmitir del tipo digital. Esta transición permite al país obtener los beneficios del proceso de digitalización de la señal televisiva y al mismo tiempo permite buscar alternativas de solución a la implementación de Redes en Frecuencia Única con el estándar ATSC de televisión digital adoptado por México en el año 2004.

El objetivo principal de la tesis, es determinar mediante pruebas de laboratorio el desempeño de una muestra representativa de receptores de televisión digital en Redes en Frecuencia Única.

En la tesis se define el protocolo de las pruebas a realizar, los parámetros de simulación, se plantean las pruebas que se realizaron a cada uno de los receptores, el equipamiento de laboratorio utilizado en las pruebas, se presentan los valores límites obtenidos por cada receptor, y se determina qué valores son considerados óptimos para el buen desempeño de los mismos.

Índice general

Resumen	I
Lista de términos	IX
1. Introducción	1
1.1. México y la Televisión Digital	1
1.2. Proyecto REFUTV	3
1.3. Justificación de la Tesis	4
1.4. Objetivo de la Tesis	5
1.4.1. Objetivo General	5
1.4.2. Objetivos Particulares	5
1.5. Estructura de la Tesis	6
2. Estado del Arte	7
2.1. Sistemas de Televisión Digital Terrestre	7
2.1.1. Sistemas con Modulación Multiportadora	7
2.1.2. Sistemas con Modulación Uniportadora	10
2.2. Redes en Frecuencia Única en la TDT	10
2.2.1. Redes en Frecuencia Única con Sistemas de Modulación Multiportadora	12
2.2.2. Redes en Frecuencia Única con Sistemas de Modulación Uniportadora .	12
2.3. Pruebas de Laboratorio Realizadas con ATSC	14
3. Diseño de las Pruebas de Laboratorio	17
3.1. Objetivo	17
3.2. Consideraciones Previas a la Definición de las Pruebas	18
3.2.1. Documento ATSC A/74: Recomendaciones de Desempeño de los Recep- tores	18
3.2.2. Modelos de Canal	19

3.2.2.1.	¿Qué es Multitrayecto?	19
3.2.2.2.	¿Qué es un Modelo de Canal?	20
3.2.2.3.	Selección de los Modelos de Canal	20
3.3.	TOV: Umbral de Visibilidad	23
3.4.	Equipamiento de Laboratorio	23
3.4.1.	Selección de los Receptores	23
3.4.2.	Generador de la Señal Digital ATSC	24
3.5.	Definición y Objetivos de las Pruebas de Laboratorio	27
3.5.1.	Objetivos Particulares de las Pruebas de Laboratorio	27
3.6.	Metodología de las Pruebas de Laboratorio	30
4.	Resultados de las Pruebas de Laboratorio	31
4.1.	Resultados de las Pruebas Relacionadas con la Recomendación A/74	31
4.1.1.	Sensibilidad	31
4.1.2.	Umbral de C/N	32
4.1.3.	Tolerancia a un Eco Estático	35
4.1.4.	Tolerancia a un Eco Dinámico	36
4.1.5.	Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos	40
4.1.6.	Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociado a Velocidades de un Avión	44
4.2.	Pruebas de una Red SFN con dos Transmisores	46
4.2.1.	Resultado de una SFN de dos Transmisores para Recepción en Exteriores	46
4.2.2.	Resultado de una SFN de dos Transmisores para Recepción en Interiores	48
4.2.3.	Respuesta a la Recepción Móvil/Portátil	49
4.3.	Prueba de Respuesta al Desplazamiento Doppler	50
5.	Conclusiones	55
5.1.	Valores Límite de Buen Desempeño de los Receptores ATSC	56
5.2.	Trabajo a Futuro	61
A.	Contribuciones de la Tesis	63
A.1.	Publicaciones Internacionales	63
A.2.	Publicaciones Nacionales	78
	Bibliografía	81

Índice de figuras

3.1. Valores límite que debe demodular un receptor ATSC según el documento A/74 de ATSC.	19
3.2. Panel principal de operación del equipo generador SFE de R&S®.	25
3.3. Tabla de paths del equipo generador SFE de R&S®.	25
3.4. Señal ATSC de -28 dBm de potencia generada por el equipo SFE en el canal 18.	26
3.5. Diagrama de configuración de equipamiento utilizado en laboratorio.	26
4.1. Resultados de la prueba de Sensibilidad [dBm] de cada receptor.	32
4.2. Resultados de prueba de Umbral de C/N [dB] con una potencia de recepción intensa, -28 dBm.	33
4.3. Resultados de prueba de Umbral de C/N [dB] con una potencia de recepción moderada, -53 dBm.	34
4.4. Resultados de prueba de Umbral de C/N [dB] con una potencia de recepción débil, -68 dBm.	34
4.5. Desempeño de los receptores ante un Eco Estático.	35
4.6. Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 0 Hz en un rango de 0-2 μ s.	37
4.7. Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 0.5 Hz en un rango de 0-2 μ s.	38
4.8. Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 1 Hz en un rango de 0-2 μ s.	38
4.9. Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 1.5 Hz en un rango de 0-2 μ s.	39
4.10. Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 2 Hz en un rango de 0-2 μ s.	39
4.11. Parámetros de configuración de la prueba de Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos.	40
4.12. Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 0 Hz).	41
4.13. Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 1 Hz).	41

4.14. Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 2 Hz).	42
4.15. Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 3 Hz).	42
4.16. Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 4 Hz).	43
4.17. Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 5 Hz).	43
4.18. Efecto del Desplazamiento Doppler en recepción relacionado a velocidades de un avión.	44
4.19. Equivalencia entre Desplazamiento Doppler (Hz) y Velocidad (km/h) para una frecuencia de 497 MHz, canal 18 de televisión.	45
4.20. Respuesta de los receptores ante una red SFN de dos transmisores y con recep- ción en exteriores (Multitrayecto de cada transmisor representado por el Modelo de Canal Brasil A).	47
4.21. Respuesta de los receptores ante una red SFN de dos transmisores y con recep- ción en interiores (Multitrayecto de cada transmisor representado por el Modelo de Canal Brasil D).	48
4.22. Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 3 km/h.	51
4.23. Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 25 km/h.	51
4.24. Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 50 km/h.	52
4.25. Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 120 km/h.	52
4.26. Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 400 km/h.	53

Índice de tablas

2.1. Parámetros del estándar DVB-T.	9
2.2. Parámetros del estándar ISDB-T.	10
2.3. Parámetros del estándar DTMB.	11
2.4. Parámetros del estándar ATSC.	11
2.5. Intervalos de Guarda y Modos de Transmisión de los Sistemas con Modulación OFDM.	13
3.1. Modelo de Canal Brasil A (Condiciones de Recepción en Exteriores).	21
3.2. Modelo de Canal Brasil D (Condiciones de Recepción en Interiores).	21
3.3. Modelo de Canal TU6 (Condiciones de Recepción Móvil Urbana).	22
3.4. Modelo de Canal Pedestrian A (Condiciones de Recepción Portable en Exteriores).	22
3.5. Modelo de Canal Pedestrian B (Condiciones de Recepción Portable en Interiores).	22
3.6. Receptores Evaluados en las Pruebas.	24
3.7. Pruebas seleccionadas de Laboratorio para evaluación de los receptores ATSC.	27
3.8. Configuración general para la evaluación de una red SFN de dos transmisores.	30

Lista de términos

ARIB	<i>Association of Radio Industries and Business</i>
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
BCH	<i>Bose-Chaudhuri-Hocquengham</i>
BST-OFDM	<i>Band Segmented Transmission OFDM</i>
CDTI	<i>Centro para el Desarrollo Tecnológico Industrial</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CONACYT	<i>Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología</i>
CRC	<i>Communications Research Centre</i>
DOCRs	<i>Digital On Channel Repeaters</i>
DTMB	<i>Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting</i>
DTV	<i>Digital Televisión</i>
DTxRs	<i>Distributed Translators</i>
DTxTs	<i>Distributed Transmitters</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting-Terrestrial</i>
ETSI	<i>European Telecommunication Standard Institute</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HD	<i>High Definition</i>
HDTV	<i>High Definition Televisión</i>
INEGI	<i>Instituto Nacional de Estadística y Geografía</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial)</i>
JCTEA	<i>Japan Cable Television Engineering Asociation</i>
LDCP	<i>Low Density Parity Check</i>
MFN	<i>Multiple Frequency Network</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>

NTSC	<i>National Television System Committee</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
REFUTV	<i>Redes en frecuencia única para el desarrollo de la televisión digital ATSC</i>
SDTV	<i>Standard Definition Television</i>
SFN	<i>Single Frequency Network</i>
TDS-OFDM	<i>Time Domain Synchronous-OFDM</i>
TDT	<i>Televisión Digital Terrestre</i>
TELBOR	<i>Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V.</i>
TU6	<i>Typical Urban of 6 paths</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	<i>Unión Internacional de Telecomunicaciones</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VSB	<i>Vestigial Side Band</i>

Capítulo 1

Introducción

En el presente capítulo se da a conocer la situación actual en la que se encuentra México ante la transición de la televisión analógica a la televisión digital. Se describen los beneficios e inconvenientes que surgen a partir de la selección de un estándar de televisión digital que no fue diseñado en un principio para la implementación de Redes en Frecuencia Única (SFN). Se describe la importancia del estudio de redes SFN para televisión digital ATSC realizado por el proyecto REFUTV. Se plantea la justificación y los objetivos de la tesis. Por último, se describe la estructura de la misma.

1.1. México y la Televisión Digital

La televisión es un sistema de radiodifusión empleado para la transmisión de imágenes fijas o en movimiento, sonido e información. Desde su desarrollo, ha tenido como objetivo informar o entretener al público por medio de la difusión de distintos tipos de programación [1, 2].

En México, la televisión ha jugado un papel fundamental a lo largo de su historia desde las primeras transmisiones realizadas en el año de 1950 con tecnología analógica [3]. Datos oficiales presentados por el Instituto de Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), revelaron que en el año 2014 el 94.9 % de los hogares en el país contaban con televisores, de los cuales el 15.2 % contaba con un televisor sólo del tipo digital, 68.9 % contaba con un televisor sólo del tipo analógico y el 16 % contaba con ambos tipos de televisores [4].

En el año 2004 México adoptó el estándar de televisión digital ATSC, documentado para recepción fija en A/53 [5] y para recepción móvil en A/153 [6]. En julio del mismo año, la adopción del estándar se publicó en el Diario Oficial de la Federación con el título: “Acuerdo por el que se Adopta el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre y se Establece la Política para la Transición de la Televisión Digital Terrestre en México” [7]. En ese acuerdo

se determinó que la fecha en la cual se debe llevar a cabo la suspensión de la transmisión de la señal de televisión analógica, para sólo dejar la transmisión de la señal de televisión digital, debe tener como fecha límite el 31 de diciembre de 2021; no obstante, por decreto presidencial esa fecha fue adelantada al 31 de diciembre de 2015 [8].

Para la selección de dicho estándar se creó el Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión en el año de 1999, el cual estuvo encargado del estudio, evaluación y desarrollo de tecnologías digitales de radiodifusión. Éste Comité evaluó los estándares de televisión digital ATSC, DVB-T e ISDB, llegando a la conclusión de que el que más convenía a México era el estándar ATSC, por reunir ciertas características que lo hacían la mejor opción [7].

Algunos de los beneficios que presenta la digitalización de la señal de televisión en México son:

- Optimizar el uso del espectro radioeléctrico por medio de la transmisión de canales de televisión en un ancho de banda de 6 MHz, ancho de banda que correspondía a la transmisión de canales analógicos, permitiendo ofrecer dos o más servicios.
- Mayor calidad en el video al realizar transmisiones de alta definición o HD (High Definition).
- Mayor calidad de audio.
- Transmisión de información adicional, como lo son títulos, duración del programa, idiomas, autores etc.
- Utilizar menor potencia para cubrir el área que anteriormente se cubría con las transmisiones analógicas.
- Mejoramiento de la recepción de la señal en territorio nacional y que por la ubicación puedan ser captadas en el extranjero (territorio fronterizo).

Por otro lado, existe un concepto relacionado a la televisión digital, y este consiste en el diseño de redes en donde varios transmisores pueden transmitir simultáneamente la misma señal digital en la misma frecuencia. A este tipo de redes se les conoce como Redes en Frecuencia Única o redes SFN (Single Frequency Networks).

No obstante, para el estándar de televisión digital ATSC, la implementación de éstas redes se hace complicada debido a que se utiliza una modulación de portadora única llamada 8-VSB, la cual se ve afectada en gran manera por el multitrayecto al solo utilizar una portadora para la sincronización de la recepción de la señal digital, por lo que este tipo de implementación de redes es factible principalmente con los estándares digitales de televisión que hacen uso de modulaciones con multiportadora u OFDM y que actualmente con el desarrollo de la tecnología

en los receptores digitales se implementan complejas técnicas de ecualización lo que les permite recibir la señal ante diferentes condiciones de multitrayecto.

En la televisión analógica, el tipo de redes de transmisión usual consiste, a diferencia de las redes SFN, en transmitir la señal analógica con una modulación en amplitud y en diferentes frecuencias para no producir interferencias en la recepción en la zona a la que se desea dar cobertura¹, ya que los receptores no cuentan con técnicas robustas de procesamiento de señal para la mitigación de la interferencia producida por la transmisión de varias señales a la misma frecuencia. A éste tipo de redes se les conoce como Redes en Frecuencia Múltiple o redes MFN (Multiple Frequency Networks).

El multitrayecto en una red SFN consiste en el conjunto de señales generadas por cada uno de los transmisores y la reflexión o desfasamiento de cada una de las señales transmitidas.

A pesar de los beneficios que presenta el estándar ATSC, existe un problema inherente al sistema, que es la baja robustez frente al multitrayecto natural y al desplazamiento Doppler, lo que dificulta la implementación de redes SFN. Este impedimento se debe a que una red SFN consiste en señales generadas por cada uno de los transmisores, las cuales llegan en diferente momento al receptor, de la misma forma que el multitrayecto.

Para dar solución a este inconveniente, se ha trabajado en el desarrollo de los ecualizadores de canal de los receptores ATSC 8-VSB, permitiendo así mejorar la capacidad de la relación de tiempo y amplitud entre la señal directa y los ecos que recibe el receptor [9, 10].

Prácticamente a la par del desarrollo tecnológico de los receptores, ATSC estableció el estándar A/110 en el cual define como sincronizar múltiples transmisores emitiendo la señal del estándar A/53 de ATSC [11], sin embargo, la implementación de redes SFN con el estándar A/53 de ATSC no se ha desarrollado comercialmente al 100 %, ya que según la documentación, en otros países se han realizado implementaciones para realizar pruebas [12–14] y, las redes existentes en nuestro país son conformadas con transmisores complementarios (SFN de baja potencia); sin embargo, algunas de estas redes no tienen el funcionamiento esperado.

1.2. Proyecto REFUTV

El periodo de transición consistió en asignar nuevas frecuencias a la televisión digital terrestre para transmitir señales digitales al mismo tiempo que analógicas, para después conforme a un plan establecido, la transmisión de señales analógicas vayan siendo eliminadas y así liberar el uso del espectro radioeléctrico.

¹Área que generalmente es muy extensa y un sólo transmisor no es suficiente para garantizar la cobertura y por lo tanto se recurre a transmisores de apoyo y/o retransmisores.

Debido al periodo de transición de señales analógicas a digitales de televisión que se está llevando a cabo en el país, se lanzó la propuesta de desarrollar redes SFN. El proyecto REFUTV (Redes en frecuencia única para el desarrollo de la televisión digital ATSC) tiene como uno de sus objetivos estudiar en qué condiciones dichas redes funcionan.

REFUTV, es un proyecto internacional de la convocatoria CONACYT-CDTI (México-España), en donde participan tres entidades: la Facultad de Ingeniería por parte de la UNAM, EGATEL S.L. y TELBOR S.A. de C.V.

El objetivo principal del proyecto es desarrollar equipamiento para la implementación de redes SFN con el estándar de televisión digital A/53 de ATSC para su comercialización, y por otra parte, estudiar este tipo de redes para obtener parámetros de funcionamiento en el país.

Para lograr desarrollar el objetivo principal del proyecto, REFUTV llevará a cabo dos objetivos particulares:

1. Desarrollar el equipo encargado de introducir los datos de sincronización en la trama de datos (MIP Inserter) y desarrollar el equipo modulador que recibe esa trama de datos para enviar la señal de ATSC sincronizada al transmisor y así pueda ser recibida por receptores comerciales.
2. Determinar los parámetros límite para la implementación de redes SFN por medio de la elaboración de pruebas de laboratorio y de campo.

La UNAM es la encargada de realizar pruebas de laboratorio, evaluar el desempeño de receptores digitales ATSC 8-VBS para obtener los parámetros límites de funcionamiento de una red SFN y posteriormente, con base a los datos obtenidos de las pruebas de laboratorio, llevar a cabo pruebas de campo utilizando el equipo desarrollado por EGATEL y TELBOR y así determinar la funcionalidad de la red SFN.

1.3. Justificación de la Tesis

Debido al cambio tecnológico que se vive en el país (la transición de la televisión analógica a la digital), el estudio busca determinar la respuesta que tienen los receptores que se comercializan en el país ante el multitrayecto. Esto debido a que depende de los receptores la demodulación de la señal ATSC y si ha mejorado esta respuesta con respecto a estudios pasados, además de determinar que parámetros límites corresponden a la implementación de redes SFN. Los parámetros límites consisten en el rango que hay entre amplitud y retardo de la señal directo con respecto al eco, en el cual un receptor es capaz de demodular la señal ATSC correctamente.

Es importante mencionar que los resultados de esta tesis son la de evaluar una muestra comercial representativa de receptores digitales para obtener parámetros límite de funcionamiento ante el multitrayecto que se puede encontrar en un ambiente SFN y que para lograrlo, se simularán condiciones controladas en ambiente de laboratorio, mientras que el proyecto RE-FUTV tienen como motivo principal el desarrollo de equipamiento para la implementación de redes SFN.

1.4. Objetivo de la Tesis

Debido a que el desarrollo e implementación de redes SFN con el estándar A/53 de ATSC depende principalmente del desarrollo de la tecnología implementada en cada receptor, en especial de su ecualizador, permitiendo al receptor poder demodular la señal ATSC ante diferentes condiciones de multitrayecto, como lo es una red SFN, se plantean los siguientes objetivos de la tesis.

1.4.1. Objetivo General

El objetivo principal de la tesis consiste en determinar mediante pruebas de laboratorio el desempeño que presentan receptores de televisión digital ATSC ante el multitrayecto, como lo es una Red en Frecuencia Única.

1.4.2. Objetivos Particulares

Los objetivos específicos de la tesis son los siguientes:

- Definir el protocolo de pruebas a realizar.
- Selección de equipamiento de pruebas a partir de la definición de parámetros de simulación de una red en frecuencia única.
- Realizar las medidas con diferentes modelos de receptores y obtener los parámetros de respuesta de los receptores digitales ante el multitrayecto.
- Determinar si los receptores cumplen con los lineamientos bases propuestos por ATSC.
- Determinar que receptores funcionan mejor en redes SFN y que receptores no recibirán bien en una situación real.
- Obtener los parámetros óptimos para definir redes en frecuencia única con ATSC, para que un gran porcentaje de los receptores sean capaces de recibir la señal correctamente.

1.5. Estructura de la Tesis

La tesis está dividida en seis partes que consisten en lo siguiente:

En el Capítulo 1 se da un panorama general de la situación que se vive en México con respecto a la Televisión Digital Terrestre (TDT), los beneficios y desventajas que dan como resultado de la elección del sistema de TDT ATSC. Se plantea la dificultad de implementar redes SFN con éste sistema y se menciona en que consiste el proyecto REFUTV en el cual una de las entidades participantes es la FI de la UNAM. Se plantea la justificación y los objetivos de la tesis. Por último, se da a conocer la manera en que se ha organizado el presente documento.

En el Capítulo 2 se hace referencia acerca de los sistemas de televisión digital terrestre. La teoría acerca de las redes SFN y su implementación con sistemas con modulación de portadora única y portadora múltiple. Por último, se habla acerca de que pruebas de laboratorio se han realizado con el sistema de televisión digital ATSC.

En el Capítulo 3 se describen los objetivos correspondientes a la realización de las pruebas de laboratorio. Se menciona la selección del equipamiento de laboratorio utilizado en las pruebas. Se da a conocer la investigación previa que se realizó para la selección de las pruebas de laboratorio. Se enlista la elección de las pruebas y se describen los objetivos de cada una de ellas. Para finalizar, este capítulo presenta la metodología utilizada en la realización de las pruebas.

En el Capítulo 4 se dan a conocer los resultados obtenidos de la evaluación de los receptores digitales con respecto a su respuesta ante la sensibilidad, multitrayecto, respuesta al desplazamiento Doppler y valores hasta los cuales se puede recibir bien la señal en los receptores al ser expuestos a ambientes de redes SFN.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas de la evaluación de los receptores digitales. Se plantean los valores óptimos recomendables para el buen desempeño de receptores digitales en nuestro país cuando se implementen redes SFN con el estándar ATSC.

Para finalizar, se hace referencia a los trabajos desarrollados y presentados derivados del estudio al que hace mención ésta tesis.

Capítulo 2

Estado del Arte

En este capítulo se presenta la teoría referente a los sistemas de TDT aprobados por la UIT y utilizados en el mundo. Se dan las características principales de cada uno de ellos. Se habla acerca de las redes SFN y su implementación con sistemas de modulación de uniportadora y multiportadora. Por último, se hace referencia a pruebas de laboratorio que se han realizado con el estándar ATSC.

2.1. Sistemas de Televisión Digital Terrestre

Actualmente existen cuatro estándares definidos para TDT, los cuales han sido aprobados y recomendados por la UIT en el informe UIT-R BR. 1306-7 [15]. Estos estándares son los siguientes:

1. El sistema ATSC desarrollado en los Estados Unidos de América por el Comité de Sistemas de Televisión Avanzada o ATSC (Advanced Television System Committee).
2. El sistema DVB-T desarrollado por la Unión Europea y estandarizado por la ETSI (European Telecommunication Standard Institute).
3. El sistema ISDB-T desarrollado en Japón y estandarizado por la ARIB (Association of Radio Industries and Business) y por la JCTEA (Japan Cable Television Engineering Association).
4. El sistema DTMB desarrollado en China por la Universidad de Tsinghua.

2.1.1. Sistemas con Modulación Multiportadora

El sistema de modulación multiportadora utilizado por algunos sistemas de TDT, es el OFDM.

Esta modulación consiste en utilizar un método en donde todas las señales o subportadoras moduladas, transmitidas y demoduladas en recepción deben presentar ortogonalidad entre sí. Esta ortogonalidad impide la interferencia entre las señales moduladas y demoduladas.

Otro aspecto importante de esta modulación consiste en el periodo de símbolo OFDM¹, el cual comprende el intervalo de tiempo en el cual se envían las subportadoras de información útil o de usuario (datos), subportadoras de sincronización y el intervalo de guarda. Éste intervalo de guarda comprende subportadoras que no contienen información y las cuales permiten mitigar el problema de interferencia ocasionado por el efecto del multitrayecto, debido a que en ese tiempo el receptor es capaz de recibir ecos sin considerarlas como interferencia.

Un gran beneficio que presenta esta modulación, además de la ortogonalidad e intervalo de guarda, es que la información de usuario se transmite por medio de diferentes subportadoras, disminuyendo las pérdidas de información que sufrirá la señal si sólo se envía por medio de una subportadora [16].

Son tres los sistemas de TDT que utilizan un método de modulación multiportadora, estos son el DVB-T, ISDB-T y DTMB.

DVB-T. El estándar DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial) utiliza un sistema de transmisión multiportadora llamado OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplex) combinado con un código corrector de errores, por lo cual es nombrado COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplex). Para maximizar el uso del espectro en las bandas UHF(Ultra High Frequency), la modulación OFDM utiliza tres opciones de número de portadoras (2k, 4k y 8k), tres esquemas de modulación y diferentes intervalos de guarda que permiten la operación de redes SFN de gran o pequeña cobertura. El ancho de banda principalmente utilizado es el de 8 MHz aunque tiene la posibilidad de operar en 7 MHz y 6 MHz. El sistema permite variar entre diferentes niveles de modulación QAM y codificación interna de canal para operar la robustez contra la tasa de bits [17, 18]. En la tabla 2.1 se muestran las principales características del sistema DVB-T [15].

Con el objetivo de mejorar la tolerancia del sistema frente al multitrayecto y mejorar la carga de datos, se desarrolla la segunda versión del estándar nombrado DVB-T2. Algunas de las mejoras que presenta en comparación con el estándar DVB-T son: modulación 256 QAM, intervalo de guarda de 1/128, códigos correctores de errores 3/5 LDPC + BCH y mayor número de portadoras (Modo 32k) [19].

ISDB-T. El estándar ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting-Terrestrial) es un sistema desarrollado con el fin de integrar varios servicios como lo es la televisión en su formato estándar y de alta definición, servicios de internet, portabilidad y movilidad. Se implementa la

¹Grupo de señales ortogonales utilizadas para la transmisión de información de usuario.

Parámetros	DVB-T COFDM
Ancho de Banda	6 MHz, 7 MHz, 8 MHz
Número de Portadoras	1705 (Modo 2k), 3409 (Modo 4k), 6817 (Modo 8k)
Métodos de Modulación	QPSK, 16 QAM, 64 QAM
Intervalos de Guarda	1/32, 1/16, 1/8, 1/4
Codificación Interna de Canal	Código Convolutacional: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8.
Codificación Externa de Canal	Reed Solomon. RS (204,188, T = 8)
C/N	Depende de la modulación y la codificación: 3.1-20.1 dB

Tabla 2.1: Parámetros del estándar DVB-T.

televisión de alta definición en un ancho de banda de 6 MHz. El canal de 6 MHz está dividido en trece segmentos de 429 kHz cada uno. En esos trece segmentos se pueden transmitir tres programas simultáneamente con diferente robustez y modulación [20]. Es un sistema robusto contra el multitrayecto, ruido y desvanecimientos. Presenta flexibilidad de servicios y de recepción ya que en el mismo ancho de banda cualquier sistema de recepción es posible (fijo, móvil y portable). Es apto para la implementación de redes SFN ya que utiliza la modulación OFDM [21]. En la tabla 2.2 se muestran las características principales del sistema [15].

Por otro lado, Brasil adopta en el año 2006 el sistema ISDB-T, al cual implementará nuevas tecnologías de codificación (H.264/MPEG-4) para la televisión en formato estándar y de alta definición, por estos cambios realizados al estándar se le conoce como ISDB-T Internacional [21].

DTMB. El estándar DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcast) es un sistema que utiliza un esquema de modulación TDS-OFDM (Time Domain Synchronous-Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Puede operar en 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz y permite la variación de los siguientes métodos de codificación: QPSK, 16-APSK, 64-APSK, 256-APSK. En la tabla 2.3 se muestran sus características [15].

Parámetros	ISDB-T BST-OFDM
Ancho de Banda	6 MHz, 7 MHz, 8 MHz
Número de Segmentos	13 segmentos por canal
Número de Portadoras	1 405 (Modo 1), 2 809 (Modo 2), 5 617 (Modo 3)
Métodos de Modulación	DQPSK, QPSK, 16 QAM, 64 QAM,
Intervalos de Guarda	1/32, 1/16, 1/8, 1/4
Codificación Interna de Canal	Código Convolutacional: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6, 7/8.
Codificación Externa de Canal	Reed Solomon. RS (204,188, T = 8)
C/N	Depende de la modulación y la codificación: 5-23 dB

Tabla 2.2: Parámetros del estándar ISDB-T.

2.1.2. Sistemas con Modulación Uniportadora

El estándar desarrollado por ATSC es el único que actualmente funciona con sistema de modulación uniportadora llamado 8-VSB.

Este estándar de TDT fue diseñado para transmitir video y sonido de alta calidad en un ancho de banda de 6 MHz. Está diseñado para soportar diferentes tipos de interferencia como lo son: las señales analógicas de la televisión NTSC y el ruido [5,22]. ATSC es un sistema diseñado para la implementación de redes MFN, no obstante, en los últimos años se ha trabajado en desarrollar alternativas para su implementación en redes SFN. En la tabla 2.4, se muestran los parámetros principales del sistema ATSC [15].

2.2. Redes en Frecuencia Única en la TDT

La transmisión de la señal digital que se realiza por medio de más de una torre transmisora utilizando una sola frecuencia se le conoce como Red en Frecuencia Única o SFN. Para poder llevar a cabo este tipo de transmisiones es necesario que cada una de las torres transmita el contenido sincronizado en el tiempo y frecuencia, por medio de algún tipo de referencia universal como lo puede ser el GPS [23].

Parámetros	DTMB TDS-OFDM
Ancho de Banda	6 MHz, 7 MHz, 8 MHz
Número de Portadoras	4 096 (Modo 4k), 8 192 (Modo 8k), 32 678 (Modo 32k)
Métodos de Modulación	QPSK, 16-APSK, 64-APSK, 256-APSK
Intervalos de Guarda	1/8, 1/4, 1/2 (Modo 4k), 1/16, 1/8, 1/4 (Modo 8k), 1/64, 1/32, 1/16 (Modo 32k)
Codificación Canal	Código LDPC/BCH y una tasa de código de 1/2, 2/3, 5/6
C/N	Depende de la modulación y la codificación: 0.62-21.08 dB

Tabla 2.3: Parámetros del estándar DTMB.

Parámetros	ATSC 8-VSB
Ancho de Banda	6 MHz
Número de Portadoras	1
Codificación Interna de Canal	2/3 trellis
Codificación Externa de Canal	Reed Solomon. RS(207, 187, T=10)
C/N	14.9-15.19 dB

Tabla 2.4: Parámetros del estándar ATSC.

Las redes SFN se han implementado principalmente con sistemas digitales de radio y televisión que utilizan la modulación OFDM. Esto se debe principalmente a que en este tipo de modulación es posible dejar un intervalo de guarda que en ocasiones es proporcional a la distancia entre las torres transmisoras de la red, permitiendo así, la recepción de la señal digital dentro del tiempo correspondiente al intervalo de guarda, con esto, se minimiza la interferencia entre señales provenientes de las diferentes torres transmisoras que conforman la red SFN.

A diferencia de la modulación OFDM, la modulación 8-VSB no tiene la posibilidad de dejar intervalos de guarda, por lo que la posible implementación de una red SFN está basada en el desarrollo del procesamiento de la señal recibida por receptores digitales 8-VSB. Este procesamiento consiste en la capacidad del receptor en su ecualizador de canal de lograr demodular las señales

provenientes de más de un transmisor. Estas señales, dependiendo de la ubicación del receptor dentro de la cobertura de la red SFN, llegan retardadas entre sí, y con diferencia de amplitud entre la señal que llega con mayor potencia y la señal que llega con menor nivel de potencia nombrada eco [24].

Para ATSC además de los avances que se presentan en recepción de la señal 8-VSB, la correcta configuración de redes SFN en la transmisión también está definida en el estándar A/110 de ATSC [11] y en la recomendación A/111 de ATSC, en donde se proporcionan las directrices para el diseño de redes SFN y para la gestión de interferencias [25].

2.2.1. Redes en Frecuencia Única con Sistemas de Modulación Multiportadora

Como se ha mencionado anteriormente, para cada sistema de televisión digital (DVB-T, DVB-T2, ISDB-T, ISDB-T Internacional y DTMB), la implementación de redes SFN está basada en la modulación OFDM.

Gracias a los diferentes modos de modulación utilizados por cada sistema, los cuales consisten en utilizar diferentes configuraciones con diferentes portadoras e intervalos de guarda, es posible variar los parámetros de la configuración de la red, en donde el intervalo de guarda expresado en tiempo (μs) es proporcional a la distancia máxima de posicionamiento entre transmisores dentro de la red y en algunos casos al tiempo en que el receptor podrá demodular dicha señal correctamente [26–31]. En la tabla 2.5 se muestran los intervalos de guarda para cada modo y que corresponde al número de portadoras a elegir para cada sistema [15].

Para el sistema DVB-T, está documentado el estándar ETSI TS 101 191 V1.4.1 (2004-06) para la sincronización de redes SFN [26], mientras que para el sistema DVB-T2 se encuentra en el documento ETSI TS 102 831 V1.2.1 (2012-08) [19]. En el estándar ISDB-T, el documento en donde se especifica la sincronización de redes SFN es el ARIB STD-B31 Version 2.2 [32].

