



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

**“METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN EN CAMPO DE REDES SFN CON
ATSC EN LA CIUDAD DE MÉXICO”**

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

PRESENTA:
ANDREA ZENTELLA LEÓN

TUTOR:
DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI
FACULTAD DE INGENIERÍA

CIUDAD DE MÉXICO. NOVIEMBRE 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: DR. LANDEROS AYALA SALVADOR

Secretario: DR. MOUMTADI FÁTIMA

Vocal: DR. MATÍAS MARURI JOSÉ MARÍA

1^{er}. Suplente: DR. MOCTEZUMA FLORES MIGUEL

2^{do}. Suplente: DR. RANGEL LICEA VICTOR

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM

TUTOR DE TESIS:

DR. JOSÉ MARÍA MATÍAS MARURI

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mis padres María León y Rafael Zentella por haberme apoyado en todo momento, y por la educación que me han dado en el transcurso de mi vida, pero sobre todo por su excelente ejemplo de vida. Le agradezco a mi madre por ser como es, y hacerme una persona responsable y tenaz en todo lo que hago. Agradezco a mi padre por darme todo su cariño y apoyo en todas las decisiones que tome durante mi vida.

A mi hermana Maribel Calderón por ser mi cómplice en todas las locuras que se me ocurren desde que era pequeña, es una de las personas que más quiero y siempre estaré con ella.

También agradezco a mis amigos no solo del posgrado de Ingeniería, si no de la Facultad como de la preparatoria, principalmente a Gabriela, Adriana, Vania, Eduardo, Esperanza, Eduardo Ramírez, Mónica y Jairo, que cada uno de ellos estuvo en una etapa importante de mi vida y siempre lo seguirán estando. Además agradezco a mis amigos del inglés como son Brenda y Suleima, por hacer mis clases mejores.

También a Manuel, que siempre estuvo ahí tanto en mi camino de la Facultad como de la maestría, agradezco su ayuda y el apoyo incondicional que tuvo. También agradezco a su familia por aceptarme y apoyarme en todo momento.

Le doy las gracias a la profesora Margarita, por siempre animarme y creer en mí en que podía lograr esta tesis y otros sueños que yo tenía.

Le agradezco a mi director de tesis, el Dr. José María Matías Maruri, por todo su apoyo, orientación, paciencia y por la confianza que me brindó en la realización de la tesis. Gracias por su atención y enseñanza.

A los miembros de mi jurado de examen agradezco profundamente su tiempo, y sus observaciones a la tesis y por formar parte de la evaluación.

Quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México y sus profesores que me han brindado una excelente educación. También agradezco a la Facultad de Ingeniería y al Posgrado de Ingeniería Eléctrica por haberme brindado la oportunidad de realizar mis estudios de maestría. De igual forma agradezco a CONACYT por la beca que me otorgó durante mis estudios de maestría (Beca CONACYT No. 710353). La presente tesis fue desarrollada dentro del proyecto REFUTV, por lo que quiero agradecer a dicho proyecto, el cual tiene una colaboración internacional con España, que está apoyado por el fondo institucional de CONACYT.

INDICE

RESUMEN	11
Capítulo 1. INTRODUCCIÓN	13
1.1. Situación actual de la televisión digital terrestre en México	13
1.2. Proyecto REFUTV	14
1.3. Justificación de la Tesis	15
1.4. Objetivos	16
1.4.1. Objetivo General de las pruebas de campo	16
1.4.2. Objetivos de la tesis	16
1.4.2.1 Objetivo Principal	16
1.4.2.2 Objetivos Particulares	16
1.5. Estructura de la Tesis	17
Bibliografía	18
Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE	19
2.1. Estándares de Televisión Digital Terrestre	19
2.1.1. DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial)	19
2.1.2. DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting)	21
2.1.3. ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial)	21
2.1.4. ATSC (Advanced Television Systems Committee)	22
2.1.4.1 ATSC M/H (Advanced Television Systems Committee Mobile/ Handheld)	25
2.1.4.2 ATSC 3.0.....	25
2.2. Redes en Frecuencia Única en Televisión Digital Terrestre	26
2.3. Pruebas de campo en otros países con el estándar ATSC.....	27
2.3.1. Pruebas de ATSC en Estados Unidos de América.....	28
2.3.2. Pruebas de ATSC en Canadá.....	29
Bibliografía	31
Capítulo 3. EQUIPAMIENTO PARA LAS PRUEBAS DE CAMPO	33
3.1. Definición del equipamiento de medida	33
3.1.1. Equipamiento de medida en la unidad móvil	34
3.1.2. Equipamiento de medida en el laboratorio	37
3.2. Estimación de consumo eléctrico para la unidad móvil.....	39
3.3. Sistema de alimentación para la unidad móvil	41
3.4. Programas a utilizar en las pruebas de campo	46

3.4.1. Descripción y funcionamiento del sistema de captura y reproducción.....	47
3.4.1.1 Descripción del sistema de captura	47
3.4.1.2 Descripción del sistema de reproducción	48
3.4.1.3 Funcionamiento del sistema de captura y reproducción.....	50
3.4.2. Descripción del software BC Drive de R&S	50
3.5. Caracterización de los equipos de medición	53
3.5.1. USRP (Universal Software Radio Peripheral)	53
3.5.1.1 Descripción del equipo.....	53
3.5.1.2 Caracterización del equipo.....	55
3.5.1.2.1 Estabilidad de frecuencia del USRP	55
3.5.1.2.2 Sensibilidad del USRP	60
3.5.2. ETL TV Analyzer de R&S.....	66
3.5.2.1 Descripción del equipo.....	66
3.5.2.1 Caracterización del equipo.....	67
Bibliografía	73
Capítulo 4. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAMPO	75
4.1. Parámetros de medida	75
4.1.1. Parámetros de medida de la calidad de recepción de la señal de ATSC.....	76
4.1.2. Parámetros de medida de las condiciones de recepción de la señal de ATSC dentro de una red SFN	77
4.2. Datos adicionales a tomar durante las pruebas de campo.....	78
4.3. Grabación de la señal de referencia.....	79
4.4. Acciones a realizar cada día	80
4.4.1. Unidad Móvil	80
4.4.2. Verificación del buen funcionamiento del equipo de medida y los transmisores.....	81
4.5. Realización de las pruebas de campo	82
4.5.1. Recepción fija	82
4.5.1.1 Recepción fija en exteriores.....	82
4.5.1.2 Recepción fija en interiores.....	83
4.5.2. Recepción móvil	85
4.6. Pruebas en el laboratorio con los demás receptores.....	86
4.6.1. Acciones a realizar al inicio de cada día	86
4.6.2. Realización de las pruebas	87

4.7. Predicción de cobertura y distribución de los sitios de medición.....	88
4.7.1. Estimación de cobertura	88
4.7.2. Definición de los sitios de medida.....	93
4.8. Duración de las pruebas en campo	99
Bibliografía	101
Capítulo 5. CONCLUSIONES	103
5.1. Objetivos logrados.....	103
5.2. Trabajo a futuro.....	105
Anexo A. PRODUCTOS DE LA TESIS	106

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Diagrama en bloques del transmisor de ATSC.	23
Figura 2.2. Diagrama de una red SFN.....	27
Figura 3.1. Diagrama del equipo de medida en la unidad móvil para las pruebas de campo.	34
Figura 3.2. Diagrama del equipo de medida en el laboratorio.	38
Figura 3.3. Inversor Samlex de 1000 W.....	42
Figura 3.4. Inversor Xantrex de 1000 W.....	43
Figura 3.5. Inversor de Steren 1000W.	43
Figura 3.6. Inversor de Steren 1500 W.....	44
Figura 3.7. Inversor Truper de 1000 W.	45
Figura 3.8. Inversor Truper de 1500 W.	45
Figura 3.9. Diagrama de bloques del programa "Sistema de captura" en GNU Radio.	48
Figura 3.10. Diagrama de bloques del programa "Sistema de reproducción" en GNU Radio.	49
Figura 3.11. Visualización de los datos obtenidos por BC Drive mediante el conjunto de colores y la ubicación de estos en el programa Google Earth.	51
Figura 3.12. Valores de las medidas seleccionados para cada muestra.	52
Figura 3.13. Patrón de ecos (eco estático pre-eco de 10 μ s) de la muestra seleccionada.	52
Figura 3.14. Vista superior interna del USRP X300.	54
Figura 3.15. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -28 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP sin OCXO.	57
Figura 3.16. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -53 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP sin OCXO.	57
Figura 3.17. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -28 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP con OCXO.....	59
Figura 3.18. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -53 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP con OCXO.....	59
Figura 3.19. Espectro de la señal de televisión digital con una potencia de -30 dBm generado por el equipo SFE de R&S.	61
Figura 3.20. Espectro de la señal de televisión digital con una potencia de -30 dBm grabada y reproducida por el USRP con OCXO.	63

Figura 3.21. Representación de señal principal y una señal eco (pos-eco) con un retardo de 5 μ s.	64
Figura 3.22. Representación de señal principal y una señal eco (pos-eco) con un retardo de 10 μ s.	65
Figura 3.23. Representación de señal principal y una señal eco (pre-eco) con un retardo de 5 μ s.	65
Figura 3.24. Representación de señal principal y una señal eco (pre-eco) con un retardo de 10 μ s.	66
Figura 3.25. Equipo ETL TV Analyzer.	67
Figura 3.26. Valores mínimos que debe demodular un receptor de ATSC según la práctica recomendada A/74 de ATSC.	69
Figura 3.27. Desempeño de los receptores ante un Eco estático.	70
Figura 3.28. Mascara de recepción de los receptores ante una red SFN de dos transmisores utilizando el modelo de Brasil A (recepción externa).	71
Figura 3.29. Respuesta de los receptores ante una red SFN de dos transmisores usando el modelo Brasil D (recepción interna).	72
Figura 4.1. Diagrama del equipamiento de medida en la unidad móvil para las pruebas de campo.	81
Figura 4.2. Diagrama del equipo de medida en el laboratorio.	87
Figura 4.3. Simulación de la cobertura del transmisor principal (SPR) localizado en el Cerro del Chiquihuite.	90
Figura 4.4. Simulación de la cobertura del transmisor secundario (Radio UNAM) localizado en la Sierra del Ajusco.	91
Figura 4.5. En color verde se muestra la simulación de la cobertura de la red SFN de los dos transmisores, en color azul la cobertura del transmisor principal y en color amarillo la cobertura del transmisor secundario.	92
Figura 4.6. Perfil del terreno entre los transmisores sobre la Ciudad de México.	92
Figura 4.7. Valores mínimos del ecualizador para un receptor ATSC de acuerdo a la recomendación A/74.	94
Figura 4.8. Predicción de cobertura de la red SFN con los diferentes tiempos de retardo relativo.	95
Figura 4.9. Gráfica del nivel de potencia en recepción y la distancia entre los transmisores.	96
Figura 4.10. Gráfica del nivel de potencia en recepción y la distancia entre los transmisores, cuando el transmisor de Radio UNAM tiene un retardo de 81.66 μ s.	97
Figura 4.11. Ubicación de los puntos de medición en recepción fija para exteriores (azul) e interiores (rojo).	99

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Longitudes específicas del intervalo de guarda de acuerdo al modo de funcionamiento.	20
Tabla 2.2. Parámetros del estándar ISDB-T.....	22
Tabla 3.1. Consumo de potencia por los equipos que se podrían usar en la unidad móvil para las pruebas de campo.....	40
Tabla 3.2. Consumo de potencia de los equipos a utilizar simultáneamente en el sistema de grabación para las pruebas de campo.	40
Tabla 3.3. Características técnicas del inversor de 1000 W Samlex.....	42
Tabla 3.4. Características técnicas del inversor de 1000 W Xantrex.....	42
Tabla 3.5. Características técnicas del inversor de 1000 W Steren.	43
Tabla 3.6. Características técnicas del inversor de 1500 W Steren.	44
Tabla 3.7. Características técnicas del inversor de 1000 W Truper.	44
Tabla 3.8. Características técnicas del inversor de 1500 W Truper.	45
Tabla 3.9. Valores de la frecuencia piloto de una señal de televisión digital de acuerdo al estándar de ATSC A/53.....	56
Tabla 3.10. Valores medidos con el ETL TV Analyzer de las señales grabadas y reproducidas con el USRP sin OCXO.	56
Tabla 3.11. Valores de la frecuencia piloto de señales grabas con el USRP con OCXO.	58
Tabla 3.12. Valores medidos con el ETL TV Analyzer para verificar la señal de TV Digital generada por el SFE de R&S.	61
Tabla 3.13. Valores medidos con el ETL TV Analyzer de las señales grabadas y reproducidas con el USRP con OCXO.....	62
Tabla 3.14. Valores de potencia y retardo del equipo ETL TV Analyzer ante la prueba de eco estático.....	64
Tabla 3.15. Modelo de canal Brasil A (Recepción en exteriores).....	68
Tabla 3.16. Modelo de canal Brasil D (Recepción en interiores).	68
Tabla 4.1. Ubicación de los transmisores ATSC de la red SFN.	89

LISTA DE TÉRMINOS

ADC	Analog-to-Digital Converter
ANATEL	Agencia Nacional de Telecomunicaciones
ATSC	Advanced Television Systems Committee
ATSC M/H	Advanced Television Systems Committee Mobile/ Handheld
AWGN	Additive White Gaussian Noise
BCH	Bose Chaudhuri Hocquengham
VER	Bit Error Ratio
CONACYT	Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología
C/N	Carrier to Noise
DAC	Digital-to-Analog Converter
DOCRs	Digital On-Channel Repeaters
DTMB	Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting
DTV	Digital Television
DTxTs	Distributed Transmitters
DVB-T	Digital Video Broadcasting - Terrestrial
EVM	Error Vector Magnitude
FCC	Federal Communication Commission
FEC	Forward Error Correction
FPGA	Field Programmable Gate Array
GPS	Global Positioning System
HD	High Definition
HDTV	High Digital Television
HEVC	High Efficiency Video Coding
ISDB-T	Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial
ISOBMFF	ISO Base Media File Format
LDPC	Low Density Parity Check
MER	Modulation Error Ratio
MFN	Multiple Frequency Network
MPEG	Moving Picture Expert Group
MTVA	Metropolitan Television Alliance
NTSC	National Television System Committee
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiple
PER	Packet Error Ratio
PIRE	Potencia Isotrópica Radiada Equivalente
PRA	Potencia Radiada Aparente
REFUTV	Redes en Frecuencia Única para el desarrollo de la Televisión Digital ATSC
RS-CRC	Reed- Solomon Cyclic Redundancy Check

SCCC	Serial Concatenated Convolutional Coder
SDR	Software Defined Radio
SDTV	Standard Digital Television
SER	Segment Error Ratio
SFN	Single Frequency Network
SPR	Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano
TDT	Televisión Digital Terrestre
TOV	Threshold of Visibility
UHD	Ultra High Definition
UHF	Ultra High Frequency
UIT	Unión Internacional de Telecomunicaciones
UNAM	Universidad Nacional Autónoma de México
USRP	Universal Software Radio Peripheral
VHF	Very High Frequency
VSB	Vestigial Side Band

RESUMEN

México en el año 2004 el estándar de televisión digital ATSC (Advanced Television Systems Committee), pero fue hasta el año 2015 que se realizó por completo el apagón analógico o la transición analógica a digital.

En la actualidad, existen cuatro estándares de televisión digital terrestre, los cuales son:

1. DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial), es un estándar que se desarrolló en Europa, el cual forma parte de un grupo de estándares ya aprobados, los cuales son DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) y DVB-C (Digital Video Broadcasting-Cable).
2. DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting) se desarrolló en China en la universidad de Tsinghua.
3. ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial) es desarrollado en Japón, teniendo características similares al estándar europeo. Es estandarizado por la ARIB (Association of Radio Industries and Business).
4. ATSC (Advanced Television Systems Committee) desarrollado en los Estados Unidos de América.