2.2.2. Redes en Frecuencia Única con Sistemas de Modulación Uniportadora

Como se ha mencionado, ATSC describe en el estándar A/110 y en la recomendación A/111 las configuraciones para diseño de redes SFN con el estándar ATSC 8-VSB. Estos modos de configuración son los siguientes:

- **Repetidores Digital en Canal o DOCRs (Digital On Channel Repeaters).** Consiste en la captación desde una torre principal utilizando un radioenlace dedicado a una

Modulación	Duración de Intervalos	
COFDM	6 MHz	1/32, 1/16, 1/8, 1/4 de 9.33, 18.67, 37.33, 74.67 μ s (modo 2k) 18.67, 37.33, 74.67, 149.33 (modo 4k) 37.33, 74.67, 149.33, 298.67 μ s (modo 8k)
	7 MHz	1/32, 1/16, 1/8, 1/4 de 8, 16, 32, 64 μ s (modo 2k) 16, 32, 64, 128 μ s (modo 4k) 32, 64, 128, 256 μ s (modo 8k)
	8 MHz	1/32, 1/16, 1/8, 1/4 de 7, 14, 28, 56 μ s (modo 2k) 14, 28, 56, 112 μ s (modo 4k) 28, 56, 112, 224 μ s (modo 8k)
BST-OFDM	6 MHz	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 de 63, 31.5, 15.75, 7.875 μ s (modo 1) 126, 63, 31.5, 15.75 μ s (modo 2) 252, 126, 63, 31.5 μ s (modo 3)
	7 MHz	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 de 54, 27, 13.5, 6.75 μ s (modo 1) 108, 54, 27, 13.5 μ s (modo 2) 216, 108, 54, 27 μ s (modo 3)
	8 MHz	1/4, 1/8, 1/16, 1/32 de 47.25, 23.625, 11.8125, 5.90625 μ s (modo 1) 94.5, 47.25, 23.625, 11.8125 μ s (modo 2) 189, 94.5, 47.25, 23.625 μ s (modo 3)
TDS-OFDM	6 MHz	1/8, 1/4, 1/2 de 90.3, 181, 361 μ s (modo 4k), 1/16, 1/8, 1/4 de 90.3, 181, 361 μ s (modo 8k), 1/64, 1/32, 1/16 de 90.3, 181, 361 μ s (modo 32k)
	7 MHz	1/8, 1/4, 1/2 de 77.4, 155, 310 μ s (modo 4k), 1/16, 1/8, 1/4 de 77.4, 155, 310 μ s (modo 8k), 1/64, 1/32, 1/16 de 90.3, 181, 361 μ s (modo 32k)
	8 MHz	1/8, 1/4, 1/2 de 67.7, 135, 271 μ s (modo 4k), 1/16, 1/8, 1/4 de 67.7, 135, 271 μ s (modo 8k), 1/64, 1/32, 1/16 de 67.7, 135, 271 μ s (modo 32k)

Tabla 2.5: Intervalos de Guarda y Modos de Transmisión de los Sistemas con Modulación OFDM.

torre secundaria para la posterior retransmisión de la señal a la misma frecuencia en que fue recibida. Aunque este tipo de configuración pueden ser de las más sencillas para implementar, debido a que la función de las demás torres transmisoras es la misma de una repetidora, existen dos limitaciones importantes; la primera consiste en un retraso entre las señales que capta el receptor; éste retraso de señales se presenta en las zonas en donde el receptor logra captar la señal que proviene de la torre principal y la señal recibida de la torre repetidora². Estos retardos ocasionan la recepción de ecos: cuando tenemos una señal que llega con mayor potencia en comparación con otra de menor potencia y que ha llegado antes, tenemos situaciones en donde se generan pre-ecos, los cuales mayormente son perjudiciales al procesamiento de la señal que realiza cada receptor. La segunda limitación se relaciona con el aislamiento que debe existir entre la antena receptora y la transmisora del DOCR, el cual debe ser alto por utilizar el mismo canal de frecuencia [25].

- **Transmisores Distribuidos o DTxTs (Distributed Transmitters).** Esta configuración consiste en que cada transmisor de la red recibe a través de un enlace dedicado la señal ATSC a transmitir. Ésta configuración adquiere gran flexibilidad debido a que en cada transmisor se puede variar la potencia y retardo de la señal conforme a las necesidades de la red, para ello, se necesita mantener sincronizada la transmisión de la información de cada transmisor. A pesar del beneficio que presenta la red, ésta se encuentra en menor

²En esta configuración, se debe considerar que el diseño propio de la torre secundaria o DOCR también le introduce un retardo a la señal.

medida limitada al desarrollo del procesado de señal de cada receptor [25].

- **Transladores Distribuidos o DTxRs (Distributed Translators).** Este tipo de configuración consiste en captar la señal de una torre principal por medio del aire, no existen radioenlaces dedicados, por lo que la señal es la misma que recibiría un receptor, la señal captada es retransmitida en otra frecuencia por un transmisor o un grupo de transmisores [25].
- Combinaciones entre los mencionados anteriormente.

2.3. Pruebas de Laboratorio Realizadas con ATSC

En los sistemas de televisión digital que utilizan la modulación OFDM, se han realizado pruebas de laboratorio para determinar su desempeño dentro de redes SFN. Dentro de estas evaluaciones se ha determinado la mejoría que se tiene en la cobertura al implementar este tipo de redes [33] y respuesta ante condiciones de multitrayecto como lo son el modelo de Canal TU 6 (En el capítulo 3 se hablará acerca de los modelos de canal) [34].

A partir de la implementación del sistema de TDT ATSC, se han llevado a cabo diferentes estudios sobre el desempeño presentado por cada uno de los receptores digitales para el correcto funcionamiento del sistema ante diferentes condiciones de multitrayecto, considerando la implementación de Redes en Frecuencia Única. Dentro de estas pruebas se han utilizado configuraciones de redes SFN como Repetidores Digital en Canal, en donde se evalúa la respuesta de la red ante ruido AWGN, un eco estático y conjuntos de multitrayecto como lo es el modelo de canal Brasil A y Brasil E [35, 36].

Las primeras evaluaciones realizadas por diferentes organizaciones consistían en la comparación de desempeño entre los diferentes sistemas de TDT [37–39], llegando así en algunas ocasiones a la conclusión de que la modulación 8-VSB presentaba beneficios como la robustez del sistema ante ruidos y señales analógicas NTSC, pero al mismo tiempo presentaba un gran déficit en su funcionamiento ante diferentes condiciones de multitrayecto. Por tal motivo se enfocó gran parte del estudio del estándar en solucionar este problema por medio del desarrollo de los ecualizadores de canal (procesado de señal correspondiente a la correcta demodulación de la señal recibida por el receptor) de los receptores digitales.

Por otra parte, se han realizado pruebas de laboratorio a receptores para determinar el comportamiento que han tenido estos ante el multitrayecto, determinando principalmente la ventana de recepción del ecualizador o rango de retardos y amplitud del eco con respecto a la señal directa (la de mayor potencia recibida) en las que el receptor demodula correctamente la señal ATSC, con valores de retardo que van desde los $40\mu\text{s}$ hasta los $80\mu\text{s}$. También se ha

evaluado el desempeño del sistema por medio de la evaluación del umbral de C/N o relación portadora a ruido, el cual nos indica la robustez del sistema [40–45].

En el informe UIT-R BT.2035-2 [46], así como en la recomendación A/74 de ATSC [47] se plantean las pruebas que deben realizarse a receptores digitales bajo condiciones de laboratorio, para la determinación de su buena calidad.

Para el desarrollo de las pruebas de laboratorio mencionadas dentro de esta tesis, se seleccionó como base la recomendación A/74, para evaluar los receptores comerciales ante diferentes condiciones de multitrayecto, además de que se seleccionaron 5 modelos de canal para el desarrollo de las pruebas en redes en frecuencia única, los cuales se explican en el siguiente capítulo.

Además de las pruebas realizadas para determinar la respuesta de los receptores ante situaciones de multitrayecto como lo son las redes en frecuencia única descritas en ésta tesis, se han realizado otros trabajos relacionados al tema de investigación los cuales son:

- **Parámetros de Desempeño de Receptores ATSC 8-VSB Bajo los Lineamientos de la Recomendación A/74 de ATSC.**
- **Planning Laboratory Tests and Field Trials for Evaluating ATSC DTV on SFN networks in Mexico City.**
- **Laboratory tests of ATSC M/H commercial receivers.**
- **Resultados de Laboratorio de Desempeño de Receptores ATSC frente al Desplazamiento Doppler.**
- **Pruebas de Laboratorio de Sensibilidad y Relación Portadora a Ruido para el Estándar de Televisión Digital ATSC.**

Capítulo 3

Diseño de las Pruebas de Laboratorio

En el presente capítulo se dan a conocer los objetivos generales y particulares de las pruebas de laboratorio. Se menciona el equipamiento que fue utilizado. Se presentan las consideraciones previas a conocer, para la selección de las pruebas y se listan las pruebas a realizar, así como la definición de su metodología.

Las pruebas definidas en la presente tesis son realizadas únicamente para la evaluación del estándar en recepción fija de ATSC.

3.1. Objetivo

La implementación de redes SFN en ATSC, está completamente ligada al desarrollo del ecualizador en los receptores, lo que significa que un receptor debe ser capaz de recibir señales retardadas o ecos con cierta relación de amplitud y retardo con respecto a la señal principal (señal que llega con mayor potencia y a la cual se le considera que llega al receptor en un tiempo de 0 μ s).

Por ello, el objetivo general de las pruebas de laboratorio consiste en determinar cuál es el comportamiento de una muestra representativa de receptores comerciales en México ante diferentes condiciones de multitrayecto que se pueden encontrar dentro de una red SFN y, que dichas condiciones al ser generadas en un ambiente de laboratorio, se pueden definir para un amplio abanico de posibilidades.

También es indispensable evaluar el comportamiento que tendrán los receptores ante condiciones de desplazamiento Doppler ocasionado por la reflexión de la señal con objetos en movimiento, y así entender el posible efecto que tendrá la recepción de la señal digital ATSC en una red SFN que cuente dentro de su cobertura con ambientes de recepción cercanos a aeropuertos,

avenidas, etc.

3.2. Consideraciones Previas a la Definición de las Pruebas

La selección de las pruebas consiste en determinar y definir qué parámetros de medición permitirán cumplir con el objetivo ya antes planteado. Para ello se llevó a cabo una investigación de pruebas realizadas con ATSC y en donde se han simulado severas distorsiones por multitrayecto en ambientes SFN [36, 39, 48]. Un documento de suma importancia que se encontró como base para la realización de las pruebas es la recomendación A/74 de ATSC [47] en donde se dan a conocer los lineamientos base que se recomienda que cumplan los receptores ATSC para la recepción de la señal digital. En los documentos investigados también se encontraron lineamientos y sugerencias para ayudar a simular "lo más real posible" condiciones de recepción fija en ambientes de exteriores (fuera de una construcción), en interiores (dentro de una construcción) y de movilidad.

3.2.1. Documento ATSC A/74: Recomendaciones de Desempeño de los Receptores

Existe un documento que es la base de evaluación de desempeño de receptores digitales ATSC. Esta base es una recomendación generada por el comité ATSC en dos versiones, la primera publicada en el año 2004 [49] y la segunda en el año 2010 [47]. El documento da a conocer los parámetros base de sensibilidad, solape de múltiples señales, selectividad y multitrayecto que un receptor digital debería cumplir para la buena recepción de la señal ATSC. De estas pruebas las que son de mayor interés son las de sensibilidad y multitrayecto.

Dentro de las pruebas correspondientes a la respuesta que tienen los receptores ante el multitrayecto, la prueba correspondiente a la tolerancia de un eco estático es la que cobra mayor importancia. Esta prueba comprende los valores mínimos de comportamiento que deben cumplir los receptores ante la presencia de un eco, prueba que está relacionada con el comportamiento ideal de una red SFN de dos transmisores.

En este documento se presenta una tabla con valores que describen la magnitud de la respuesta impulsional de canal en la cual un receptor debería presentar un funcionamiento aceptable ante condiciones estáticas o cuasiestáticas de multitrayecto.

Los valores presentados en la figura 3.1 corresponden a los valores límite que debe lograr demodular un receptor ATSC ante la presencia de dos señales estáticas o cuasiestáticas. La

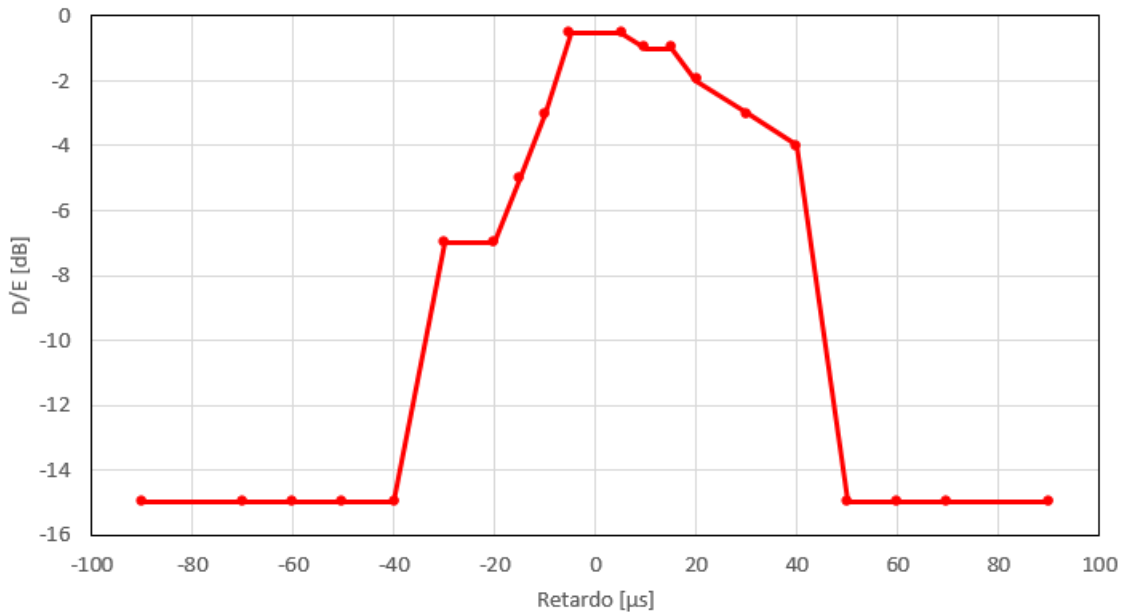


Figura 3.1: Valores límite que debe demodular un receptor ATSC según el documento A/74 de ATSC.

representación de la figura corresponde a la relación que existe entre una señal que llega con mayor potencia, conocida como señal directa (D), y otra señal que llega con menor potencia retarda en el tiempo (E). La señal que llega con mayor potencia en cualquier instante de tiempo es considerada la señal de referencia, por lo que, a partir de ésta todas las señales que llegan antes o después, son consideradas ecos. A partir de esta condición los ecos son clasificados en pre-ecos y post-ecos. La buena recepción de la señal se dará en todas las condiciones en que las que la recepción de la señal se dé por debajo de los valores límite representados en la gráfica.

3.2.2. Modelos de Canal

3.2.2.1. ¿Qué es Multitrayecto?

El desvanecimiento por multitrayecto o simplemente multitrayecto es la condición generada en comunicaciones inalámbricas por la múltiple reflexión de la señal generada al no tener una línea de vista directa entre el transmisor y el receptor, es ocasionada por obstáculos naturales como lo pueden ser los árboles o las montañas, o por obstáculos artificiales como lo son edificios, autos, aviones, etc.

La recepción de la señal puede darse en dos condiciones principales: la primera consiste en la recepción de una señal por cada uno de los sitios transmisores y al multitrayecto de las mismas cuando el equipo receptor se encuentra fijo, mientras que la segunda consiste en la recepción de una señal por cada uno de los sitios transmisores y al multitrayecto que se genera

cuando el equipo receptor se encuentra en movimiento. A estas condiciones se les nombra como condiciones de recepción estáticas y dinámicas respectivamente.

En el caso de recepción bajo condiciones estáticas, el multitrayecto puede causar efectos constructivos o destructivos en la señal recibida, y dependen de la fase y el tiempo en el que lleguen al receptor. Mientras que, en el caso de la recepción en condiciones dinámicas, el multitrayecto consiste en la recepción de una variedad de señales con distribuciones de amplitud y fase aleatorias ocasionando una variación a lo largo del dominio del tiempo. Estos cambios están relacionados con el cambio de frecuencia (frecuencia Doppler) que se produce en la frecuencia de la señal debido al rebote de la misma por un objeto u objetos en movimiento [50].

3.2.2.2. ¿Qué es un Modelo de Canal?

Debido a la complejidad que presenta el multitrayecto de una señal en un medio en particular y en el cual tendríamos que conocer el comportamiento de cada eco o reflexión en cada momento determinado de su propagación; se han desarrollado modelos de canal los cuales emulan el comportamiento típico o promedio de un canal en un cierto entorno.

3.2.2.3. Selección de los Modelos de Canal

Debido a que el estándar de televisión digital A/53 de ATSC es un estándar desarrollado para recepción en condiciones estáticas, se buscaron aquellos modelos de canal que podían representar éste tipo de condiciones en recepción. De los modelos de canal investigados se llegó a la conclusión de que dos de ellos son los que cobran mayor importancia para la principal aplicación que va a tener la televisión digital en nuestro país. Esta selección comprende dos modelos de canal obtenidos por medio de pruebas que se realizaron en Brasil¹ [39] y que representan condiciones de recepción en exteriores e interiores; se denominan Brasil A y Brasil D respectivamente.

Brasil A. Modelo de canal que representa recepción en exteriores. Las condiciones que representa este tipo de canal es que se tiene una antena fija en el exterior de una construcción y la cual se encuentra apuntando con línea de vista a un transmisor de televisión digital. En la tabla 3.1 se muestran los parámetros de simulación del modelo de canal Brasil A.

Brasil D. Modelo de canal que representa la recepción en interiores. Las condiciones que representa este tipo de canal es la de un receptor que se encuentra en el interior de una construcción y cuenta con una antena pequeña o de televisor. En la tabla 3.2 se muestran los parámetros de simulación del modelo de canal Brasil D.

¹Las pruebas se realizaron comparando los estándares de televisión digital DVB-T, ATSC e ISDB-T.

Modelo de Canal	Parámetros de Simulación	Ecos					
		1	2	3	4	5	6
BRASIL A	Atenuación [dB]	0	13.8	16.2	14.9	13.6	16.4
	Retardo [μ s]	0	0.15	2.22	3.05	5.86	5.93
	Desplazamiento Doppler [Hz]	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.1: Modelo de Canal Brasil A (Condiciones de Recepción en Exteriores).

Modelo de Canal	Parámetros de Simulación	Ecos					
		1	2	3	4	5	6
BRASIL D	Atenuación [dB]	0.1	3.8	2.6	1.3	0	2.8
	Retardo [μ s]	0.15	0.63	2.22	3.05	5.86	5.93
	Desplazamiento Doppler [Hz]	0	0	0	0	0	0

Tabla 3.2: Modelo de Canal Brasil D (Condiciones de Recepción en Interiores).

En cada una de las tablas mostradas se presenta un conjunto de multitrayectos compuesto por seis paths, donde la atenuación en dB representa la diferencia de potencia que existe entre una señal de referencia (la de mayor potencia) y cada uno de los ecos o señales degradadas, mientras que el retardo, es el tiempo en el cual un eco llega antes o después que la señal de referencia.

Si comparamos la atenuación de cada uno de los ecos de la tabla 3.1 con la tabla 3.2, los valores correspondientes al modelo Brasil A, al ser mayores que los del modelo Brasil D, se encuentran más atenuados. La atenuación de los ecos del modelo Brasil A representa un menor daño en el procesado de la señal ATSC en el ecualizador de canal del receptor. Por otro lado, la atenuación de los ecos del modelo Brasil D tienen valores más cercanos a 0 dB (sin atenuación) lo que representa una recepción más difícil de procesar cuando se refiere a la capacidad del receptor (ecualizador) de demodular correctamente la señal ante la presencia de ecos con niveles de potencia similares a la señal que se considera como principal. Factores como la amplitud y retraso de los ecos indican que la recepción en un ambiente en interiores (Brasil D) es más agresiva u ocasiona mayor daño en la recepción, en comparación con la recepción en un ambiente en exteriores (Brasil A)².

Se ha indicado que para condiciones estáticas (fijas) de recepción se han seleccionado modelos de canal que describen las situaciones típicas en las que se puede ubicar una antena para

²Debido a que en la bibliografía consultada donde se definen los modelos de canal Brasil A y Brasil D no se especifica el tipo de antenas utilizado, se considera que por los parámetros de atenuación de cada modelo: el modelo Brasil A recrea la condición de recepción en exteriores mediante una antena directiva, al apuntar hacia el transmisor se modifica la relación de potencia recibida entre la señal directa y las señales eco; el modelo Brasil D recrea la condición de recepción en interiores utilizando una antena del tipo omnidireccional/dipolo, la cual permite considerar la potencia con la que llegan al receptor todas las señales, incluyendo las señales eco.

Modelo de Canal	Parámetros de Simulación	Ecos					
		1	2	3	4	5	6
TU6	Atenuación [dB]	3	0	2	6	8	10
	Retardo [μ s]	0	0.2	0.5	1.6	2.3	5
	Desplazamiento Doppler [Hz]	23	23	23	23	23	23

Tabla 3.3: Modelo de Canal TU6 (Condiciones de Recepción Móvil Urbana).

Modelo de Canal	Parámetros de Simulación	Ecos			
		1	2	3	4
Pedestrian A	Atenuación [dB]	0	9.7	-19.2	-22.8
	Retardo [μ s]	0	0.11	0.19	0.41
	Desplazamiento Doppler [Hz]	1.38	1.38	1.38	1.38

Tabla 3.4: Modelo de Canal Pedestrian A (Condiciones de Recepción Portable en Exteriores).

la recepción de la señal, no obstante, se determinó evaluar también qué efecto se tendría en el caso de que el receptor fuese utilizado ante una condición no usual, pero que puede darse, y que es cuando este se encuentre en movimiento, por lo que se evaluarán condiciones que representen movilidad por medio de modelos de canal móvil y portables ya definidos.

Para la selección de modelos de canal móviles/portables se determinó utilizar el modelo de canal TU6 (Typical Urban, 6 paths) que representa la recepción de señales a una velocidad de 50 km/h en un entorno urbano y, los modelos de canal portable Pedestrian A y Pedestrian B que representan recepción de señales a una velocidad de 3 km/h en un entorno urbano y en donde los usuarios peatonales se encuentran en las calles y en el interior de los edificios respectivamente [51, 52]. En las tablas 3.3, 3.4, 3.5, se muestran los parámetros de simulación correspondientes a cada modelo de canal móvil.

Modelo de Canal	Parámetros de Simulación	Ecos					
		1	2	3	4	5	6
Pedestrian B	Atenuación [dB]	0	0.9	4.9	8	7.8	23.9
	Retardo [μ s]	0	0.2	0.8	1.2	2.3	3.7
	Desplazamiento Doppler [Hz]	1.38	1.38	1.3	1.38	1.3	1.38

Tabla 3.5: Modelo de Canal Pedestrian B (Condiciones de Recepción Portable en Interiores).

3.3. TOV: Umbral de Visibilidad

El TOV (Threshold of Visibility) es una medida utilizada en la evaluación de los receptores para determinar de manera subjetiva el valor hasta el cual se haya la falla en la demodulación de la señal televisiva por medio de la observación. Este umbral de visibilidad es medido a una S/N (Signal to Noise) de 14.9 dB cuando hay 2.5 segmentos de errores por segundo que corresponde a un segmento de tasa de error de 1.93×10^{-4} [22].

3.4. Equipamiento de Laboratorio

El equipamiento de laboratorio descrito a continuación se define a partir de los objetivos que se desean alcanzar con la realización de las pruebas de laboratorio.

3.4.1. Selección de los Receptores

La selección de los receptores es la parte fundamental para la realización de las pruebas, ya que la implementación tecnológica que presenten dará como resultado los valores límites de buen funcionamiento de los receptores ante condiciones de multitrayecto y que se pueden encontrar dentro de una red SFN. La selección realizada para estas pruebas corresponde a una muestra representativa de los receptores digitales comerciales en México.

Para esta selección se llevaron a cabo dos acciones. La primera consistió en consultar en la Revista del Consumidor un estudio que se realizó en diciembre de 2013 [53], en donde se evaluaba la calidad de la señal a través de la sensibilidad que presentaba cada receptor. La segunda consistió en realizar encuestas electrónicas a la comunidad estudiantil de la FI, UNAM y público en general para ver qué receptores digitales eran los que más se utilizaban en los hogares de la Ciudad de México. Estas dos acciones ofrecieron un panorama sobre qué receptores elegir con respecto a calidad y cantidad de equipos preferidos entre los usuarios.

Con base a las anteriores consideraciones, se eligieron seis receptores digitales ATSC de diferentes gamas y marcas (se consideró que los modelos de una misma marca pueden contar con la misma tecnología en el ecualizador de canal y por tanto, el objetivo buscado es el de evaluar diferentes tecnologías), clasificándolos con base a su precio; en receptores de gama baja, media y alta. En la tabla 3.6 se muestra la clasificación de cada receptor evaluado.

Todos los receptores presentados, son de uso doméstico y/o comercial con la consideración especial del receptor R1, el cual se vende como receptor portable.

Las características técnicas generales de cada receptor son las siguientes:

Receptor	Pantalla	Gama	Precio (MX)
R1	7''	Baja	\$1000-
R2	19''	Baja	\$4000
R3	32''	Promedio	\$4001-
R4	40''	Promedio	\$9000
R5	42''	Alta	\$9001-
R6	32''	Alta	\$13000

Tabla 3.6: Receptores Evaluados en las Pruebas.

- Rango de recepción: canal 2 (54 a 60 MHz) al canal 69 (800 a 806 MHz).
- Impedancia de entrada: 75Ω .
- Ancho de banda de la señal: 6 MHz.
- Modulación de la señal: 8 VSB³.
- Sistema de Video: MPEG-2.
- Sistema de Sonido: Dolby AC-3.

3.4.2. Generador de la Señal Digital ATSC

Se ha descrito que en un ambiente de laboratorio se generara la señal ATSC con la finalidad de simular los posibles escenarios que se puede encontrar un receptor en una red SFN. Para ello, además de receptores ATSC se necesita un equipo cuyo principal requerimiento sea:

- Generar señales ATSC con niveles bajos de potencia y ruido.
- Contar con opción de simular redes SFN, es decir, tener un simulador de canal o simulador de fading.

Para generar la señal ATSC se utilizó el generador de señales R&S®SFE, el cual incluye un modulador 8-VSB, un generador de ruido AWGN y un simulador de multitrayecto.

Las características del equipo generador son las siguientes:

- Rango de frecuencias de operación: 100 kHz a 2.7 GHz.
- Rango de potencia de la señal de salida: -110 dBm a +20 dBm.
- Modulación 8-VSB con un ancho de banda de la señal de 6 MHz.
- Rango de C/N: -30 dB a +60 dB.

³Todos los receptores son capaces de recibir también la señal analógica de televisión en el estándar NTSC, el cual se transmitió hasta finales del año 2015 en la Ciudad de México.

- Número de paths (trayectos configurables) del simulador de multitrayecto: 12 paths agrupados en dos grupos de 6 cada uno.
- Rango de atenuación de los Paths: de 0 dB a 50 dB.
- Rango de configuración de retardo de los paths: 0 s a 40 μ s (primer grupo) y de 0 s a 5.242 ms (segundo grupo).

En la figura 3.2 se muestra el panel principal de operación del equipo generador de la señal ATSC, y en la figura 3.3 se muestran los parámetros a configurar de cada path.

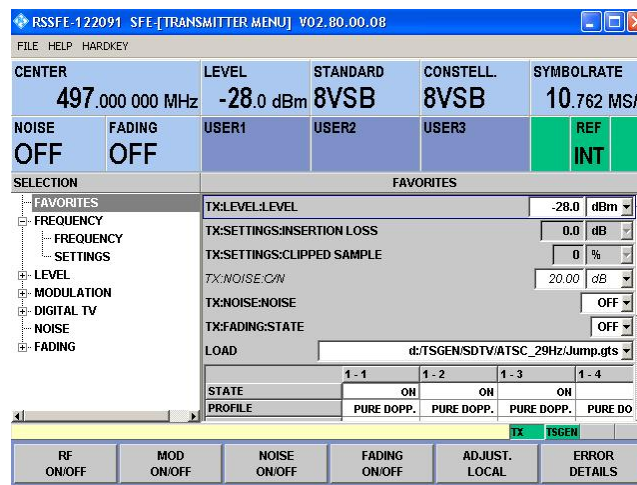


Figura 3.2: Panel principal de operación del equipo generador SFE de R&S®.

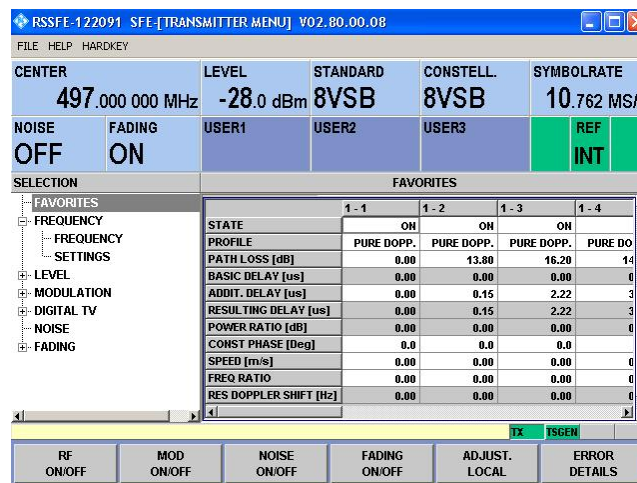


Figura 3.3: Tabla de paths del equipo generador SFE de R&S®.

Se utilizó un analizador de espectro para comprobar la generación de la señal ATSC. En la figura 3.4 se muestra un ejemplo la señal que genera el equipo SFE. Los parámetros de la señal generada son: nivel de potencia de -28 dBm y con una frecuencia central en el canal 18 (494 MHz -500 MHz).

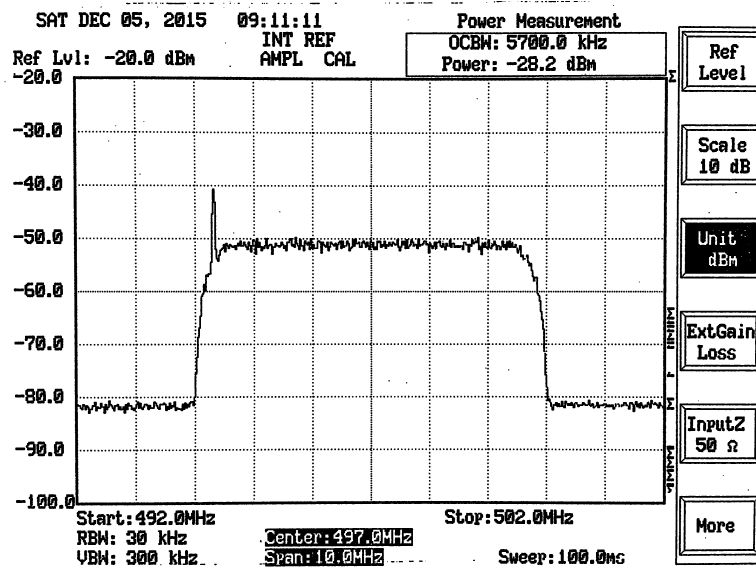


Figura 3.4: Señal ATSC de -28 dBm de potencia generada por el equipo SFE en el canal 18.

Para acoplar la salida del equipo generador con los receptores digitales se utilizó un acoplador de impedancia bidireccional de 50Ω a 75Ω . Las especificaciones del acoplador de impedancias son: PE7071 de la marca PASTERNAK, del cual se especifica una atenuación máxima de 5.7 dB y que opera en frecuencias en el rango de 0-3 GHz. [54]. En principio, la pérdida de potencia debida al acoplador de impedancias no es relevante por dos razones. La primera razón más importante, es que la mayoría de las pruebas en las que se evalúa el desempeño de los receptores es el multitrayecto generado en diversas condiciones, por lo que la sensibilidad de potencia no es tan importante. La segunda, es que conociendo la pérdida ocasionada, este valor se puede incluir en todos los resultados. La figura 3.5 muestra la configuración del equipamiento de medidas utilizada en el laboratorio.

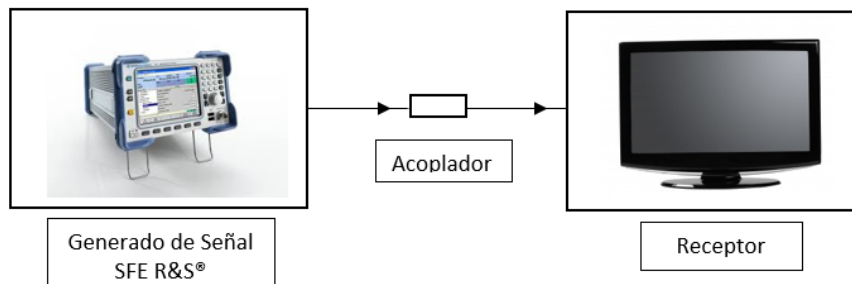


Figura 3.5: Diagrama de configuración de equipamiento utilizado en laboratorio.

3.5. Definición y Objetivos de las Pruebas de Laboratorio

En este apartado se lleva a cabo la selección, definición, nombramiento y orden en las que se desarrollan las pruebas de laboratorio para la evaluación de los receptores digitales ATSC.

Se seleccionó como grupo básico de pruebas de laboratorio aquellas recomendadas por el documento A/74 de ATSC las cuales se relacionan con la sensibilidad y multitrayecto, además se evaluó el umbral de C/N para comparar con el valor indicado en la recomendación A/54 de ATSC.

Otro grupo de pruebas consistió en la definición de aquellas pruebas que simulan el entorno de una red SFN conformada por dos transmisores ATSC y en la cual las configuraciones de multitrayecto se realizaron con los modelos de canal Brasil A, Brasil D, TU6, Pedestrian A y Pedestrian B.

También se definió una prueba en la cual se evalúa el desempeño de los receptores cuando reciben un sólo eco pero desplazado en frecuencia. En la tabla 3.7 se enumera las pruebas seleccionadas:

Prueba	Nombre de la Prueba
1	Sensibilidad
2	Umbral de C/N
3	Tolerancia a un Eco Estático
4	Tolerancia a un Eco Dinámico
5	Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos
6	Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociada a Velocidades de un Avión
7	Respuesta a una SFN de dos Transmisores utilizando el Modelo de Canal Brasil A (Recepción en Exteriores)
8	Respuesta a una SFN de dos Transmisores utilizando el Modelo de Canal Brasil D (Recepción en Interiores)
9	Respuesta a la Recepción Móvil/Portátil
10	Respuesta al Desplazamiento Doppler

Tabla 3.7: Pruebas seleccionadas de Laboratorio para evaluación de los receptores ATSC.

3.5.1. Objetivos Particulares de las Pruebas de Laboratorio

En esta sección se dan a conocer los objetivos de cada una de las pruebas presentadas en la tabla 3.7. Las pruebas 1 y 2 consisten en evaluar el umbral de potencia con el cual se recibe bien la señal digital de ATSC en cada uno de los receptores bajo prueba. De la prueba 3 a la 6 se evalúa el efecto que generan las condiciones de multitrayecto propuestas por la recomendación A/74. En la prueba 7 y 8 se evalúa la recepción de la señal en una red SFN de dos transmisores

con los modelos de canal que representan condiciones de recepción en exteriores e interiores respectivamente. En la prueba 9 se evalúa la recepción de la señal en condiciones de movilidad y por último, en la prueba 10 se evalúa el comportamiento que se tiene en recepción cuando se tiene una señal (eco) desplazada en frecuencia (Frecuencia Doppler) ocasionada por la reflexión de señales en objetos que se encuentran en movimiento.

A continuación, se lista y se explica el objetivo de cada una de las pruebas que se implementaron para la evaluación de los receptores digitales.

1. **Sensibilidad.** Se busca encontrar el nivel mínimo de potencia de la señal con que el receptor es capaz de recibir una señal. Se considera que un receptor ATSC deber ser capaz de demodular correctamente la señal en el rango de -5 dBm a -83 dBm para las bandas de VHF y UHF [47]. El nivel mínimo de potencia de la señal con el cual el receptor recibe correctamente se determina disminuyendo la potencia de la señal de RF hasta encontrar el TOV (Threshold of Visibility, o umbral de visibilidad).
2. **Umbral de C/N.** El objetivo principal de esta prueba es determinar qué tan tolerante es el receptor ante condiciones de ruido y comparar el resultado con el umbral (valor) de C/N indicado en la recomendación A/54 de ATSC [22]. El valor de C/N se determina con 3 niveles diferentes de potencia de la señal, los niveles son denominados como: intenso (-28 dBm), moderado (-53 dBm) y débil (-68 dBm).
3. **Tolerancia a un Eco Estático.** Esta prueba consiste en evaluar la capacidad que tiene el receptor de responder ante un canal de propagación consistente en una señal principal más un eco estático (sin desplazamiento Doppler) y la cual llega con diferentes valores de retardo y amplitud. Esta prueba determina la capacidad que tiene el receptor de decodificar señales eco en situaciones de pre eco y de post eco. En la prueba se le configuró un desplazamiento Doppler de 0.05 Hz a la señal eco para que ésta pueda presentar diferentes desfases con respecto de la señal directa, además se utiliza un nivel de potencia de -28 dBm [47]. Esta prueba es un pilar para determinar la respuesta máxima que tendrá cada uno de los receptores en una situación donde el receptor recibe dos señales de dos transmisores (una señal por cada transmisor) que emiten el mismo contenido y con la misma frecuencia, es decir, en una Red en Frecuencia Única conformada por dos transmisores.
4. **Tolerancia a un Eco Dinámico.** En esta prueba se evalúa el comportamiento del receptor ante un eco dinámico, es decir, un eco con desplazamiento Doppler. En este caso se configura un trayecto principal, y un eco compuesto por dos trayectos a la misma amplitud y el mismo retardo pero con variación de fase, la variación de fase se obtiene mediante la inserción de un desplazamiento Doppler en uno de los dos trayectos.
5. **Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos.** Consiste en evaluar al receptor en condi-

ciones más severas de multitrayecto representado por múltiples ecos dinámicos y definidos en los modelos de canal CRC. Estos modelos representan la recepción de ecos dinámicos en presencia de ruido aleatorio con un nivel de señal en recepción moderado (-53 dBm) [36].

6. ***Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociado a Velocidades de un Avión.*** Debido a que el multitrayecto de la señal afecta a los receptores, los cuales también pueden presentar desplazamiento Doppler generado por la reflexión de la señal en objetos en movimiento, en esta prueba se busca evaluar el efecto que se genera en la recepción cuando las señales presentan desplazamiento Doppler (desde 0 Hz a 150 Hz) ocasionado por las velocidades generadas en el momento de despegue o aterrizaje de un avión. Esta situación se presenta en los receptores cercanos a un aeropuerto.
7. ***Respuesta a una SFN de dos Transmisores utilizando el Modelo de Canal Brasil A (Recepción en Exteriores).*** En esta prueba se evalúa la recepción de señales en una red SFN con dos transmisores, cada transmisor se configura utilizando el modelo de Canal Brasil A. Esta prueba es de gran importancia ya que nos proporciona los valores límite que soportará cada uno de los receptores para demodular la señal correctamente ante una situación más real de recepción (en ambientes exteriores) de la señal que la prueba de Tolerancia a un Eco Estático.
8. ***Respuesta a una SFN de dos Transmisores utilizando el Modelo de Canal Brasil D (Recepción en Interiores).*** En esta prueba se evalúa la recepción de señales en una red SFN con dos transmisores, cada transmisor configurado con el modelo de Canal Brasil D. Esta prueba es de gran importancia ya que nos proporciona los valores límite que soporta cada uno de los receptores para demodular la señal correctamente ante una situación considerada como más real de recepción (en ambientes interiores) de la señal y con multitrayectos más agresivos.
9. ***Respuesta a la Recepción Móvil/Portátil.*** En esta prueba se busca evaluar si el receptor es capaz de recibir la señal en condiciones de movimiento. La evaluación se realiza a través de la simulación con el modelo de canal móvil denominado TU6 y que representa la recepción de señales en un ambiente urbano a una velocidad de movimiento de 50 km/h [51], y también se utilizan los modelos de canal portable Pedestrian A y Pedestrian B los cuales representa recepción de señales cuando el usuario camina de exteriores a interiores de una construcción o viceversa [52].
10. ***Respuesta al Desplazamiento Doppler.*** A pesar de que el receptor se encuentra estático para la recepción de la señal, en su entorno existen obstáculos que pueden estar en movimiento como lo son, por ejemplo, medios de transporte. Este movimiento de objetos genera en la señales un cierto desplazamiento Doppler, el cual depende de la

velocidad en la que se esté moviendo el objeto que la refleja y del canal de frecuencia utilizado en el que se envía la señal. Por lo tanto, se busca evaluar esa condición para 5 velocidades típicas que pueden encontrarse, siendo estas: 3 km/h, 25 km/h, 50 km/h, 120 km/h y 400 km/h.

3.6. Metodología de las Pruebas de Laboratorio

Para la evaluación de los receptores en cada una de las pruebas descritas en la siguiente sección se tomarán las siguientes consideraciones: se considerará que la señal falla con el umbral de visibilidad o TOV por sus siglas en inglés (Threshold of Visibility) y que se determina de forma subjetiva cuando se observan dos errores durante un minuto de reproducción de la señal en cada receptor [55]. La evaluación del umbral TOV en cada receptor se consideró desde un estado óptimo (sin fallas) hasta encontrar el error.

Los canales seleccionados para la evaluación de las pruebas 1 y 2 son: Canal 2 (54 a 60 MHz), Canal 6 (82 a 88 MHz), Canal 12 (204 a 210 MHz), Canal 18 (494 a 500 MHz) y Canal 64 (770 a 776 MHz). La elección de estos canales corresponde a cada una de las bandas de frecuencia atribuidas a México para el servicio de televisión terrestre [56]. Por último, para las pruebas de la 3 a la 10 se designó como canal de prueba el canal 18. Los canales se seleccionaron con base a pruebas realizadas en laboratorio, en donde, utilizando una antena omnidireccional⁴ y un analizador de espectros, se encontró que en algunos canales existían ya transmisiones de televisoras locales. Esta situación llevó a que se buscara aquellos canales en los que no se recibiera algún tipo de señal externa de televisión, para así, poder tener la certeza de que los datos obtenidos en laboratorio no presentarán algún tipo de interferencia externa.

Para las pruebas correspondientes a la recomendación A/74 de ATSC, se usó como guía una nota de aplicación de R&S@SFE [57], del equipo que se seleccionó en las pruebas para genera la señal de ATSC.

Las pruebas correspondientes a la simulación de la recepción de una red SFN de dos transmisores se configuraron con dos grupos de paths con su variación entre atenuación y retardo tal y como se muestra en la tabla 3.8.

Parámetros de Simulación	Modelo de Canal 1						Modelo de Canal 2					
	Path 1-1	Path 1-2	Path 1-3	Path 1-4	Path 1-5	Path 1-6	Path 2-1	Path 2-2	Path 2-3	Path 2-4	Path 2-5	Path 2-6
Atenuación	Valor fijo correspondiente al modelo						Variación de la atenuación de los trayecto hasta encontrar el TOV					
Retardo	Valor fijo correspondiente al modelo						Variación entre grupo de trayectos para determinar el rango de equalización					
Desplazamiento Doppler	Valor fijo correspondiente al modelo						Valor fijo correspondiente al modelo					

Tabla 3.8: Configuración general para la evaluación de una red SFN de dos transmisores.

⁴La medición con antena omnidireccional permitió considerar todas las señales multitrayecto que estarían llegando o recibándose por el receptor.

Capítulo 4

Resultados de las Pruebas de Laboratorio

En éste capítulo se presentan los resultados de la evaluación de los receptores digitales; los resultados obtenidos se presentan en dos apartados. Primero, son los resultados de las pruebas consideradas como base para verificar el funcionamiento de los receptores bajo los lineamientos de la recomendación A/74 de ATSC. El segundo, concentra los resultados de las pruebas que simulan las condiciones que se pueden encontrar en ambientes SFN, sobre todo de multitrayecto. Los resultados de las pruebas ayudarán a establecer los valores óptimos convenientes de implementación y despliegue de redes SFN y que garantizarán el correcto desempeño de los receptores dentro de la misma.

4.1. Resultados de las Pruebas Relacionadas con la Recomendación A/74

Dentro de este apartado se dan a conocer los resultados correspondientes de la evaluación de las pruebas seleccionadas de la recomendación A/74 de ATSC [47], para la comprobación de la prueba de umbral de C/N , se tomaron los valores indicados en la recomendación A/54 de ATSC [22]. Los resultados de las pruebas descritas corresponden a las numeradas desde la prueba 1 hasta la prueba 6 de la Tabla 3.7.

4.1.1. Sensibilidad

En esta prueba, se muestran los valores límite de potencia mínima con que es capaz de recibir y demodular correctamente la señal cada uno de los receptores. Para cada receptor

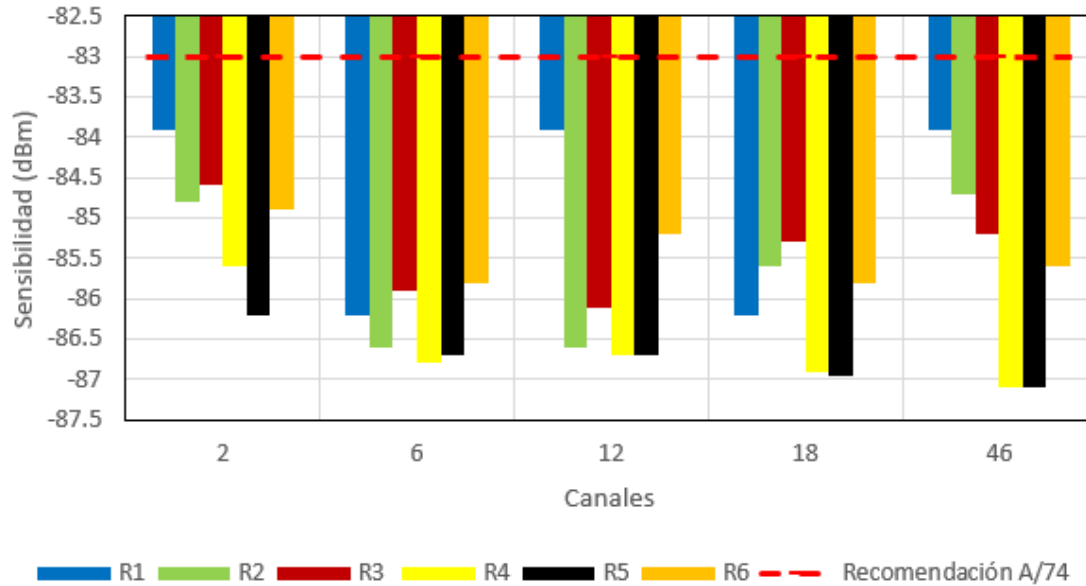


Figura 4.1: Resultados de la prueba de Sensibilidad [dBm] de cada receptor.

bajo prueba se mide el valor límite de sensibilidad para seis diferentes canales de frecuencia, la selección de los canales se realizó en la sección 3.6.

En la figura 4.1 se muestra los resultados de la prueba, se muestran los valores de sensibilidad que presenta cada uno de los receptores en comparación con el valor límite que deberían cumplir conforme a la recomendación A/74. Es posible observar que ese valor se cumple en todos los receptores, ya que todos reciben y demodulan correctamente la señal con una potencia menor a la de -83 dBm, potencia definida en la recomendación y presentada con la línea punteada roja en la figura.

Esta evaluación para cada uno de los canales seleccionados se ha configurado con una señal directa, la cual no contiene multitrayecto, ni ruido.

4.1.2. Umbral de C/N

La evaluación del umbral de C/N corresponde a determinar que la mínima relación portadora a ruido con que cada receptor recibe correctamente está alrededor del valor teórico establecido por la recomendación A/54 de ATSC: 14.9 dB [22].

Para evaluar este umbral se utilizaron tres niveles de potencia de recepción de la señal (niveles: intenso, moderado y débil) y en cada uno de los canales seleccionados: 2, 6, 12, 18 y 46, lo que ayuda a determinar el grado de afectación del ruido conforme la potencia de la señal se va degradando y también, cuando la frecuencia de la señal aumenta.

En la figura 4.2 se muestran los resultados de la evaluación de los receptores para un nivel de potencia de recepción de -28 dBm. Este nivel de potencia es considerado como un nivel de potencia **fuerte/intenso** [46,47]. El umbral de C/N para cinco de los seis receptores, está por debajo del valor recomendado, lo que significa que estos receptores presentan un valor mucho mejor al propuesto, mientras que el receptor R3 presenta una pequeña diferencia por encima del valor recomendado, valor que no afecta en gran medida en la recepción de la señal.

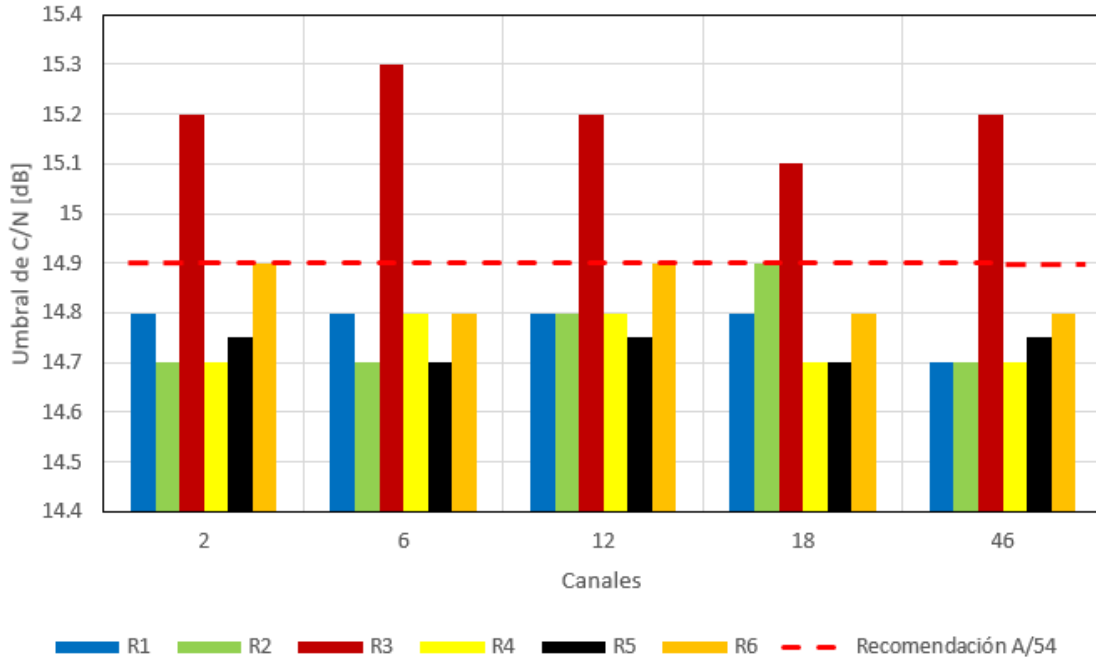


Figura 4.2: Resultados de prueba de Umbral de C/N [dB] con una potencia de recepción intensa, -28 dBm.

Para la figura 4.3, la evaluación se realiza con una potencia de -53 dBm, valor considerado como una potencia **media/moderada** [46,47]. Al igual que sucedió con la potencia fuerte, el ruido sigue sin afectar la recepción de la señal al estar el umbral de C/N de cinco de los seis receptores por debajo de la recomendación. A pesar de que uno de los receptores (R3) presenta un umbral por encima de la recomendación, este valor no es de gran impacto.

Por último, se presenta el umbral de C/N obtenido para un nivel de potencia de recepción **bajo/débil** de -68 dBm [46,47]. En ésta condición se comienza a observar un comportamiento diferente al de las figuras 4.2 y 4.3; sin importar la frecuencia de la señal, el umbral de C/N comienza a estar por encima de la recomendación, debido a que el ruido intrínseco del receptor comienza a afectar la medición por ser un nivel de potencia bajo. Estos resultados son mostrados en la figura 4.4.

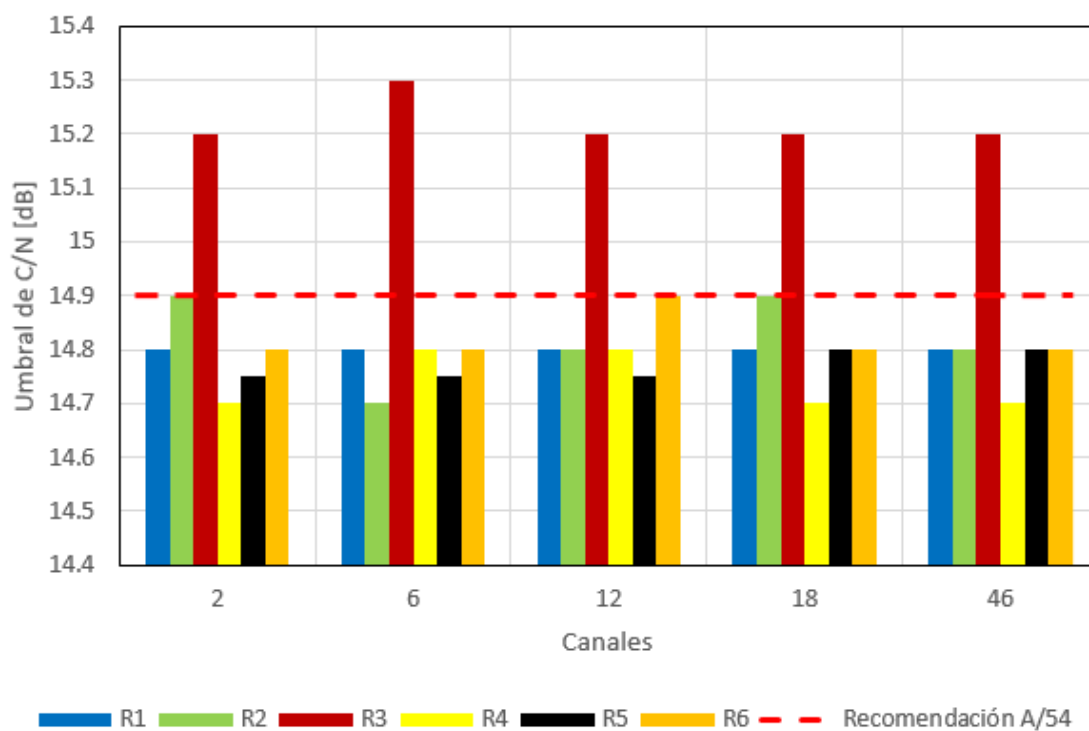


Figura 4.3: Resultados de prueba de Umbral de C/N [dB] con una potencia de recepción moderada, -53 dBm.

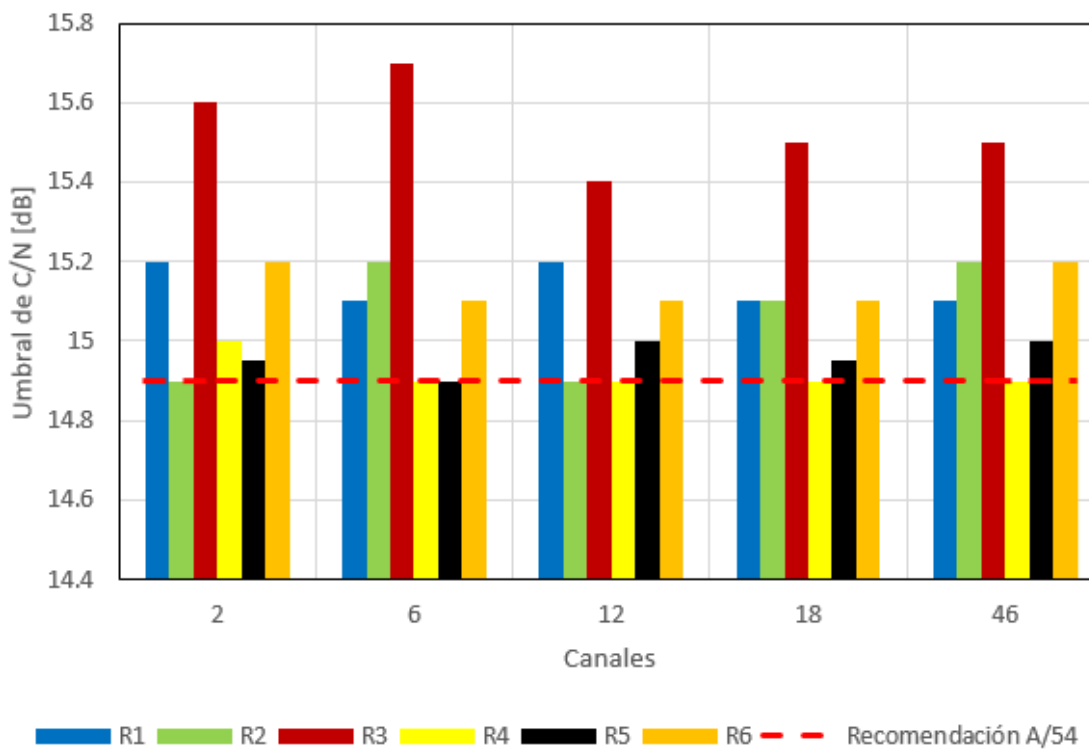


Figura 4.4: Resultados de prueba de Umbral de C/N [dB] con una potencia de recepción débil, -68 dBm.

4.1.3. Tolerancia a un Eco Estático

La prueba de multitrayecto de la recomendación A/74, es fundamental en la evaluación del desempeño de los ecualizadores de los receptores digitales. Con esta prueba es posible determinar la respuesta de un receptor que tiene en función del retardo y amplitud entre una señal directa/principal con respecto a una señal eco.

En la figura 4.5 se muestra la respuesta del ecualizador de cada uno de los receptores. La figura, muestra por medio de una línea los valores límite de recepción de la señal ante la presencia de un eco. Si el eco está por debajo de esos límites, la recepción de la señal se dará sin ningún problema, al contrario, si la relación entre la amplitud de la señal directa/principal con el eco está por encima de esos valores límites para esos valores de retardo, la señal no será demodulada correctamente por el receptor.

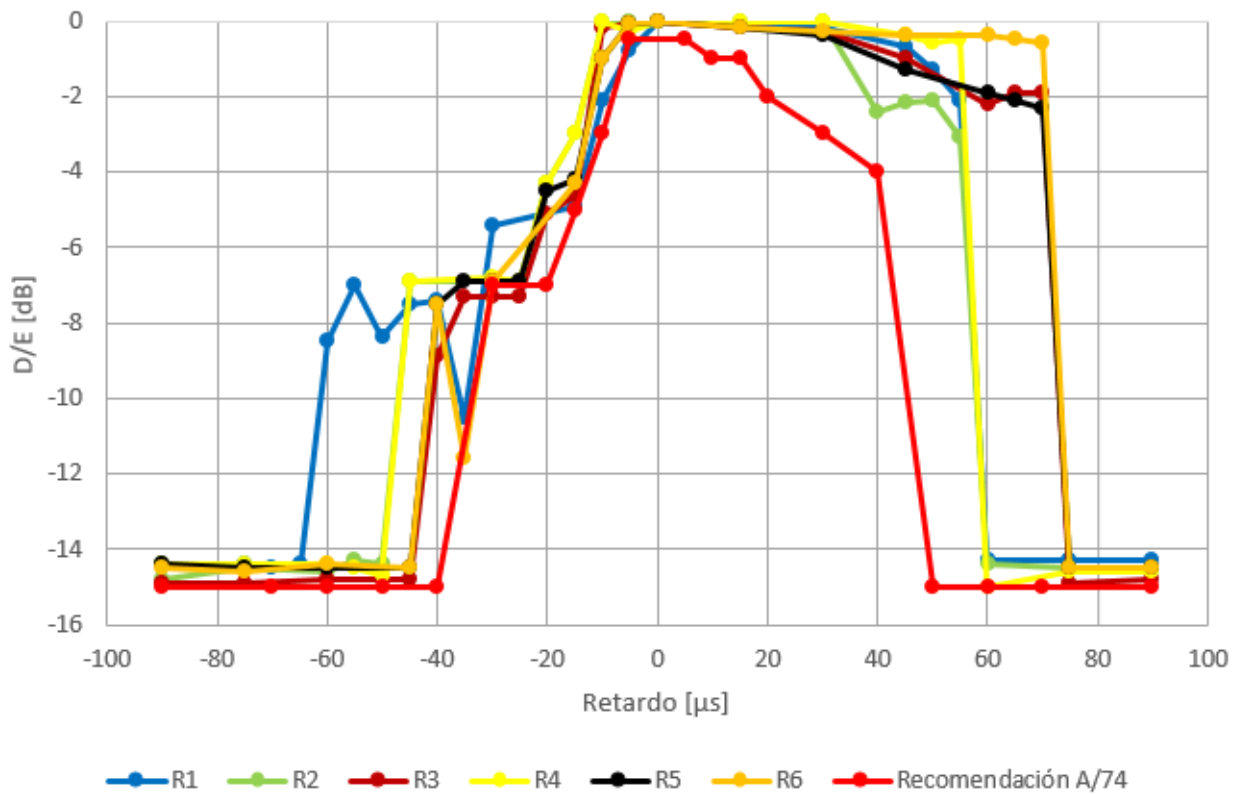


Figura 4.5: Desempeño de los receptores ante un Eco Estático.

Los retardos se representan tomando en cuenta como referencia una señal fuerte de 0 dB de amplitud y a 0 μs . Los retardos positivos corresponden a la recepción posterior del eco a la señal considerada como directa/principal, a ésta situación se le conoce como post-eco, y los retardos negativos corresponden a la recepción del eco antes que la señal directa/principal, ésta condición de recepción es de situaciones de pre-eco. Una situación de post-eco consiste en la recepción primaria de una señal con mayor potencia, y que las subsecuentes lleguen con una

menor potencia. Una situación de pre-eco consiste en la recepción primaria de señales con una potencia menor seguida de una señal con mayor potencia y la cual se toma como referencia. En la prueba se configuró una señal eco a la cual se varía su amplitud al modificar el parámetro Path Loss con relación a una señal de referencia y, el rango de tiempo en que esta señal se adelanta o se atrasa con respecto de la misma fue de $-100 \mu s$ a $100 \mu s$.

Con base en los resultados obtenidos, cada uno de los receptores muestra un mejor desempeño en comparación con lo recomendado con la norma A/74. Con estos resultados se puede comprobar que el desarrollo e implementación tecnológica en los ecualizadores de los receptores fabricados desde el año 2010 en adelante es mayor al desempeño mostrado por los receptores utilizados en la prueba de Eco Estático mencionada en el A/74 de ATSC.

Para al desempeño en post-eco, tres de los receptores tienen un buen desempeño hasta los $70 \mu s$, mientras que los tres restantes lo presentan hasta los $55 \mu s$. Estos valores de retardo representan una mejor relación entre amplitud (aumento en la capacidad de aceptar señales de igual amplitud) y retardo de la señal directa con el eco (D/E^1) de entre $15 \mu s$ como mínimo y de $30 \mu s$ como máximo en comparación con el valor de retardo dado por la recomendación, en donde los valores máximos que puede recibir un receptor en post-eco y demodular correctamente la señal están en $40 \mu s$. Con respecto al desempeño en pre-eco, se presenta un pequeño aumento en la relación de amplitud y retardo ($5 \mu s$) de D/E donde las señales son capaces de llegar al receptor con la misma amplitud con respecto a la recomendación, la cual se especifica un valor en este punto de $10 \mu s$. De manera general, todos los receptores en pre-eco mejoran su desempeño, pero a retardos muy grandes y cuando la relación de amplitud entre la señal eco y la señal directa/principal es mayor o igual a 7 dB, es decir, cuando la señal eco llega muy atenuada al receptor en el rango de $-60 \mu s$ a $-40 \mu s$.

4.1.4. Tolerancia a un Eco Dinámico

Con esta prueba se busca determinar el comportamiento de los receptores cuando un eco varía su amplitud en el tiempo, de forma que puede superar en amplitud al eco principal y comportarse de distinta manera. Esta variabilidad ocasiona que exista un cambio de roles entre la señal directa y el eco, por ejemplo, cuando la potencia del eco logra superar de la señal directa, se presenta un cambio dinámico de una situación de post-eco a una de pre-eco, y viceversa de forma sucesiva. Este cambio de potencia en el eco se debe a la configuración propuesta por la recomendación, en donde dos trayectos que componen el eco, tienen el mismo retardo pero se varía la fase entre ellas, ocasionando así, una variación de potencia al ser sumados esos dos trayectos con diferentes fases.

¹La acotación D/E [dB] de la gráfica hace referencia a Desired/Undesired Echo Ratio, es decir, la relación de amplitud en dB entre la señal deseada y la señal eco.

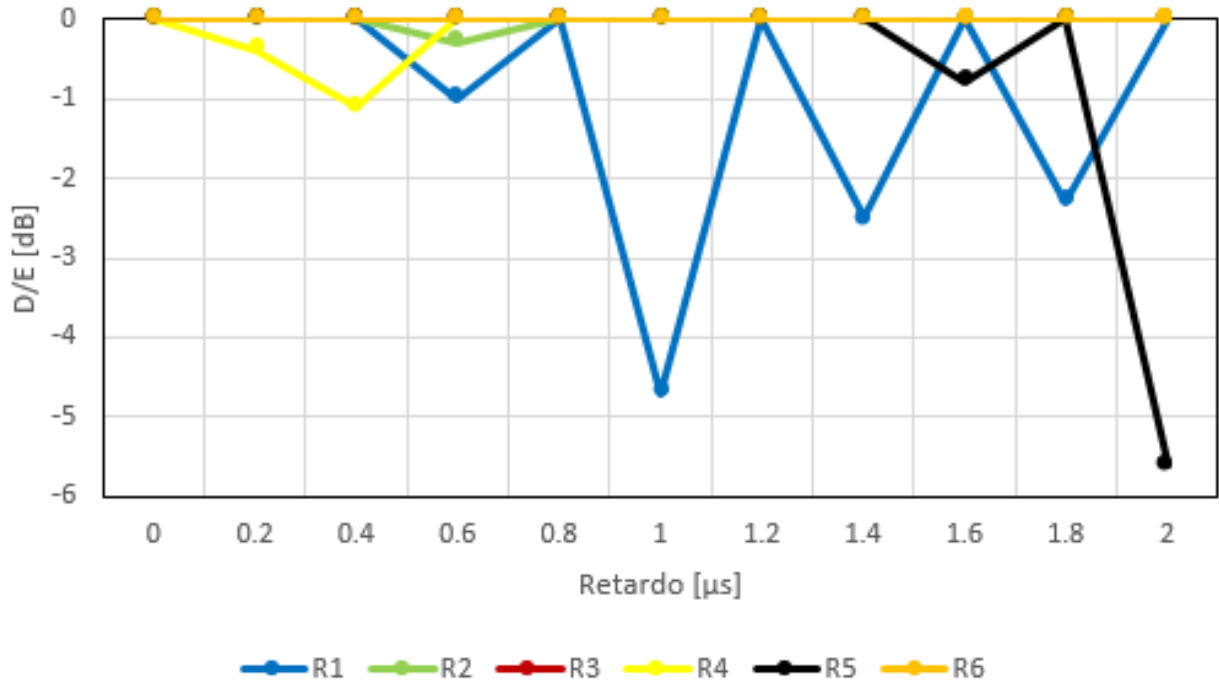


Figura 4.6: Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 0 Hz en un rango de 0-2 μs .

La prueba se realizó para retardos que van desde los 0 μs hasta los 2 μs con saltos de 0.2 μs entre la señal directa y el eco. La variación de fase consistió en configurar un desplazamiento Doppler a uno de los dos trayectos que componen el eco con variación 0.25 Hz en un rango de 0 Hz a 2 Hz. Estos desplazamientos Doppler marcan la velocidad de la variación entre pre-eco y post eco.

En la figura 4.6, 4.7, 4.8, 4.9, y 4.10 se muestra el comportamiento de cada uno de los receptores ante la presencia de un eco dinámico. Como es posible observar en cada una de las figuras, la inestabilidad que causa la presencia del desplazamiento Doppler en alguno de los dos trayectos que conforman el eco, ocasiona variabilidad y una menor tolerancia del receptor a medida que el desplazamiento Doppler del eco aumenta ante una relación de retardo y amplitud en relación con la señal directa alrededor de 6 dB de amplitud que debe tener el eco para lograr una demodulación correcta de la señal.

En el caso de la figura 4.6, es posible observar que la mayoría de los receptores reciben bien ante un desplazamiento Doppler de 0 Hz, no obstante, a partir de que el desplazamiento Doppler comienza a aumentar a 0.5 Hz (figura 4.7), 1 Hz (figura 4.8), 1.5 Hz (figura 4.9) y 2 Hz (figura 4.10), el efecto en recepción comienza a ser muy complicado, tal que, esta situación es muy problemática para la buena demodulación de la señal.