Los estándares DVB-T, DTMB e ISDB-T ocupan una modulación OFDM, lo que permite implementar en Redes en Frecuencia Única (SFN), en cambio ATSC ocupa la modulación 8-VSB, implementándose sobre redes de un solo transmisor principal. Por lo que se pensaría que en este estándar sería muy difícil implementarlo en redes SFN, pero en estos últimos años se han realizado pruebas tanto de laboratorio como de campo, indicando que es posible dicha implementación, esto se debe principalmente a la tecnología que ha avanzado en los receptores, y en el diseño que se han tenido en los ecualizadores.

El objetivo principal de esta tesis es realizar la metodología de las pruebas de campo de televisión digital terrestre ATSC en redes SFN. Existe poca información sobre pruebas de campo de redes SFN con ATSC, por lo que en esta tesis se definió el equipamiento que se utilizaran en las pruebas de campo, tanto el que se llevara en la unidad móvil como el que se tendrá que utilizar en el laboratorio, para obtener la máscara de recepción de una muestra significativa de receptores de ATSC que se venden en México. Para que estos resultados sean certeros es importante realizar la caracterización a los equipos a utilizar para verificar que no existan pérdidas ni modificaciones de la señales que se grabaran, por esta razón se presenta la caracterización de los equipos USRP X300 y ETL TV Analyzer.

Otro punto muy importante para la realización de las pruebas de campo, son los parámetros que se medirán en los sitios, para después con esos resultados realizar un análisis y presentar las conclusiones de dichas pruebas, aunque también es importante la localización de los sitios que dependerá de las características de cada transmisor, por lo que en esta tesis se realizó una simulación de estas características para obtener así la red SFN de dos transmisores y localizar así lo sitios donde se realizaran las pruebas de campo.

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

En este capítulo se da a conocer el estado actual en que se encuentra la televisión digital en México, describiendo además el proyecto REFUTV, dentro del cual se ha desarrollado la presente tesis. Después se explica la justificación de la tesis y los objetivos que se desean lograr en esta tesis. Por último, se describe la estructura de la misma.

1.1. Situación actual de la televisión digital terrestre en México

En Julio de 2004 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el: “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” [1], mediante el cual México adoptó el estándar de televisión digital ATSC, tanto la versión para recepción fija A/53 [2] como la versión para recepción móvil A/153 [3]. La fecha en la cual se llevó a cabo la suspensión de la transmisión de la señal de televisión analógica fue el 31 de diciembre del 2015 [4].

Para la selección de dicho estándar se creó en el año de 1999, el Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión, el cual estuvo encargado del estudio, evaluación y desarrollo de tecnologías digitales de radiodifusión. Este 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. Algunas características que presenta este estándar son las siguientes [1]:

- Alta definición en canales de 6 MHz.
- La disponibilidad de aparatos de recepción en condiciones favorables de calidad, diversidad y precio.
- El potencial de desarrollo de nuevos servicios y de aplicaciones móviles y portátiles.
- Las mejores condiciones para la recepción de las señales originadas en el territorio nacional y que por su ubicación pudieran ser captadas en el extranjero.

Por otro lado, existe un concepto importante relacionado a la televisión digital, las Redes en Frecuencia Única (SFN, por sus siglas en Inglés: Single Frequency Network), en donde varios transmisores transmiten simultáneamente la misma señal a la misma frecuencia. Esto permite usar

el mismo canal en zonas de sombra o en zonas de cobertura adyacentes. Las ventajas más importantes que tienen este tipo de redes son: aumentar el área de cobertura sin necesidad de más canales [5] así como tener un mejor uso del espectro radioeléctrico. En una red SFN se genera multitrayecto, donde los receptores reciben la misma señal repetida, pero con diferentes retardos y fases. Este conjunto de señales son generadas por los transmisores y reflexiones y/o desfases de cada una de las señales.

Debido al multitrayecto, la implementación de las redes SFN es difícil de realizar con el estándar de televisión digital ATSC, ya que ocupa la modulación 8-VSB, y esta modulación solo ocupa una portadora para la sincronía. Las redes SFN principalmente se ocupan en estándares de televisión digital que basados en la modulación OFDM, como por ejemplo DVB, ISDB, DTMB, etc., debido a que OFDM es multiportadora, y por tanto, más sencilla su recepción en entornos multitrayecto.

No solo el multitrayecto afecta negativamente al estándar ATSC para implementar redes SFN, sino también el desplazamiento Doppler, por lo que en la actualidad se está trabajando en el desarrollo de ecualizadores de canal para este estándar, mejorando la capacidad de relación de amplitud y tiempo de la señal directa y de los ecos [6].

1.2. Proyecto REFUTV

El proyecto REFUTV (Redes en Frecuencia Única para el desarrollo de la Televisión Digital ATSC) tiene como objetivo estudiar en qué condiciones es viable la implementación de dichas redes. Es un proyecto de colaboración internacional financiado por CONACYT y el CDTI (España), los países involucrados son México y España. Dentro del proyecto participan tres entidades: la Facultad de Ingeniería de la UNAM, Telemática e Innovación a Bordo S.A. de C.V. (TELBOR) y EGATEL S.L.

Los principales objetivos de este proyecto son dos. El primero, desarrollar el equipamiento necesario para la implementación de redes SFN usando el estándar de Televisión Digital ATSC, objetivo que está a cargo de EGATEL S.L. y TELBOR S.A. de C.V. El segundo objetivo fundamental del proyecto es determinar los parámetros de funcionamiento de las redes SFN en México, estando a cargo de este objetivo la Facultad de Ingeniería de la UNAM.

Para lograr el cumplimiento de estos objetivos principales se tienen dos objetivos particulares, los cuales son:

1. El equipamiento que se desarrollará para las redes SFN serán dos equipos electrónicos: el primero es un prototipo que se encargará de introducir los datos de sincronización en la trama de datos (MIP Inserter) y el segundo es el equipo modulador que recibe la

trama de datos para enviar la señal de ATSC sincronizada, la cual puede ser recibida por los receptores comerciales (el modulador ATSC-SFN).

2. La determinación de los parámetros límite que se necesitan implementar en redes SFN se hará a partir de la elaboración de pruebas de laboratorio, las cuales evaluarán el desempeño de una muestra de receptores comerciales de México, a partir de los cuales se determinarán los valores de los parámetros de funcionamiento de la red SFN. Posteriormente se realizarán pruebas de campo a partir de dichos valores obtenidos, para verificar que los valores obtenidos en el laboratorio se pueden usar en condiciones reales.

La presente tesis se encargará de realizar los objetivos y metodología para las pruebas de campo. Los valores que se obtengan en dichas pruebas se compararán con los valores obtenidos en las pruebas de laboratorio. Los resultados de las pruebas se entregarán a CONACYT en un informe.

Esta tesis, es la continuación de la tesis de maestría “Planificación de pruebas de campo sobre Redes en Frecuencia Única de televisión digital ATSC” realizada por Ricardo Abraham Zavaleta Vega, el cual fue un primer avance para la planificación de las pruebas de campo , pero no definió la metodología para realizar las pruebas de campo, no realizó la caracterización de los equipos de medida y la distribución de los sitios fue incorrecta, debido a que las características de los transmisores son diferentes, como por ejemplo la localización del transmisor secundario, el cual no estará en TV UNAM, si no en Radio UNAM.

1.3. Justificación de la Tesis

Usualmente las redes SFN se realizan con tecnologías basadas en la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), por lo que se pensaría que con el sistema ATSC es imposible su implementación, pero durante los últimos años se han llevado a cabo pruebas de laboratorio y de campo y los resultados indican que es posible la implementación de redes SFN con el estándar ATSC. Esto es debido al diseño de los ecualizadores de los receptores, ya que ellos hacen que el receptor sea capaz de recibir en las condiciones del multitrayecto generado por una red SFN.

En el proyecto REFUTV se realizaron pruebas de laboratorio con el estándar ATSC en redes SFN, determinando la respuesta que tienen que tienen varios receptores comerciales vendidos en el país ante el multitrayecto y determinando qué parámetros límite son viables para la implementación de redes SFN. Estos parámetros son el rango que hay entre amplitud y retardo de la señal principal con su eco o sus ecos.

Estos resultados se tomarán como base para definir la metodología de las pruebas de campo, cuyo principal objetivo es comparar los parámetros de funcionamiento de la red SFN obtenidas en estas pruebas con las del laboratorio, para poder determinar bajo qué condiciones se puede implementar una red SFN con el estándar de ATSC. Por ello, lo que se realizará en esta tesis es la metodología que se debe seguir en las pruebas de campo de acuerdo a los objetivos, así como el equipamiento necesario para dichas pruebas y también, los parámetros de medición que se deben medir en cada sitio.

1.4. Objetivos

En este apartado se define en principio el objetivo general de las pruebas de campo, para después hablar sobre los objetivos de esta tesis, ya que la tesis se enfocara principalmente en la metodología de estas pruebas de campo.

1.4.1. Objetivo General de las pruebas de campo

Como el objetivo del proyecto es estudiar las redes SFN con el estándar de ATSC, y en este tipo de redes se genera multitrayecto, es importante saber el comportamiento que presentan los receptores comerciales a este efecto, por lo que el **Objetivo General** de las pruebas de campo del proyecto REFUTV es:

Evaluar el desempeño de receptores comerciales de ATSC en una Red en Frecuencia Única (SFN) de dos transmisores, mediante la obtención de la máscara de recepción (diferencias de retardo y potencia de las señales principales recibidas de los dos transmisores) de los receptores tanto en exteriores como en interiores [7].

1.4.2. Objetivos de la tesis

1.4.2.1 Objetivo Principal

De acuerdo al objetivo general de las pruebas de campo, el objetivo principal de esta tesis es definir la metodología de medida de las pruebas de campo bajo el estándar de televisión digital ATSC en Redes en Frecuencia Única (SFN).

1.4.2.2 Objetivos Particulares

Derivado del objetivo principal de esta tesis se tienen los siguientes objetivos particulares:

- Seleccionar el equipamiento necesario que se llevará para la realización de las pruebas de campo.
- Definir los parámetros de medición que se realizarán en cada sitio de prueba.
- Definir la metodología para cada lugar de medición de acuerdo al modo de recepción.
- Realizar una estimación de cobertura que se tendrá de los transmisores que conformarán la red SFN.
- Definir la distribución de los sitios de medición.

1.5. Estructura de la Tesis

La tesis está dividida en cuatro capítulos, los cuales a continuación se describen:

En el Capítulo 1 (que es el presente capítulo) se describe la situación actual que México presenta con la Televisión Digital Terrestre (TDT), así como algunas características que presenta el estándar de ATSC. Además se habla del proyecto REFUTV, el cual estudia la implementación de redes SFN y las entidades participantes es la UNAM, EGATEL S.L. y TELBOR S.A. de C.V. También se plantea la justificación y los objetivos de esta tesis y por último se presenta la organización de éste documento.

En el Capítulo 2 se habla de los estándares de Televisión Digital Terrestre, se abordará el tema de las redes SFN en televisión digital terrestre y por último se hará una recopilación de pruebas de campo con el estándar de ATSC que se han realizado en otras partes del mundo, observando la metodología y los principales parámetros de medición que han ocupado.

En el Capítulo 3 se realiza la selección del equipamiento que se utilizará en las pruebas de campo, además se describirán los programas que se utilizarán en las pruebas. Por último, se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los equipos de medición para obtener la limitación de cada uno de ellos y a partir de eso poder determinar hasta que valores se puede medir.

En el Capítulo 4 se habla de los parámetros de medida importantes que se ocuparán para cumplir con los objetivos de las pruebas. Se describe la metodología que se utilizará en las pruebas con diferentes modos de recepción. Además se realiza una simulación para la predicción de cobertura y así poder definir la distribución de los sitios de medida. Finalmente de define la duración de dichas pruebas.

En el Capítulo 5 se presentan las conclusiones obtenidas de la realización de dicha tesis, y además del posible trabajo a futuro que se derivará de ésta tesis.

Bibliografía

- [1] 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. 02 de Julio, 2004.
- [2] Advanced Television Systems Committee. "A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1-6". Washington, D.C. 07 August, 2013.
- [3] Advanced Television Systems Committee. "A/153: ATSC Mobile DTV Standard, Parts 1-10". Washington, D.C. 11 March, 2013.
- [4] Diario Oficial de la Federación. Art IV: Política para la Transición Digital Terrestre. México. 11 de Septiembre, 2014.
- [5] Mattsson, A. "Single Frequency Networks in DTV". IEEE Transactions on Broadcasting. Vol. 51, No. 4. December 2005.
- [6] Yanjie Peng, A.G. Klein, and Xinming Huang. "Hybrid DFSF-BP equalization for ATSC DTV receivers". In Circuits and Systems (ISCAS). IEEE International Symposium, pages 1712–1715. June 2014.
- [7] Andrea Zentella y José María Matias. "Definición del objetivo y metodología de las pruebas de campo". Facultad de Ingeniería UNAM, CONACYT. 04 de Abril, 2017.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

En este capítulo se explican los sistemas de transmisión de televisión digital terrestre que se utilizan en todo el mundo, dando las características principales de cada uno de ellos. Además se hablará sobre las redes SFN utilizadas en los sistemas de televisión digital terrestre. Por último se presentan las pruebas de campo que se han realizado en el estándar ATSC.

2.1. Estándares de Televisión Digital Terrestre

En la actualidad, existen cuatro estándares para televisión digital terrestre en el mundo, los cuales han sido recomendados por la UIT (Unión Internacional de Telecomunicaciones) en la recomendación UIT-R BT. 1306-7 [1]. Los estándares son los siguientes:

5. DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial), es un estándar que se desarrolló en Europa, el cual forma parte de un grupo de estándares ya aprobados, los cuales son DVB-S (Digital Video Broadcasting-Satellite) y DVB-C (Digital Video Broadcasting-Cable).
6. DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting) se desarrolló en China en la universidad de Tsinghua.
7. ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial) es desarrollado en Japón, teniendo características similares al estándar europeo. Es estandarizado por la ARIB (Association of Radio Industries and Business).
8. ATSC (Advanced Television Systems Committee) desarrollado en los Estados Unidos de América.

A continuación se presentan las características más importantes de estos estándares.

2.1.1. DVB-T (Digital Video Broadcasting - Terrestrial)

El estándar DVB-T (Digital Video Broadcasting-Terrestrial) ocupa un sistema de transmisión multiportadora llamado OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) con un código de corrección de errores, siendo esto COFDM (Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Una característica importante de este estándar, es maximizar la eficiencia del espectro en la banda UHF (Ultra High Frequency), esto se logrará, junto con otras técnicas, utilizando Redes en Frecuencia Única (SFN) [2].

En DVB se definen dos modos de funcionamiento de acuerdo al número de portadores posibles, estas son: el modo “2K” y el modo “8K”. El modo “2K” tiene 1705 portadoras por símbolo OFDM siendo solamente 1512 de portadoras útiles. Es adecuado para el funcionamiento de un solo transmisor y para redes SFN con distancias limitadas por el transmisor. El modo “8K” tiene 6817 portadoras por cada símbolo OFDM ocupando solo 6048 portadoras, las otras se utilizan para sincronía y señalización. Puede utilizarse tanto para el funcionamiento de un transmisor único como para redes SFN tanto pequeñas como grandes [2], [3].

Exclusivamente para el uso de DVB-H (Digital Video Broadcasting - Handheld) se define un tercer modo de transmisión, el modo “4K” que corresponden a los equipo portátiles. El modo “4K” tiene como objetivo una ofrecer una compresión adicional entre las celdas de transmisión y la capacidad de recepción móvil [2].