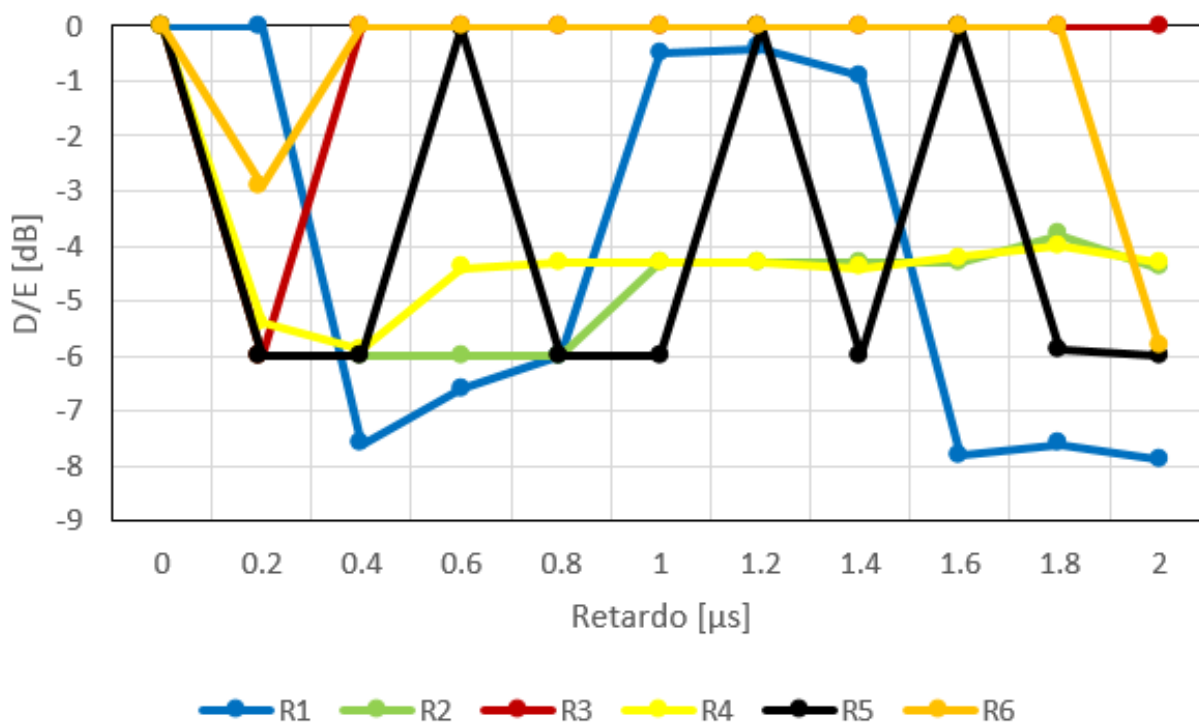


Figura 4.7: Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 0.5 Hz en un rango de 0-2 μ s.

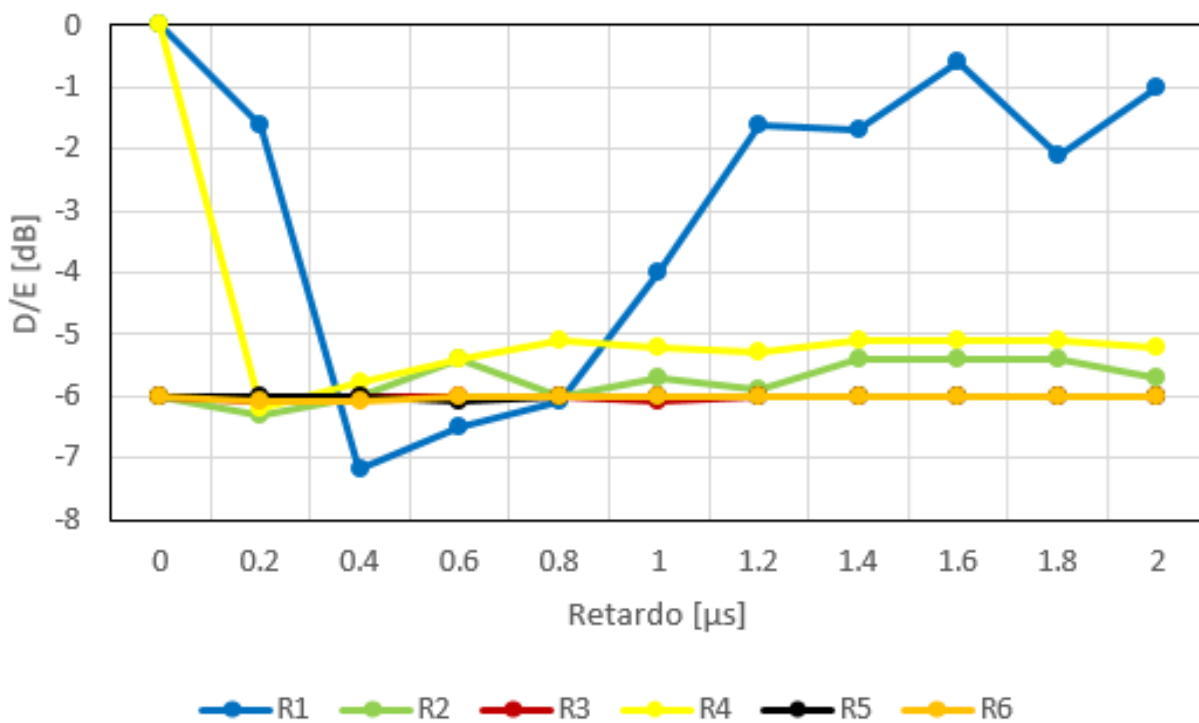


Figura 4.8: Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 1 Hz en un rango de 0-2 μ s.

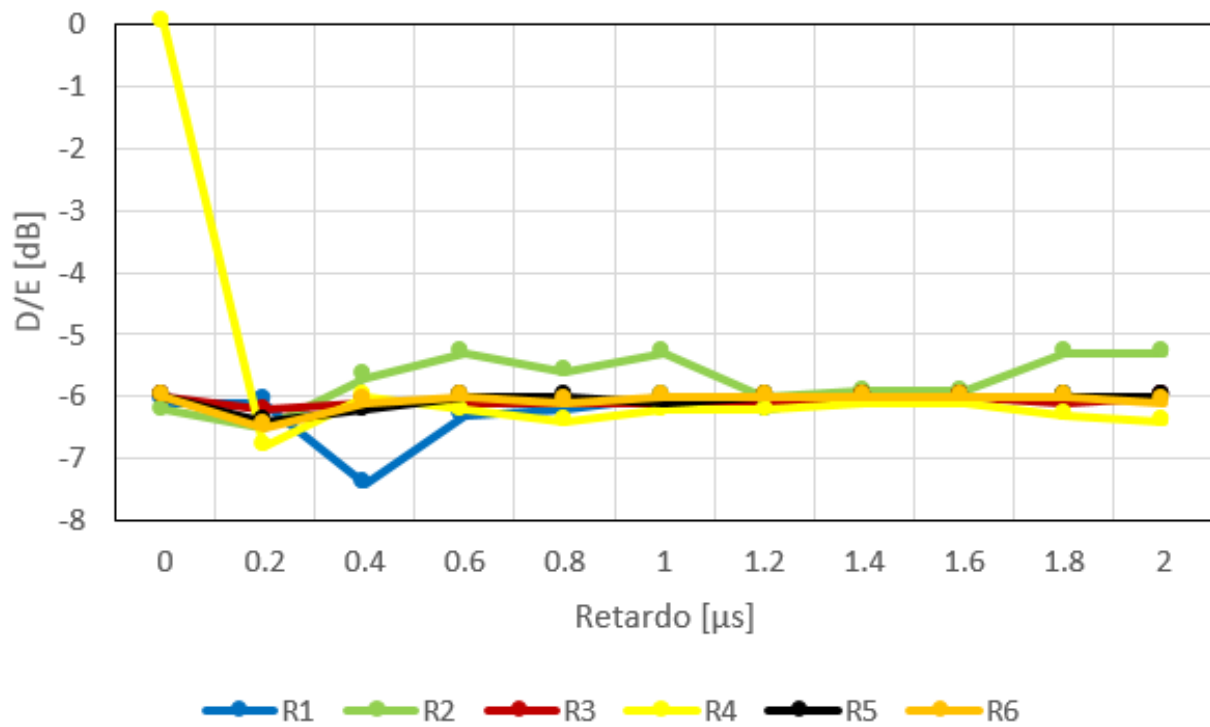


Figura 4.9: Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 1.5 Hz en un rango de 0-2 μ s.

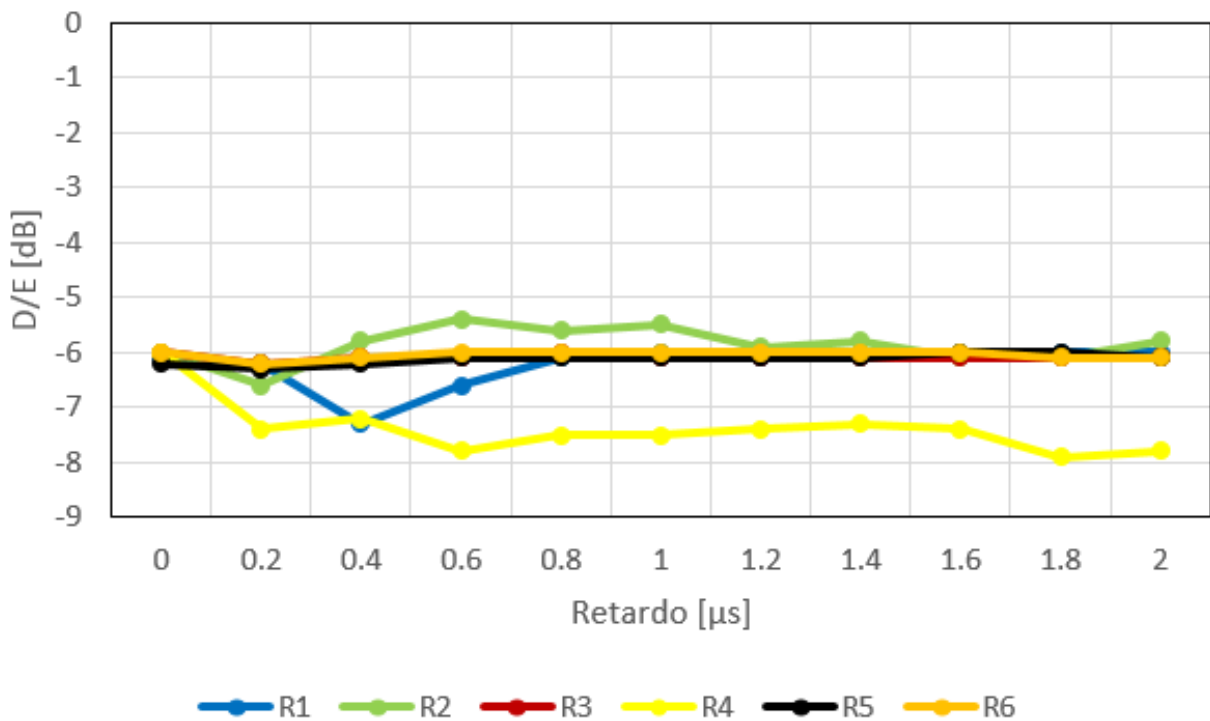


Figura 4.10: Tolerancia entre una señal principal y un Eco Dinámico a 2 Hz en un rango de 0-2 μ s.

4.1.5. Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos

Ésta es la primera prueba de multitrayecto en la que interviene un número mayor de ecos. Las configuraciones corresponden a modelos de canal propuestos por el Centro de Investigación de Comunicaciones (CRC) de Canadá [36].

En la figura 4.11 se muestran los parámetros de configuración del modelo de canal CRC en sus cuatro conjuntos. La variable que existen entre cada uno de los conjuntos consiste en ir disminuyendo la atenuación de los ecos para tener conjuntos con multitrayectos más severos que afecte en la recepción. El parámetro límite de buena recepción se obtuvo al variar la atenuación del path 5 (en todos los conjuntos), y el cual se muestra en cada una de las gráficas que a continuación describen el comportamiento de los receptores.

Conjuntos	Parámetros	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
1	Atenuación (dB)	0	20	20	10	TOV	18
2		0	17	17	7		15
3		0	14	14	4		12
4		0	11	11	1		9
	Retardo (μ s)	0	-1.8	0.15	1.8	5.7	35
	Fase	0	125°	80°	45°	(0-5 Hz)	90°

Figura 4.11: Parámetros de configuración de la prueba de Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos.

La representación de las figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 y 4.17 consiste en comparar cada uno de los conjuntos propuestos por el CRC con los números de conjunto 1, 2, 3 y 4 en el eje horizontal, mientras que en el eje vertical se establece la relación entre la señal directa y el eco (D/E) obtenida en cada prueba para el path 5 cuando éste tiene un valor de fase específico.

De acuerdo a la respuesta obtenida por cada uno de los receptores, se obtiene un comportamiento negativo por parte de dos de los seis receptores probados (R2 y R4), lo que permite aseverar que estos receptores presentan problemas para demodular la señal ante condiciones de multitrayecto más severas, como lo es cuando las señales eco están menos atenuadas con respecto a una señal considerada como principal y, cuando una de las señales eco a la vez que disminuye su atenuación aumenta su desplazamiento Doppler o fase.

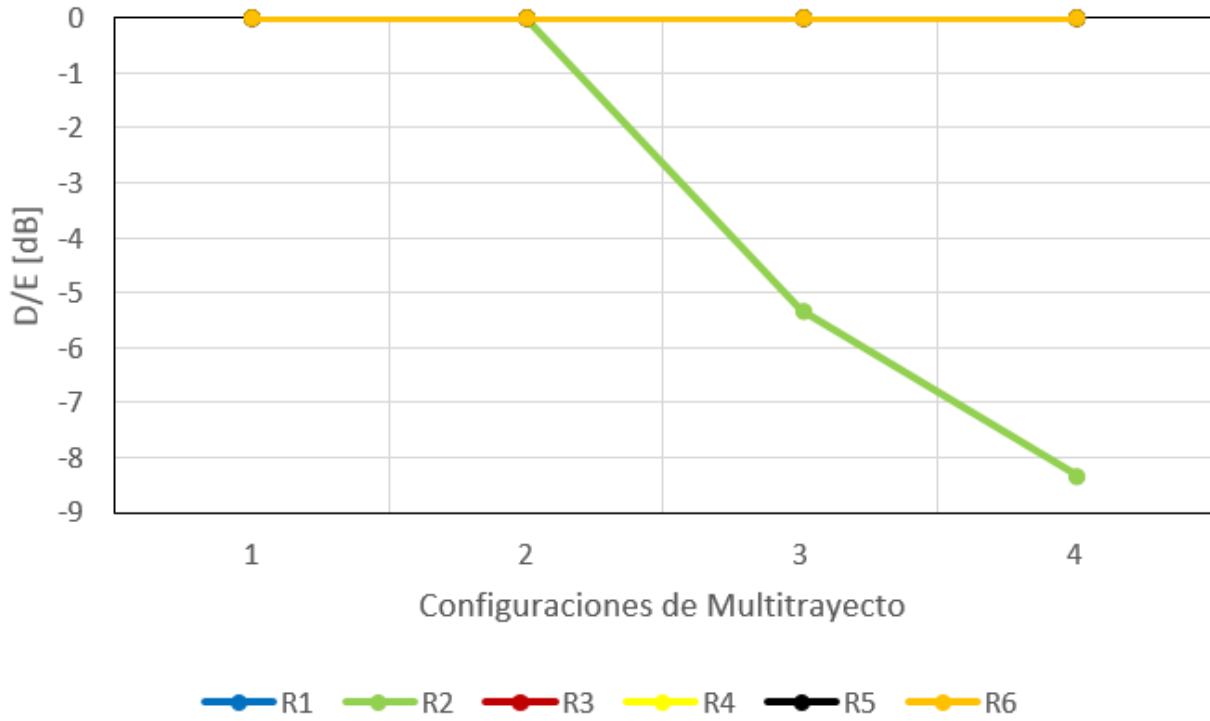


Figura 4.12: Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 0 Hz).

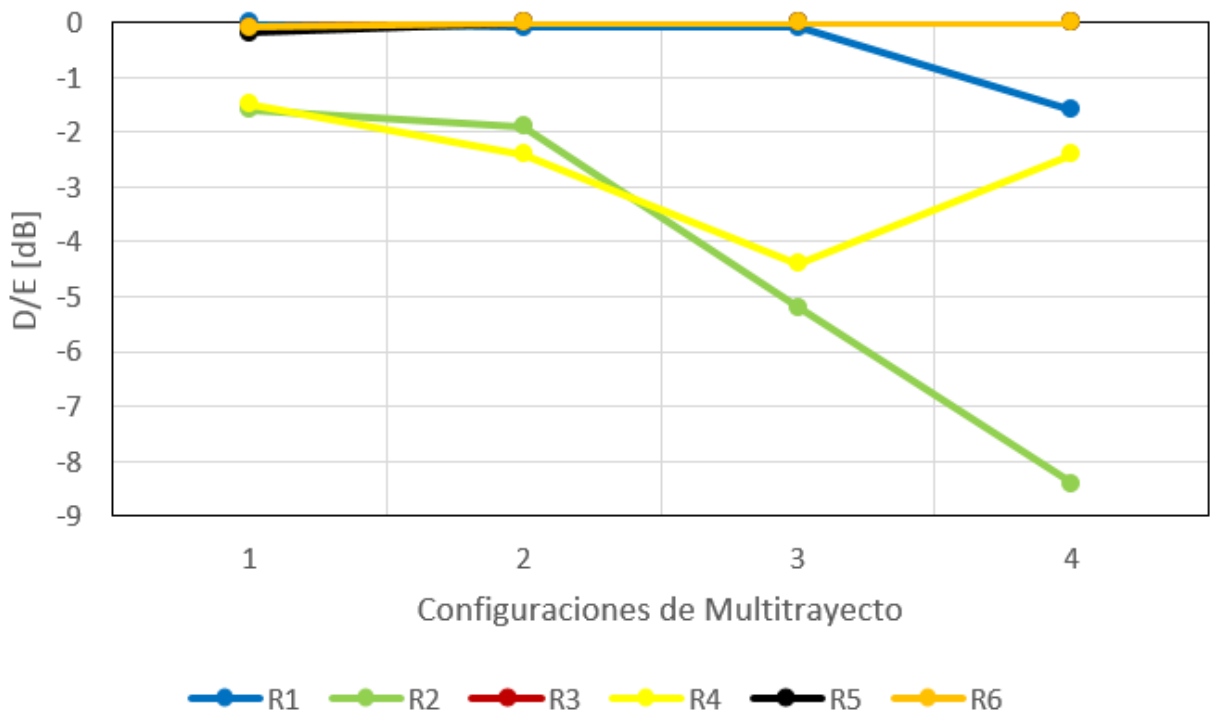


Figura 4.13: Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 1 Hz).

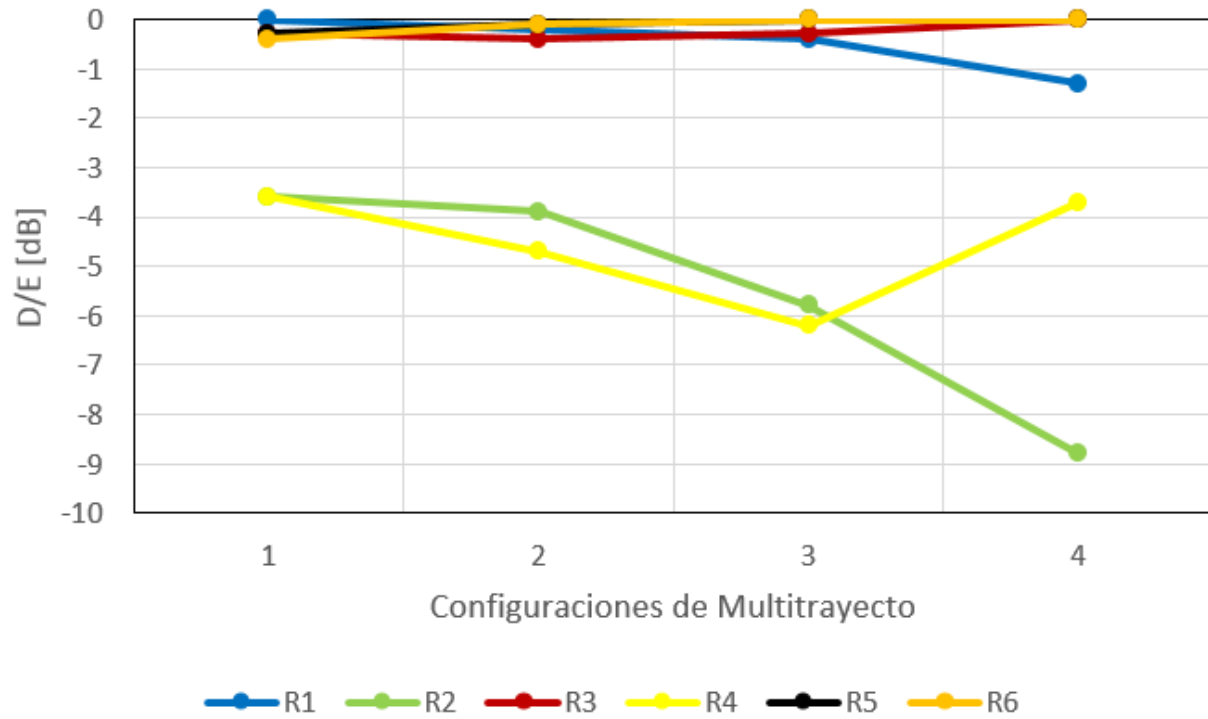


Figura 4.14: Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 2 Hz).

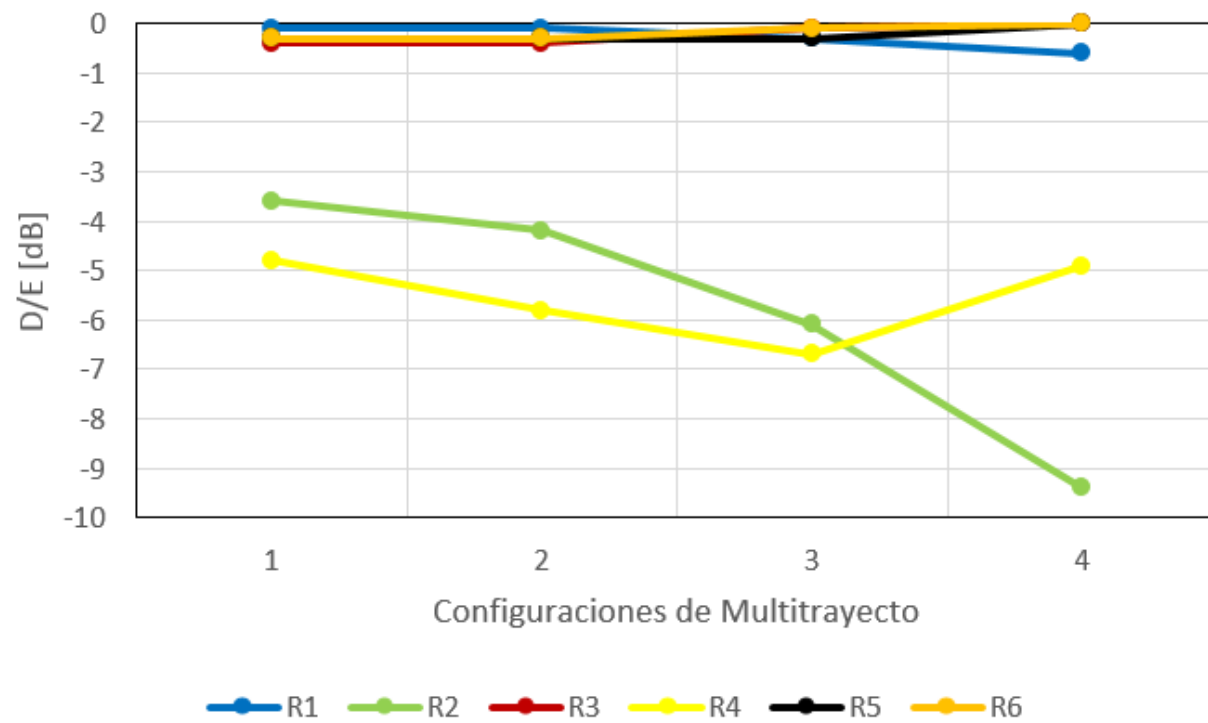


Figura 4.15: Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 3 Hz).

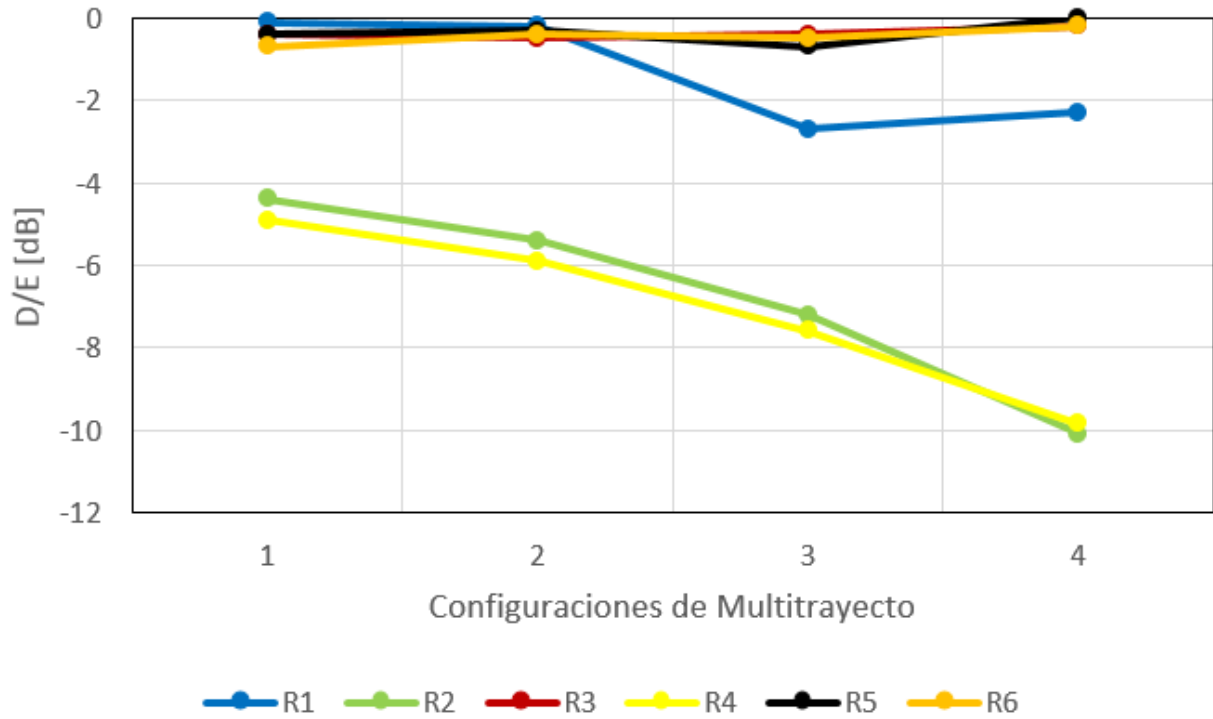


Figura 4.16: Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 4 Hz).

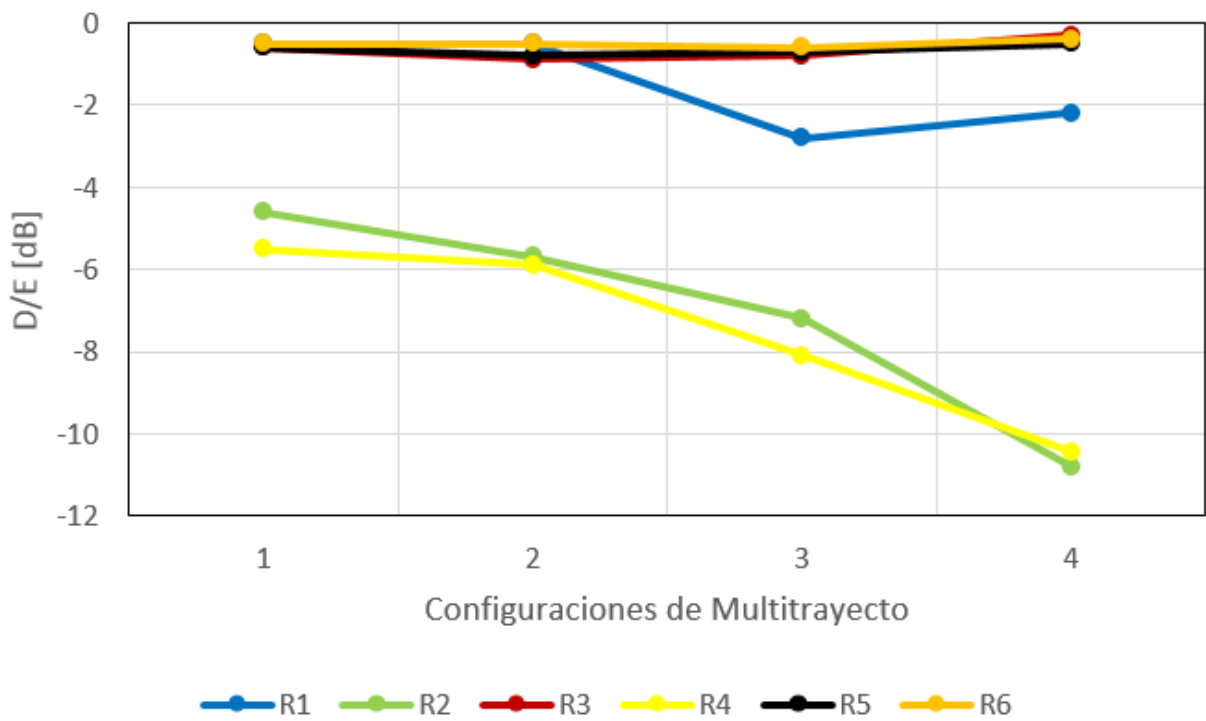


Figura 4.17: Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos (Path 5 a 5 Hz).

4.1.6. Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociado a Velocidades de un Avión

Un efecto que debe estudiarse debido a que dentro de la zona de cobertura en la que las señales se propagan es la presencia de objetos en movimiento como lo son: autos, aviones, trenes, etc. Este efecto consiste en el desfaseamiento de la señal (que rebota) ocasionada por el movimiento de los objetos y que es proporcional a la velocidad de su movimiento, al cual se le conoce como efecto Doppler.

Para recepción fija, uno de los objetos que mayor velocidad de movimiento alcanza actualmente, y que normalmente se encuentra en ciudades grandes como lo son la Ciudad de México, corresponde al despegue o aterrizaje de un avión dentro de un aeropuerto. De tal manera, que en las cercanías de un aeropuerto un avión puede reflejar la señal de DTV provocando un eco con un gran desplazamiento Doppler.

Con ésta prueba se obtiene la respuesta de los receptores, y se determina la relación entre la amplitud de la señal directa y el eco que presenta el desplazamiento Doppler a distintas velocidades. El desempeño de los receptores se plasma en la figura 4.18.

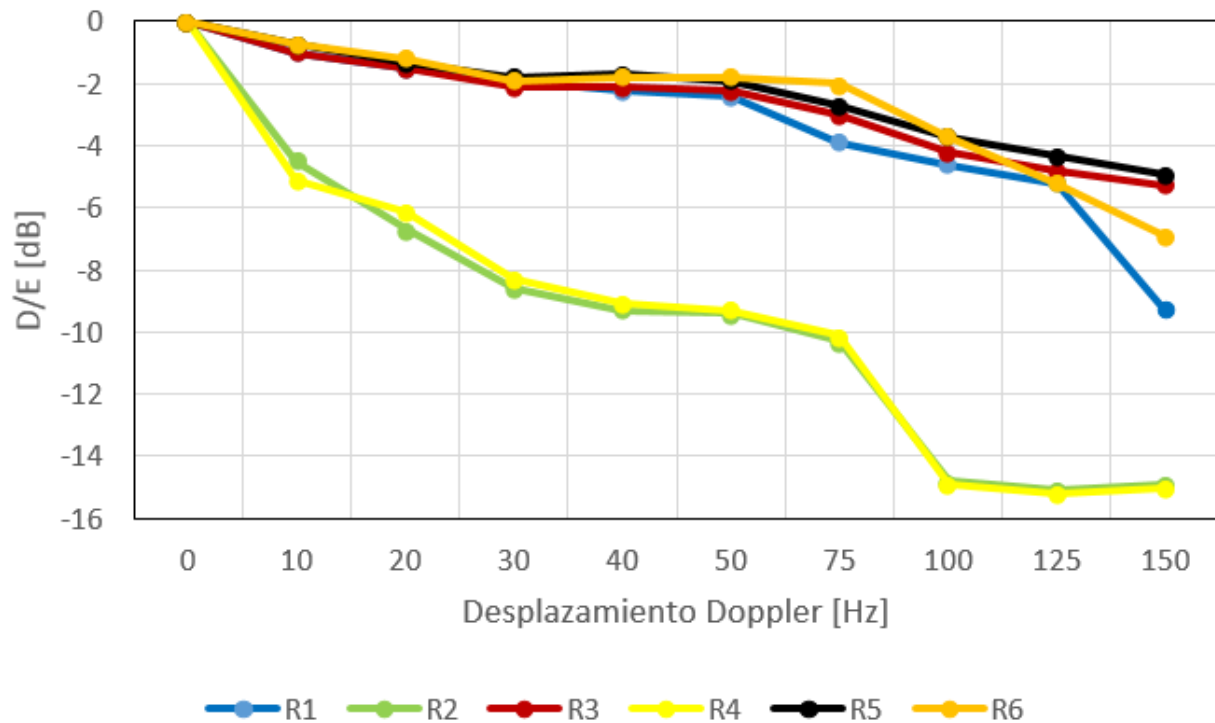


Figura 4.18: Efecto del Desplazamiento Doppler en recepción relacionado a velocidades de un avión.

El efecto que ocasiona que la señal se refleje en un objeto en movimiento, como lo es en

este ejemplo el avión, es que conforme la velocidad del avión aumenta, el eco proveniente del objeto (que a su vez presenta mayor desplazamiento Doppler) debe tener mayor atenuación para que el receptor pueda recibir y demodular correctamente la señal. En la figura 4.18 es posible observar que cuatro de los receptores tienen un comportamiento similar (R1, R3, R5 y R6), mientras que los otros dos (R2 y R4) se ven mayormente afectados por éstas condiciones de recepción.

En la figura 4.19 se muestra la relación que existen entre el desplazamiento Doppler (configurado en el equipo de simulación) y la velocidad correspondiente a el canal de prueba 18, es decir, frecuencia a la que se envió la señal ATSC.