El ancho de banda utilizado comúnmente para este estándar es de 8 MHz, pero tiene la posibilidad de operar con 6 MHz y 7 MHz. Además el sistema permite diferentes métodos de modulación los cuales son QPSK, 16QAM y 64QAM. Los intervalos de guarda que ocupa este estándar son 1/32, 1/16, 1/8 y 1/4, el cual se coloca entre los símbolos OFDM consecutivos para evitar la interferencia de ecos o de señales de transmisión adyacentes en redes SFN. En la tabla 2.1 se muestra la duración de cada intervalo de guarda de acuerdo a los modos de operación [2], [3].

Proporción a la longitud del intervalo útil	Duración del intervalo de guarda [μ s]	
	Modo 8K	Modo 2K
1/4	224	56
1/8	112	28
1/16	56	14
1/32	28	7

Tabla 2.1. Longitudes específicas del intervalo de guarda de acuerdo al modo de funcionamiento [3].

En la codificación interna de canal se ocupa un código convolucional (CC) con las siguientes tasas de codificación: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8. La tasa de código 1/2 tiene la redundancia más alta, este modo se ocupa para canales fuertemente perturbados. Por otro lado, una tasa de código 7/8 tiene la redundancia más baja, por lo tanto se utiliza para canales con baja interferencia. La codificación externa de canal es Reed Solomon (188/204). El umbral de la relación C/N (Carrier to Noise) depende del tipo de modulación y codificación que se ocupe, el rango de este parámetro va desde 3.1 dB a 20.1 dB¹ [1], [3].

¹ La proporción de errores antes de la decodificación Reed Solomon es de 2×10^{-4} y la proporción de errores después de la decodificación Reed Solomon es de 1×10^{-11} .

Con el objetivo de aumentar una mayor tolerancia al multitrayecto, se desarrolló una segunda generación del estándar, llamado DVB-T2. Algunas características importantes de mejora que tiene el estándar DVB-T2 son: modulación 256-QAM, un mayor número de portadoras (modo 32K), un intervalo de guarda de 1/128 y un código corrector de errores 3/5 LDPC+BCH (Low Density Parity Check + Bose Chaudhuri Hocquengham), el cual ofrece un funcionamiento excelente en presencia de altos niveles de ruido e interferencia, dando como resultado una señal robusta [4].

2.1.2. DTMB (Digital Terrestrial Multimedia Broadcasting)

DTMB es el estándar chino desarrollado en la universidad de Tsinghua en Beijing, ocupa la técnica TDS-OFDM (Time Domain Synchronous-Orthogonal Frequency Division Multiplexing). Opera con un ancho de banda de 6 MHz, 7 MHz y 8 MHz. Los tipos de modulación que ocupa son: QPSK, 16 APSK, 64 APSK y 256 APSK. La codificación interna de canal es LDPC y para la codificación externa de canal es BCH, con un bloque de 61 440 ó 15 360 bits y tasas de codificación 1/2, 2/3 y 5/6. El número de portadoras que utiliza son: 4096 (modo 4K), 8192 (modo 8K) y 32678 (modo 32K), con un intervalo de guarda 1/8, 1/4 y 1/2 para el modo 4K, para el modo 8k se tiene 1/16, 1/8 y 1/4 y se tiene un intervalo de 1/64, 1/32 y 1/16 para el modo 32K. El umbral de la relación C/N está en función del tipo de modulación y codificación de canal, por lo tanto el rango va de 0.62 a 21.08 dB² [1].

Al igual que otros sistemas de transmisión, utiliza flujos de transporte MPEG-2 (Moving Picture Expert Group). Este estándar está diseñado para transmitir en definición estándar o en alta definición y funciona en los modos de transmisión fijo y móvil.

2.1.3. ISDB-T (Integrated Services Digital Broadcasting – Terrestrial)

El estándar ISDBT es japonés, desarrollado en el consorcio ARIB (Association of Radio Industries and Business) [5]. Se encuentra documentado en el estándar ARIB STD-B31 [6] que hace referencia al sistema de transmisión y el ARIB STD-B32 [7] que corresponde a la codificación de audio y video, y multiplexación de datos. El estándar tiene sus variantes para cable y satelital, pero en este caso solo de describirá las características importantes de la parte terrestre.

Es un sistema desarrollado para integrar varios servicios como la televisión en su formato estándar y de alta definición, servicios de internet, móvil y portátil. Ocupa la misma técnica de

² Con un BER de 1×10^{-5} y un ancho de banda del sistema de 8 MHz

modulación que DVB-T, el cual es COFDM. En la tabla 2.2 se muestra las características más importantes de este estándar [1].

Parámetro	Estándar ISDB-T
Ancho de Banda	6 MHz, 7 MHz y 8 MHz
Número de segmentos	13 ³
Numero de portadoras	1405 (Modo 1), 2809 (Modo 2) y 5617 (Modo 3)
Métodos de modulación	DQPSK, QPSK, 16 QAM y 64 QAM
Intervalo de Guarda	1/4, 1/8, 1/16 y 1/32
Codificación interna de canal	Código convolucional: 1/2, 2/3, 3/4, 5/6 y 7/8
Codificación externa de canal	Reed Solomon (204, 188, T=8)
Umbral de la relación C/N	Depende de la modulación y código de canal, oscila entre 5 y 23 ⁴ dB

Tabla 2.2. Parámetros del estándar ISDB-T [1].

Este estándar, la codificación de video, así como flujo de datos que utiliza es el MPEG-2.

En el 2006, Brasil adopta el estándar japonés. La ANATEL (Agencia Nacional de Telecomunicaciones) de Brasil, realiza ciertas modificaciones al estándar, llamándose ISDB-Tb o ISDB-T International. Las principales modificaciones que tiene el ISDB-Tb con el ISDB-T original son [8], [9]:

- Introducción de aplicaciones de televisión digital interactiva.
- Utilización de codificación de video en MPEG-4.

2.1.4. ATSC (Advanced Television Systems Committee)

ATSC proviene de Advanced Television Systems Committee (Comité de Sistemas de Televisión Avanzada) fundado en Estados Unidos de América en 1982 para investigar nuevas tecnologías de televisión. Actualmente ATSC, es una organización internacional sin fines de lucro para el desarrollo de normas para televisión digital.

El estándar ATSC se aprobó en 1996 por la FCC (Federal Communication Commission), la documentación del estándar está definida en A/53 de ATSC [10]. Los países que actualmente han

³ Los sistemas de multiportadora con segmentos de banda de radiofrecuencia utilizan 13 segmentos para los servicios de televisión, pero puede utilizarse cualquier número de segmentos para los demás servicios, por ejemplo servicios radiofónicos.

⁴ La proporción de errores antes de la decodificación Reed Solomon es de 2×10^{-4} y la proporción de errores después de la decodificación Reed Solomon es de 1×10^{-11} .

adoptado este estándar son Estados Unidos de América, México, Canadá, Corea del Sur, Guatemala, Honduras, República Dominicana y el Salvador [11].

Este estándar está diseñado para la implementación de redes MFN (Multiple Frequency Network), no obstante, en los últimos años se ha investigado para su implementación en redes SFN (Single Frequency Network).

En el documento A/53, explica que el sistema DTV (Digital Television) ocupa la técnica modulación 8-VSB (Vestigial Side Band), el formato de compresión de video es MPEG-2, el cual comprime los datos de video utilizando diferentes métodos de compresión de datos como son: la transformada discreta de coseno, codificación de truncamiento y predicción de movimiento bidireccional. Una vez comprimido el video se mezcla con el audio digital codificada en Dolby AC-3.

En la figura 2.1 se muestra el diagrama general del estándar de ATSC, describiendo cada etapa a continuación [12], [13].

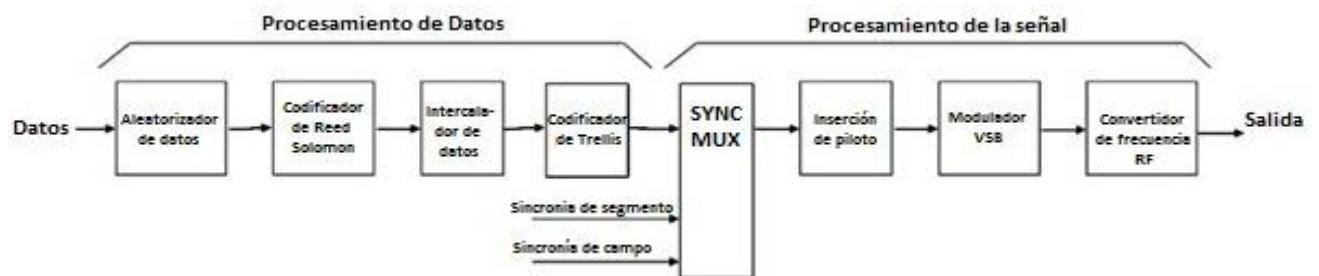


Figura 2.1. Diagrama en bloques del transmisor de ATSC [12].

Lo primero que se debe de hacer antes de realizar cualquier proceso a la señal, es la sincronización realizándose esto en banda base. El inicio y fin de cada paquete MPEG-2 debe de ser identificado, y esto se logrará mediante un byte de sincronía, que siempre es el primer byte de cada paquete de 188 bytes. Cuando se identifica el byte de sincronía es descartado, ya que será sustituido más adelante por el byte de sincronía de segmento. Finalmente este paquete es la entrada del aleatorizador.

- **Aleatorizador de datos:** El flujo de bits de la señal 8-VSB debe ser lo más aleatorio posible, similar al ruido. Esto se debe a que el espectro de la señal transmitida debe tener un espectro similar al ruido, para utilizar al máximo el ancho de banda de 6 MHz. Lo que se hace en este proceso, es cambiar cada valor de bytes a partir de un patrón conocido pseudo-aleatorio. Teniendo ya este flujo de datos, el siguiente paso es el codificador Reed Solomon.

- **Codificador Reed Solomon:** Las señales digitales llevan un proceso de detección y corrección de errores, a esto se le conoce como códigos correctores de errores FEC (Forward Error Correction). El FEC que se utiliza en ATSC es el código Reed Solomon. Este código se basa en la probabilidad de errores de símbolo, en donde el codificador procesa un bloque de datos (187 bytes) y le agrega redundancia (20 bytes), para producir un bloque de símbolos codificado (207 bytes por paquete). Este algoritmo solo puede corregir hasta 10 errores, si el paquete contiene más bytes con errores, el receptor no lo puede decodificar.
- **Intercalador de datos:** Este proceso toma el paquete de 207 bytes (salida del codificador Reed Solomon) y lo reacomoda, por lo que perderán la secuencia original, evitando así las pérdidas por ráfaga.
- **Codificador de Trellis:** Este codificador es otra forma de códigos de corrección de errores (FEC del inglés Forward Error Correction) igual que el Reed Solomon, pero la diferencia que tienen esos dos códigos, es que el Reed Solomon es un código de bloques (esto significa que solo codifica cada cierto bloque de símbolos, en este caso 187 bytes) en cambio el de Trellis es un código convolucional (esto significa que las palabras se generan a partir de la información actual y también de la información anterior en el tiempo). Para su codificación cada byte de 8 bits se divide en una secuencia de cuatro símbolos de 2 bits, además tiene una relación de código de 2/3, es decir por cada dos bits que entran, tres bits salen. A la salida de este bloque se tienen 828 símbolos por paquete (207 bytes * 4 símbolos/byte) y cada símbolo corresponde a 3 bits.
- **Multiplexor y sincronizador de datos:** Se encarga de producir a intervalos definidos, patrones de sincronización especiales que se transmiten con la información de sincronización para el receptor. Estos patrones se utilizan para la sincronización de campo y de segmento. Los datos codificados por la etapa FEC, la sincronización de segmento y la sincronización de campo producidas, son combinadas en el multiplexor.
- **Inserción de piloto:** Se agrega una señal piloto, la cual ayuda al receptor para la demodulación de la señal de RF. Antes de la modulación, se le agrega a la señal de 8 niveles discretos de amplitud (-7, -5, -3, -1, +1, +3, +5, +7), se le agrega una componente de directa con una amplitud relativa de +1.25 que genera una portadora piloto, por lo que todos los valores originales de la señal son modificados. Esta piloto es añadida tanto para datos de carga como datos de sincronización.

- **Modulador VSB:** La modulación en amplitud se produce en un mezclador que tiene como entrada la señal de 8 niveles y la piloto, la señal de salida produce un espectro de doble banda lateral con demasiada redundancia de información ocupando un espectro mayor al permitido en la transmisión de televisión digital (6 MHz). Este problema se soluciona con un filtro de banda lateral vestigial.
- **Convertidor de la frecuencia RF:** Después del filtro de banda lateral vestigial, la señal de frecuencia intermedia de 8 VSB es convertida a la frecuencia de canal asignada en la banda UHF o VHF, mediante osciladores, mezcladores o filtros.

En recepción, se demodula la señal de RF, aplicando en forma inversa los mismos procesos que ya se mencionaron anteriormente.

Del estándar ATSC han surgido diferentes estándares como ATSC M/H (Advanced Television Systems Committee Mobile/ Handheld) y ATSC 3.0. Estos dos se describirán a continuación.

2.1.4.1 ATSC M/H (Advanced Television Systems Committee Mobile/ Handheld)

El estándar A/153 describe el funcionamiento del sistema ATSC M/H (Advanced Television Systems Committee Mobile/ Handheld) [14]. Esta desarrollado para dispositivos móviles y portátiles. La señal de ATSC M/H es transmitida en una porción del total del ancho de banda de la señal de ATSC fijo, por lo tanto el estándar de ATSC M/H es compatible con la infraestructura actual de ATSC.

ATSC M/H usa la compresión de video H.264 (MPEG-4 AVC) y el codificador de audio es el HE AAC v2. La técnica de modulación que ocupa es la 8-VSB, debido a que se encuentra en la capa física de ATSC. En los métodos de corrección de errores FEC utiliza un código convolucional llamado RS-CRC (Reed Solomon - Cyclic Redundancy Check) para la capa de empaquetamiento y un código convolucional concatenado llamado SCCC (Serial Concatenated Convolutional Coder) para la capa física. Los paquetes de audio y video previamente comprimidos se encapsulan usando el protocolo de IP. Dado que ocupa este protocolo, es fácil la integración de los servicios en tiempo real, además ofrece programación múltiple en cada canal de M/H [14].

2.1.4.2 ATSC 3.0

El ATSC 3.0 es un nuevo estándar de difusión, actualmente en desarrollo, que permitirá enviar el contenido principal (audio/video) a través del aire como se realiza actualmente con la señal de

televisión, pero otros contenidos como son los comerciales, subtítulos y audios en diferentes idiomas serán enviados a través de internet con la finalidad de que estos se encuentren dirigidos a las necesidades del usuario [15].

Uno de los objetivos que tiene este estándar, es proporcionar servicio de televisión digital tanto a dispositivos fijos como móviles. La calidad de la imagen es HD (High Definition) y UHD (Ultra High Definition), con soporte de 4K al principio y soporte de 8K posteriormente mediante extensibilidad. La técnica de modulación que utiliza es OFDM, con una amplia gama de intervalos de guarda para disminuir los efectos del multitrayecto. La codificación interna de canal es el LDPC (Low Density Parity Check), con diferentes tasas de código, para la recepción móvil y fija. Usa la compresión de video HEVC (High Efficiency Video Coding) o H.265 y para la compresión de audio es el Dolby AC-4. Los contenidos de transmisión, por ejemplo la televisión de vivo, se entregará en pedazos, utilizando ISOBMFF (ISO Base Media File Format) como formato de contenido, en lugar de un flujo continuo de bits [15].

2.2. Redes en Frecuencia Única en Televisión Digital Terrestre

Las SFN (Single Frequency Network) son un método de transmisión de señales de RF, en donde se emplean dos o más transmisores, los cuales operan en un solo canal (transmitiendo a una sola frecuencia) [16]. Para poder llevar a cabo este tipo de transmisiones es necesario que cada transmisor envíe su contenido sincronizado en tiempo y frecuencia, por medio de una referencia universal que puede tomarse de un GPS [17].

Las redes SFN se han implementado en sistemas digitales de radio y televisión que utilizan la técnica de modulación OFDM, debido a que en este tipo de modulación existe un intervalo de guarda que en ocasiones es proporcional a la distancia de los transmisores de la red, permitiendo que la recepción de la señal este dentro del intervalo de guarda, minimizando así, la interferencia entre señales provenientes de diferentes transmisores. En cambio, para la técnica de modulación 8 VSB no tiene el intervalo de guarda por lo que la posibilidad de implementar una red SFN está en el desarrollo del ecualizador del receptor, permitiendo así mejorar la capacidad la relación de tiempo y amplitud entre la señal directa y el eco [18], [19]. En la figura 2.2 [17] se muestra el esquema de una red SFN.

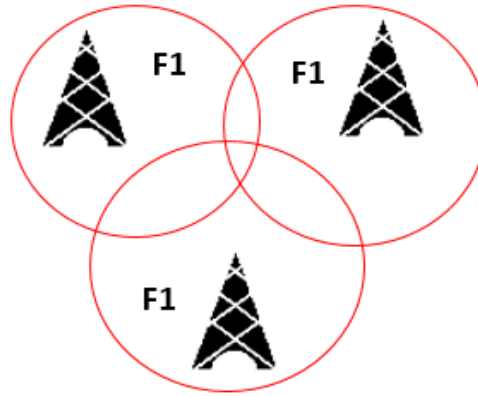


Figura 2.2. Diagrama de una red SFN [17].

ATSC estableció en el estándar A/110 [16] y la recomendación A/111 [20] las configuraciones de para el diseño de redes SFN. Estas configuraciones se muestran a continuación.

- **Repetidores Digital de Canal o DOCRs (Digital On-Channel Repeaters):** Es el método más simple para establecer una red SFN. Esta configuración consiste en recibir la señal del transmisor principal a través del aire (radioenlace dedicado) y se retransmite en el mismo canal de frecuencia introduciendo un retardo a la señal. Como se recibe y se retransmite en el mismo canal, se tiene que tener un aislamiento entre la antena receptora y transmisora. Esta configuración está limitada en potencia y el costo es muy bajo [20].
- **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 de ATSC a transmitir. La configuración tiene flexibilidad, debido a que a cada transmisor se puede variar la potencia y retardo conforme a las necesidades de la red, pero se tienen que sincronizar todos los transmisores. A pesar de que esta configuración es la más difícil de realizar para una red SFN, tienen mayores flexibilidades en cuanto a los parámetros de diseño [20].

2.3. Pruebas de campo en otros países con el estándar ATSC

Con el estándar ATSC, se han realizado pruebas de campo para probar su desempeño en redes SFN, principalmente en los países donde se han hecho dichas pruebas son en Estados Unidos y Canadá. A continuación se describirá los resultados que se obtuvieron para cada una y los

parámetros de medición que se utilizaron, ya que a partir de esto se pueden definir los parámetros que se pueden ocupar para realizar las pruebas de campo del proyecto REFUTV.

2.3.1. Pruebas de ATSC en Estados Unidos de América

Estados Unidos de América es el país que más ha realizado pruebas de campo con el estándar ATSC. De acuerdo a la FCC, las primeras señales de televisión digital estuvieron al aire en noviembre de 1999, todas las emisoras comerciales restantes para noviembre del 2002 y todas las estaciones de radiodifusión pública para noviembre del 2003.

Las primeras pruebas realizadas con ATSC en este país fue en junio de 1999 en las ciudades de Washington, Chicago, Nueva York, San José y Dallas, teniendo como objetivo construir una base de datos para definir los modelos de propagación que se tenían, otro objetivo importante verificar el desempeño del sistema de transmisión de RF para señales digitales en una gran variedad de terrenos, así como entornos urbanos, suburbanos y rurales [21].

En estas pruebas se utilizó una antena de recepción a 30 pies sobre el nivel del suelo. La ubicación de los sitios de medición fue con una configuración en radiales, arcos y rejillas, para estas configuraciones se tomó como base las pruebas realizadas en televisión analógica, además el número de sitios para realizar las pruebas fue en un rango de 100 a 200, ubicando estos lugares tanto en exteriores como interiores. Una de las medidas realizadas fue encontrar el umbral de visibilidad (TOV) observando la señal durante un tiempo de 10 minutos, este tiempo se seleccionó para visualizar cualquier desvanecimiento de la señal a corto plazo [21].

Los resultados que se tuvieron con estas pruebas indicaron que la disponibilidad de los servicios DTV se aproxima a los NTSC en la mayoría de los casos, además las antenas transmisoras más altas tenían mayor beneficio en recepción en comparación con el transmisor que tenía mayor potencia. Para los parámetros de medición tomaron como base las medidas que se realizaron en la planificación de la FCC para la asignación del espectro. Con los resultados obtenidos en las pruebas de campo se diseñaron receptores para mejorar la calidad de la señal [21].

Otra prueba importante que se tuvo en ese país es la que se realizó el 22 de marzo de 2007 en donde se instaló una red SFN de Transmisores Distribuidos (DTxTs) en la ciudad de Nueva York por parte de la MTVA (Metropolitan Television Alliance), el cual ayudó a determinar la viabilidad la utilización de esta técnica en edificación densa y ambientes urbanos (estimando el área de cobertura y desempeño del servicio) [22].

El área de medida se llevó a cabo en Brooklyn. La red consistió en cuatro transmisores operando en los canales 12, 33 y 65, con antenas transmisoras omnidireccionales y una potencia PIRE (Potencia Isotrópica Radiada Equivalente) de 100 W. Los transmisores fueron sincronizados de acuerdo al estándar A/110. Se realizaron un total de 132 lugares de medición, ubicando estos lugares tanto en exteriores (109 sitios) e interiores (23 sitios), ocupando una configuración de rejilla para ubicar los puntos de medición. Los receptores usados fueron dos de quinta generación. A continuación se muestran los resultados más importantes [22]:

- **Recepción en exteriores:** Se utilizaron antenas logo-periódicas calibradas en la banda VHF (Very High Frequency) y UHF (Ultra High Frequency) a una altura de 15 y 30 metros sobre el nivel del suelo. Cada medición se realizó con la antena orientada en donde se obtuvo el máximo nivel de la señal. Para el **canal 12** una intensidad de campo de 70 dB μ V/m para la antena ubicada a 30 m, además se obtuvieron niveles altos de C/N, que están por encima del umbral de 14.9 dB que se requiere para una buena recepción. Para el **canal 30**, se tuvo una señal promedio de 80 dB μ V/m con una antena ubicada a 30 m y con una relación C/N mayor a 47 dB. Para el **canal de 65**, el valor de la señal fue de 76 dB μ V/m para una antena ubicada a 30 m y con valores C/N mayores a 40 dB.
- **Recepción en interiores:** Se realizaron medidas en el canal 33 con una antena dipolo calibrada para la banda VHF y UHF. Se tuvo un valor promedio de intensidad de campo de 69 dB μ V/m, ubicándose la antena donde estaba el receptor. El valor de C/N promedio fue de 38 dB.

Los resultados de estas pruebas solo fue una muestra para comprobar la viabilidad de este tipo de redes con la configuración de transmisores distribuidos y poderlo implementar en la Ciudad de Nueva York.

2.3.2. Pruebas de ATSC en Canadá

Canadá es otro país que adoptó el estándar ATSC para televisión digital. Las pruebas de campo que se realizaron fueron en una red SFN con una configuración de repetidores de canal. El transmisor principal tenía un PIRE de 30 kW, el canal que se utilizó fue el 67, la antena de transmisión fue omnidireccional y se ubicó 215 metros sobre el nivel del suelo, la antena del DOCR en recepción fue una Yagi-Uda con una ganancia de 12 dBd y la de transmisión fue una antena logo-periódica con una ganancia de 7.5 dBi y la potencia PIRE del transmisor DOCR fue de 10.5 dBW [23].

El número de sitios de medición fueron 9, 6 en exteriores y 3 en interiores, el DOCR se ubicó a 28.8 km del transmisor principal, procurando que existiera línea de vista entre ellos y la distancia de

las antenas del DOCR (receptora-transmisora) se ubicaron a 15 metros. Las mediciones se realizaron primero cuando la red SFN estaba desactivada (operando solo el transmisor principal) encontrando el área de recepción del transmisor principal y después se realizaron las mismas mediciones con la red activa (transmisor principal – DOCR). Estas dos mediciones se realizaron para evaluar la cobertura que se tiene con las dos configuraciones [23].

En recepción, se ocuparon receptores del año pasado a la realización de las pruebas de campo, estos receptores presentaron un buen desempeño a las pruebas de laboratorio que recomienda ATSC A/74 [24]. La antena en recepción en exteriores es direccional con una ganancia de 7.5 dBi y en interiores se utilizó una antena pasiva comercial para NTSC. Cuando la red SFN estuvo activa, se comprobó que utilizar una antena direccional tanto en exteriores como en interiores ayuda a discriminar entre las señales que llegan al receptor al apuntar en dirección de mayor potencia [23].

De estas pruebas se llegó a la conclusión, que para evitar interferencia con la señal principal se tenía que agregar un retardo a la señal en el DOCR, esto ocasionará que se tuviera una buena recepción en las zonas de alta interferencia. También se encontró que cuando la antena transmisora del DOCR irradia en dirección del transmisor principal se tienen áreas en donde es imposible la recepción, sin embargo se espera que la recepción mejore si se diseñan ecualizadores que soporten multitrayecto [23].

Bibliografía

- [1] Sector de Radiocomunicaciones de la UIT. Recomendación UIT-R BT. 1306-7. “Métodos de corrección de errores, de configuración de tramas de datos, de modulación y de emisión para la radiodifusión de televisión digital terrenal”. Junio, 2015.
- [2] Digital Video Broadcasting. “Framing structure, channel coding and modulation for digital terrestrial television (DVB-T)”. June, 2015.
- [3] Digital Video Broadcasting. “Implementation guidelines for DVB terrestrial services; Transmission aspects. ETSI TR 101 190 V1.3.2”. Mayo, 2011.
- [4] Digital Video Broadcasting. “Implementation guidelines for a second generation digital terrestrial television broadcasting system (DVB-T2)”. ETSI TR 102 831 V1.2.1. August, 2012
- [5] ARIB. Association of Radio Industries and Business. “About ARIB”. Fecha de consulta: 19 Mayo, 2017. Disponible: <http://www.arib.or.jp/english/>.
- [6] ARIB STD-B31. “Transmission system for digital terrestrial television broadcasting”. Versión 2.2. 18 March, 2014.
- [7] ARIB STD-B32. “Video coding, audio coding, and multiplexing specifications for digital broadcasting”. Versión 2.1. 14 March, 2007.
- [8] ABNT NBR 15601 NORMA BRASILEÑA (traducción al español). “Televisión digital terrestre — Sistema de transmisión”. 07 Abril, 2008.
- [9] ABNT NBR 15608-2. NORMA BRASILEIRA “Televisão digital terrestre — Guia de operação. Guia para implementação da ABNT NBR 15602 Parte 2: Codificação de vídeo, áudio e multiplexação”. 22 Septiembre, 2008.
- [10] Advanced Television Systems Committee. “A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1-6”. Washington, D.C. 07 August, 2013.
- [11] ATSC. “About ATSC”. Fecha de consulta: 23 Mayo, 2017. Disponible: <http://atsc.org/about-us/about-atsc/#.WTS164WcHIU>.
- [12] W. Bretl, William R. Meintel, Xianbin Wang, S. Merrill Weiss and Khalil. “ATSC RF, Modulation and Transmission”. Proceeding of the IEEE, Vol. 94, No.1, pages: 44-59. January, 2006.
- [13] David Sparano, "What exactly is 8-VSB anyway?". N.Y, U.S.A: Master of Science degree from Rensselaer Polytechnic Institute, 1997.

- [14] Advanced Television Systems Committee. "A/153: ATSC Mobile DTV Standard, Parts 1-10". Washington, D.C. 11 March, 2013.
- [15] Alexandria Va. "ATSC 3.0: Where we stand". Fecha de consulta: 05 de Junio, 2017. Disponible: <http://atsc.org/newsletter/atsc-3-0-where-we-stand/#.WTncvMa1vIU>.
- [16] Advanced Television Systems Committee, "A/110: ATSC Standard for Transmitter Synchronization". Washington, D.C. 08 April, 2011.
- [17] Sung Woong Choi and Heon Jin Hong. "A study on the interference in the digital broadcasting area using same frequency". 8th International Conference on ITS Telecommunications in Phuket, Thailand, pages 279–282. October, 2008.
- [18] Xianbin Wang, Yiyang Wu, G. Gagnon, Bin Tian, Kechu Yi, and J.-Y. Chouinard, "A Hybrid Domain block equalizer for single-carrier modulated systems". IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 54, No.1, pages: 91–99. March 2008
- [19] Yanjie Peng, A.G. Klein, and Xinming Huang. "Hybrid DFSF-BP equalization for ATSC DTV receivers". In Circuits and Systems (ISCAS). IEEE International Symposium on Circuits and System in Australia, pages 1712–1715. June 2014.
- [20] Advanced Television Systems Committee, "A/111 Recommended Practice: Design of Multiple Transmitter Networks". Washington, D.C. 18 September, 2009.
- [21] Gary Sgrignoli, Zenith Electronics Corporation. "Preliminary DTV field test results and their effects on VSB receiver design". IEEE Transactions on Consumer Electronics, Vol. 45, No. 3, pages: 894–915. August, 1999.
- [22] 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 06 27 08.doc". MSW (Meintel, Sgrignoli and Wallece). June, 2008.
- [23] K. Salehian, M. Guillet, B. Caron, and A. Kennedy. "On-channel repeater for digital television broadcasting service". IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 48, No. 2, pages: 97–102. June, 2002.
- [24] Advanced Television Systems Committee. "A/74 Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines". Washington, D.C. 07 April, 2010.

Capítulo 3. EQUIPAMIENTO PARA LAS PRUEBAS DE CAMPO

En este capítulo se describe el equipamiento a usar en las pruebas de campo, el cual se dividirá en dos: el equipo de medida en la unidad móvil y el equipo de medida que se ocupará en el laboratorio, el motivo de dividirse es para evaluar todos los receptores con la misma señal bajo ciertas condiciones y reducir el tiempo que se esté en campo. Se realiza la estimación de consumo eléctrico de todo el equipamiento para la unidad móvil, mediante la potencia de consumo de todos los equipos que se usarán simultáneamente y este valor se obtendrá de la hoja de especificaciones. A partir de la estimación de consumo eléctrico, se define el sistema de alimentación, el cual se describe posteriormente. Además, se explican los programas a utilizar en las pruebas campo, los cuales son tres, el primero nos sirve para grabar una señal de RF con ciertas condiciones, el segundo reproduce señales de RF y el tercero guarda datos de una señal de televisión digital. Por último se presentan los resultados obtenidos de la caracterización de los equipos de medición para delimitar las medidas que se realizarán en cada uno de los sitios, estos equipos son: el USRP y ETL TV Analyzer. El equipo USRP nos servirá grabar y reproducir las señales de televisión digital y el ETL TV Analyzer medirá los parámetros de medición de una señal de ATSC.

3.1. Definición del equipamiento de medida

En este apartado se describe el equipo a utilizar en las pruebas de campo dividiéndose en dos partes: el sistema de grabación que se usará en la unidad móvil y el sistema de reproducción que se ocupará en el laboratorio. El objetivo de dividir el equipamiento de medida en dos es hacer más eficiente la toma de medidas y comparar el desempeño de los diferentes televisores bajo las mismas condiciones. Durante las medidas de campo se grabarán señales con una antena, éstas serán muestreadas con un programa desarrollado en SDR (Software Defined Radio, o Radio Definida por Software) guardándose en un disco duro, teniendo ya estas señales, en el laboratorio con otro programa y otro equipo SDR se reproducirán las mismas condiciones que se tuvieron en campo como si se estuviera en ese momento. Permitiendo que en campo solo se hagan mediciones con un solo televisor, mientras que en el laboratorio se realicen las mismas pruebas con el resto de los televisores, reduciendo así el tiempo que se esté en campo; y de esa forma, hacer más eficiente la toma de medidas en campo, que es la parte más costosa económicamente y más difícil de controlar desde el punto de vista logístico.