Desplazamiento Doppler (Hz)	Velocidad (Km/h)
0	0
10	21.71
20	43.42
30	65.14
40	86.86
50	108.57
75	162.86
100	217.15
125	271.44
150	325.72

Figura 4.19: Equivalencia entre Desplazamiento Doppler (Hz) y Velocidad (km/h) para una frecuencia de 497 MHz, canal 18 de televisión.

Tomando en cuenta la velocidad de despegue de un avión (la cual depende, entre otras cosas, de su tamaño y peso) llega a estar por debajo de los 400 km/h [58], y con base a las velocidades de la prueba (figura 4.19), se puede observar que la recepción de la señal se torna complicada para cada uno de los receptores, en especial para el R2 y R4. Para los cuatro receptores restantes: R1, R3, R5 y R6, se puede concluir que para velocidades por debajo de los 200 km/h su desempeño es razonable, lo que nos indica que en situaciones de recepción fija en donde las velocidades de los objetos en movimientos están por debajo de los 200 km/h y por ende, ocasionan que el desplazamiento de la señal que rebota sea menor, se logre recibir la señal de ATSC en lugares como avenidas, paso del metro, etc.

4.2. Pruebas de una Red SFN con dos Transmisores

Como se ha mencionado, y como parte de los objetivos principales de esta tesis, se evaluó el comportamiento de los receptores ante condiciones de multitrayecto en una red SFN. Para la evaluación de estas redes, se buscó determinar la respuesta de los receptores tomando como base la prueba de Tolerancia a un Eco Estático, la evaluación se planteó para dos transmisores, una de las mínimas condiciones en el número de transmisores para implementación de una red SFN.

En una red SFN, cada señal de los dos transmisores puede ser considerada por el receptor como señal de multitrayecto, a su vez, cada señal que proviene de un transmisor puede contener su propio multitrayecto, los cuales son señales que llegan con diferente amplitud y retardo al receptor, como lo es en una condición normal de multitrayecto. Por eso, con dos transmisores en una red SFN, se tendrían en el receptor dos grupos de multitrayecto, cada uno generado por la señal que proviene de un transmisor.

La idea en estas pruebas es usar canales de propagación más complejos y realistas que un único eco por transmisor, situación que, de hecho, ya está estudiada con la prueba 3 (Tolerancia a un Eco Estático). Para esta evaluación se llevaron a cabo 3 pruebas dentro de las cuales se evalúan las siguientes condiciones de multitrayecto: recepción en exteriores con el modelo de canal Brasil A, recepción en interiores con el modelo de canal Brasil D y recepción móvil con los modelos de canal TU6, Pedestrian A y Pedestrian B.

La configuración de la red SFN en el equipo transmisor SFE, consistió en utilizar los doce paths de simulación. Esos doce paths son divididos en dos para que los primeros seis paths representen a la señal proveniente de un transmisor con su respectivo modelo de canal, y los otros seis paths representen la señal proveniente del segundo transmisor con el mismo modelo de canal, la única variación entre los dos grupos de paths fue el retardo y la amplitud de un grupo con respecto del otro. El canal de frecuencia utilizado fue el canal 18.

4.2.1. Resultado de una SFN de dos Transmisores para Recepción en Exteriores

Uno de los modos de recepción de la señal de TDT para receptores digitales fijos, consiste en la ubicación de la antena que se utiliza para la recepción de la señal televisiva. Uno de ellos consiste en la recepción de la señal por medio de una antena que es colocada en el exterior, como lo puede ser en el techado de alguna construcción, al encontrarse en el exterior, la antena puede ser apuntada al transmisor (línea de vista), ésta es una situación muy habitual en la Ciudad de México.

Partiendo de que se puede representar por medio del modelo de canal Brasil A este tipo de situaciones (tabla 3.1), en la prueba se evaluaron los seis receptores, para obtener la respuesta del ecualizador de canal, comparar el desempeño de todos ellos para finalmente obtener los valores que delimitan a las redes SFN ante las condiciones descritas.

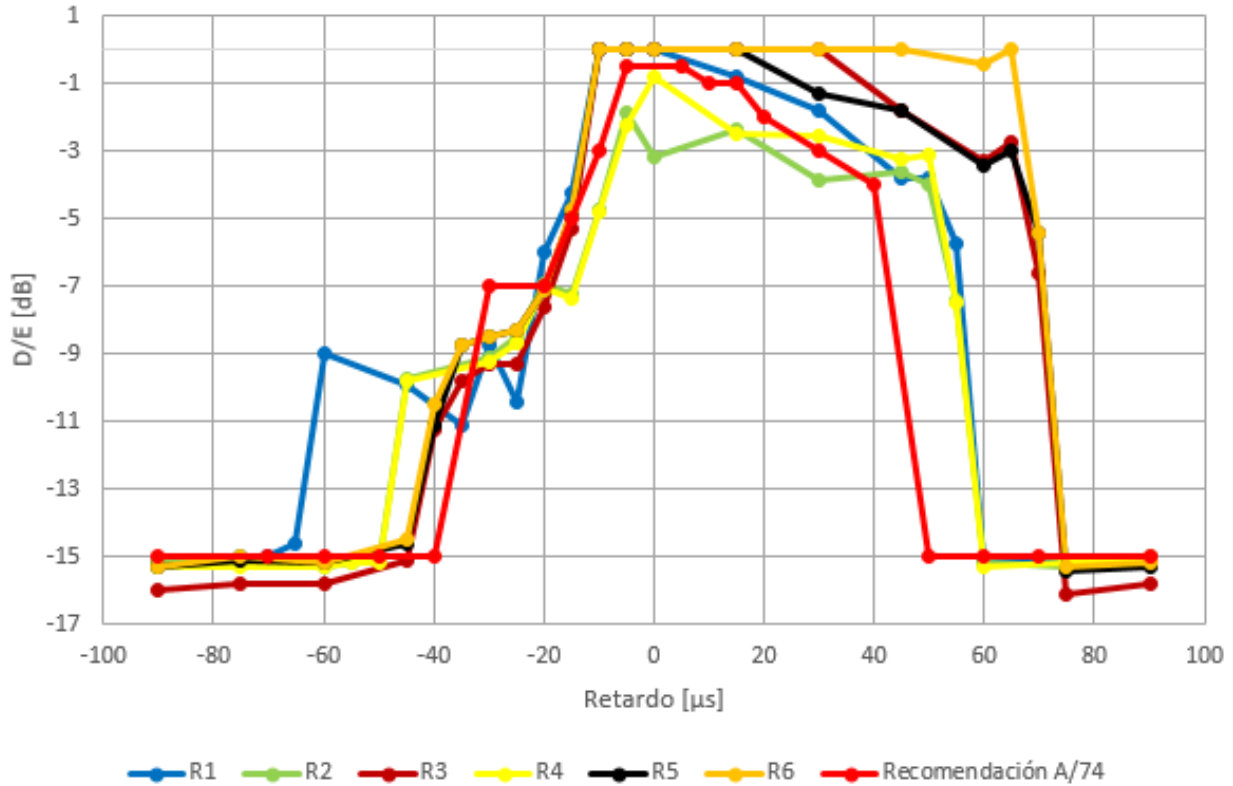


Figura 4.20: Respuesta de los receptores ante una red SFN de dos transmisores y con recepción en exteriores (Multitrayecto de cada transmisor representado por el Modelo de Canal Brasil A).

En la figura 4.20 se muestra el desempeño de los receptores ante la recepción de la señal por medio de una antena colocada en exteriores. Esta figura representa el valor límite de recepción de la señal para la relación entre amplitud y retardo del conjunto de señales del primer transmisor con respecto a las del segundo transmisor, es decir, se representa la recepción del eco más fuerte proveniente de cada transmisor con la influencia de su respectivo multitrayecto.

Para comparar el desempeño de los receptores cuando se recibe una señal del exterior con el desempeño que deben tener los receptores según la recomendación A/74 de ATSC, se colocaron junto con los resultados de los receptores los valores límites propuestos por la recomendación. Partiendo de ésta comparación se puede observar, que dos de los seis receptores evaluados (R2 y R4) presentan una relación D/E menor entre los retardos de $-30 \mu s$ y $30 \mu s$, lo que supondría un déficit en el desempeño de la tecnología de estos dos receptores dentro de una red SFN en donde cada multitrayecto de un transmisor se modela como canal Brasil A.

A pesar de los valores en respuesta de amplitud presentados por los receptores R2 y R4, se obtuvo una mejoría en la recepción por parte de los demás receptores, ya que la amplitud de la señal está por encima de la recomendación. Por otro lado, todos los receptores mantienen su relación de retardo, como se evaluó con la prueba de Tolerancia a un Eco Estático; la mejoría se sigue presentado en la recepción de la señal hasta los $55 \mu\text{s}$ y $70 \mu\text{s}$ de retardo en post-eco mientras que en pre-eco la mejoría como mínimo es de unos $5 \mu\text{s}$ más que la recomendación. Esto indica que la implementación de redes SFN de dos transmisores puede presentar un buen desempeño en los receptores cuando la antena en los mismos presenta línea de vista a alguno de los transmisores que conformen la red.

4.2.2. Resultado de una SFN de dos Transmisores para Recepción en Interiores

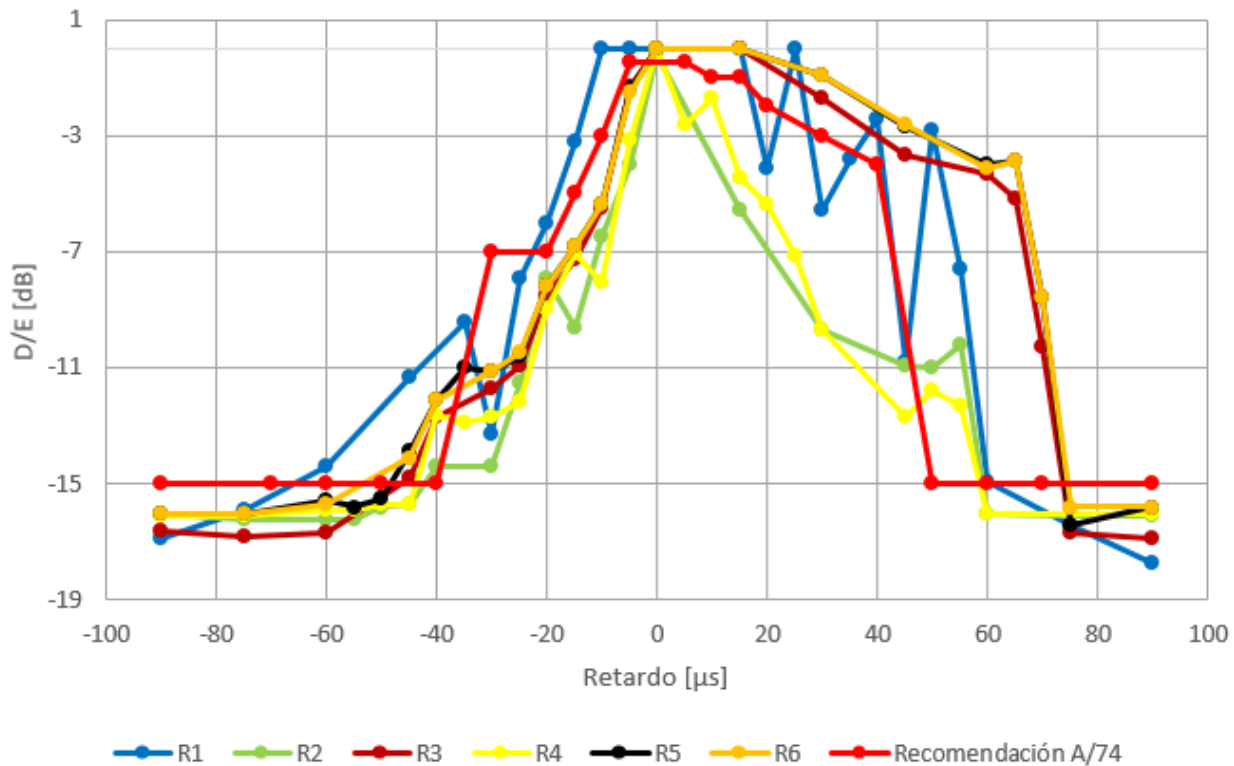


Figura 4.21: Respuesta de los receptores ante una red SFN de dos transmisores y con recepción en interiores (Multitrayecto de cada transmisor representado por el Modelo de Canal Brasil D).

Otro modo de captar la señal digital de televisión es por medio de una antena ubicada en ambientes interiores, como lo es colocada dentro de una construcción, casa, comercio, etc. Las antenas más comúnmente usadas son del tipo dipolo, este tipo de antenas reciben la señal

con sus ecos provenientes de todas las reflexiones ocasionadas por el medio exterior e interior, ocasionando así una recepción más agresiva para el receptor.

La recepción en interiores se puede modelar por medio del modelo de canal Brasil D (tabla 3.2). Los resultados de desempeño de los seis receptores se muestran en la figura 4.21.

Con esta evaluación es posible observar que, comparando la respuesta de cada uno de los receptores con respecto a la respuesta que deben presentar conforme a lo especificado por la recomendación A/74, para post-eco los receptores R1, R2 y R4, presentan graves problemas para la recepción en interiores, mientras que los receptores R3, R5 y R6 siguen por encima de la recomendación al seguir presentando recepción de la señal a los 70 μ s. Para la zona de pre-eco ninguno de los receptores bajo prueba presentó una mejoría comparada con la recomendación A/74, e incluso se puede decir que el desempeño en pre-eco es malo para todos los receptores. De manera general, se puede considerar que la mayoría de los receptores no tendrían problemas para la recepción de la señal en ambientes interiores siempre y cuando se realice un ajuste de retardo a la transmisión de la señal de los transmisores de la red, logrando así, una recepción de señales dentro de este tipo de redes y en ambiente de interior. La recepción de la señal en interiores es factible, siempre y cuando se normalizara el tipo de tecnología de implementación usada en los ecualizadores de canal de los receptores digitales, para que se reciba bien la señal en el total de los receptores.

4.2.3. Respuesta a la Recepción Móvil/Portátil

A pesar de que el estándar A/53 de ATSC ha sido diseñado para la recepción de señales en condiciones fijas o estáticas, es decir, que el receptor no esté en movimiento, se realizó la evaluación de la señal cuando se presenta esta situación porque hay aplicaciones móviles (por ejemplo, la recepción en un autobús) que es susceptible de ser usadas con una señal de DTV de ATSC. Además, uno de los receptores adquiridos es catalogado como portable, por lo que se podría considerar que en este receptor se presenta una mejoría en el desempeño de su tecnología para la recepción de la señal cuando el receptor se encuentra en movimiento.

De los tres modelos de canal que se eligieron para la evaluación de los seis receptores ante condiciones móviles o portables (TU6, Pedestrian A y Pedestrian B), ninguno presentó para los receptores una buena recepción de la señal, con lo que se llegó a la conclusión de que realmente ni con los avances en la tecnología que se ha implementado en los ecualizadores de canal de los receptores más actuales es posible recibir la señal de ATSC bajo condiciones de movilidad.

4.3. Prueba de Respuesta al Desplazamiento Doppler

Como parte de una evaluación más completa a la prueba recomendada por el documento A/74 de ATSC (Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociado a velocidades de un Avión), en donde se evalúa la respuesta del receptor ante el desplazamiento Doppler asociado a velocidades de un avión, en ésta prueba se propone determinar para los seis receptores, una respuesta más completa de todos los receptores ante velocidades de movimiento típicas de humanos, autos, etc., y que generan diferentes condiciones de desplazamiento Doppler que un avión.

Para esta prueba se establecieron 5 velocidades que representan diferentes condiciones de reflexión ocasionadas por el movimiento de algún objeto (auto, tren, avión) o persona. Las velocidades son: 3 km/h, 25 km/h, 50 km/h, 120 km/h y 400 km/h. El canal de frecuencia utilizado en esta prueba fue el canal 18 (494 - 500 MHz), por lo que el desplazamiento Doppler se tomó considerando la frecuencia central del canal, 497 MHz.

Cada una de las pruebas se realizó considerando una señal directa y un eco. En el eco se le configura el desplazamiento Doppler según la velocidad correspondiente a cada caso y también la variación de retardo.

En la figura 4.22, 4.23, 4.24, 4.25, y 4.26, se muestra el desempeño de los receptores ante diferentes condiciones de velocidad. Como es posible observar, a mayor velocidad, los valores límites o de buena de recepción de la señal disminuyen.

De los seis receptores evaluados, dos de ellos (R2 y R4) presentan un significativo impacto negativo ante la recepción de un eco desplazado en frecuencia, como se muestra en cada una de las figuras, mientras que los demás receptores comienzan a presentar problemas para demodular la señal correctamente a velocidades de 120 km/h y 400 km/h. Estos valores de velocidad nos indican las problemáticas que se pueden llegar a tener en aquellos lugares en donde se desee obtener la señal de televisión y se encuentren cerca de una autopista o aeropuerto, en donde, es muy probable la recepción de ecos con desplazamientos en frecuencia asociados a estas velocidades.

Debido al bajo desempeño que ha mostrado el receptor R2 y R4 en comparación con los otros receptores en esta prueba y en otras relacionadas con el efecto del multitrayecto, es recomendable normalizar la tecnología de los receptores que se venden en México, ya que se pueden utilizar las ventajas de la mejor tecnología en recepción disponible en el mercado, como la que se muestra en varios de los casos los demás receptores, permitiendo así aprovechar al máximo la tecnología de televisión digital adquirida en el país.

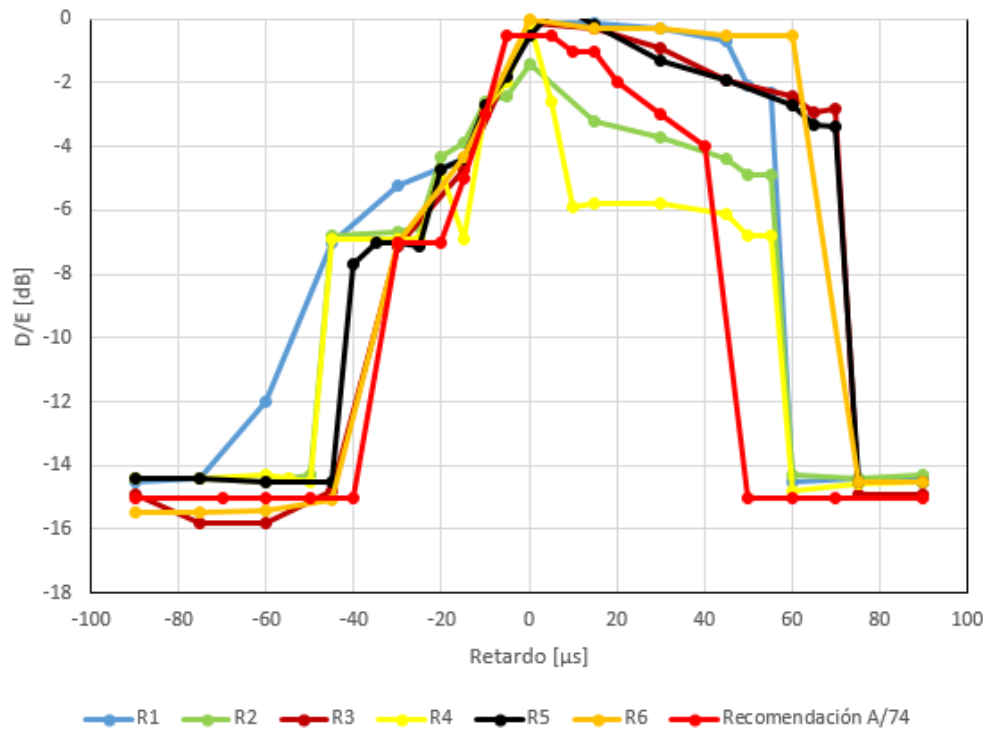


Figura 4.22: Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 3 km/h.

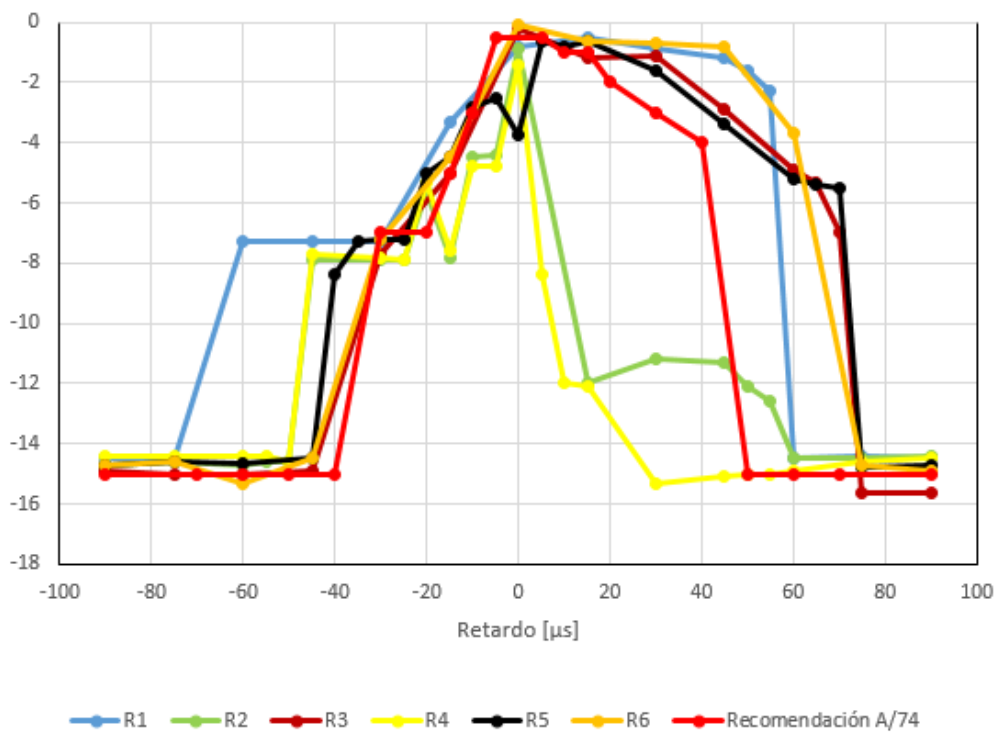


Figura 4.23: Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 25 km/h.

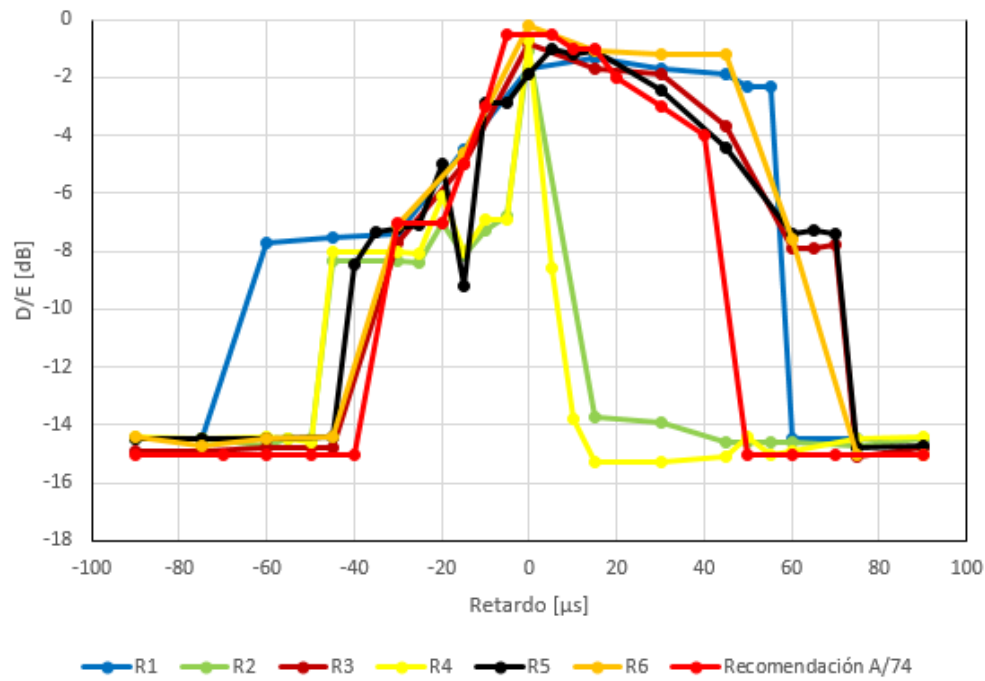


Figura 4.24: Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 50 km/h.

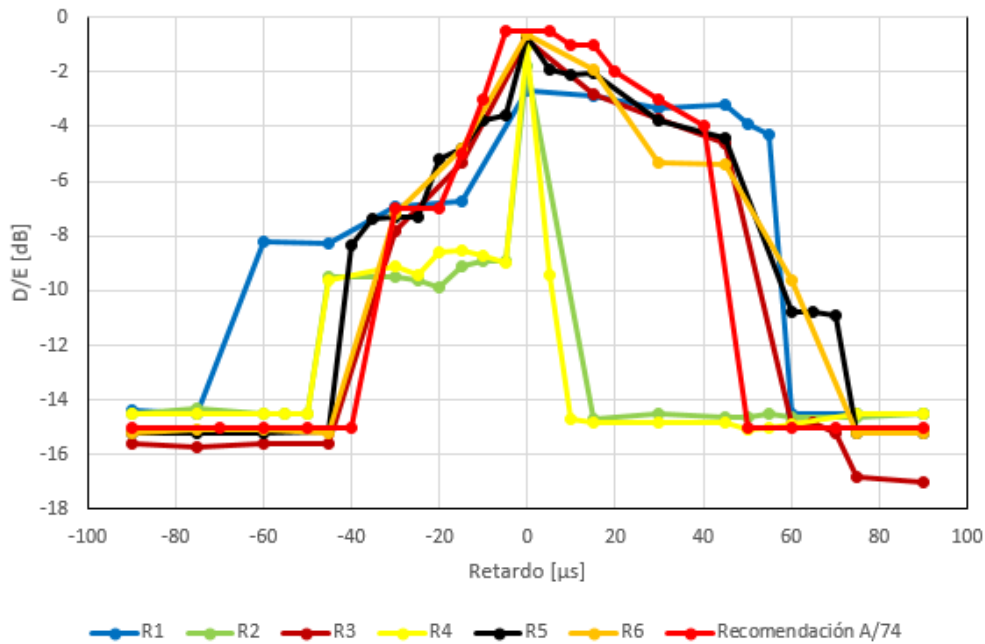


Figura 4.25: Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 120 km/h.

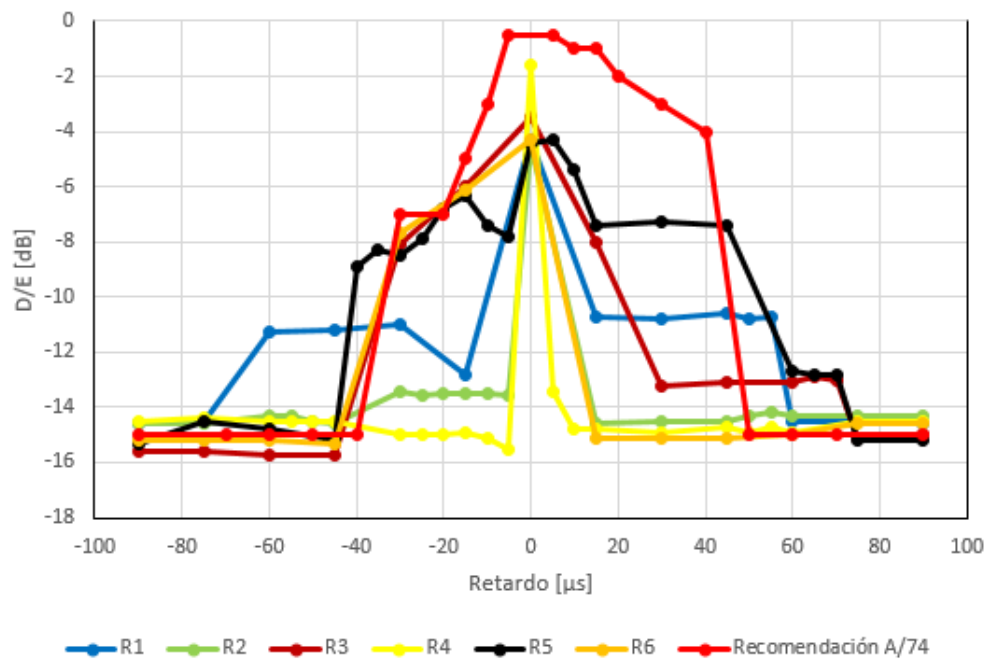


Figura 4.26: Respuesta de los receptores ante un eco desplazado 400 km/h.

Capítulo 5

Conclusiones

En éste último capítulo, se presentan las conclusiones a las cuales se llegó después de obtener los resultados de las pruebas.

De los seis receptores evaluados, el receptor R2 y R4, son los que mayor problema presentaron en la mayoría de las pruebas realizadas, además se observa que su comportamiento llega a ser similar entre ellos, lo que nos puede dar a entender que la tecnología de ecualización de esos dos receptores puede ser similar y demasiado básica, a diferencia de los demás receptores los cuales presentan otro tipo de variaciones pero menos significativas que la de los receptores R2 y R4.

Con base a los objetivos planteados en la tesis y el procedimiento que se llevó a cabo para el desarrollo de las pruebas de laboratorio, en este trabajo:

- Se definió el protocolo de pruebas a realizar, el cual consistió de 10 pruebas dirigidas a evaluar la sensibilidad, umbral de C/N, multitrayecto, el efecto que presenta el desplazamiento Doppler de un eco y la respuesta al multitrayecto de una red SFN de dos transmisores.
- Se seleccionó el equipamiento de laboratorio a utilizar, el cual comprende 6 receptores digitales de diferentes marcas y gamas, y un generador de señal digital ATSC con los requerimientos necesarios para configurar multitrayecto y simular redes SFN.
- Se realizó la comparación del desempeño obtenido de los receptores, por el recomendado por parte de ATSC en el documento A/74. En esta comparación, se obtuvo que todos los receptores cumplen con los umbrales de sensibilidad y C/N al obtenerse valores alrededor de los -83 dBm de sensibilidad y de 14.9 dB de relación de C/N.
- Se obtuvieron nuevos valores límite (donde la señal es demodulada correctamente) de desempeño de los receptores ante diferentes condiciones de multitrayecto: relacionadas al

eco estático y al desplazamiento Doppler.

- También se determinaron los parámetros límite de funcionamiento de una red SFN de dos transmisores para condiciones de recepción en ambientes exteriores e interiores. Se observó que la recepción en interiores es más complicada, debido a que dos de los receptores no cumplen con los parámetros mínimos de respuesta que establece la recomendación A/74 de ATSC, por lo que para el correcto funcionamiento de la mayoría de los receptores dentro de la cobertura de una red SFN, los resultados obtenidos en éstas pruebas supondrían dos cosas: la primera es colocar antenas en el exterior de las construcciones que están direccionadas a uno de los transmisores (se entiende que al direccionarse, la antena es directiva) o segunda, normalizar la tecnología de todos los receptores a aquellos que mejor desempeño presenten para que sea posible la recepción de la señal (sin problemas) en ambientes de interior y que están dentro de la zona de cobertura de una red SFN.

5.1. Valores Límite de Buen Desempeño de los Receptores ATSC

En este apartado se darán a conocer los valores límites recomendados para el buen desempeño de los receptores digitales en recepción fija de la señal ATSC. Los valores recomendados presentados están basados completamente en los resultados obtenidos por las pruebas aquí mencionadas, realizadas en laboratorio, y no significa que se cumpla con el total de los receptores comerciales disponibles en el país en la actualidad, pero los receptores evaluados en las pruebas sí son una muestra representativa del comportamiento adquirido por parte de los usuarios/consumidores.

Algunos de los valores enunciados a continuación no serán cambiados debido a que se han cumplido por lo recomendado por ATSC, por lo que para esos valores seguir esa recomendación oficial es lo más adecuado.

A continuación, se listan los valores que deben seguir cumpliendo los receptores y aquellos nuevos valores que se han presentado y en donde se tiene una buena recepción de la señal ATSC:

- Sensibilidad: -83 dBm .
- Umbral de C/N teórico: 14.9 dB .
- Eco Estático: *Aumento del retardo de por lo menos $15 \mu\text{s}$ en post-eco y de $5 \mu\text{s}$ en pre-eco.*
- Respuesta ante Ecos Dinámicos: *El receptor debe mejorar la condición de su ecualizador para lograr soportar la recepción de la señal ante ecos con ligera variación de fase.*

- Respuesta ante el Desplazamiento Doppler: *El receptor deberá soportar la recepción de señales eco desplazadas con una frecuencia Doppler por debajo de los 100 km/h de velocidad.*
- Recepción en Exteriores: *Los receptores deben mantener la relación de retardos correspondientes al eco estático de la recomendación A/74.*
- Recepción en Interiores: *Los receptores deben mantener la relación de retardos correspondientes al eco estático de la recomendación A/74.*

Las condiciones que se recomiendan (en la lista anterior) son aquellos valores que mostraron el mejor desempeño de los receptores en las diferentes pruebas realizadas.

A continuación, se detalla la explicación del porqué se ha decidido tomar las consideraciones antes mencionadas como el cumplimiento mínimo para un buen desempeño de las señales en recepción para el estándar de televisión digital ATSC y cuando éste se encuentra operando en redes SFN.