3.1.1. Equipamiento de medida en la unidad móvil

El equipamiento de medidas en la unidad móvil se dividirá en tres partes: la primera es el equipo que se ocupa para grabar la señal de RF con ciertas condiciones en cada lugar de medida, en este caso se usará un USRP con una laptop con sistema operativo Linux y el software GNU Radio para la realización de esta tarea; la segunda son los dispositivos que se necesitan para medir y grabar los parámetros de medición de la señal grabada, para esta tarea se utilizará un equipo ETL TV Analyzer y una laptop con sistema operativo Windows y el software BC Drive; y la tercera es el receptor comercial para verificar la calidad de la señal en forma subjetiva.

En la figura 3.1 se muestra el diagrama de los equipos a usar en la unidad móvil para la realización de las pruebas de campo.

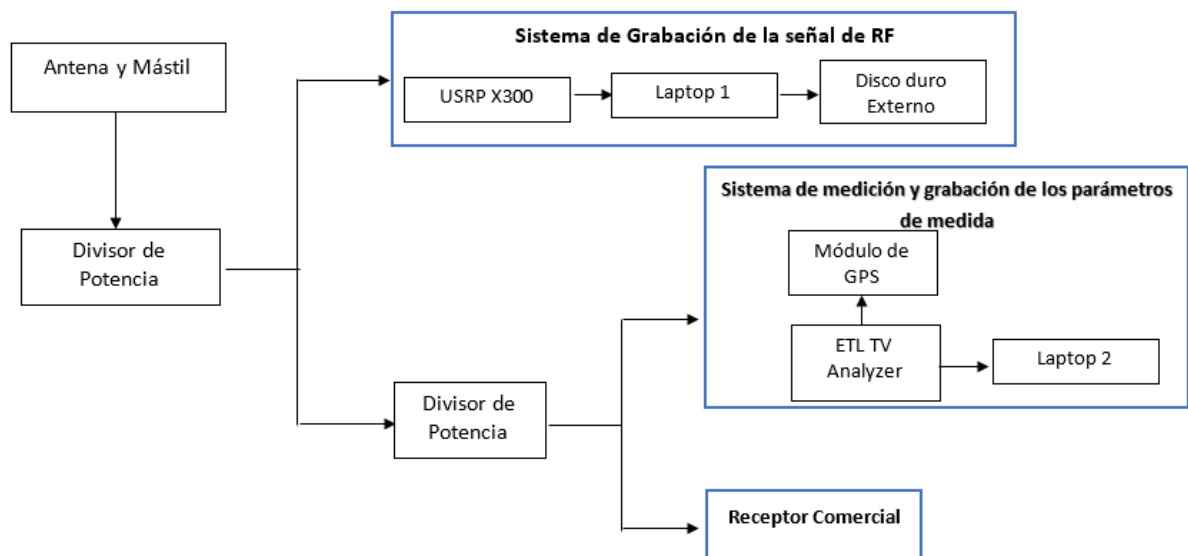


Figura 3.1. Diagrama del equipo de medida en la unidad móvil para las pruebas de campo.

- **Antenas:** Deben ser antenas calibradas, que operen a la frecuencia de 569 [MHz] (canal 30), que es la frecuencia de operación del transmisor SPR (Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano).
 - Antena Direccional: Otorga la posibilidad de estudiar el desempeño de los receptores bajo diferentes relaciones de potencia que se reciben de cada transmisor.
- **Mástil [1]:** Poste que ayuda a la estabilidad de las antenas, para posicionarla a diferentes alturas y tener una mejor recepción de la señal. El mástil a usar es de la empresa MFJ modelo

1919, debido a que cuenta con una altura máxima de 2 [m], la base está formada por triángulos equiláteros la cual proporciona mayor estabilidad, y es manejable y fácilmente instalable y desmontable.

- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Macho):** Conecta la antena a utilizar con el divisor de potencia.
- **Divisores de Potencia [2]:** La señal captada por la antena, pasará por el divisor de potencia hacia los tres subsistemas, en el caso del sistema de grabación se tendrá el doble de la potencia que en los equipos de medición y en el receptor comercial, pero se tendrán las mismas características de multitrayecto en los tres subsistemas. La pérdida de potencia ocasionada por el divisor no es relevante en este estudio, ya que las pruebas de campo se enfocan al desempeño de los receptores debido al multitrayecto en la red SFN, y por lo tanto, no se espera trabajar cerca del umbral de recepción, sino con potencias relativamente altas. El divisor de potencia que se utilizará es el de la empresa Mini Circuit modelo ZFSC-2-1-N+, los conectores son de tipo “N”, debido a que este conector es el que tienen las antenas de la frecuencia de 569 [MHz].
- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Macho) y SMA (Macho):** Conecta el divisor de potencia con el equipo USRP X300.
- **Sistema de grabación de la señal de RF:** Este sistema graba una señal de RF bajo ciertas condiciones requeridas para las pruebas de campo. Este sistema está conformado por los siguientes equipos:
 - **USRP X300 [3]:** Tiene un programa desarrollado en SDR el cual muestrea la señal RF recibida y la convierte en muestras IQ que son grabadas en un archivo. Este archivo será después reproducido en el laboratorio para testear los receptores y poder determinar su desempeño. El programa que este equipo usará para grabar la señal se denomina “Sistema de Captura” y fue desarrollado en el grupo de investigación. Este equipo cuenta con un GPS OCXO el cual sirve para mejorar la estabilidad del oscilador local del USRP, proporcionando alta precisión en la frecuencia de grabación. El USRP (Universal Software Radio Peripheral) es de la empresa Ettus Research y el modelo es el X300, tiene una tarjeta hija WBX Rx/Tx, que tiene un rango de frecuencia de 50 MHz a 2.2 GHz y un ancho de banda de 40 MHz [4].

- Laptop 1: Cuenta con el sistema operativo LINUX y el software libre GNU Radio. Éste último se encarga de controlar al equipo USRP X300, para que muestre y digitalice la señal en RF y se guarde directamente en el disco duro.
- Cable Ethernet: Comunica la laptop con el USRP X300 a partir del cable gigabit Ethernet, que soporta la gran velocidad de datos requerida para esta operación.
- Disco Duro Externo: Conformar la base de datos de los archivos grabados con el USRP X300; dependiendo de la duración de la medida es el peso de cada archivo.
- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Male)**: Conecta el divisor de potencia con el equipo ETL TV Analyzer R&S.
- **Sistema para medir y grabar los parámetros de medición de las señales grabadas**: Este sistema mide los parámetros de medida (como el MER (Modulation Error Ratio), el BER (Bit Error Ratio) antes y después del Reed Solomon, la C/N (Relación Carrier to Noise), etc. de las señales. Estos resultados serán importantes para el análisis de los resultados de las pruebas de campo, por esta razón es importante la grabación de estas medidas. El sistema está conformado de los siguientes equipos:
 - ETL TV Analyzer de R&S [5]: Es un receptor profesional y analizador de señales ATSC, el cual será el encargado de medir los parámetros de medida de la señal de ATSC. Además, permite visualizar y capturar las imágenes del espectro de la señal, la constelación, el diagrama de ojo y el patrón de ecos; esta última medida es fundamental para el análisis de los resultados de recepción en una red SFN.
 - Módulo de GPS: Muestra la posición exacta de los lugares donde se realizaron las pruebas, además de poder grabar algunos parámetros de medición obtenidos en esos puntos.
 - Laptop 2: Cuenta con el sistema operativo Windows y el programa BC Drive de R&S, que permite grabar los valores de los parámetros de medición en diferentes lugares y así poderlos visualizar en el programa Google Earth. Además, permite exportar esos valores a una tabla de Excel, que pueden ser útiles en un futuro para el análisis de los resultados de las pruebas de campo.
- **Acoplador de impedancias de “N” (Macho) a “F” (Hembra) [6]**: Debido a que la impedancia de salida del divisor de potencia es de 50 Ω y la impedancia de entrada de la televisión es

de 75 $[\Omega]$, se necesita un acoplador de impedancias. El acoplador de impedancias que se va a usar es de la empresa Pasternack modelo PE7071.

- **Cable RG6 de 75 $[\Omega]$ con conectores “F” (Macho):** Conecta el acoplador de impedancias con la entrada de la televisión.
- **Receptor Comercial:** Con este equipo se evaluará subjetivamente la calidad de recepción de la señal grabada, ayudando a corroborar las medidas realizadas por el ETL TV Analyzer de R&S (Rohde & Schwarz). En el laboratorio se reproducirán las mismas pruebas realizadas en campo con el resto de receptores comerciales, para obtener así su máscara de recepción.

3.1.2. Equipamiento de medida en el laboratorio

Después de grabar señales en campo dentro de una red SFN (Single Frequency Network) en condiciones diferentes, se reproducirán estas señales en el laboratorio para todos los receptores utilizados en las pruebas de laboratorio (estos receptores son una muestra significativa de los receptores vendidos en el país). De esta manera se podrá determinar el desempeño de cada receptor. La evaluación se realizará en forma subjetiva con el umbral de fallo ó TOV (Threshold of Visibility, o Umbral de Visibilidad). Dentro del Proyecto REFUTV, el criterio para definir el TOV es la existencia de al menos dos errores visibles en un periodo de un minuto de reproducción de la señal, el cual es equivalente a un SER (Segment Error Ratio) de 1.93×10^{-4} [7], siendo este valor el umbral de visibilidad.

El equipo de medida en el laboratorio muy importante porque como ya se ha explicado, permite evaluar todos los receptores con las mismas condiciones. En campo no se podrían evaluar todos los receptores simultáneamente, por falta de espacio y porque requeriría una atenuación grande en la señal. Se podrían evaluar de forma consecutiva, pero las condiciones de la señal cambiarían, y el tiempo de medida sería mucho mayor. Por ello se optó por grabar las señales con un USRP y después reproducir las mismas señales con otro USRP en el laboratorio. Esto permite que todos los receptores se evalúen con las mismas señales y además permite reducir el tiempo de las medidas en campo. También permite reproducir las condiciones de prueba. En laboratorio se aumenta el tiempo de medida, pero a un costo menor y realizándose en cualquier momento.

En la Figura 3.2 se muestra el diagrama del equipo de medida usado en laboratorio para la reproducción de las señales grabadas. Con este sistema se reproducirá la señal simultáneamente en dos receptores para disminuir el tiempo de la realización de dichas pruebas.

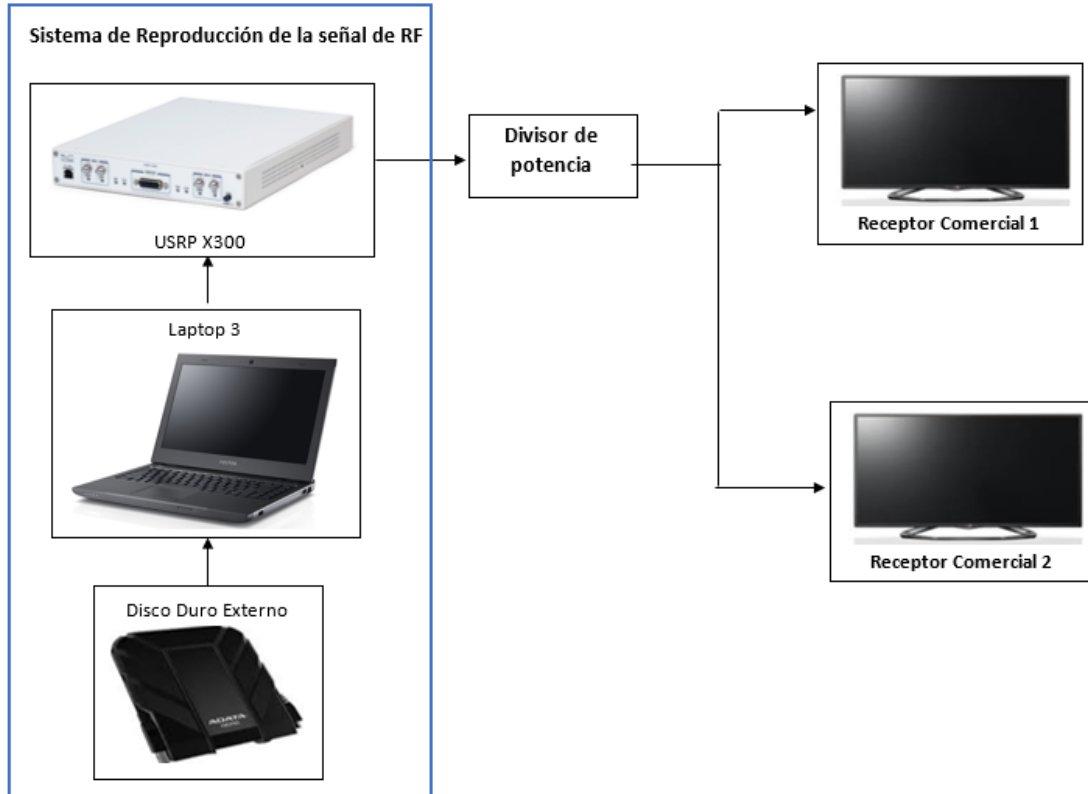


Figura 3.2. Diagrama del equipo de medida en el laboratorio.

- **Sistema de reproducción de la señal de RF:** Este sistema reproduce las señales de RF que se grabaron en campo. El sistema está conformado por los siguientes equipos:
 - USRP X300 [3]: Este equipo de SDR reproducirá la señal que se grabó en campo, para poder evaluar los receptores comerciales usados en las pruebas de laboratorio. Este equipo usará el programa “Sistema de Reproducción” para reproducir la señal grabada. El USRP es de la empresa Ettus Research y el modelo es el X300, tiene una tarjeta hija WBX Rx/Tx, que tiene un rango de frecuencia de 50 MHz a 2.2 GHz y un ancho de banda de 40 MHz [4].
 - Laptop 3: Cuenta con el sistema operativo LINUX y el software GNU Radio, este último se encarga de controlar al equipo USRP X300, para que funcione como reproductor para señales de RF.
 - Cable Ethernet: Comunica la computadora con el USRP X300, el cable a usar es un gigabit Ethernet, y como en el caso de la unidad móvil, tiene una alta capacidad de transmisión que permite reproducir las muestras grabadas en tiempo real.

- Disco Duro Externo: Se localizan todos los archivos grabados que se necesitarán para evaluar el desempeño de los receptores y que se reproducirán con el USRP.
- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Macho) y SMA (Macho)**: Conecta el equipo USRP X300 con el divisor de potencia.
- **Divisor de Potencia [2]**: La señal de RF reproducida pasará por un divisor de potencia, para que se reproduzca la misma señal en dos receptores simultáneamente.
- **Acoplador de impedancias N (Macho) a F (Hembra) [5]**: Debido a que el divisor de potencia tiene impedancia de 50 [Ω] a la salida y la entrada de los televisores tienen una impedancia de 75 [Ω], se necesita un acoplador de impedancias.
- **Cable RG6 de 75 [Ω] con conectores “F” (Macho)**: Conecta el acoplador de impedancias con la salida de la televisión.
- **Receptores Comerciales**: Con este equipo se evaluará la calidad de recepción de la señal de forma subjetiva, para así poder determinar el desempeño de los receptores comerciales dentro de una red SFN.