1. **Sensibilidad de -83 dBm.** Este valor corresponde al valor mínimo de potencia que debe recibir un receptor para demodular la señal correctamente conforme a lo establecido por la recomendación A/74 de ATSC. Como conclusión de esta prueba se decide tomar este valor como el mínimo debido a que en la evaluación de los receptores, el valor de potencia mínima recibida estuvo dentro de los valores de -87.1 dBm y -83.9 dBm. Debido a que este rango de valores cumple con el valor mínimo de recepción establecido de -83 dBm de la recomendación A/74, es decir, se decide establecer a -83 dBm como el valor que debe seguirse utilizando para la buena recepción de la señal ATSC.
2. **Umbral de C/N de 14.9 dB.** Dentro de la recomendación A/54 de ATSC se establece como umbral de C/N el valor de 14.9 dB. Este valor se decide establecer como la mínima relación portadora a ruido que debe presentar cada receptor, debido a que en la evaluación de esta prueba, se obtuvieron valores en el rango de los 14.7 dB a los 15.2 dB para un nivel de potencia fuerte (-28 dBm), o en el caso de una potencia media (-53 dBm) se presentó un rango de umbral de C/N de 14.8 dB a 15.2 dB. Para el caso de una potencia débil (-68 dBm) el ruido intrínseco del equipo comenzaba a afectar la evaluación por lo que se obtuvieron valores entre los 14.9 dB y los 15.7 dB de umbral de C/N. Los rangos de valores obtenidos presentan en todo momento a el valor teórico establecido por la recomendación, además de presentar una mínima diferencia entre cada uno de ellos, se sugiere seguir utilizando un umbral de C/N de 14.9 dB como parámetro de referencia.
3. **Respuesta al Eco Estático.** La prueba de eco estático es la prueba más importante para determinar el comportamiento que se tiene por parte de los receptores ante la condición de multitrayecto más básica. Esta respuesta delimita el rango de recepción de

la señal ATSC para cada receptor. Ese rango comprende la relación entre amplitud y retardo límite de la señal que se recibe con mayor potencia y la señal eco en la cual se podrá demodular correctamente y observar la señal de televisión digital sin problema.

La respuesta obtenida por cada uno de los receptores ha sido mejor a la respuesta que se presenta en la recomendación A/74 de ATSC. Esta mejora obtenida nos permite comprobar que el tipo de tecnología con la que cuentan los receptores que se están fabricando y comercializando en la actualidad en nuestro país incorporan mejoras, sobre todo en el ecualizador de canal.

Gracias al avance que presenta la respuesta de los receptores, tenemos una mejoría en su relación de retardo en por lo menos $15 \mu\text{s}$ en post-eco y de $5 \mu\text{s}$ en pre-eco. Estos valores pueden ser utilizados para normalizar en un momento dado el desempeño que deben presentar los receptores ante un eco estático y en condiciones de multitrayecto típicas de una red SFN.

4. ***Respuesta ante Ecos Dinámicos.*** Debido a la gran variabilidad que presenta cada uno de los receptores en la pruebas relacionadas a un eco dinámico y a múltiples ecos dinámicos, en donde la recepción de la señal es inestable, y tomando en cuenta de que no se presentan por parte de la recomendación A/74 de ATSC valores previos que puedan ser tomados como guía de desempeño de los receptores ante estas condiciones, se recomienda, con base a los resultados obtenidos, que el desempeño de los receptores ante condiciones de multitrayecto dinámico debe estar más apegado a la respuesta presentada por aquellos receptores que muestran un mejor comportamiento, como lo es en las pruebas de Tolerancia a un Eco Dinámico y Tolerancia a Múltiples Ecos Dinámicos los receptores R1, R3, R5 y R6.
5. ***Respuesta ante el Desplazamiento Doppler.*** Para obtener la respuesta del comportamiento en los receptores se llevó a cabo la evaluación de dos pruebas correspondientes al desplazamiento Doppler. La primera que está basada en una prueba establecida por la recomendación A/74 de ATSC y relacionada a la reflexión de una señal eco en un avión con velocidades típicas de despegue o aterrizaje dentro de un aeropuerto.

La segunda prueba consiste en determinar el efecto en recepción cuando se recibe una señal eco desplazada en frecuencia debido a la reflexión en objetos en movimiento, establecidos por cinco velocidades diferentes.

La primera prueba relacionada a velocidades de despegue o aterrizaje de un avión, permite obtener la respuesta de los receptores ante diferentes cambios de desplazamiento Doppler de la señal eco que rebota. Esta respuesta permite identificar que conforme la velocidad de los objetos aumenta, la recepción de la señal eco se va limitando en potencia, por lo que la respuesta de los receptores se hace cada vez más complicada, no obstante, para

velocidades por debajo de los 200 km/h, la recepción de la señal parece presentar un buen desempeño a excepción de los receptores R2 y R4.

En la otra prueba, en donde se evalúa la recepción de la señal desplazada en frecuencia, debido a la reflexión en objetos en movimiento, con base, a cinco velocidades establecidas, también se obtiene la respuesta de cada uno de los receptores ante dicha configuración. La forma de comparar el buen desempeño de las señales recibidas se basó en la referencia de la recomendación A/74 de ATSC. La respuesta presentada por cuatro de los receptores (R1, R3, R5 y R6) dentro de las primeras tres velocidades de evaluación (3 km/h, 25 km/h y 50 km/h) presentó un buen desempeño en comparación con las otras dos velocidades. La velocidad de 120 km/h es en donde se comienza a ver afectada la recepción de la señal digital para los cuatro receptores mencionados.

Con base a la respuesta obtenida en las dos pruebas mencionadas anteriormente, se obtienen dos conclusiones principales: la primera está relacionada con la máxima velocidad de reflexión del eco en la cual el receptor podría recibir adecuadamente la señal digital, la cual se sugiere a velocidades de objetos que estén por debajo de los 100 km/h. Esta decisión se define debido al comportamiento presentado por cuatro de los seis receptores mencionados en las figuras 4.18, 4.22, 4.23, 4.24, en donde es posible observar el rango de buen funcionamiento y la figura 4.25 que es en donde empiezan a presentar problemas en la recepción. La segunda conclusión consiste en que se pueda normalizar la respuesta de los receptores a aquellos que presentan un mejor desempeño, descartando la utilización de la tecnología presentada por el receptor R2 y R4, y así garantizar la correcta recepción de la señal digital ante condiciones de multitrayecto en donde la señal eco presenta desplazamiento Doppler.

6. **Recepción en Exteriores.** La evaluación con condiciones de multitrayecto en una red SFN de dos transmisores con recepción en exteriores (recepción con una antena colocada en el exterior direccionada a uno de los transmisores de la red) es una prueba fundamental para el estudio del desempeño de los receptores de este tipo de redes con estas característica de recepción, ya que comúnmente las personas colocan antenas en el exterior de sus casas para obtener una mejoría en recepción de la señal televisiva.

La respuesta presentada por la mayoría de los receptores ante la recepción de la señal ATSC en exteriores está por encima de lo recomendado por ATSC, lo que permite en primer momento la implementación de este tipo de redes, obteniendo una configuración apropiada entre retardo y amplitud de las señales que se reciben de los dos transmisores. Este sería el primer paso para llevar a cabo la implementación de este tipo de redes de forma experimental, ya que es posible observar que la tecnología que presentan los receptores en sus ecualizadores de canal lo permiten.

Para poder establecer qué valores deberían cumplir los receptores (amplitud y retardo entre las señales que reciben) ante este tipo de recepción en exteriores, se observa la variación de respuesta entre cada uno de los receptores, y que dos de ellos comienzan a presentar problemas en comparación con lo recomendado por ATSC, por lo que seguir los parámetros básicos de la recomendación A/74 de ATSC es lo fundamental para el despliegue de redes SFN en el país, y más que se ha probado que la tecnología de la mayoría de los receptores utilizados en las pruebas de laboratorio recibe bien.

Ahora, de manera general con la implementación de este tipo de redes (SFN) será posible la optimización del espectro radioeléctrico en zonas tan urbanizadas como lo es la Ciudad de México.

7. **Recepción en Interiores.** La respuesta obtenida por cada uno de los receptores cuando la recepción de la señal se da en interiores (recepción con una antena pequeña o de televisor dentro de una casa, etc.) presenta más limitantes que cuando se recibe con una antena en exteriores. Estas limitaciones se deben a que las condiciones presentadas por el modelo de canal que modela las condiciones de recepción en interiores (Brasil D), plantea la recepción de ecos muy poco atenuados con respecto a la señal principal, ocasionando así, mayor dificultad de recepción correcta de la señal en presencia de ecos con similar nivel de potencia y con diferentes retardos.

A pesar de que la respuesta en interiores se ve más afectada que en exteriores, tres de los seis receptores bajo prueba (R3, R5 y R6) reciben la señal por encima de lo recomendado por ATSC, lo que significa que es posible el tipo de recepción en interiores tomando en cuenta la tecnología empleada por estos tres receptores que logran recibir y demodular correctamente la señal.

Los valores que se recomiendan para la buena recepción de la señal en interiores deben cumplir con la respuesta establecida por la recomendación A/74 de ATSC. Lo más recomendable sería regularizar el tipo de tecnología que utilizan los receptores para la demodulación de la señal ATSC (ecualizador de canal), limitando la implementación de la tecnología que presenta mal funcionamiento y así dejar que la totalidad de los receptores comercializados en el país no presenten problemas cuando la recepción de la señal se dé en ambientes de interior y estando dentro de la cobertura de una red SFN. Implementar este tipo de normas, sería benéfico de beneficio tanto para el despliegue de las redes SFN en el país, como de beneficio para la sociedad, ya que utilizar antenas pequeñas para recibir la señal en los televisores es la forma fácil que el colocar una antena en exterior, o en algunos casos es la solución para aquellos que no tenga la posibilidad de colocar una antena en exteriores debido a la infraestructura de la construcción en la que se desea obtener la señal de televisión digital ATSC.

5.2. Trabajo a Futuro

Como parte de la evaluación del comportamiento de los receptores ante redes SFN, el estudio con más de dos transmisores permitiría definir los valores límites cuando la red sea más grande, comparando así el impacto que se tendría en la recepción, y si ésta variaría mucho con respecto a la obtenida por redes SFN de dos transmisores ante ambientes de exteriores e interiores.

Apéndice A

Contribuciones de la Tesis

Del presente trabajo de investigación se derivan las siguientes publicaciones:

A.1. Publicaciones Internacionales

Título: Parámetros de Desempeño de Receptores ATSC 8-VSB Bajo los Lineamientos de la Recomendación A/74 de ATSC.

Autores: J. Huerta, M. A. Hernández, J.M. Matías, R. A. Zavaleta, A. Ipiña.

Congreso: VII Congreso Internacional de Computación y Telecomunicaciones COMTEL 2015.

Modalidad: Exposición de Artículo.

Fecha: Septiembre de 2015.

Lugar: Lima, Perú.

ISBN: 978-612-4050-88-6.

Título: Planning Laboratory Tests and Field Trials for Evaluating ATSC DTV on SFN networks in Mexico City.

Autores: R. A. Zavaleta, J. Huerta, M. A. Hernández, J. M. Matías.

Congreso: IEEE LATINCOM 2015. 7th IEEE Latin-American Conference on Communications.

Modalidad: Artículo IEEE LATINCOM 2015.

Fecha: Noviembre de 2015.

Lugar: Arequipa, Perú.

Parámetros de Desempeño de Receptores ATSC 8-VSB Bajo los lineamientos de la Recomendación A/74 de ATSC

J. Huerta, M. A. Hernández, J. M. Matías, R. A. Zavaleta, A. Ipiña

j.huerta@comunidad.unam.mx, matias.unam@gmail.com

Universidad Nacional Autónoma de México, México
Av. Universidad No. 3000, Coyoacán, Ciudad Universitaria, 04510
Ciudad de México - México

Resumen: Debido a que en México se concluye la transición de la televisión analógica a la digital a finales del año 2015, estudios sobre televisión digital toman importancia actualmente en este país. En este artículo se presentan los resultados de pruebas de laboratorio de la evaluación de receptores comerciales de televisión digital ATSC disponibles en México en el año 2014. Las pruebas descritas en este documento están basadas en la Recomendación A/74 emitida por ATSC en el año 2010. Además se evaluó la robustez de los receptores con base en el umbral de C/N descrito en el estándar. El desempeño que han mostrado cada uno de los receptores darán los lineamientos básicos de operación para la transmisión de contenido digital en ATSC, así como para implementar Redes en Frecuencia Única en el país.

Abstract: Due that in Mexico the transition from analogue television to digital television will conclude at the end of 2015, digital television studies are becoming important in this country. This paper presents the results of the evaluation in laboratory tests of digital ATSC commercial receivers available in Mexico in 2014. The laboratory tests raised in this paper are based in the ATSC Recommended Practice A/74 published in 2010. Furthermore, the robustness of the receivers based on the C/N threshold described in the standard was evaluated. The performance showed by each receiver will give the operational basic guidelines to implement the digital content transmission in ATSC broadcasting, and also to implement Single Frequency Networks in the country.

Palabras claves: ATSC, Receptores ATSC, Pruebas de Laboratorio, Recomendación A/74 de ATSC, Televisión Digital.

1 Introducción

La televisión en México representa un papel importante en la actual sociedad mexicana, ya que en 2014 en México el 94.9 % de los hogares contaban con un televisor; de ese porcentaje el 80.5% tenían un televisor analógico y el 29.5 % un televisor digital, de acuerdo con datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) [1].

Con la adopción del sistema de televisión digital ATSC (Advanced Television Systems Committee) por parte de la República Mexicana en el 2004 [2] y con la transición de la televisión analógica a la digital que debe concluirse a más tardar el 31 de Diciembre de 2015 [3], se hace más relevante la evaluación de desempeño de los receptores comerciales disponibles en los últimos años. Ello permitirá determinar los lineamientos básicos de operación para la transmisión de contenido digital ATSC, además de evaluar la implementación de Redes en Frecuencia Única.

Uno de los principales problemas a los que se ha enfrentado el sistema de televisión digital ATSC, es el gran efecto que tiene el multitrayecto en la correcta sincronización y desempeño del equipo receptor. Debido a este problema, a lo largo de los años se ha buscado mejorar los ecualizadores de canal de los receptores ATSC, para así lograr demodular la señal ante la presencia de ecos con retardos más prolongados y con mayor amplitud [4-5]. Esto, a su vez, ha permitido la implementación de Redes en Frecuencia Única, como lo indica el estándar A/110 de ATSC [6]. ATSC publicó en el año de 2004 [7] y posteriormente una actualización en

el año 2010 [8], los lineamientos básicos que deberían cumplir los receptores digitales para presentar una buena recepción de la señal ATSC. La recomendación se divide en cinco categorías generales:

- Sensibilidad.
- Solape de Múltiples Señales.
- Ruido de Fase.
- Selectividad.
- Multitrayecto.

El estudio aquí presentado se enfoca al desempeño de los receptores en situaciones de multitrayecto, ya que es éste el problema más relevante y que más depende de la tecnología propia de cada receptor. Por ello, se decidió realizar únicamente las pruebas correspondientes a la sensibilidad y manejo de multitrayecto de la recomendación A/74 de ATSC [8].

El objetivo principal de este artículo es analizar y mostrar los resultados de la condición actual que presenta una muestra de los receptores digitales ATSC vendidos en México, conforme a la recomendación A/74 de ATSC.

El artículo consta de las siguientes secciones. En la Sección 2 se hace referencia a la importancia que ha tenido la evolución de los receptores digitales de televisión digital ATSC. En la Sección 3, se plantean los objetivos de las pruebas que se realizaron a cada uno de los receptores, además del equipamiento utilizado. En la Sección 4 se presentan los resultados obtenidos y por último en la Sección 5 las conclusiones del trabajo.

2 Evolución de Receptores de ATSC

Desde el desarrollo [9] e implementación del estándar de televisión digital ATSC [10], así como de otros sistemas de TDT (Televisión Digital Terrestres) en el mundo, el desempeño y evolución de los receptores digitales ha jugado un papel fundamental para la implementación de los diferentes estándares de televisión digital.

Una limitante importante de los receptores 8-VSB es la incapacidad de recibir la señal de RF ante condiciones severas de multitrayecto. Por lo que el desarrollo de receptores 8-VSB se ha enfocado en mejorar la recepción en dichas condiciones, lo que a su vez ha llevado a desarrollar ecualizadores que permitan la recepción en condiciones cada vez más severas de multitrayecto [11-12].

En todos los estándares de televisión digital se adoptó OFDM como método de modulación, a excepción de ATSC, que emplea 8-VSB. Se han realizado algunos estudios de laboratorio y de campo [13-16] para comparar el desempeño entre el sistema ATSC y el sistema DVB-T (Digital Video Broadcasting), que es el estándar de televisión digital europeo para transmisión terrestre. En general, los resultados muestran que DVB-T tiene una mayor tolerancia a la amplitud y retardo del eco de señal y tiene un mejor desempeño en redes SFN y en recepción móvil. Sin embargo, ATSC requiere una menor C/N ante el multitrayecto.

Una de las ventajas de OFDM es que la recepción es relativamente inmune a la distorsión por multitrayecto, sin embargo, actualmente, el desempeño conseguido con VSB es comparable con el de OFDM en canales con multitrayecto, pese a que el diseño e implementación de los ecualizadores de VSB tienen mayor complejidad [17]. Aunque no hay estudios comparativos entre ATSC y DVB-T2 (la segunda generación de DVB-T, 2008), éste fue diseñado para proveer mayor capacidad, flexibilidad de transmisión y desempeño que DVB-T.

Diferentes pruebas de laboratorio y campo [18-23] se han realizado para determinar la ventana del ecualizador de los receptores digitales 8-VSB, es decir, el rango de retardos y amplitud del eco con respecto a la señal directa en los que logra el receptor demodular la señal ATSC. Además de someter al receptor ante diferentes condiciones de multitrayecto, también se evalúa su sensibilidad de recepción y la mínima relación portadora a ruido con la que se logra demodular la señal (umbral de C/N). Por tal motivo, es importante realizar estudios de calidad a los receptores digitales para obtener sus parámetros básicos de desempeño, y a partir de ellos, estudiar las zonas de cobertura en las cuales un receptor podría ser capaz de recibir correctamente, ante situaciones complicadas de multitrayecto, como lo sería, por ejemplo, una Red en Frecuencia Única.

3 Pruebas de Laboratorio

El objetivo principal de las pruebas de laboratorio que se describe en este artículo, es evaluar la condición actual de los receptores digitales en México, ante escenarios de multitrayecto, para dar paso a la implementación de Redes en Frecuencia Única en el país.

En la recomendación A/74 de ATSC así como en el informe UIT-R BT.2035-2 [24], se dan a conocer las pruebas que deberían realizarse a los receptores ATSC y de TDT en general respectivamente, con el fin de determinar la calidad de cada uno de ellos. De las pruebas recomendadas en el A/74, se determinaron aquellas que proporcionan los parámetros de funcionamiento correspondientes a la respuesta de los receptores ante escenarios de multitrayecto, además de evaluar la sensibilidad y el umbral de C/N de cada uno de los receptores. Entonces las pruebas realizadas a los receptores quedan enumeradas de la siguiente manera:

1. Sensibilidad.
2. Umbral de C/N.
3. Eco Estático.
4. Eco Dinámico.
5. Múltiples Ecos Dinámicos.
6. Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociado al Vuelo de un Avión.

Cada una de las pruebas, a excepción de la prueba 2 que corresponde a la evaluación del cumplimiento del umbral de C/N de la recomendación A/54 de ATSC [25], son pruebas detalladas en la recomendación A/74, donde se recomiendan los lineamientos básicos de desempeño de los receptores para lograr asegurar la buena recepción de la señal digital ATSC [8].

3.1 Equipo Utilizado en las Pruebas

Un factor muy relevante en el estudio es la selección de los receptores comerciales bajo prueba. Las primeras bases de selección fueron que los receptores fueran de diferentes marcas, para así evaluar diferentes tecnologías, y que fueran de diferentes gamas de calidad dentro del mercado (alta, media y baja).

Para conocer la penetración en el mercado mexicano de receptores digitales comerciales se realizaron encuestas en la Ciudad de México que dieron la pauta para determinar qué receptores digitales eran los más usados. A partir de esas encuestas y con base a una evaluación de la Revista del Consumidor [26], que analizó la calidad de diferentes receptores, se eligieron 6 receptores comerciales de diferentes marcas y precio, los cuales corresponden a receptores de gama baja, media y alta. Los receptores serán representados como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Receptores bajo prueba.

Receptor	Pantalla	Gama	Precio (MX)
R1	7"	Baja	\$1000-
R2	19"	Baja	\$4000
R3	32"	Promedio	\$4001-
R4	40"	Promedio	\$9000
R5	42"	Alta	\$9001-
R6	32"	Alta	\$13000

Las características principales de cada uno de los receptores de la Tabla 1 son:

- Rango de recepción: canal 2 (54 a 60 MHz) al canal 69 (800 a 806 MHz).

- Impedancia de entrada: 75 Ω
- Ancho de banda de la señal: 6 MHz
- Modulación de la señal: 8 VSB
- Sistema de Video: MPEG-2
- Sistema de Sonido: AC-3

Todos los receptores bajo prueba son de uso doméstico o comercial. A excepción del receptor R1, que está publicitado para uso vehicular (receptor en movimiento), todos están pensados para recepción estática.

Por otro lado, para generar la señal de televisión digital ATSC se utilizó el equipo R&S®SFE, el cual incluye un generador de ruido AWGN, un simulador de multitrayecto y un generador de contenido. Además se utilizó un acoplador de impedancia bidireccional de 50 Ω a 75 Ω para adaptar la salida del equipo SFE a la entrada de los equipos receptores.

En el siguiente apartado se describe el objetivo de cada una de las pruebas realizadas a los receptores digitales.

3.2 Descripción de las Pruebas

a) Prueba 1. Sensibilidad.

Se busca encontrar el nivel mínimo de potencia de la señal con el que es capaz de recibir el receptor, partiendo de que un receptor ATSC no debería presentar errores en la recepción en el rango de -5 dBm a -83 dBm para las bandas de VHF y UHF [8]. El nivel mínimo de potencia de la señal se determina disminuyendo la potencia de la señal de RF hasta encontrar el TOV (Threshold of Visibility, o umbral de visibilidad) en cada uno de los canales bajo prueba. En la sección 4 se describe el criterio del TOV utilizado en las pruebas.

b) Prueba 2. Umbral de C/N.

El objetivo principal de esta prueba es determinar qué tan tolerante es el receptor digital ante condiciones de ruido y compararlo con el umbral de C/N teórico indicado en la recomendación A/54 de ATSC [25]. El umbral de C/N se evalúa con 3 niveles de potencia de RF, denominados como sigue: intenso (-28 dBm), moderado (-53 dBm) y débil (-68 dBm) [8,10, 24].

c) Prueba 3. Eco Estático.

Esta prueba consiste en evaluar la capacidad que tiene el receptor de responder ante un eco estático a diferentes retardos y amplitudes, lo cual indica la capacidad que tiene de decodificar la señal tanto en situaciones de pre eco como de post eco.

Se configuró un desplazamiento Doppler de 0.05 Hz al eco para que éste pueda presentar diferentes desfases, respecto de la señal directa, además de utilizar un nivel de potencia de -28 dBm [8].

Esta prueba es un pilar para determinar la respuesta que tendría cada uno de los receptores ante una situación ideal de dos transmisores emitiendo el mismo contenido y con la misma frecuencia, es decir, en Redes en Frecuencia Única.

d) Prueba 4. Eco Dinámico.

En esta prueba se evalúa el comportamiento del receptor ante un eco dinámico. En este caso se configura un trayecto principal, y un eco compuesto por dos trayectos a la misma amplitud y el mismo retardo, pero con variación de fase, mediante la inserción de un desplazamiento Doppler en uno de los dos trayectos. El retardo de la señal directa, con respecto al eco, está en un rango de 0 μ s a 2 μ s y dicho desplazamiento Doppler del trayecto está entre 0 Hz a 2 Hz [8].

e) Prueba 5. Múltiples Ecos Dinámicos.

Consiste en evaluar al receptor en condiciones más severas de multitrayecto representado por múltiples ecos dinámicos con base en los modelo de canal CRC [8,10].

f) Prueba 6. Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociado al Vuelo de un Avión.

Debido a que el efecto de multitrayecto que afecta a los receptores también puede presentar desplazamiento Doppler generado por objetos en movimiento, en esta prueba se busca evaluar el efecto que generaría en la recepción el desplazamiento Doppler (0 Hz a 150 Hz) ocasionado por el despegue o aterrizaje de un avión [8].

4 Resultados y Análisis Obtenidos del Desempeño de Receptores ATSC

Para la evaluación de los receptores en cada una de las pruebas antes descritas se tomaron las siguientes consideraciones: el umbral de visibilidad o TOV por sus siglas en inglés (Threshold of Visibility) se determinó al observar dos errores durante un minuto de reproducción del video [27]. La evaluación y determinación del umbral se consideró desde un estado óptimo (sin fallas) hasta encontrar el error en recepción.

Los canales utilizados para la evaluación de la prueba 1 y 2 son: Canal 2 (54 a 60 MHz), Canal 6 (82 a 88 MHz), Canal 12 (204 a 210 MHz), Canal 18 (494 a 500 MHz) y Canal 64 (770 a 776 MHz). La elección de estos canales corresponde a cada una de las bandas de frecuencia atribuidas a México para el servicio de televisión terrestre [28]. Por último, para las pruebas 3, 4, 5 y 6 se designó como canal de prueba el canal 18.

Como apoyo para la implementación de la metodología en cada una de las pruebas se tomó como referencia la nota de aplicación de R&S® para la recomendación A/74 [29], además de la recomendación A/74 ya antes mencionada.

a) Prueba 1. Sensibilidad.

En la figura 1 se muestran los resultados correspondientes a la evaluación de sensibilidad de cada uno de los receptores. Se observa la buena sensibilidad que presenta cada uno de los receptores, dado que todos superan la sensibilidad recomendada por ATSC A/74 (-83 dBm). El receptor que presentó mejor sensibilidad promedio es el R5 con -86.7 dBm, mientras que el que presentó una menor sensibilidad promedio es el receptor R1 con -84.8 dBm. La sensibilidad promedio corresponde al promedio de la sensibilidad de todos los canales de prueba por receptor mencionado.

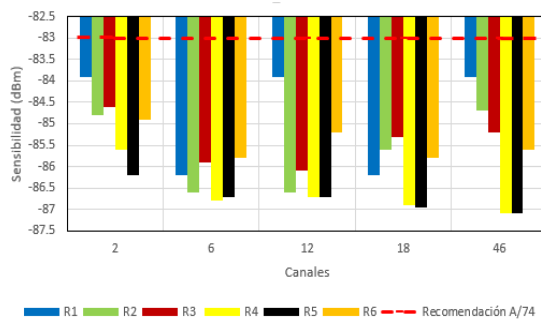


Figura 1. Sensibilidad de los receptores para cada uno de los canales de evaluación.

b) Prueba 2. Umbral de C/N.

En la figura 2 se muestra la relación portadora a ruido obtenida en cada uno de los receptores para un nivel de potencia intenso de -28 dBm. Los umbrales de C/N promedios presentados son el promedio del umbral de C/N de todos los canales por receptor mencionado. El receptor con un mejor umbral de C/N promedio obtenido es el R5 con 14.7 dB mientras que el receptor que presenta un umbral de C/N promedio más alto es el R3 con 15.2 dB, incluso, este valor es superior al recomendado por ATSC.

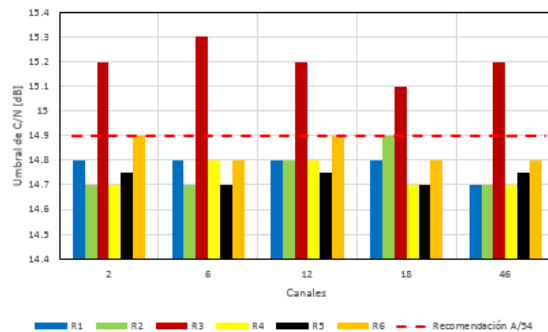


Figura 2. Umbral de C/N para -28 dBm de potencia.

Como se presentó en la descripción de la prueba 2, se realizó la evaluación del umbral de C/N también para las potencias de -53 dBm y -68 dBm. En la figura 3 se presenta el umbral de C/N para un nivel moderado de potencia de -53 dBm. El receptor que presenta un mejor umbral de C/N promedio para este nivel de potencia es el R4 con 14.7 dB, mientras que el que presentó un umbral de C/N promedio más alto fue, nuevamente, el receptor R3 con 15.2 dB. Resultado que también está por encima de la recomendación.

Como se muestra en la figura 4, el umbral de C/N para cada uno de los receptores varía para este nivel de potencia bajo, con respecto a los otros dos niveles de potencia antes mostrados. El receptor que presenta un mejor umbral de C/N promedio es el R4 con 14.9 dB mientras que el que presenta un umbral de C/N más alta es el receptor R3.

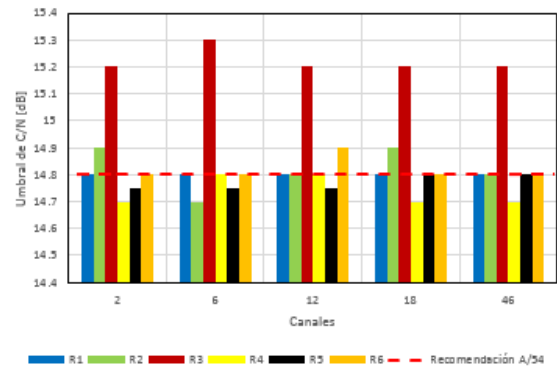


Figura 3. Umbral de C/N para -53 dBm de potencia.

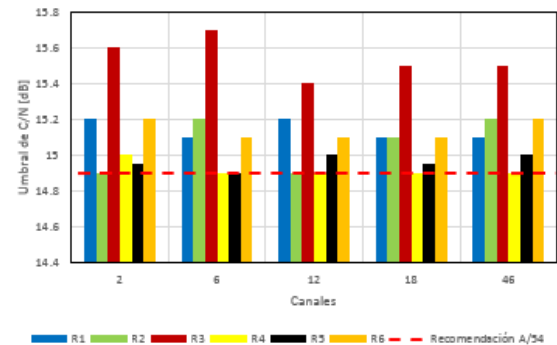


Figura 4. Umbral de C/N para -68 dBm de potencia.

A pesar de que este resultado es peor que la recomendación, en prácticamente todos los receptores, esto no es un problema, ya que en este nivel de potencia (-68 dBm) la C/N ya está influenciada por el ruido intrínseco del receptor.

c) Prueba 3. Eco Estático.

La prueba 3 de Eco Estático es la prueba fundamental de multitrayecto de la recomendación A/74, ya que nos permite determinar la respuesta del ecualizador a diferentes respuestas impulsionales del canal y así obtener su rango de funcionamiento ante diferentes retardos y amplitudes de los ecos de la señal directa. Los valores presentados en la figura 5 representan las condiciones límite, de amplitud y retardo, en las que los receptores son capaces de demodular la señal en condiciones de post eco (retardos positivos) como de pre eco (retardos negativos). En el eje de las abscisas se muestra el retardo del eco con respecto a la señal de referencia (la más potente) y en el eje de las ordenadas se muestra la amplitud relativa del eco con respecto a la señal directa (D/E). Esta prueba da las pautas en las cuales puede operar una Red en Frecuencia Única ideal, lo cual permitirá adecuar los retardos y potencias con los cuales puede transmitir una red de dos transmisores, para que la señal pueda ser demodulada correctamente por los receptores.

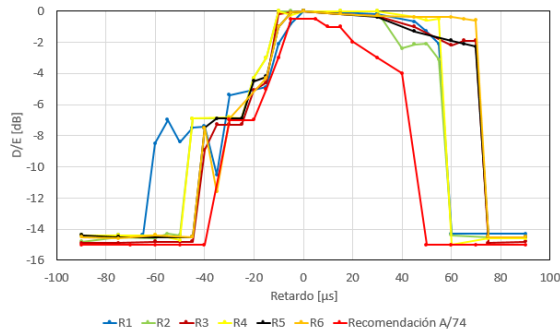


Figura 5. Relación entre retardo y amplitud de la señal directa con el eco de los receptores.

Con base en la figura 5 se puede observar que los ecualizadores de receptores más recientes han aumentado su capacidad de recepción tanto para retardos en post eco como en pre eco, con respecto a la recomendación A/74 de ATSC del año 2010. De los receptores probados, el que mejor respuesta presenta al eco estático en la zona de post eco es el receptor R6 mientras que en la zona de pre eco es el receptor R1. En post eco mejoran más de 15 μ s, el cual es un valor considerable, además de mejorar notablemente la respuesta en amplitud.

d) Prueba 4. Eco Dinámico.

En esta prueba se determina la respuesta de los receptores ante la simulación de un escenario en donde el trayecto principal y el eco pueden invertir sus roles si la potencia del eco es lo suficientemente fuerte. Esta variación se debe a que el eco está conformado con dos trayectos con el mismo retardo entre los cuales hay una variación de fase, lo que ocasiona una variación de amplitud del eco en cada punto de prueba [8]. La respuesta a la amplitud del eco de los receptores para desplazamientos Doppler correspondientes a 0 Hz, 0.5 Hz, 1 Hz, 1.5 Hz y 2 Hz, se muestra en las figuras 6 a 10 a diferentes retardos del eco.

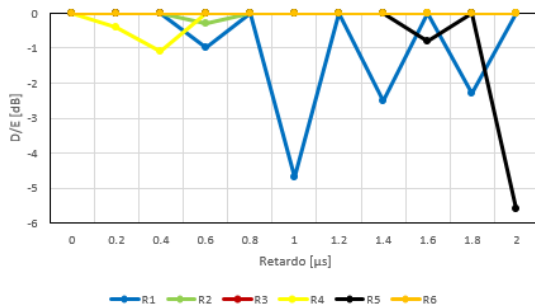


Figura 6. Respuesta ante un Eco Dinámico a 0 Hz.

La respuesta de los receptores ante un eco dinámico ocasiona diferentes variaciones en la relación de amplitud de la señal directa con el eco al ir variando el desplazamiento Doppler del eco y el retardo de la señal directa con respecto al eco. Para cada uno de los receptores se presenta gran variación a partir de los 0.5 Hz de desplazamiento Doppler en la amplitud de la relación de la señal directa con el eco, hasta comenzar a presentar una tendencia a los 2 Hz con una caída aproximada de 6 dB por debajo de la señal directa.

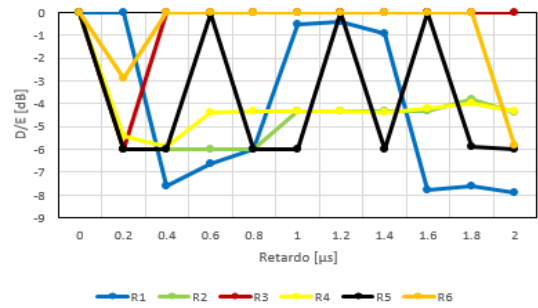


Figura 7. Respuesta ante un Eco Dinámico a 0.5 Hz.