3.2. Estimación de consumo eléctrico para la unidad móvil

La estimación de potencia requerida para alimentar el equipamiento de la unidad móvil, se basará de acuerdo a la potencia consumida por los equipos a utilizar. Estos valores se obtuvieron de la hoja de especificaciones de cada equipo. Para considerar la potencia consumida se toman en cuenta todos los equipos a utilizar simultáneamente, contemplando también un margen de potencia el cual será útil para no sobrecargar el sistema de alimentación y también por si en un futuro se requiere utilizar otro equipo de medición.

En la tabla 3.1 se muestran los posibles equipos a utilizar en la unidad móvil, especificando el número de elementos que se tienen de cada uno y el consumo de potencia requerido. Los datos de la potencia consumida se obtuvieron de las hojas de especificaciones de cada dispositivo.

Equipo	Cantidad	Consumo de Potencia [W]
ETL TV Analyzer Rohde & Schwarz [5]	1	140
USR X300 [3]	1	45
Laptop Dell Vostro 3460 [8]	1	90
Laptop Dell Precision M4800 [9]	1	110
Televisión LG 42LA6200 [10]	1	110
Televisión Samsung UE40H5510 [11]	1	105
Televisión Panasonic L32E6 [12]	1	82
Televisión SONY Bravia 32R430B [13]	1	60
Televisión TCL L19D3300C [14]	1	47

Tabla 3.1. Consumo de potencia por los equipos que se podrían usar en la unidad móvil para las pruebas de campo.

Para el cálculo de la potencia consumida se toma en cuenta todos los dispositivos a utilizar simultáneamente. El receptor comercial que se eligió fue el que tuviera mayor consumo de potencia, para tener un mayor margen en el sistema de alimentación.

La tabla 3.2 muestra el equipamiento de medida que se usará en la unidad móvil en forma simultánea.

Equipo	Cantidad	Consumo de Potencia
ETL TV Analyzer Rohde & Schwarz	1	140 W
USR X300	1	45 W
Laptop Dell Precision M4800	1	110 W
Laptop Dell Vostro 3460	1	90 W
Televisión LG 42LA6200	1	110 W
Potencia total requerida		495 W

Tabla 3.2. Consumo de potencia de los equipos a utilizar simultáneamente en el sistema de grabación para las pruebas de campo.

La potencia total requerida es de 495 W, pero es recomendable tener un margen amplio de potencia por cualquier inconveniente, por lo tanto, se recomienda aumentar el 50% de la potencia total consumida [15], teniendo como consumo máximo de potencia 742.5 W. Como es una potencia relativamente baja la que se necesita, en vez de usar un generador AC para obtener la energía eléctrica requerida, se usará un inversor de corriente para autos, el cual tiene un bajo costo y poco peso en comparación con el generador de AC.

3.3. Sistema de alimentación para la unidad móvil

El sistema de alimentación consta de un inversor de corriente DC/ AC, la batería de la unidad móvil que se utilizará y cables con pinzas para conectar el inversor de corriente con la batería. En conjunto estos tres elementos proporcionarán la potencia necesaria para alimentar el equipamiento de medida que se usará en la unidad móvil.

Un inversor convierte corriente directa de una batería a corriente alterna convencional, que puede utilizarse para que funcionen diferentes dispositivos que requieren energía eléctrica, conectando solo la batería del automóvil a un inversor.

Los inversores se pueden clasificar de acuerdo a la forma de onda de salida:

- Onda sinusoidal pura
- Onda sinusoidal modificada

Los inversores de onda sinusoidal pura (también llamados de onda sinusoidal verdadera), producen una corriente de mayor pureza y calidad, aunque resulta más costoso. Son más apropiados para equipos especializados, como por ejemplo los equipos médicos.

La onda sinusoidal modificada es una señal acondicionada que se asemeja a una señal proveniente de la red eléctrica que tiene un voltaje efectivo de 127 V. Esta señal funciona correctamente para la mayoría de los dispositivos. Este tipo de inversor es el más común en el mercado y el más económico.

En el mercado existen diferentes marcas de este tipo de inversores, esto dependerá de la potencia de salida que genere el inversor y la forma de onda que tenga. En este caso la potencia consumida por los equipos a usar simultáneamente es de 742.5 W, por lo que las opciones de inversores tendrán que superar esa potencia, para que no exista falla en los equipos por alguna sobrecarga en el sistema de alimentación.

Algunas opciones de inversores de onda pura pueden ser:

- **Opción 1 [16]:** El inversor es de onda sinodal pura de la marca Samlex, tiene el modelo PST-1000. Cuenta con una eficiencia alta, el consumo de energía es reducido y la temperatura se puede controlar, la interferencia que tiene es baja. En la tabla 3.3 se muestra las características técnicas.

Características Técnicas	Valor
Potencia de carga máxima	1000 W
Voltaje de entrada directa	12 VCC
Voltaje de salida alterna	120 VCA 60 Hz
Corriente máxima salida	8.5 A
Dimensiones	39.7 cm frente x 8.2 cm alto x 24.06 cm fondo
Peso	4.0 kg
Precio	\$ 8,059.32 MXN

Tabla 3.3. Características técnicas del inversor de 1000 W Samlex [16].



Figura 3.3. Inversor Samlex de 1000 W [16].

- **Opción 2 [17]:** El inversor es de onda sinodal pura de la marca Xantrex, tiene el modelo PROsine-1000. Son ideales para los sistemas electrónicos que tienen un cargador de batería multietapa de calidad, diseñada para aplicaciones industriales, capaz de manejar cargas pesadas como cargas múltiples. Tiene un apagado automático por sobrecarga, corto circuito o temperatura elevada. En la tabla 3.4 se muestra las características técnicas.

Características Técnicas	Valor
Potencia de carga máxima	1000 W
Voltaje de entrada directa	12 VCC
Voltaje de salida alterna	120 VCA 60 Hz
Corriente máxima salida	8.0 A
Dimensiones	40.8 cm frente x 10 cm alto x 20.3 cm fondo
Peso	3.5 kg
Precio	\$ 6,550.15 MXN

Tabla 3.4. Características técnicas del inversor de 1000 W Xantrex [17].



Figura 3.4. Inversor Xantrex de 1000 W [17].

Las opciones de inversores de onda modificada que se encontraron en el mercado son las siguientes:

- **Opción 3 [18]:** El inversor de corriente es de la marca Steren, tiene el modelo INV-1000, tiene dos cables de polarización y tiene un apagado automático por sobrecarga, corto circuito o temperatura elevada. En la tabla 3.5 se muestra las características técnicas.

Características Técnicas	Valor
Potencia de carga máxima	1000 W
Voltaje de entrada directa	12 VCC
Voltaje de salida alterna	110 VCA 60 Hz sinusoidal modificada
Puerto USB	5 VCC y 1.8 A
Dimensiones	27.0 cm frente x 5.5 cm alto x 13 cm fondo
Peso	1.7 kg
Precio	\$ 2,790.00 MXN

Tabla 3.5. Características técnicas del inversor de 1000 W Steren [18].



Figura 3.5. Inversor de Steren 1000W [18].

- **Opción 4 [19]:** Este inversor es de la misma marca que la opción 1, solo cambia el modelo el cual es INV-1500. En la tabla 3.6 se especifica las características técnicas de dicho inversor.

Características Técnicas	Valor
Potencia de carga máxima	1500 W
Voltaje de entrada directa	12 VCC
Voltaje de salida alterna	110 VCA 60 Hz sinusoidal modificada
Puerto USB	5 VCC y 1.8 A
Dimensiones	27.5 cm frente x 6 cm alto x 13 cm fondo
Peso	1.9 kg
Precio	\$ 3,790.00 MXN

Tabla 3.6. Características técnicas del inversor de 1500 W Steren [19].



Figura 3.6. Inversor de Steren 1500 W [19].

- **Opción 5 [20]:** El inversor de corriente es de la marca Truper, el modelo es INCO-1000, tiene un display digital indicando el voltaje de alimentación DC, potencia de salida y código de error. En la tabla 3.7 se muestra las características técnicas del inversor obtenidas de la hoja de especificaciones.

Características Técnicas	Valor
Potencia de carga máxima	1000 W
Voltaje de entrada directa	12 VCC
Voltaje de salida alterna	120 VCA 60 [Hz] sinusoidal modificada
Puerto USB	5 VCC y 0.5 A
Dimensiones	15.3 cm ancho x 24 cm longitud
Peso	1.5 kg
Precio	\$ 2,985.00 MXN

Tabla 3.7. Características técnicas del inversor de 1000 W Truper [20].



Figura 3.7. Inversor Truper de 1000 W [20].

- **Opción 6 [20]:** Este inversor es de la misma marca que la opción 3, cambia el modelo, siendo este el INCO-1500 y en la tabla 3.8 se coloca las especificaciones del inversor.

Características Técnicas	Valor
Potencia de carga máxima	1500 W
Voltaje de entrada directa	12 VCC
Voltaje de salida alterna	120 VCA 60 [Hz] sinusoidal modificada
Puerto USB	5 VCC y 0.5 A
Dimensiones	15.7 cm ancho x 24.5 cm longitud
Peso	1.6 kg
Precio	\$ 3,825.00 MXN

Tabla 3.8. Características técnicas del inversor de 1500 W Truper [20].



Figura 3.8. Inversor Truper de 1500 W [20].

De acuerdo a las opciones mostradas el inversor que se usará es el de onda sinusoidal modificada, debido a su bajo costo y porque se pueden adquirir fácilmente, en cambio los inversores de onda sinusoidal pura tienen costos elevados y los distribuidores se encuentran principalmente en Estados Unidos.

Descartando los inversores de onda sinusoidal pura, las opciones que se tienen, son inversores de mayor potencia a la que se requieren en las pruebas de campo (potencia máxima de 742.5 W), pero el costo de estos inversores depende de la potencia máxima de salida que proporcionen y de las marcas. Por lo que se decidió adquirir el de bajo costo, pero el que tiene una mayor potencia de salida, que en este caso fue el de la marca Steren, modelo INV-1500, teniendo un costo de \$3,790.00 MXN.

El sistema de alimentación estará conformado de la batería de la unidad móvil, el inversor de corriente de la marca Steren que tiene una potencia de salida de 1500 W (que es excedente a la potencia de salida requerida) y los cables de polarización que conectan el inversor con la batería del automóvil.

3.4. Programas a utilizar en las pruebas de campo

Los programas a utilizar en las pruebas de campo serán 3, los cuales son: el sistema de captura, el sistema de reproducción y BC Drive de R&S (Rohde & Schwarz). Los primeros dos programas se desarrollaron para SDR. El software ocupado en SDR es GNU Radio, el cual es una herramienta de desarrollo libre y abierto que consta de un conjunto de herramientas que proporcionan bloques de procesamiento para desarrollar radio de software. Las aplicaciones de GNU Radio se construyen en un entorno gráfico de GNU Radio Companion o mediante lenguajes de programación como Python o C++.

El sistema de captura y el sistema de reproducción servirán para tener en todos los receptores las mismas señales obtenidas en campo y poderlos evaluar en forma subjetiva, estos dos programas se desarrollaron dentro de un grupo de investigación de la Facultad de Ingeniería. Estos resultados son importantes para el análisis de las pruebas de campo.

El BC Drive es un software de R&S (Rohde & Schwarz) que funciona con el equipo ETL TV Analyzer de R&S y una computadora, este software graba datos georreferenciados de una señal de ATSC proporcionados por el ETL, como el MER, el BER, la respuesta impulsional y otros. Estos datos servirán para el análisis de los resultados de las pruebas de campo, comparándose con los resultados obtenidos de la evaluación a los receptores comerciales.

3.4.1. Descripción y funcionamiento del sistema de captura y reproducción

3.4.1.1 Descripción del sistema de captura

El programa “Sistema de captura” graba señales de RF mediante el muestreo de la señal. En el programa están definidas seis variables, que se pueden cambiar dependiendo de la información que se desee recibir. Estas variables son las siguientes:

- **Lo_offset:** Sirve para desplazar la frecuencia del oscilador local que tiene el USRP. Esta frecuencia afecta a la información que se desea grabar, por lo que es recomendable que esta frecuencia esté afuera del ancho de banda de la señal grabada.
- **Sample_rate:** Es la frecuencia de muestreo que ocupará el USRP para capturar la señal y está dada en Hz.
- **Ganancia:** Aumenta la potencia de la señal que se graba y está dada en dB. El valor máximo que se le puede dar es de 30 dB.
- **Frecuencia:** Es la frecuencia central de la señal y está dada en Hz. El rango de esta variable depende de la tarjeta hija WBX que tenga el USRP X300, en este caso el rango de frecuencia va de 50 MHz a 2.2 GHz y un ancho de banda de 40 MHz [4].
- **Antenna:** Es el nombre del conector RF donde se va a recibir la señal, en este caso es Tx/Rx.
- **Duración:** Es el tiempo de adquisición de datos de la señal recibida, está dada en segundos. Dependiendo del tiempo será el peso del archivo que se guarde.

En la figura 3.9 se muestran los bloques programados del “Sistema de Captura”.

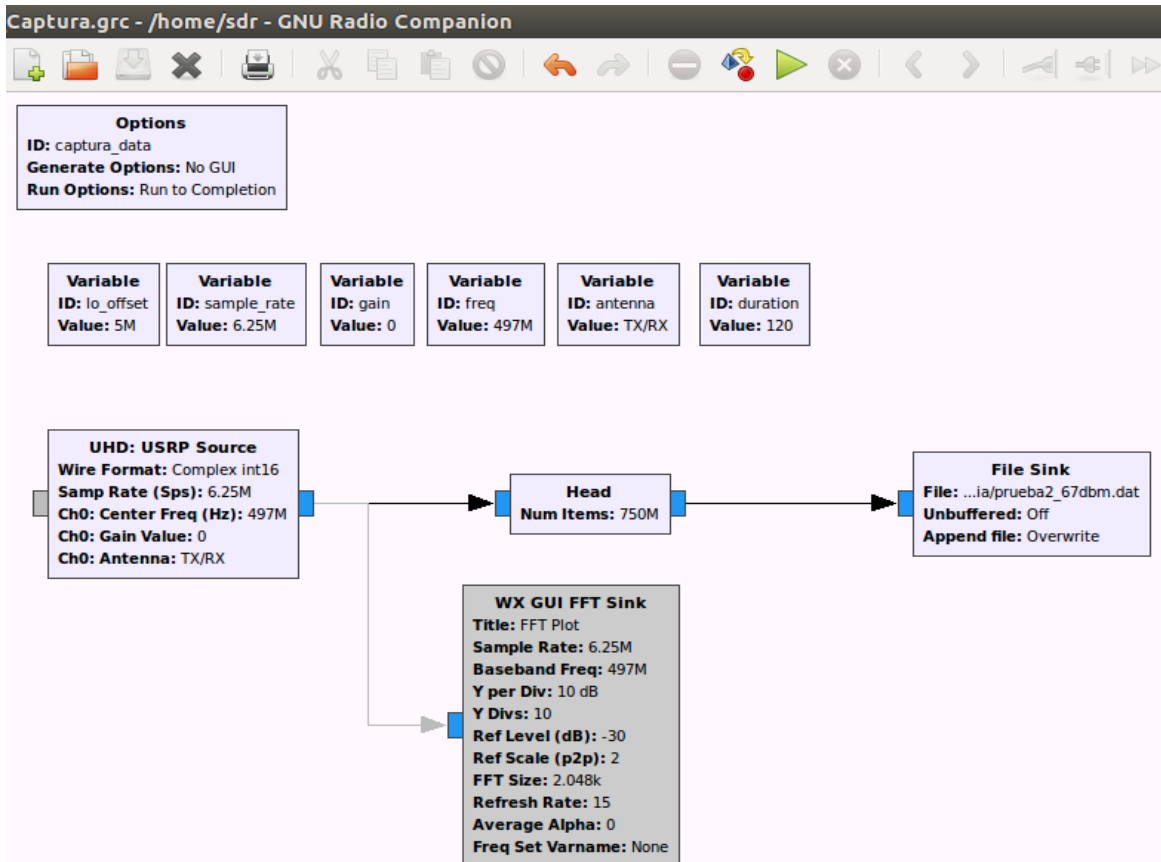


Figura 3.9. Diagrama de bloques del programa "Sistema de captura" en GNU Radio.