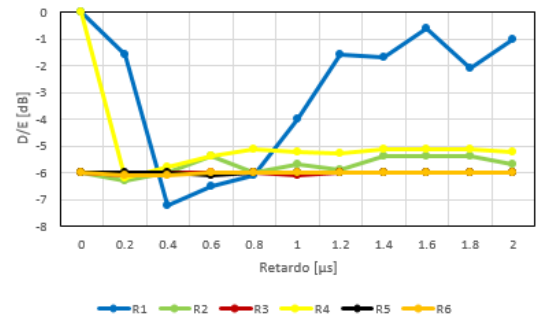


Figura 8. Respuesta ante un Eco Dinámico a 1 Hz.

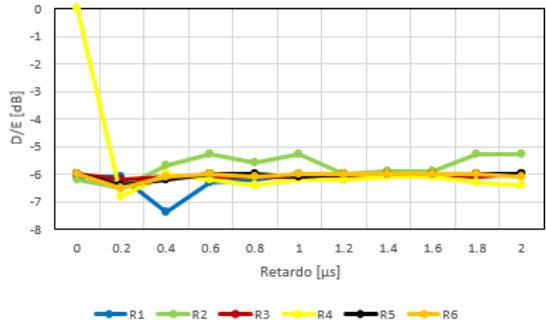


Figura 9. Respuesta ante un Eco Dinámico a 1.5 Hz.

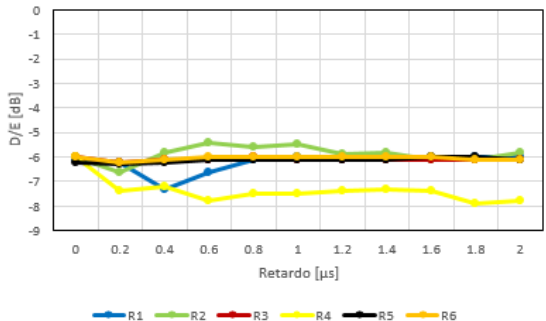


Figura 10. Respuesta ante un Eco Dinámico a 2 Hz.

e) Prueba 5. Múltiples Ecos Dinámicos.

Diferentes conjuntos de multitrayecto, conformados por varios ecos cada uno, son probados en cada uno de los receptores en esta prueba. El principal objetivo es determinar el comportamiento de los receptores ante condiciones más severas de multitrayecto, con variaciones

en el desplazamiento Doppler de uno de sus ecos. Las configuraciones de los ecos están definidas en la recomendación A/74, en la figura 11 se muestra un ejemplo en donde se detalla la configuración de un conjunto multitrayecto conformado por 6 ecos.

Ensemble		Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
Relative attenuation (dB)	#1	0	20	20	10		18
	#2	0	17	17	7	Varied to reach TOV	15
	#3	0	14	14	4		12
	#4	0	11	11	1		9
Delay (µsec)		0	-1.80	0.15	1.80	5.70	35.0
Phase or Doppler		0	125°	80°	45°	Variable (0 – 5 Hz)	90°

Figura 11. Definición de Conjuntos [8].

En las figuras 12 a 17 se observa que los receptores R2 y R4 son los más afectados por estas condiciones de multitrayecto descritas en la recomendación A/74, mientras que los receptores R4, R5 y R6 presentan un comportamiento muy similar entre ellos, esto es, sin muchas variaciones al ir aumentando el desplazamiento Doppler de uno de los ecos y ante conjuntos con condiciones de multitrayecto más severas.

f) Prueba 6. Respuesta al Desplazamiento Doppler Asociado al Vuelo de un Avión.

En la figura 18 se muestra para el canal 18 (494 a 500 MHz) la respuesta del ecualizador de cada uno de los receptores ante diferentes condiciones de desplazamiento Doppler. A mayor desplazamiento Doppler la relación entre la señal directa y el eco (D/E) va aumentando, esto nos indica que el desplazamiento Doppler ocasionado por objetos en movimiento (en este caso un avión) sí afecta a la recepción de la señal ATSC, como lo presentan los resultados de esta simulación. La respuesta del ecualizador del receptor R5 muestra un mejor desempeño ante un mayor desplazamiento Doppler, es decir, una caída de 4.9 dB para una velocidad de 325.72 km/h, mientras que la respuesta del ecualizador del receptor R4 tiene un gran impacto negativo ante cualquier desplazamiento Doppler, por ejemplo, con una caída de 15 dB para una velocidad de 325.72 km/h. En la Tabla 2 se muestra la relación entre velocidad y desplazamiento Doppler.

Tabla 2. Equivalencia entre Velocidad y Desplazamiento Doppler para el canal 18 ($f_c=497$ MHz).

Desplazamiento Doppler (Hz)	Velocidad (Km/h)
0	0
10	21.71
20	43.42
30	65.14
40	86.86
50	108.57
75	162.86
100	217.15
125	271.44
150	325.72

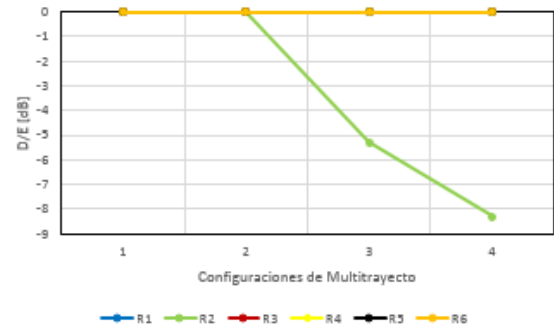


Figura 12. Respuesta de Múltiples Ecos Dinámicos a 0 Hz.

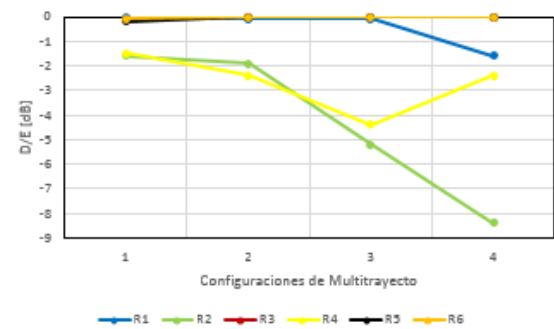


Figura 13. Respuesta de Múltiples Ecos Dinámicos a 1 Hz.

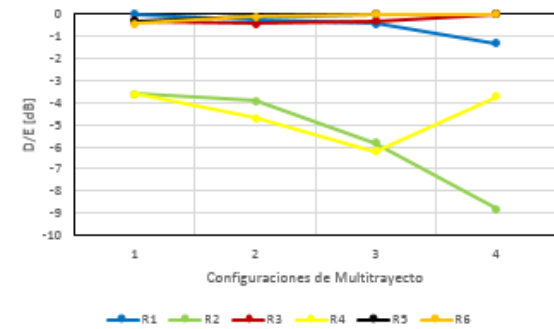


Figura 14. Respuesta de Múltiples Ecos Dinámicos a 2 Hz.

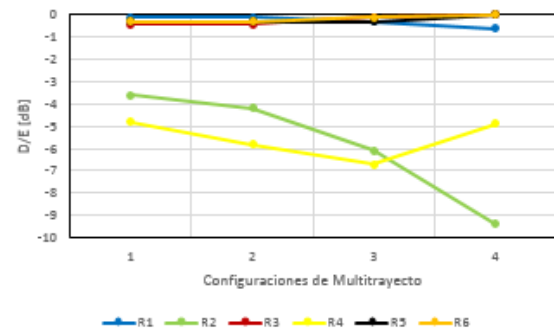


Figura 15. Respuesta de Múltiples Ecos Dinámicos a 3 Hz.

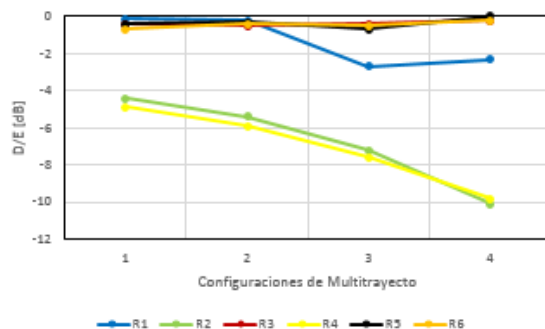


Figura 16. Respuesta de Múltiples Ecos Dinámicos a 4 Hz.

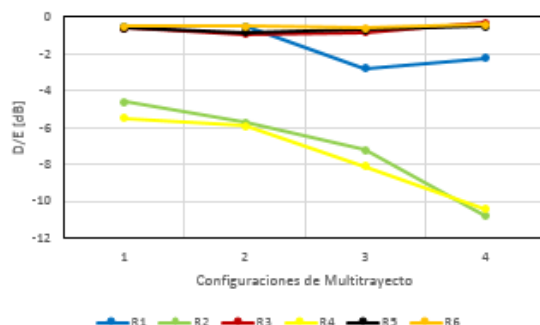


Figura 17. Respuesta de Múltiples Ecos Dinámicos a 5 Hz.

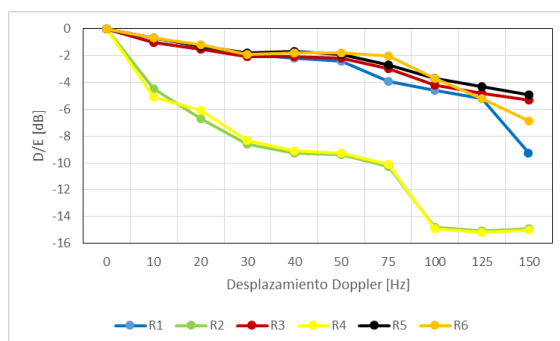


Figura 18. Respuesta del ecualizador ante diferentes desplazamientos Doppler utilizando el canal 18.

5 Conclusiones

En general, el desempeño de los receptores comerciales disponibles en México en la actualidad, está representado por medio de los resultados obtenidos en las pruebas realizadas a 6 receptores digitales ATSC. Con estos resultados se puede determinar que el avance tecnológico de los receptores sigue siendo fundamental para el buen desempeño de la televisión digital terrestre con el estándar ATSC.

De las pruebas realizadas con base en la recomendación A/74 de ATSC, y de sus resultados se concluye lo siguiente:

- El desempeño de los receptores ante condiciones estáticas o cuasi estática, de recepción cumple

con lo recomendado por ATSC, principalmente en la sensibilidad y la tolerancia a un eco estático. Además de que muestra un avance significativo con respecto a lo recomendado, tal y como se ha demostrado en las pruebas 1 a 3.

- La prueba 3 representa un avance significativo en la tecnología ATSC, ya que ahora se cuenta con receptores capaces de recibir señales con mayor amplitud y retardo.
- El efecto del desplazamiento Doppler en la señal recibida o en alguno de sus ecos, ocasionado por la reflexión de la señal en objetos en movimiento, genera un impacto negativo en la recepción, a través de una reducción en la tolerancia al multitrayecto de la señal ATSC.

Los resultados obtenidos serán la base para estudios posteriores de desarrollo e implementación de Redes en Frecuencia Única para el estándar A/53 de ATSC en México.

Por otro lado, las pruebas realizadas dan la base y conocimiento para futuras pruebas que puedan realizarse con el estándar móvil de ATSC, ATSC M/H, o la siguiente generación de ATSC, ATSC 3.0

6 Agradecimientos

Este trabajo se realizó dentro del Proyecto REFUTV. Proyecto apoyado por el Fondo Institucional del CONACYT. Proyecto conjunto CONACYT-CDTI N° 189235. Este proyecto se realiza gracias a la colaboración de EGATEL S.L., TELBOR S.A. de C.V y la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Referencias bibliográficas

- [1] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, INEGI 2015. <http://www.inegi.org.mx/>.
- [2] Diario Oficial de la Federación. Art. 4 y 5: Acuerdo por el que se Adopta el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre y se Establece la Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre en México. México, 2 de Julio 2004.
- [3] Diario Oficial de la Federación. Art IV: Política para la Transición Digital Terrestre. México, 11 de Septiembre de 2014.
- [4] Xianbin Wang, Yiyan Wu, G. Gagnon, Bin Tian, Kechu Yi, and J.-Y. Chouinard. A Hybrid Domain Block Equalizer for Single-Carrier Modulated Systems. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 54(1):91–99, March 2008.
- [5] Yanjie Peng, A.G. Klein, and Xinming Huang. Hybrid DFSF-BP Equalization for ATSC DTV Receivers. In *Circuits and Systems (ISCAS), 2014 IEEE International Symposium on*, pages 1712–1715, June 2014.
- [6] Advanced Television Systems Committee. A/110:2011, ATSC Standard for Transmitter Synchronization. April 2011.
- [7] Advanced Television Systems Committee. ATSC Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines (A/74). June, 2004.

- [8] Advanced Television Systems Committee. ATSC Recommended Practice A/74: Receiver Performance Guidelines. April 2010.
- [9] Advanced Television Systems Committee. A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1-6. August 2013.
- [10] Yiyan Wu, Xianbin Wang, R. Citta, B. Ledoux, S. Lafleche, and B. Caron. An ATSC DTV Receiver with Improved Robustness to Multipath and Distributed Transmission Environments. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 50(1):32–41, March 2004.
- [11] T. Laud, M. Aitken, W. Bretl, and K.Y. Kwak. Performance of 5th Generation 8-VSB Receivers. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 50(4):1076–1080, November 2004.
- [12] Young-Woo Suh, Jaekwon Lee, Jin-Yong Choi, and Jong-Soo Seo. A Novel Data Synchronization Method for ATSC Distributed Translator. In *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2009 IEEE 20th International Symposium on*, pages 2847–2850, September 2009.
- [13] Frank Eory. Comparison of Adaptive Equalization Methods for the ATSC and DVB-T Digital Television Broadcast Systems. *Devices, Circuits and Systems, 2000. Proceedings of the 2000 Third IEEE International Caracas Conference on*, pages T107/1-T107/7, March 2000.
- [14] Yiyan 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. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, Vol. 46, No. 2, pages 101-113, June 2000.
- [15] Mackenzie Abert and Set. General Description of Laboratory Test, *DTV Field Test Report in Brazil*, July 2000.
- [16] C.-F. Huang, T.N. Chang and C.-Y. Hsu. Field Evaluations in Taiwan of the DVB-T COFDM and ATSC 8-VSB Digital TV Systems. *EBU Technical Review*, July 2003.
- [17] M. El-Hajjar and L. Hanzo. A Survey of Digital Television Broadcast Transmission Techniques. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, Vol. 15, No. 4, Fourth Quarter 2013.
- [18] G. Sgrignoli. Preliminary DTV Field Test Results and their Effects on VSB Receiver Design. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 45(3):894–915, August 1999.
- [19] Dae Jin Kim, Sung Woo Park, Young Han Kim, and Won-Sik Yoon. Timing-offset Independent Equalization Techniques for Robust Indoor Reception of ATSC DTV Receivers. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 46(3):442–448, August 2000.
- [20] S.M.Weiss. Reception Considerations for Distributed Transmission in ATSC Systems. In *Consumer Electronics, 2005. ICCE. 2005 Digest of Technical Papers. International Conference on*, pages 477–478, January 2005.
- [21] Hyoungsoo Lim, Sung Ik Park, Won-Gi Seo, Daewon Choi, Yiyan Wu, and Heung Mook Kim. Effects of Distinct Signaling Over the Reserved Symbols in DFS per Transmitter on Legacy ATSC Receivers. In *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 1–3, March 2010.
- [22] S.R. Martin. RF Performance of DTV Converter Boxes-An Overview of FCC Measurements. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 56(4):441–451, December 2010.
- [23] Sung Ik Park, Jeongchang Kim, and Heung Mook Kim. Effect of TxID Signal on the Performance of the Legacy ATSC Terrestrial DTV Receivers. In *Consumer Electronics (ICCE), 2011 IEEE International Conference on*, pages 453–454, January 2011.
- [24] UIT, Sector de Radiocomunicaciones. Informe UIT-R BT. 2035-2: Directrices y técnicas para la evaluación de sistemas de radiodifusión de Televisión Digital Terrestre incluida la determinación de sus zonas de cobertura. *Serie BT, Servicio de Radiodifusión (Televisión)*, Noviembre 2008.
- [25] Advanced Television Systems Committee. A/54A: Guide to Use of the ATSC Digital Television Standard, with Corrigendum No. 1. December 2006.
- [26] Revista del Consumidor en Línea 2015. <http://revistadelconsumidor.gob.mx>.
- [27] K. Salehian, Yiyan Wu, and G. Gagnon. Performance of the Consumer ATSC-DTV Receivers in the Presence of Single or Double Interference on Adjacent/Taboo Channels. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 56(1):1–8, March 2010.
- [28] Diario Oficial de la Federación. Resolución mediante la cual el Pleno de la Comisión Federal de Telecomunicaciones aprueba la publicación íntegra y actualizada del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias. México, 28 de Febrero de 2012.
- [29] Rohde & Schwarz. A/74:2010 ATSC Receiver Performance Testing, *Application Note*. September 2012.

Planning Laboratory Tests and Field Trials for Evaluating ATSC DTV on SFN networks in Mexico City

R. A. Zavaleta, J. Huerta, M. A. Hernández, J. M. Matías

Faculty of Engineering

National Autonomous University of Mexico

Mexico City, Mexico

ing_telemaharba@comunidad.unam.mx, matias.unam@gmail.com

Abstract—In the year 2004, Mexico adopted the standard of digital television ATSC A/53. In 2012 it projected to end the analog broadcasting in the end of year 2015. Presently our country is in that transition process and studying the possibility to implement SFN networks (Single Frequency Networks) for the ATSC Digital Television standard. Some options that are recommended to implement ATSC SFN networks are: Distributed Transmitters (DTxTs) and Digital On-Channel Repeaters (DOCRs). It is also recommended that the ATSC receivers have a robust equalizer able to recover the signal over long and strong echoes, and improve the design of receiving antennas. In this paper, we propose a planning of laboratory tests and field trials for ATSC operating in SFN in Mexico City, whose main objective is to evaluate the performance parameters for good reception in some of the existing commercial ATSC receivers in Mexico and, based on results, make recommendations for the optimal operating parameters of ATSC SFN networks.

I. INTRODUCTION

The ATSC (Advanced Television System Committee) standard was developed by many organizations in United States of America, it was approved in 1996 and the first commercial receivers appeared in 1998 [1]. The countries that have adopted ATSC are: United States of America, Canada, Mexico, El Salvador, Dominican Republic, South Korea and Honduras [2].

Some laboratory tests and field trials have been performed to evaluate ATSC system [1], [3], [4]. United States of America, Taiwan and Mexico decided compare terrestrial DTV standards performance (ATSC, DVB and ISDB) using the best equipment available at that moment [5], [6], [7], [8]. Some locations that were selected for transmission in the field tests were usually places where analog television was being transmitted [4], [8].

In 2001, in Mexico field trials were conducted for evaluate and compare the performance of the ATSC, DVB and ISDB standards, in addition to the adoption of a standard [7]. The trials were carried out in indoor and outdoor spaces. The standards were evaluated in 6 MHz channel to compare their performance with NTSC standard. The considered areas to the tests were the sites where NTSC presented reception problems.

In July 2004, the Mexican Government announced the ATSC standard adoption for the Terrestrial Digital Television transmission [9]. It was proposed that for 2006 the three most populated cities in Mexico: Mexico City, Guadalajara and

Monterrey, and other cities along the Mexican border with United States of America should have services of commercial digital television. It was projected to begin the switch off of analog transmissions in the beginning of 2011, and completely to conclude them no later than December 31 of 2015 [9], [10]. Until June 2013, there were 313 digital terrestrial television channels in Mexico. In Mexico City the offer of terrestrial DTV was of 14 channels covering approximately 19.25 million people [11].

In July 2004, the distributed transmission alternative was added to ATSC standard (A/110A) allowing the operation in single frequency networks [1], [12]. The benefits of a ATSC SFN network have been tested, such as the increment of the bandwidth efficiency [12], increment in the signal SNR in the service areas [13] and the improvement of DTV mobile services [14]. For ATSC SFN system planning a study was conducted whose main conclusion was: the main feature of the ATSC receiver operation that is important in ATSC SFN network design is the ability of the equalizer to recover the signal over long and strong echoes [15]. For proper operation of an ATSC SFN network improvements on the ATSC receivers must be done and also in the receivers antennas design [15]. At present time, the recommendation A/74 is a guideline for the ATSC receiver performance, in which the ATSC SFN networks designers could find relevant information [16], [17].

Until 2007, there was not information about any real ATSC SFN network implemented in the world [18]. In subsequent years, laboratory and field tests of ATSC SFN networks have been conducted. The results indicate that ATSC system can be implemented with Distributed Transmitters (DTxTs) [19], Digital On-Channel Repeaters (DOCRs) and Distributed Translators (DTxRs) [20]. Unfortunately for the ATSC DTV system in SFN networks, the interference caused by multiple transmitters and/or repeaters is inevitable. Possible solutions at these interferences can be resolved for adjusting the transmission power and/or changing the instant of the beginning of transmission in one or more transmitters in the network [20].

The objective of this article is to define and to plan the laboratory test and field trials that allow the study of the SFN ATSC with some recent receivers in Mexico. Taking all this into account, the principal objective in the tests is to evaluate some of the commercial ATSC receivers performance that exist today operating in a SFN network, to define the recommended

parameters of the ATSC networks operation in Mexico.

This paper is organized as follows: the Section II describes the objectives to implement an ATSC SFN network in Mexico City. Section III describes the main requirements of laboratory equipment, and the equipment selected for testing. Section IV, indicates the recommended tests in SFN networks for ATSC and other additional tests to evaluate the performance of the ATSC receivers. Section V defines the SFN network that will be installed to do the field trials. The section VI describes the definition of the methodology of measures in the field trials. Finally, the section VII presents conclusions.

II. OBJECTIVES OF THE LABORATORY TESTS AND FIELD TRIALS

The laboratory and field tests have two main objectives:

- 1) Evaluate the signal parameters for good reception in some of the existing commercial ATSC receivers in Mexico, operating within a ATSC SFN network.
- 2) Based on the results of the previous point, make recommendations that will define the operating parameters of ATSC SFN networks to ensure that the great majority of ATSC receivers correctly receive the signal.

The planning for both tests will be defined to achieve the above objectives. Laboratory tests will be defined for a wide range of possibilities within the SFN networks. Field trials shall check in real environments the laboratory results in some of these possibilities. As an additional objective, the field trials shall serve to compare the coverage of ATSC Single Transmitter Network versus an ATSC SFN network.

III. LABORATORY SETUP

ATSC signals will be generated in the laboratory to simulate possible situations that an ATSC receiver can find within a SFN network. As the response of the receiver depends largely on the ability of equalizer to recover the signal with echoes, the reception capacity will be assessed directly to several ATSC commercial receivers. To do this, apart from ATSC receivers it is needed equipment whose main requirements are the followings:

- Generate ATSC signals with low power levels and noise.
- To have the option to simulate a SFN networks (i.e., must have a channel simulator).
- Provide the possibility of quantitative measurements (BER, constellation diagram, electric field received).

The first of the selected equipment is the SFE Broadcast Tester Instrument of Rohde & Schwarz [21]. The SFE is able to generate/reproduce contents and modulate them according the ATSC standard, simulate propagation effects that would introduce a SFN network (amplitude and delay) through several profiles of static and/or dynamic echoes and also to generate AWGN noise. As the instrument allows the power adjustment, the output signal is directly connected to commercial ATSC receiver through an impedance adapter.

Another of the selected equipment is ETL TV Analyzer of Rohde & Schwarz [22]. This instrument combines a DTV

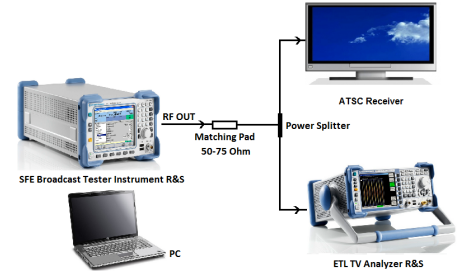


Fig. 1. Laboratory test setup.

Multipath Ensemble	Channel Simulator Parameter	Path 1	Path 2	Path 3	Path 4	Path 5	Path 6
Calibration	Delay (μ s)	0					
	Attenuation (dB)	0	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
	Phase (degrees)	0					
Brazil A	Delay (μ s)	0	0.15	2.22	3.05	5.86	5.93
	Attenuation (dB)	0	13.8	16.2	14.9	13.6	16.4
	Phase (degrees)	0	0	0	0	0	0
Brazil B	Delay (μ s)	0	0.30	3.50	4.40	9.50	12.70
	Attenuation (dB)	0	12.0	4.0	7.0	15.0	22.0
	Phase (degrees)	0	0	0	0	0	0
Brazil C	Delay (μ s)	0	0.089	0.419	1.506	2.322	2.799
	Attenuation (dB)	2.80	0	3.8	0.1	2.5	1.3
	Phase (degrees)	0	0	0	0	0	0
Brazil D	Delay (μ s)	0.15	0.63	2.22	3.05	5.86	5.93
	Attenuation (dB)	0.1	3.8	2.6	1.3	0	2.8
	Phase (degrees)	0	0	0	0	0	0
Brazil E	Delay (μ s)	0	1.0	2.0			
	Attenuation (dB)	0	0	0	OFF	OFF	OFF
	Phase (degrees)	0	0	0			
Special Brazil C	Delay (μ s)	0	0.089	1.506	1.506	2.322	2.799
	Attenuation (dB)	2.80	0	20	0	2.5	1.3
	Phase or Doppler	0°	0°	0.05 Hz	0°	0°	0°
Modified Brazil C	Delay (μ s)	0	0.089	0.419	1.506	2.322	2.799
	Attenuation (dB)	2.80	0	3.8	Variable	2.5	1.3
	Phase or Doppler	0°	0°	0°	0.05 Hz	0°	0°
Modified Brazil D	Delay (μ s)	0.15	0.630	2.22	3.05	5.86	5.93
	Attenuation (dB)	Variable	3.8	2.6	1.3	0	2.8
	Phase or Doppler	0.05 Hz	0°	0°	0°	0°	0°

Fig. 2. Definition of multipath scenarios of reception in SFN networks for moderate signal level [23].

receiver and a spectrum analyzer. In the laboratory tests the ETL will be used as a receiver reference. To view graphically the effects of ATSC SFN multipath on the receivers, the SFE output will be connected simultaneously with the ETL and each ATSC receiver. The laboratory test setup is displayed in the Figure 1.

IV. LABORATORY MEASUREMENT METHODOLOGY

To evaluate the performance of an ATSC SFN network, in laboratory the probable scenarios of a SFN network operation will be defined; variables to define scenarios are amplitude and delay variation of the received signals, static and dynamic echoes, etc. For this reason, multipath profiles will be defined in the SFE equipment.

The multipath scenarios described in [23] were used to evaluate the ability of ATSC receivers to handle several distortions produced by multipath in an ATSC SFN configuration. As the purpose of this test is to evaluate the performance of some recent commercial ATSC receivers, the values of every parameters of ATSC signal will be defined according to each of those scenarios. Figure 2 shows the profile parameters (channel models) that evaluate the ATSC receivers susceptibility to noise in presence of an ensemble of static multipath when the level of the signal is moderate (-53 dBm) [23].

TABLE I. GEOGRAPHICAL COORDINATES OF ATSC TRANSMITTERS.

Transmission station	Geographical Coordinates	Height above sea level
Cerro del Chiquihuite	19°31'58.00"N 99°07'50.00"W	2694.7 meters
TV UNAM	19°19'22.19"N 99°11'11.68"W	2293.8 meters

Apart from the previously described scenarios, it must be defined a scenario that involve one location of the special importance in the SFN network reception analysis. This is the case where the signals of two or more transmitters arrive with the similar amplitude and non-delay or a very little delay between them, the situation is known as 0 dB echo and non-delay [18]. Other tests indicated in A/74 Recommended Practices are tests with static and/or dynamic echo, simulating pre-echo and post-echo [16], the results obtained could be the relation between the echoes delay and attenuation that are able to handle the commercials ATSC receivers.

Reception failures that can happen in ATSC receivers can be measured according to the defined bit rate error (BER) [16]. ETL instrument is able to measure BER of the ATSC signal that it is received, however, as commercial receivers are not able to measure this value, so in this test the reception failure would be considered when two visible errors occur (TOV: Threshold Of Visibility level) [8], [16], [24].

V. DEFINITION OF EXPERIMENTAL SFN NETWORK IN MEXICO CITY

A. Transmission stations

The location of the ATSC transmitters shall be the responsibility of the broadcaster partner that has defined two places in Mexico City where can be put the transmission equipment because they are locations where currently already provides broadcasting services and because they are at the ends of the desired coverage area that is Mexico City. The distance between the ATSC transmitters is 24.079 km, value that in propagation delay is $80.263 \mu\text{s}$ (when a value of $3 \times 10^8 \text{ m/s}$ for the speed of propagation of light in space is used). The details of these locations are shown in Table I. The Fig. 3 shows the location of the ATSC transmitters on a map of Mexico City.

The ATSC transmitters will operate under configuration of Distributed Transmitters (DTxTs) [12]. This configuration is desired because the transmitter of Cerro of Chiquihuite works with more power and it covers the entire coverage area, and the other transmitter will improve the reception level in this coverage area, but the most important reason is because the configuration of DTxTs allows the introduction of delays at the signal on either transmitter to evaluate their impact in the coverage area.

That is, to evaluate the reception of signals in real environments with large delay is considering adding delays in one transmitter with respect to other. In addition, adding delays allows to move the area where the delays are small and thus define coverage areas, in other words, modify the coverage area for ATSC SFN network [13].

B. Estimation of electric field intensity

In order to check that the overlap area between the two transmitters is large enough for the trials and small enough

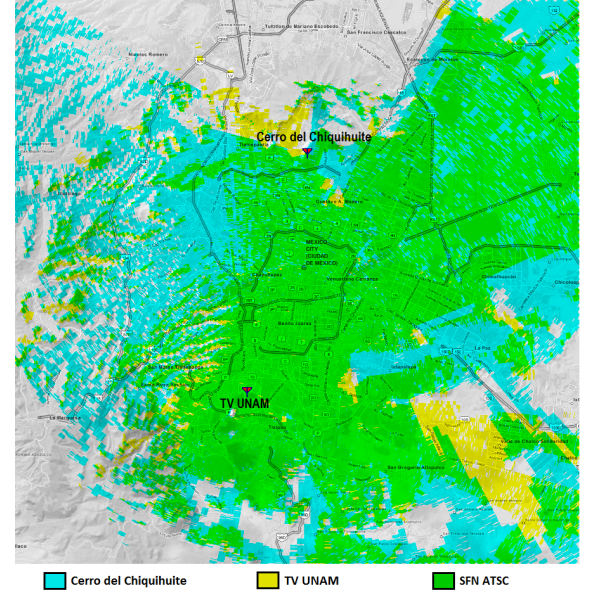


Fig. 3. Locations of the ATSC transmitters in Mexico City and estimated coverage area of two transmitters.

to be reliable in a real case, estimations of electric field were performed with the free software Radio Mobile [25]. This software uses propagation model ITS (Irregular Terrain Model), also named Longley-Rice model [26]. Radio Mobile has also been used in the planning of several digital radio DRM field trials [27], [28], [29]; moreover in Mexico is the model recommended by the *Instituto Federal de Telecomunicaciones* to estimate the coverage of a digital TV broadcast transmission [10]. This software does not take into account the morphology of the terrain (buildings, trees, etc.) and only considers the terrain profile. The estimation of the electric field was performed with the following parameters for Mexico City [30]:

- Ground conductivity: 5 mS/m.
- Permittivity of the ground: 15.
- Refractivity of ground: 301 units N.
- Climate: Temperate continental.
- Height of transmitting antenna: 30 m.
- Height of receiving antenna: 2 m.
- Frequency range: digital TV channel 20 (506-512 MHz).
- Probability of time: 90% [10].
- Probability of localization: 50% [10].
- Probability of situation: 50% [10].

Some electric field thresholds that were obtained in different field trials for the stationary reception of ATSC in the world are $46.3 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ [4] and $42.2 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ [6]. In Mexico, in the agreement of ATSC A/53 adoption, a value of $41 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ was set [9], however, this value was changed later to $43 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ for channels 7 to 13 and $48 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ for channels 14 to 51 [10]. So to estimate the electric field, the threshold of $48 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ was used for channel 20.

C. Predicted coverage area

The Cerro of Chiquihuite transmitter center is elevated about 450 meters above Mexico City, while TV UNAM

transmitter center is in the same level as the city. Therefore, it was decided to use a more powerful transmitter in Cerro of Chiquihuite and, also because it is desired to become the functional transmitter after field trials. Transmitters were defined with the following transmission powers: Cerro of Chiquihuite with 3 kW and TV UNAM with 1 kW. The transmitters are manufactured by Egatel S.L. They use Doherty technology without operating limitations in sub-bands, being considered as high efficiency. The transmitter for Cerro of Chiquihuite is the TLWH7800 series [31] and the transmitter TV UNAM is the TUWH4602 series [32]. The transmitting antennas are directionals, but with a constant gain within the coverage area (the city). The antennas have a gain of 4 dBi for both transmission stations.

Coverage area for each transmitter and the overlap area (where the signal from both transmitters is correctly received) are shown in Fig 3, which shows that the coverage area of the TV UNAM transmitter is similar to the overlap area with the Cerro of Chiquihuite transmitter. With the estimation of prior coverage, it is note that, in principle, with the Cerro of Chiquihuite transmitter coverage area is within most of the city. Therefore, the inclusion of TV UNAM transmitter does not increase the coverage area, however it is important for two reasons. First, because the level of coverage increases, understood as the percentage of time and localizations where the signal is correctly received. Second, it allows to study the signal reception in SFN environments with reception of strong power, as is done on the A/74 recommendation of ATSC [16].

VI. DEFINITION OF THE METHODOLOGY OF MEASURES IN THE FIELD TRIALS

Within the methodology of measures it is important to define settings of the transmitting and receiving, and measurement equipment to be used. Reception trials for ATSC signal will be performed in outdoor environments.