Este programa se divide en dos partes: la primera parte es para guardar la señal, ya sea en un disco externo o en el disco interno de la computadora con la extensión ".dat", y la segunda parte es para visualizar el espectro de la señal capturada.

3.4.1.2 Descripción del sistema de reproducción

El programa "Sistema de reproducción" sirve, como su nombre lo dice, para reproducir señales de RF grabadas con la extensión ".dat" con el programa "Sistema de Captura". Este programa tiene cinco variables que pueden ser modificadas de acuerdo a los requerimientos que se desee, estas variables son similares al programa "Sistema de captura". Las variables que tiene el programa se muestran a continuación:

- **Frecuencia:** Es la frecuencia central a la que se reproducirá la señal y está dada en Hz, puede ser igual a la frecuencia de captura o diferente, pero es conveniente que no se ocupen frecuencias comerciales para no irrumpir con la programación de las televisoras y para que estas no interfieran en la medida.

- **Sample_rate:** Es la frecuencia de muestreo a la que se reproducirá la señal, es importante que sea la misma a la cual se grabó la señal. Esta variable está dada en Hz.
- **Antenna:** Esta variable se coloca el nombre del conector RF donde se transmitirá la señal, en este caso es Tx/Rx.
- **Ganancia:** Aumenta la potencia de la señal que se reproducirá, está dada en dB, teniendo un valor máximo de 25 dB.
- **Lo_offset:** Desplaza la frecuencia del oscilador local que tiene el USRP, para que esta frecuencia no afecte la señal reproducida.

En la figura 3.10 se muestra el diagrama del “Sistema de reproducción” con los bloques de las variables descritas anteriormente.

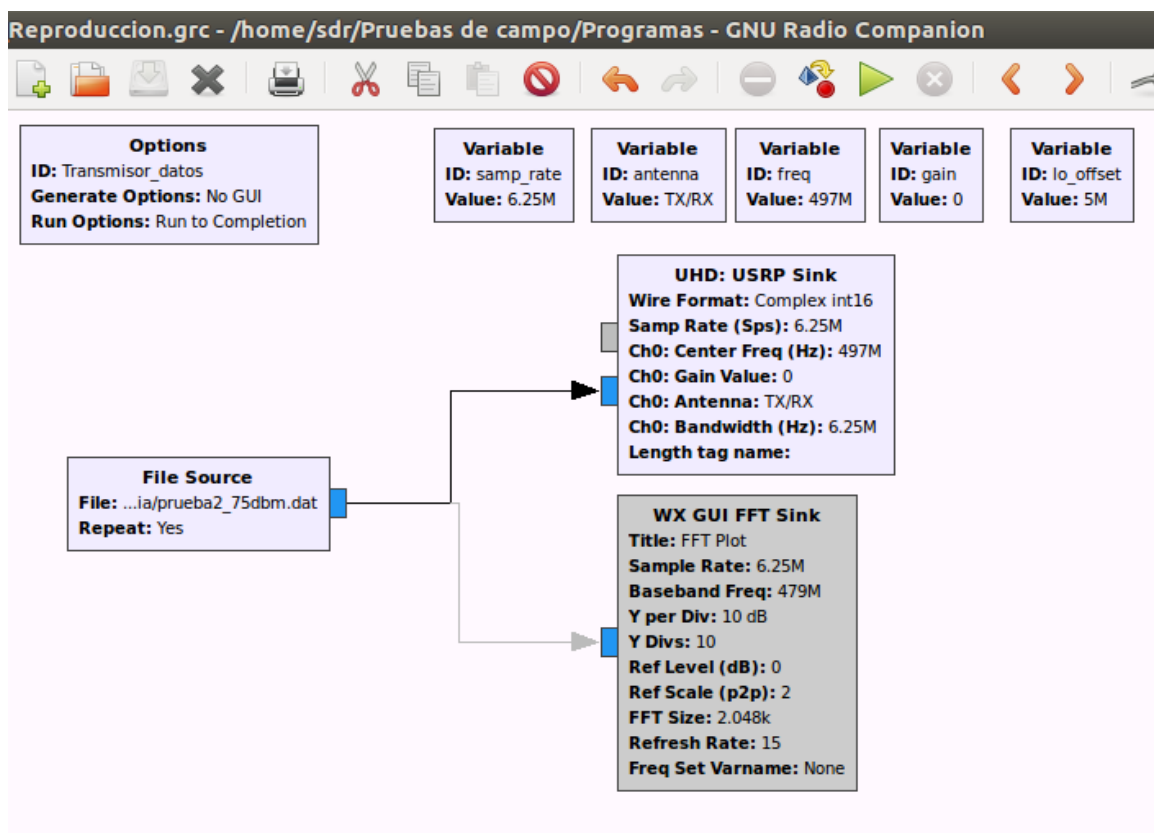


Figura 3.10. Diagrama de bloques del programa "Sistema de reproducción" en GNU Radio.

Este programa se divide en dos partes: la primera reproduce la señal que se grabó con extensión “.dat” y la segunda muestra el espectro de la señal que se reproduce.

3.4.1.3 Funcionamiento del sistema de captura y reproducción

Para corroborar el buen funcionamiento de los dos programas se realizaron varias pruebas. La primera prueba fue grabar una señal de ATSC con una potencia -28 dBm (señal buena) proveniente del equipo SFE de R&S, la cual se guardó en un disco externo. Después se reprodujo ese archivo en una televisión de prueba para verificar la calidad del video, obteniendo como resultado una señal con errores. Después se aumentó la potencia de la señal para disminuir los efectos de la atenuación que se podrían tener, pero seguía presentando errores el video cuando se reproducía la señal en el televisor.

Con el objeto de fijar este problema se cambió el receptor de prueba, obteniendo los mismos resultados (errores en el video). Investigando la causa de los errores de reproducción se realizaron más pruebas, concluyendo que el proceso de grabación o reproducción y la visualización del analizador de espectros eran dos tareas que el USRP y la computadora no podían realizar en forma simultánea por falta de capacidad de cómputo. Por ello se decidió eliminar el bloque del analizador de espectros en ambos programas.

Con las modificaciones realizadas a estos programas, se grabó de nuevo señal de ATSC con una potencia de -28 dBm, obteniendo la respuesta esperada, el cual fue un video sin errores.

En conclusión, los programas de sistema de captura y reproducción solo pueden realizar una operación a la vez, en este caso grabar o reproducir la señal, o visualizar el espectro, es decir no puede hacer estas dos acciones simultáneamente, debido al procesamiento que se lleva a cabo en la computadora el cual es tardado, ocasionando fallas en ambos procesos (grabar o reproducir la señal y analizador de espectro).

3.4.2. Descripción del software BC Drive de R&S

El software BC Drive de R&S permite guardar datos de una señal de televisión digital terrestre de diferentes estándares como por ejemplo DVB-T2, ISDB-T, ATSC, ATSC Mobile y DTMB. En este caso el estándar a utilizar es el de ATSC, que es el que se tiene en México para televisión digital. Este software controla al equipo ETL TV Analyzer de R&S y un módulo de GPS (Global Positioning System) para poder identificar la posición geográfica de cada una de las medidas obtenidas en campo.

El BC Drive se instala en una computadora o directamente en el equipo ETL TV Analyzer, si se opta por la primera opción se necesita una cable Ethernet para el control remoto del equipo. Para obtener los datos y la ubicación de la señal se tienen que realizar tres acciones las cuales son:

- Realización de una nueva prueba.

- Visualizar los resultados de la prueba en Google Earth.
- Post-proceso de los resultados de prueba.

En la primera acción de la realización de una nueva prueba se tiene que especificar el estándar a usar, las unidades de las medidas, la dirección de donde se guardarán los resultados, así como la frecuencia central de la señal de ATSC, también se selecciona las medidas que se deseen obtener de cada muestra de la señal. Por último, se coloca el número de muestras que se quieren adquirir, cada muestra se graba cada segundo. Una vez finalizada la grabación de los datos de la señal se guardan en un archivo con extensión “.drt”. El nombre del archivo se genera con el siguiente formato: *Año-Mes-Día-Hora-Minuto-Segundo-Descripción.dtr*.

La segunda acción es visualizar los resultados de las pruebas con el programa Google Earth, donde a través de esta opción se puede tener una visión general de los datos grabados y la ubicación de la señal. A partir del archivo con extensión “.drt” que tiene todos los datos grabados se genera el archivo “.kmz”, para que lo pueda abrir el programa Google Earth. En el proceso de generar el archivo “.kmz” se seleccionan las medidas que se deseen visualizar en cada muestra, también se selecciona un intervalo de valores que se visualizan mediante un conjunto de colores para cada medición, haciendo que los datos se puedan interpretar y visualizar más rápidamente. En la figura 3.11 se muestra de un ejemplo de cómo se visualiza los datos mediante el conjunto de colores dependiendo del intervalo de valores que se colocaron.

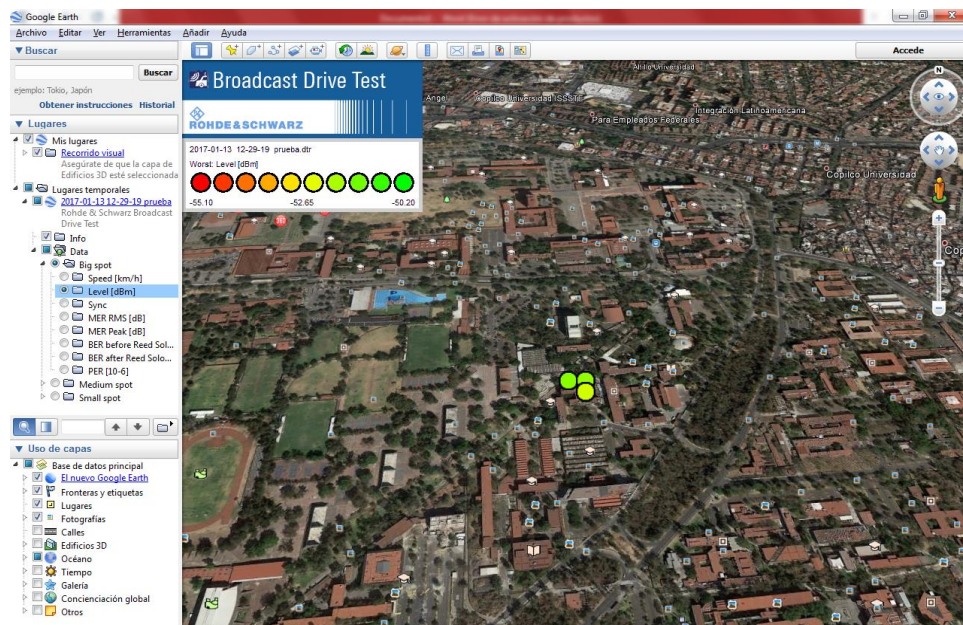


Figura 3.11. Visualización de los datos obtenidos por BC Drive mediante el conjunto de colores y la ubicación de estos en el programa Google Earth.

En la figura 3.12 se observan los valores de las medidas que se seleccionaron para que se visualizaran en cada muestra, además en la figura 3.13 se representa el patrón de ecos, en este ejemplo se presenta la tolerancia que tiene el equipo ETL TV Analyzer ante un eco estático, donde se representa la recepción de dos señales provenientes de dos transmisores (una señal por cada transmisor).

Details for the 44 aggregated samples:

Measurement	Validity	Worst	Average	Best	Distribution
Speed [km/h]	100.0%	1.9	0.67	0.0	
Level [dBm]	100.0%	-29.38	-29.28	-29.17	
Sync	100.0%	1	1.00	1	Not applicable
MER RMS [dB]	100.0%	19.3	22.18	26.1	
MER Peak [dB]	100.0%	13.3	13.30	13.6	
BER before Reed Solomon [10-6]	100.0%	1	0.20	0	
BER after Reed Solomon [10-6]	100.0%	0	0.00	0	
PER [10-6]	100.0%	0.000	0.000	0.000	

Figura 3.12. Valores de las medidas seleccionados para cada muestra.

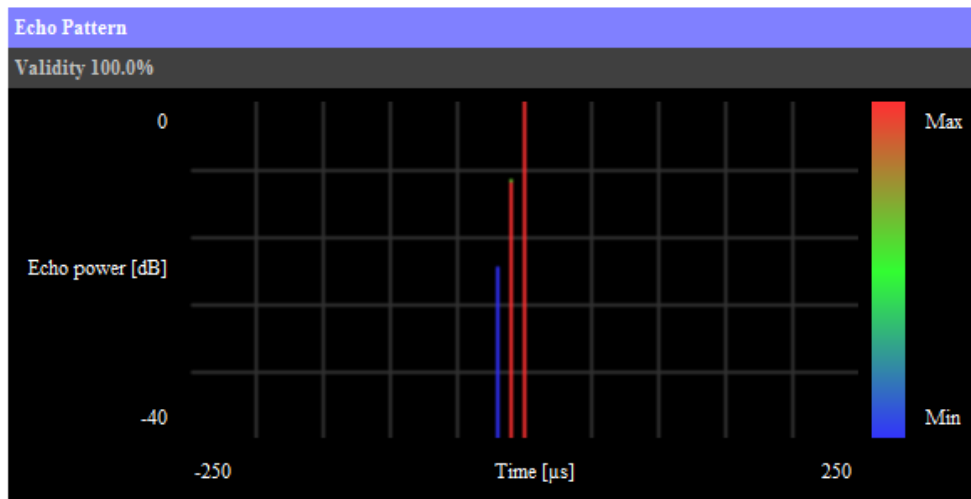


Figura 3.13. Patrón de ecos (eco estático pre-eco de 10 μs) de la muestra seleccionada.

La tercera acción es el post-proceso de los resultados de la prueba en donde a partir del archivo con extensión “.dtr” se generan tres archivos de Excel los cuales son:

- **Configuración:** Contiene la configuración que tiene el equipo ETL TV Analyzer.
- **Medición:** Contiene todas las mediciones numéricas como el MER (Modulation Error Ratio), BER (Bit Error Ratio) antes y después del Reed Solomon, el PER (Packet Error Ratio), así como la ubicación geográfica de la muestra y la fecha y hora en que se grabó de cada muestra.
- **Patrón de ecos:** Contiene los puntos de muestreo (valores) para graficar la respuesta al impulso de la señal, junto con la ubicación geográfica y fecha y hora en que se grabó la señal, por cada muestra hay 501 valores.

3.5. Caracterización de los equipos de medición

Los principales equipos que se usarán en las pruebas de campo son el USRP que servirá para grabar señales de una red SFN en diferentes condiciones y el ETL TV Analyzer que se ocupará para obtener los valores de los parámetros de medición de una señal, los cuales se utilizarán para el análisis de resultados de las pruebas de campo y obtener conclusiones de dichas pruebas.

La caracterización de estos equipos es importante para obtener los límites de medición y las pérdidas que tienen el proceso de grabación y reproducción; los cuales se tienen que tomar en cuenta para la planeación de las pruebas de campo.

3.5.1. USRP (Universal Software Radio Peripheral)

3.5.1.1 Descripción del equipo

El USRP (Universal Software Radio Peripheral) es un equipo que permite implementar radios definidos por software. Este equipo es fabricado por la compañía americana Ettus Research de NI (National Instruments). Para las pruebas de campo se utiliza la serie de USRP X300, por lo que en la figura 3.14 se muestra la apariencia de este equipo.



Figura 3.14. Vista superior interna del USRP X300 [3].