A. Transmission settings

The ATSC transmitters network will operate in Single Transmitter mode and SFN mode. In the first mode, in alternately way, only one of the transmitters will be transmitting. And that way the reception will be evaluated as MFN networks. In SFN mode, both ATSC transmitters will be broadcasting the same content simultaneously. In this mode, it will be defined other transmission settings, such as adding different delays to the signal of one of the transmitters with respect to the other. This will cause the delay in reception between the two signals to change, modifying the behavior of receptors and in turn the actual coverage area. Figure 4 shows values of delay between the two signals obtained in reception when both transmitters transmit at the same time. The lines on the figure indicate that within the zone that define it will have delay values less than the indicated value. From analysis of the power level and delay between signals for the route between two transmitters (Fig. 5), the delay value of $33.6 \mu\text{s}$ was obtained to be added to the TV UNAM transmitter to minimize areas with pre-echo signals [16]. The Fig. 6 shows values of delay between the two signals obtained in reception when TV UNAM transmitter adds a delay of $33.6 \mu\text{s}$. In these settings it will be important to evaluate the performance of

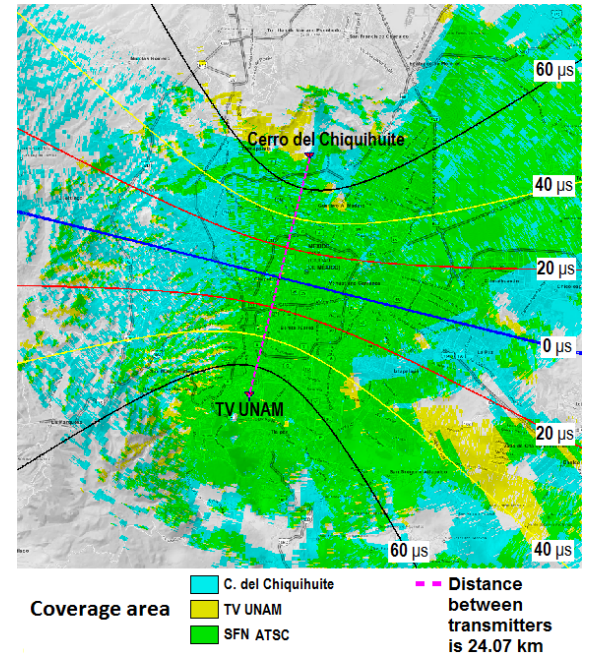


Fig. 4. Analysis of signals delay (in μs) in reception when two transmitters are synchronized.

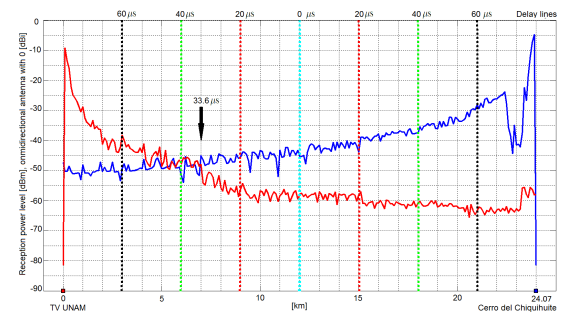


Fig. 5. Analysis (results of prediction) of the power level and delay between signals for the route between two transmitters.

the ATSC receivers to finally issue recommendations about operating parameters of ATSC SFN networks.

B. Location of the measurement sites

The measurement points are defined to study the effect that the relations between the received electric field intensity and the propagation delay between the two ATSC signals have on the quality of reception in the ATSC SFN network. The main measurement zones are those areas where there is overlap of signals, where the difference in power is less than certain value (limits of coverage areas and shadow areas) and when delay difference between the two signals is very large.

Other interesting locations to take measurements within the coverage area of the two transmitters can be defined by the size and density of buildings, because in these zones there would have different conditions for signal reception. In Mexico City it

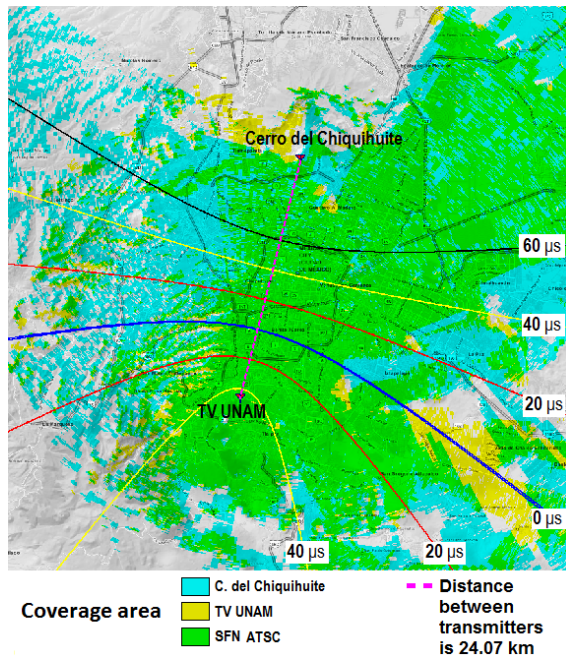


Fig. 6. Analysis of signals delay (in μs) in reception when additional delay $33.6 \mu\text{s}$ is applied to TV UNAM transmitter.

possible to choose residential areas, industrial areas and dense urban areas. The total estimated number of measurements will be about 130 to achieve a statistically significant sample [33].

C. Measurement system

In the field trials it is necessary to optimize the available resources to reduce times and costs. In order to repeat the measurement in situ with each commercial ATSC receiver, it is required equipment capable to digitize and save in one computer the received RF signal of the ATSC SFN network. Its purpose is to reproduce subsequently in laboratory the signal for testing as many times as needed with each ATSC receiver, besides thereby ensuring that all receivers are tested exactly with the same signals. The selected equipment is the USRP (Universal Software Radio Peripheral) X300 of Ettus Research [34] with the RF card WBX 50-2200 MHz Rx/Tx (40 MHz) [35]. To adjust the requirements and work with the USRP it is necessary to have a laptop whose principal requirements are a good storage RAM memory, a lot of free space in hard disk and, especially, fast interface for data connection and high speed disk recording. Also, in the field trials, the main measurement equipment to record the measurement parameters of the reception signal will be the ETL (previously mentioned in the laboratory settings). As part of the measurement equipment, there will be a GPS that allows to record each measurement location for further analysis of coverage results.

A mobile unit will be used to support the setup of the measurement equipment and to move to the field trials sites. The Fig. 7 shows the field trials measurement system. Considering the parameters of field measurements that marks the recommendation A/74 ATSC [16] to evaluate the performance of the

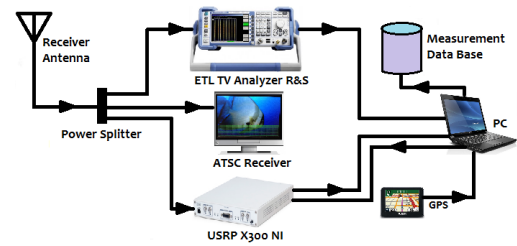


Fig. 7. Field trials measurement system.

ATSC receivers, it was decided that the static measurements and the RF signal recording will have a duration of 5 minutes for each location, as this time is considered appropriate to evaluate the variations of the signal in time. The signal will be sampled at a rate of 24 Msamples/s. The resolution of the recorded RF signal is 16 bits per sample [34]. The USRP will reproduce in laboratory the recorded RF signals, so that it is possible to reproduce them in other ATSC receivers as if they were in the mobile unit while recording the signal.

D. Receivers antennas

There will be used two calibrated antennas for reception, a directional antenna and a non-directive, both for VHF and UHF bands [16]. They will be installed at a height of 2 meters above ground level, lower than that used in A/74 ATSC external measurements [16], but with the right height for ITU [33].

Directional antennas give the possibility to study a real environment performance of ATSC receivers when the antenna is pointing to one of the transmitters, however, omnidirectional antennas receive all the multipath signals arriving at the receiver, so that it is possible to propose parameters for optimal performance in a SFN when it has directional or omnidirectional antennas, or arrangements of them [15]. In addition, by moving the directional antenna can change the ratio between the received powers of the transmitters, which gives further possibilities for study.

VII. CONCLUSIONS

In Mexico, the analog TV switch off is planned to be full at the end of 2015. In these critical times of deployment it is useful to know which parameters implement in order to operate efficiently transmitters in SFN networks, however today there are few studies on SFN networks for ATSC system. This paper presented a proposal for planning laboratory tests and field trials for ATSC SFN networks in Mexico City.

First, laboratory tests will be developed to simulate the widest possible scenarios in reception (i.e., multipath channel, the ability of the equalizer to recover the signal over long and strong echoes) and its impact will be evaluated in several commercial ATSC receivers available in Mexico.

As for the field trials, having two ATSC transmitters will allow to compare the performance Single Transmitter Network versus SFN network. The transmitters power will be adjusted so that the transmitter of the Cerro of Chiquihuite mostly covers the entire coverage area, while the TV UNAM transmitter will improve reception levels within that area, to increase

the signal intensity in time and localizations. Furthermore, in methodology of measurement, a delay value is added to the Cerro transmitter to evaluate its effect on the coverage area, minimizing the areas where there is presence of pre-echo signals. The equipment described in the planning of field trials was defined to optimize the available resources and reduce times and costs of the trial campaign. The operation of a ATSC SFN network depends on the design configuration and a large number of factors that may be present in the urban environment, so it is recommended that the spatial and temporal variability are studied in the field trial data analysis, which allow to extend the results to similar or larger urban areas.

The results of laboratory tests and field trials will allow to perform recommendations that will define the operating parameters of ATSC SFN networks in Mexico, so that the majority of commercial ATSC receivers correctly receive the signal.

ACKNOWLEDGMENT

This paper was performed within the REFUTV Project. Project supported by the CONACYT's institutional fund. Joint project CONACYT-CDTI N°189235. This work has been possible thanks to the collaboration of EGATEL S.L, Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V. and Faculty of Engineering of National Autonomous University of Mexico.

REFERENCES

- [1] Sgrignoli, G., "History of ATSC Digital Television Transmission System", *Consumer Electronics, 2007. ICCE 2007. Digest of Technical Papers. International Conference on*, vol., no., pp.12, 10-14 Jan. 2007.
- [2] ATSC. Available: <http://atsc.org/>, Jun. 2015.
- [3] Yiyang Wu; Bouchard, P.; Caron, B.; Tyrie, D.; Trenholm, R., "Canadian digital terrestrial television system technical parameters", *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol.45, no.4, pp.355364, Dec. 1999.
- [4] Chai-Chin Lin; Chih-Ming Chen; Jenn-Hwan Tarng; Hsueh-Ming Hang; Hsiao-Cheng Yu, "Analysis of ATSC field test results in Taiwan", *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol.48, no.1, pp.3843, Mar. 2002.
- [5] Federal Communications Commission, "DTV Report on COFDM and 8-VSB Performance, Technical Report, VSB/COFDM Project", Dec. 2000.
- [6] Chi-Fang Huang, Thean Chang, and Hsu Chau-Yun. "Field evaluations in Taiwan of the DVB-T COFDM and ATSC 8-VSB digital TV systems". *Technical report, Graduate Institute of Communication Engineering, Tatung University, Taiwan*, Jul. 2003.
- [7] Leonardo Ramos. "Pruebas comparativas de recepción ATSC/DVB/ISDB", *Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión*, Nov., 2001.
- [8] Yiyang Wu; Pliszka, E.; Caron, B.; Bouchard, P.; Chouinard, G., "Comparison of terrestrial DTV transmission systems: the ATSC 8-VSB, the DVB-T COFDM, and the ISDB-T BST-OFDM", *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol.46, no.2, pp.101113, Jun. 2000.
- [9] Diario Oficial de la Federación, México, Viernes 2 julio 2004, Art 4 y 5. "Acuerdo por el que se Adopta el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre y se Establece la Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre en México".
- [10] Diario Oficial de la Federación, México, 11 de Septiembre de 2014. Art IV. "Política para la transición digital terrestre".
- [11] Comisión Federal de Telecomunicaciones, "Informe al Pleno del Estado de la Televisión Digital Terrestre (TDT) en México", Jun. 2013.
- [12] Advanced Television Systems Committee, Standard A/110: Standard for Transmitter Synchronization, Washington, D.C., Apr. 2011.
- [13] Young-Woo Suh; Sung Ik Park; Ha-Kyun Mok; Heung-Mook Kim; Jin-Yong Choi; Jong-Soo Seo, "Network Design and Field Application of ATSC Distributed Translators", *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol.56, no.2, pp.150159, Jun. 2010.
- [14] A. Mattsson, "Single frequency networks in DTV", *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 51, no. 4, pp. 413422, Dec. 2005.
- [15] Weiss, S.M., "Reception considerations for distributed transmission in ATSC systems", *Consumer Electronics, 2005. ICCE. 2005 Digest of Technical Papers. International Conference on*, vol., no., pp.477,478, 8-12 Jan. 2005.
- [16] Advanced Television Systems Committee, ATSC Recommended Practice A/74:2010: Receiver Performance Guidelines, Washington, D.C., Apr. 2010.
- [17] Advanced Television Systems Committee, ATSC Recommended Practice A/111:2009: Design of Multiple Transmitter Networks, Washington, D.C., Sep. 2009.
- [18] R. Artur, Y. Iano, S. Carvalho, R.F. Larico, "Planificación de la expansión del servicio de retransmisión de TV digital en Brasil usando redes SFN", *IEEE Latin América Transactions*, vol.5, no.8, Dec. 2007.
- [19] O. Bendov, "Areas of cochannel interference and multi-path created by 8-VSB modulated distributed transmitters in flat terrain", *IEEE Trans. Broadcasting*, vol. 52, no. 1, Mar. 2006.
- [20] Donghoon Kang; Hyobae Park; Sung Ik Park; Heung-Mook Kim; Wangrok Oh, "Additional data transmission scheme using TxID signal for ATSC system", *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.1,3, 24-26 Mar. 2010.
- [21] Rohde Schwarz. Available: http://www.rohde-schwarz.com/en/product/sfe-options_63490-9485.html, Jun. 2015.
- [22] Rohde Schwarz. Available: http://www.rohde-schwarz.com/en/product/etl-options_63490-9255.html, Jun. 2015.
- [23] Yiyang Wu; Xianbin Wang; Citta, R.; Ledoux, B.; Lafleche, S.; Caron, B., "An ATSC DTV receiver with improved robustness to multipath and distributed transmission environments", *Broadcasting, IEEE Transactions on*, vol.50, no.1, pp.3241, Mar. 2004.
- [24] Keqian Yan; Wenbo Ding; Liwei Zhang; Yanbin Yin; Fang Yang; Changyong Pan, "Measurement and prediction of DTMB reception quality in single frequency networks", *Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2011 7th International*, vol., no., pp.936,940, 4-8 Jul. 2011.
- [25] Radio Mobile. Available: <http://www.cplus.org/rmw/english1.html>, Jun. 2015.
- [26] O. Bendov, "On the validity of the Longley-Rice (50,90/10) model for HDTV coverage and interference analysis", in *Proceeding of NAB Broadcast Engineering Conference*, Las Vegas, Nov., 1999.
- [27] Maier, F., "Results of the DRM Field trial in Sri Lanka". *DRM, ITU-R document 6A/503-E. 2* de Mayo de 2011.
- [28] Matías, J. M., "Estudio de la radiodifusión local en 26 MHz utilizando el estándar DRM (Digital Radio Mondiale)". *Tesis Doctoral, Universidad del Pas Vasco*. Bilbao. Noviembre de 2008.
- [29] Nota técnica, "Medicoes de Campo do Sistema DRM+ (Digital Radio Mondiale) em Baixa Potencia na Faixa de FM em Xerém, Duque de Caxias/RJ". *Ditel*, 25/2012.
- [30] Hufford, G.A., Longley, A.G. y Kissick, W. A., "A Guide to the Use of the ITS Irregular Terrain Model in the Area Prediction Mode". *NTIA REPORT 82-100*. Apr. 1982.
- [31] Egatel. Available: http://www.egatel.es/productos/visualizar_serie.php?id=56, Jun. 2015.
- [32] Egatel. Available http://www.egatel.es/productos/visualizar_serie.php?sesion=esid=57, Jun. 2015.
- [33] Informe ITU-R BT-2035-2. "Directrices y técnicas para la evaluación de sistemas de radiodifusión de televisión digital terrenal incluida la determinación de sus zonas de cobertura", *International Telecommunication Union*, Nov. 2008.
- [34] Ettus Research. Available: <https://www.ettus.com/product/details/X300-KIT>, Jun. 2015.
- [35] Ettus Research. Available: <https://www.ettus.com/product/details/WBX>, Jun. 2015.

A.2. Publicaciones Nacionales

Título: Pruebas de Laboratorio de Sensibilidad y Relación Portadora a Ruido para el Estándar de Televisión Digital ATSC.

Autores: J. Huerta Medina, R. A. Zavaleta Vega, J. M. Matías Maruri.

Congreso: 3er Congreso Nacional de Innovación y Vinculación Científico-Tecnológica de Nivel Medio Superior, Superior y Posgrado INVICYT.

Modalidad: Exposición de Póster.

Fecha: Octubre de 2014.

Lugar: Ciudad de México, México.



Pruebas de Laboratorio de Sensibilidad y Relación Portadora a Ruido para Estándar de Televisión Digital ATSC

J. Huerta Medina, R. A. Zavaleta Vega, J. M. Matías Maruri
 Dep. de Ingeniería en Telecomunicaciones, DIE, Facultad de Ingeniería, UNAM
 j.huerta@comunidad.unam.mx

En base a la adopción del estándar tecnológico de televisión digital terrestre y la política para la transición de la televisión digital terrestre en México la cual debe concluir a más tardar el 31 de Diciembre de 2015 [1], la evaluación y comprobación del desempeño de receptores digitales para el estándar ATSC [2] disponibles en México es primordial para el desarrollo y estudio de nuevas propuestas técnicas a implementar en la televisión digital terrestre. En este trabajo se presenta un estudio basado en el desempeño esperado en recepción bajo los lineamientos del estándar ATSC [3].

Objetivo

Evaluar sensibilidad y mínima relación portadora a ruido requerida para la recepción de televisores digitales, basados en la recomendación de los lineamientos para un buen desempeño de receptores ATSC [3].



Figura 1. Equipamiento de Pruebas de Laboratorio

Prueba de Sensibilidad

Objetivos. Obtener el nivel mínimo de potencia con el que el receptor ATSC bajo prueba mantiene una "buena" calidad de recepción de video, además de conocer el desempeño de dicho parámetro en el receptor en función de la frecuencia.

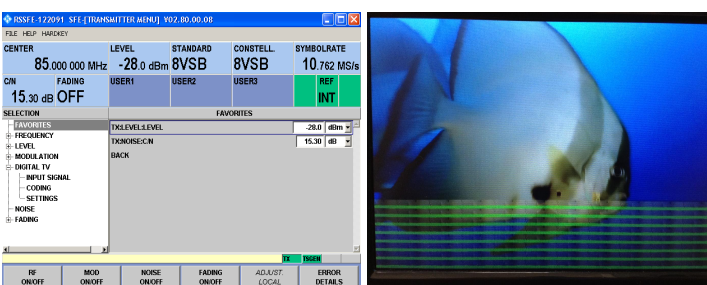


Figura 2. Configuración SFE

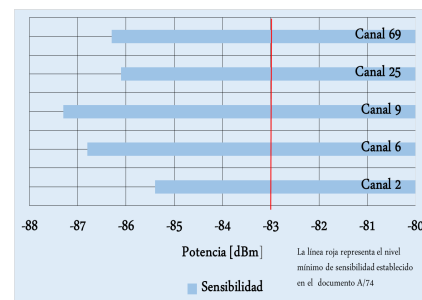


Figura 3. Efectos no deseados en Recepción

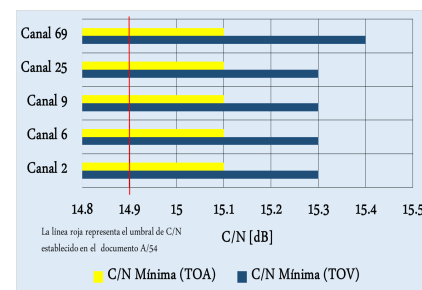
Prueba de Relación Portadora a Ruido

Objetivos. Encontrar el umbral de C/N del receptor bajo prueba en función de la potencia de señal útil y de la frecuencia. El valor de C/N donde el efecto del ruido comienza a ser visible se nombra TOV (umbral de visibilidad) y audible TOA (umbral de audibilidad) [5]

Las pruebas se realizaron con un receptor de baja gama, para así partir de un comportamiento que debería considerarse inferior al de un receptor de media o alta gama. Las señales de referencia se generan con un equipo (R&S ® SFE Broadcast Tester) capaz de generar señales ATSC con niveles bajos de potencia y con ruido.



Gráfica 1. Resultados de la Prueba de Sensibilidad



Gráfica 2. Resultados de la Prueba de Relación Portadora a Ruido

Conclusiones

El receptor ATSC presentó un umbral de recepción por debajo de los -83 dBm, para cualquiera de los canales de frecuencia que se utilizaron en la prueba. Este resultado concuerda con las recomendaciones de ATSC (documento A/74) [3]. La C/N, obtenida en el receptor está 0.4-0.5 dB por encima de las recomendaciones de ATSC (documento A/54) [2] y 0.1-0.2 dB por encima en TOV y 0.2 dB por encima en TOA con las medidas realizadas por la Gran Alianza [4],[5]. Estos resultados permiten afirmar que las recomendaciones de ATSC son válidas para planificar el despliegue de la televisión digital en México. El siguiente paso será comprobar estos resultados con otros tipos de receptores y poder evaluarlos para otros parámetros recomendados por ATSC u otros que consideremos importantes, como son las condiciones de multitrayecto.

Referencias

- [1] Diario Oficial de la Federación, México, 11 Septiembre de 2014. Art. IV, "Política para la Transición Digital Terrestre".
- [2] ATSC Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1 – Document A/54, Corrigendum No. 1 dated 20 December 2006. ATSC Inc.
- [3] ATSC Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines – Document A/74-2010 7 April 2010. ATSC Inc.
- [4] Stephen R. Martin, "RF Performance of DTV Converter Boxes AN Overview of FCC Measurements", IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 56, No. 4, December 2010
- [5] "Final technical report", Federal Communications Commission Advisory Committee on Advanced Television Service (ACATS), Oct, 31, 1995.

Bibliografía

- [1] A. M. Dhake. *TV and Video Engineering*. Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited. New Delhi, India. May, 1999.
- [2] J. M. Zamanillo Sainz de la Maza C. Pérez Vega. *Fundamentos de televisión analógica y digital*. Universidad de Cantabria. Santander, España., 2003.
- [3] A. Garnica Andrade J. R. Jara Elías. *Medición de Audiencias de Televisión en México*. Grupo Editorial Patria. México, D.F. Octubre, 2014.
- [4] Instituto Nacional de Estadística y Geografía. <http://www.inegi.org.mx/>. Consultado en Diciembre, 2014.
- [5] Advanced Television Systems Committee. *A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1-6*. August, 2013.
- [6] Advanced Television Systems Committee. *A/153: ATSC Mobile DTV Standard, Parts 1-10*. March, 2013.
- [7] Diario Oficial de la Federación. *Art. 4 y 5: Acuerdo por el que se Adopta el Estándar Tecnológico de Televisión Digital Terrestre y se Establece la Política para la Transición a la Televisión Digital Terrestre en México*. Julio, 2004.
- [8] Diario Oficial de la Federación. *Art IV: Política para la Transición Digital Terrestre. México*. Septiembre, 2014.
- [9] Xianbin Wang, Yiyan Wu, G. Gagnon, Bin Tian, Kechu Yi, and J.-Y. Chouinard. A hybrid domain block equalizer for single-carrier modulated systems. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 54(1):91–99, March 2008.
- [10] Yanjie Peng, A.G. Klein, and Xinming Huang. Hybrid dfsf-bp equalization for atsc dtv receivers. In *Circuits and Systems (ISCAS), 2014 IEEE International Symposium on*, pages 1712–1715, June 2014.
- [11] Advanced Television Systems Committee. *A/110:2011, ATSC Standard for Transmitter Synchronization*. April, 2011.

- [12] K. Salehian, M. Guillet, B. Caron, and A. Kennedy. On-channel repeater for digital television broadcasting service. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 48(2):97–102, Jun 2002.
- [13] K. Salehian, B. Caron, and M. Guillet. Using on-channel repeater to improve reception in dtv broadcasting service area. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 49(3):309–313, Sept 2003.
- [14] Meintel, Sgrignoli, and LLC Wallace. *A Report to The Metropolitan Television Alliance Regarding Field Test Results for the New York City Prototype Distributed Transmission System*. MTVA DTx Field Test Report - Final 0 27 08.doc, Jun, 2008.
- [15] Radiocommunication Sector ITU-R. *Recommendation ITU-R BT.1306-7: Error-correction, data framing, modulation and emission methods for digital terrestrial television broadcasting*. June, 2015.
- [16] A.L. Montiel Sandoval. *ESTUDIO, SIMULACIÓN Y EVALUACIÓN DE UN MODULADOR OFDM EN REDES INALÁMBRICAS*. Facultad de Ingeniería UNAM, Marzo, 2013.
- [17] Digital Video Broadcasting. *Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)*. June, 2015.
- [18] Digital Video Broadcasting. *Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects*. ETSI TR 101 190 V1.3.2, 2011.
- [19] Digital Video Broadcasting. *Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)*. ETSI TS 102 831 V1.2.1, 2012.
- [20] G. Bedicks, F. Yamada, F. Sukys, C.E.S. Dantas, L.T.M. Raunheitte, and C. Akamine. Results of the isdb-t system tests, as part of digital tv study carried out in brazil. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 52(1):38–44, March 2006.
- [21] Digital Broadcasting Expert Group. http://www.dibeg.org/techp/feature/features_of_isdb-t.html. Consultado en Octubre, 2015.
- [22] Advanced Television Systems Committee. *A/54: Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1*. December, 2006.
- [23] Sung Woong Choi and Heon Jin Hong. A study on the interference in the digital broadcasting area using same frequency. In *ITS Telecommunications, 2008. ITST 2008. 8th International Conference on*, pages 279–282, Oct 2008.

- [24] A. Mattsson. Single frequency networks in dtv. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 51(4):413–422, Dec 2005.
- [25] Advanced Television Systems Committee. *A/111, ATSC Recommended Practice: Design Of Multiple Transmitter Networks*. September, 2009.
- [26] A.M. Gallardo, M.E. Woodward, and J. Rodriguez-Tellez. Performance of dvb-t ofdm based single frequency networks: effects of frame synchronisation, carrier frequency offset and non-synchronised sampling errors. In *Vehicular Technology Conference, 2001. VTC 2001 Fall. IEEE VTS 54th*, volume 2, pages 962–966 vol.2, 2001.
- [27] Jian-Tao Wang, Jian Song, Jun Wang, Chang-Yong Pan, Zhi-Xing Yang, and Lin Yang. A general sfm structure with transmit diversity for tds-ofdm system. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 52(2):245–251, June 2006.
- [28] J.R. Perez, J. Basterrechea, J. Morgade, A. Arrinda, and P. Angueira. Optimization of the coverage area for dvb-t single frequency networks using a particle swarm based method. In *Vehicular Technology Conference, 2009. VTC Spring 2009. IEEE 69th*, pages 1–5, April 2009.
- [29] M.V. Guerra, C.V.R. Rodriguez, L. da Silva Mello, P.V.C. Gonzalez, J.A.C. Bras, and R.S. de Souza. Sfm channel measurements in isdb-t broadcast system. In *Microwave Optoelectronics Conference (IMOC), 2011 SBMO/IEEE MTT-S International*, pages 53–57, Oct 2011.
- [30] Li Caiwei, T. Sato, A. Pablo, B. Roland, Zhang Xiaolin, M. Javier, P. Ivan, A. Amaia, and Zhang Zhan. Optimal dvb-t2 network planning using theoretical sfms. In *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2014 IEEE International Symposium on*, pages 1–6, June 2014.
- [31] Digital Video Broadcasting. *Digital Video Broadcasting (DVB); DVB mega-frame for Single Frequency Network (SFN) synchronization*. ETSI TS 101 191 V1.4.1, 2004.
- [32] Association of Radio Industries and Businesses (ARIB). *Transmission System for Digital Terrestrial Television Broadcasting, ARIB STANDARD. ARIB STD-B31 Version 2.2*. March, 2014.
- [33] M.M. Anis, X. Lagrange, and R. Pyndiah. Analyzing the coverage of the single frequency broadcast network for handheld receivers. In *Consumer Communications and Networking Conference (CCNC), 2013 IEEE*, pages 689–692, Jan 2013.

- [34] M. Tormos, C. Tanougast, A. Dandache, P. Bretillon, and P. Kasser. Experimental performance of mobile dvb-t2 in sfm and distributed miso network. In *Telecommunications (ICT), 2012 19th International Conference on*, pages 1–5, April 2012.
- [35] Seung Won Kim, Yong Tae Lee, Sung Ik Park, Ho Min Eum, Jae Hyun Seo, and Heung Mook Kim. Equalization digital on-channel repeater in the single frequency networks. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 52(2):137–146, June 2006.
- [36] Yiyang Wu, Xianbin Wang, R. Citta, B. Ledoux, S. Lafleche, and B. Caron. An atsc dtv receiver with improved robustness to multipath and distributed transmission environments. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 50(1):32–41, March 2004.
- [37] Yiyang 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. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 46(2):101–113, Jun 2000.
- [38] Australian Department of Communications and the Arts. *Results Summary for Australian 7 MHz Laboratory tests of DVB-T and ATSC DTTB modulation systems*. June, 1998.
- [39] ABERT Mackenzie and SET. *General Description of Laboratory Tests,” DTV Field Test Report in Brazil*. July, 2000.
- [40] Dae Jin Kim, Sung Woo Park, Young Han Kim, and Won-Sik Yoon. Timing-offset independent equalization techniques for robust indoor reception of atsc dtv receivers. In *Consumer Electronics, 2000. ICCE. 2000 Digest of Technical Papers. International Conference on*, pages 44–45, June 2000.
- [41] S.M. Weiss. Reception considerations for distributed transmission in atsc systems. In *Consumer Electronics, 2005. ICCE. 2005 Digest of Technical Papers. International Conference on*, pages 477–478, Jan 2005.
- [42] Hyungsoo Lim, Sung Ik Park, Won-Gi Seo, Daewon Choi, Yiyang Wu, and Heung Mook Kim. Effects of distinct signaling over the reserved symbols in dfs per transmitter on legacy atsc receivers. In *Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB), 2010 IEEE International Symposium on*, pages 1–3, March 2010.
- [43] S.R. Martin. Rf performance of dtv converter boxes x2014;an overview of fcc measurements. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 56(4):441–451, Dec 2010.
- [44] Sung Ik Park, Jeongchang Kim, and Heung Mook Kim. Effect of txid signal on the performance of the legacy atsc terrestrial dtv receivers. In *Consumer Electronics (ICCE), 2011 IEEE International Conference on*, pages 453–454, Jan 2011.

- [45] Sung Ik Park, Jeongchang Kim, Daewon Choi, Heung Mook Kim, and Wangrok Oh. Rf watermark backward compatibility tests for the atsc terrestrial dtv receivers. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 57(2):246–252, June 2011.
- [46] Sector de Radiocomunicaciones UIT. *Informe UIT-R BT. 2035-2: Directrices y técnicas para la evaluación de sistemas de radiodifusión de Televisión Digital Terrestre incluida la determinación de sus zonas de cobertura. Serie BT, Servicio de Radiodifusión (Televisión)*. Noviembre, 2008.
- [47] Advanced Television Systems Committee. *ATSC Recommended Practice A/74: Receiver Performance Guidelines*. April, 2010.
- [48] T. Laud, M. Aitken, W. Bretl, and K.Y. Kwak. Performance of 5th generation 8-vsb receivers. *Consumer Electronics, IEEE Transactions on*, 50(4):1076–1080, Nov 2004.
- [49] Advanced Television Systems Committee. *ATSC Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines (A/74)*. June, 2004.
- [50] J. Bach Andersen Nathan Blaunstein. *Multipath Phenomena in Cellular Networks*. Artech House mobile communications series, 2002.
- [51] M.Failli (Chairman). *COST 207 Digital land mobile radio communications*. Final Report: 14 March 1984-13 September 1988, 1989.
- [52] Sector de Radiocomunicaciones UIT. *Recommendation ITU-R M.1225: Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000*. 1997.
- [53] Revista del Consumidor. *Televisión LCD LED: La Revolución de la TV*. Diciembre, 2013.
- [54] Inc. PASTERNAK® Enterprises. *50 Ohm N Male To 75 Ohm F Female Matching Pad Operating From DC to 3 GHz RoHS Compliant*. 2013.
- [55] K. Salehian, Yiyan Wu, and G. Gagnon. Performance of the consumer atsc-dtv receivers in the presence of single or double interference on adjacent/taboo channels. *Broadcasting, IEEE Transactions on*, 56(1):1–8, March 2010.
- [56] Diario Oficial de la Federación. *Resolución mediante la cual el Pleno de la Comisión Federal de Telecomunicaciones aprueba la publicación íntegra y actualizada del Cuadro Nacional de Atribución de Frecuencias*. Febrero, 2012.
- [57] Rohde & Schwarz. *A/74:2010 ATSC Receiver Performance Testing, Application Note*. September, 2012.

- [58] Boeing. *Exceeding Tire Speed Rating During Takeoff*. Consultado en Noviembre, 2015.

DECLARACIÓN

La información presentada en este trabajo se obtuvo de diversas fuentes que se consideran fidedignas y se consignan puntualmente en las referencias. El uso dado a la información es de naturaleza estrictamente de investigación académica y de divulgación, sin fines de lucro o de otra índole. Se ha hecho también el mayor esfuerzo por acreditar debidamente datos, opiniones y contenidos presentados, por lo que cualquier error u omisión en ello, es del todo involuntario.

México, D. F., Agosto de 2012



JUDITH ESTEFANIA MONTOYA
VAZQUEZ



THALIA IVONNE OCAMPO
SANCHEZ