Algunas características generales del USRP X300 son [3]:

- Utiliza una FPGA, cuenta con un reloj de 200 MHz y 200 MS/s⁵ por ancho de banda para cada canal de 16 bits.
- Cuenta con múltiples interfaces de alta velocidad: Dual 10 Gigabit Ethernet (200 MS/s Full Duplex), ExpressCard (50 MS/s Full Duplex), Dual 1 Gigabit Ethernet (25 MS/s Full Duplex).
- Arquitectura UHD (USRP Hardware Driver) que permite la compatibilidad con diferentes softwares de SDR, que será en este caso GNU Radio.

El USRP cuenta con una tarjeta hija utilizada en la implementación de los transmisores, la cual es la WBX Rx/Tx que trabaja en un rango de 50 MHz a 2.2 GHz con un ancho de banda de 40 MHz tanto en transmisión como en recepción. Las principales características de esta tarjeta son las siguientes [4]:

- Proporciona una potencia de salida de hasta 100 mW.
- Opera en full dúplex a diferentes frecuencias.
- Los osciladores locales de transmisión y recepción son independientes pero pueden ser sincronizados para trabajar con sistema MIMO (Multiple-Input Multiple-Output).
- Cuenta con dos entradas, una puede ser utilizada para transmitir como para recibir (Tx/Rx) y la otra solo permite recepción (Rx2).

⁵ 10⁶ muestras por segundo

3.5.1.2 Caracterización del equipo

El USRP X300 es el hardware que se utiliza para la grabación y reproducción de señales de RF, por lo tanto se tiene que obtener el valor de las pérdidas que tiene este equipo a la hora de realizar estos procesos para que la señal reproducida tenga el mismo nivel que la señal grabada. También hay que verificar si es capaz de grabar y reproducir la señal con las mismas características que la original. Por esta razón se hicieron varias pruebas para verificar el funcionamiento del equipo.

Los equipos que se utilizaron para realizar estas pruebas son el equipo USRP con módulo OCXO (sirve para estabilizar la frecuencia del USRP, mediante un GPS que tiene el módulo) y otro USRP sin módulo OCXO, una computadora con sistema operativo Linux y con el software GNU Radio, un generador de señales de televisión digital con el estándar ATSC que en este caso será un SFE de R&S, el equipo ETL TV Analyzer para obtener el espectro y medir algunos parámetros de la señal de ATSC y un cable RG58 con conectores “N” (ETL TV Analyzer y SFE) y “SMA” (USRP).

3.5.1.2.1 Estabilidad de frecuencia del USRP

La primera prueba que se realizó fue la comparación del USRP sin el módulo de OCXO y el USRP con el módulo de OCXO. Este módulo tiene como función mejorar la estabilidad de la frecuencia del oscilador local que tiene el USRP.

La prueba se hizo midiendo la desviación de la frecuencia piloto de una señal de televisión digital, grabando y reproduciendo con el USRP con y sin OCXO. Además se llevó a cabo con diferentes frecuencias para determinar que el módulo OCXO funciona adecuadamente para cualquier frecuencia. Las frecuencias usadas fueron 57, 85, 207 y 497 MHz, que corresponde a los canales 2, 6, 12 y 18 de DTV respectivamente, de igual forma se efectuó con dos niveles de potencia: el nivel óptimo de -28 dBm y el nivel medio de -53 dBm.

En la tabla 3.9 se muestra los valores de la frecuencia piloto con respecto a la frecuencia central, la diferencia de la potencia piloto y el nivel de la señal y el nivel de DC de la piloto que se agrega a cada símbolo de acuerdo a al estándar A/53 [21].

Frecuencia RF [MHz]	Frecuencia de la piloto medida [MHz]	Diferencia de potencia de la piloto y el nivel de la señal [dB]	Nivel de DC de la señal piloto
57	54.309	11.3	1.25
85	82.309	11.3	1.25
207	204.309	11.3	1.25
497	494.309	11.3	1.25

Tabla 3.9. Valores de la frecuencia piloto de una señal de televisión digital de acuerdo al estándar de ATSC A/53.

La tabla 3.10 muestra los valores obtenidos de las señales grabadas y reproducidas con el USRP sin OXCO, medidos con el equipo ETL TV Analyzer de R&S.

Frecuencia RF [MHz]	Potencia SFE R&S [dBm]	Frecuencia de la piloto medida [MHz]	Diferencia de potencia de la piloto y el nivel de la señal [dB]	Nivel de DC de la señal piloto
57	-28	54.300	11.5	1.23
57	-53	54.300	11	1.2
85	-28	82.300	11.4	1.23
85	-53	82.300	10.9	1.3
207	-28	204.300	11.2	1.27
207	-53	204.300	11.6	1.3
497	-28	494.300	11	1.26
497	-53	404.300	10.8	1.3

Tabla 3.10. Valores medidos con el ETL TV Analyzer de las señales grabadas y reproducidas con el USRP sin OXCO.

En la figura 3.15 se muestra el espectro de una señal de ATSC a una frecuencia de 497 MHz (canal 18) y a una potencia de -28 dBm, además se muestra en líneas verdes la atenuación de hombros y en línea roja la frecuencia a la que debe de estar la piloto de acuerdo a la recomendación de la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC). En la figura 3.16 se presenta una señal de ATSC a la misma frecuencia que la figura anterior (canal 18) pero a una potencia de -53 dBm; estas dos figuras se grabaron y reprodujeron con el USRP sin OXCO.

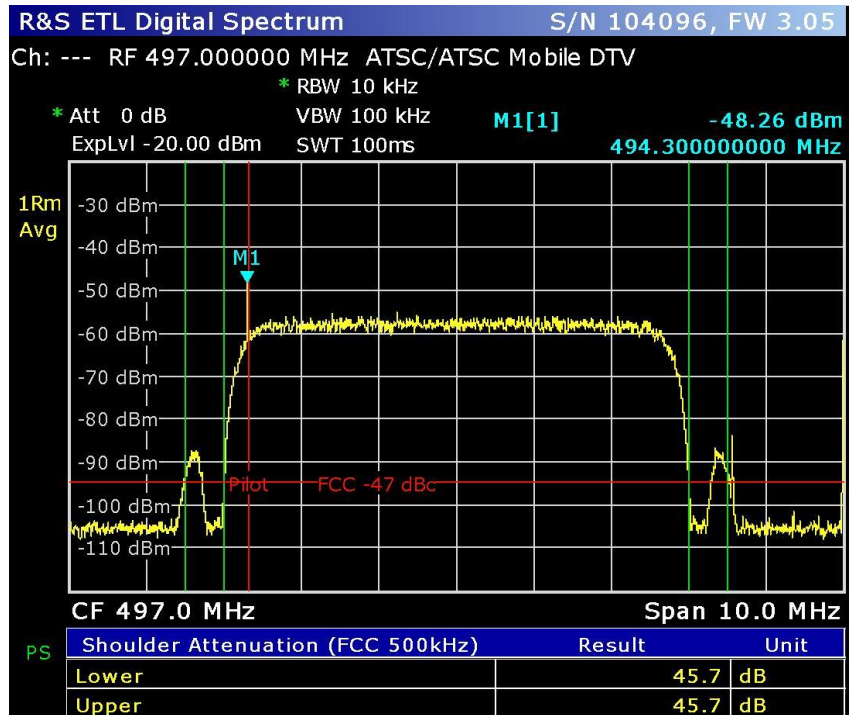


Figura 3.15. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -28 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP sin OXCO.

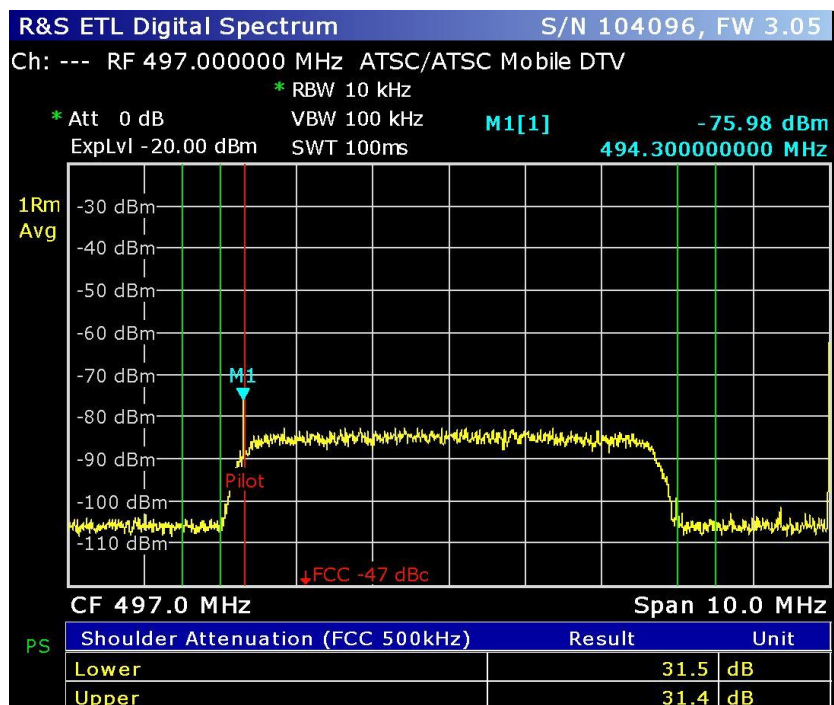


Figura 3.16. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -53 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP sin OXCO.

La desviación de la frecuencia piloto obtenida de una señal de televisión digital grabada y reproducida por el USRP sin OCXO fue de 9 kHz comparada con la tabla de acuerdo al estándar de ATSC A/53.

En la tabla 3.11 se muestran los valores obtenidos de las señales grabadas y reproducidas con el USRP con OCXO, estas señales fueron medidas con el equipo ETL TV Analyzer.

Frecuencia RF [MHz]	Potencia SFE R&S [dBm]	Frecuencia de la piloto medida [MHz]	Diferencia de potencia de la piloto y el nivel de la señal [dB]	Nivel de DC de la señal piloto
57	-28	54.308	11.4	1.24
57	-53	54.308	11.5	1.24
85	-28	82.308	11.3	1.24
85	-53	82.308	11.4	1.25
207	-28	204.308	11.4	1.24
207	-53	204.308	11.4	1.23
497	-28	494.308	11.3	1.24
497	-53	494.308	11.3	1.23

Tabla 3.11. Valores de la frecuencia piloto de señales grabas con el USRP con OCXO.

En las figuras 3.17 y 3.18 se muestran el espectro de una señal de ATSC de una potencia de -28 dBm y -53 dBm respectivamente, a una frecuencia de 497 MHz; estas dos señales fueron grabadas y reproducidas con el equipo USRP con OCXO.

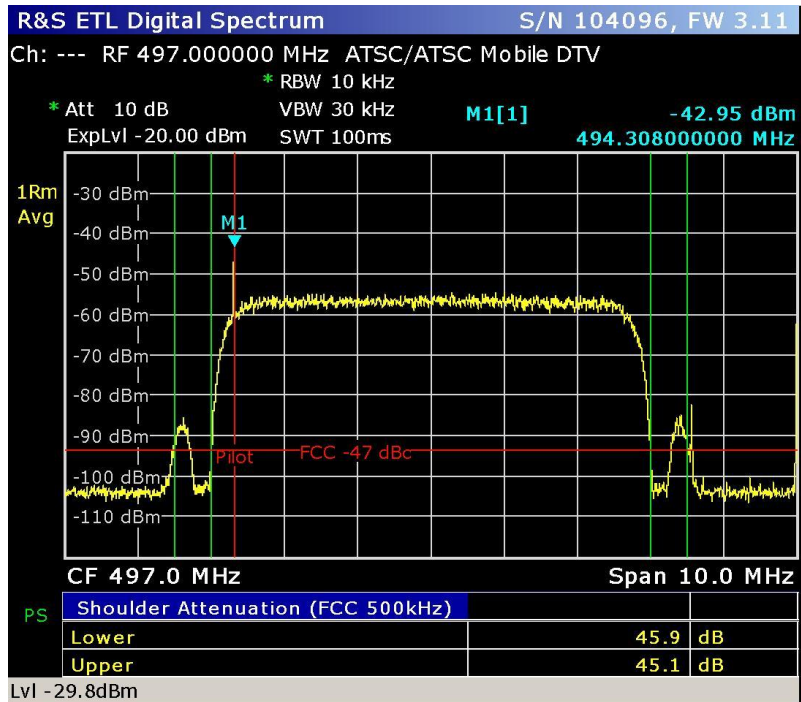


Figura 3.17. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -28 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP con OCXO.

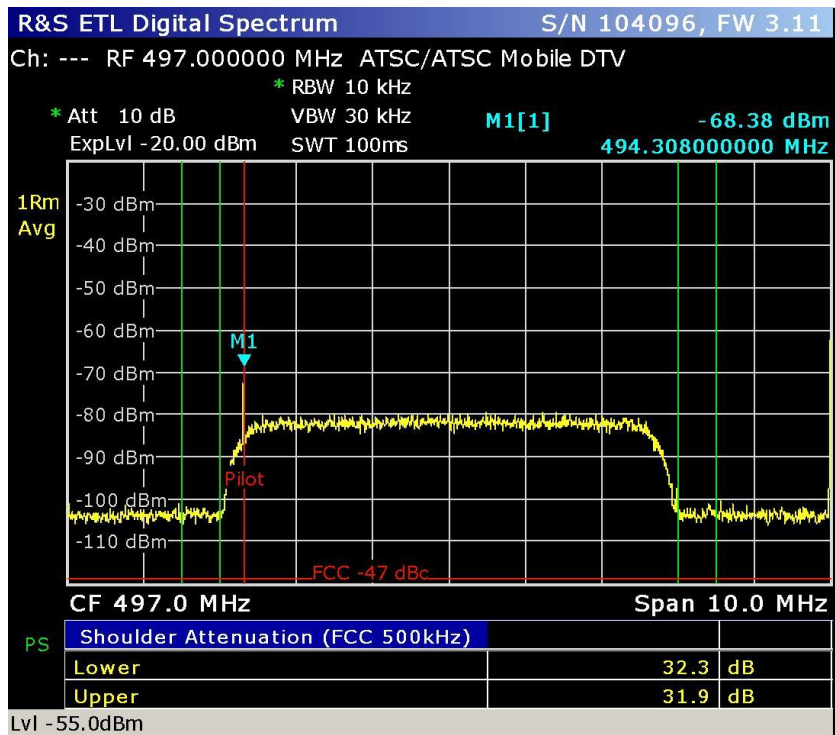


Figura 3.18. Espectro de la señal de ATSC con una potencia de -53 dBm, a una frecuencia de 497 MHz grabado con el USRP con OCXO.

Comparando las tablas 3.9 y 3.11 se puede determinar que la desviación en frecuencia de la piloto de una señal de televisión digital grabada y reproducida por un equipo USRP con OCXO fue de 1 kHz. Se puede concluir que la desviación en frecuencia de la señal piloto fue menor con OCXO que sin OCXO, esta prueba es importante debido a que si desviación es muy grande causa pérdidas de la sincronía de la señal y como consecuencia no se podría demodular. Por esta razón se eligió el USRP con OCXO, a este equipo se le realizaron pruebas para determinar las pérdidas que puede tener en el proceso de grabación y reproducción, y también para verificar si graba las señales con las mismas características que la original.

3.5.1.2.2 Sensibilidad del USRP

La siguiente prueba es la de sensibilidad, servirá para calcular las pérdidas que tiene el USRP X300 cuando graba y reproduce una señal de RF. Esto se hará con señales a diferentes potencias, ocupando el equipo SFE de R&S para generar las señales de referencia, y además se utilizará el ETL TV Analyzer para medir diferentes parámetros de la señal. En principio, para esta prueba se medirá las pérdidas de los cables, es decir se caracterizaran los cables, y esto se hará midiendo la potencia de la señal generada por el SFE de R&S con el equipo ETL TV Analyzer, además de medir la potencia del canal, también se medirá la C/N (Carrier to Noise) que de acuerdo a la recomendación A/54 el valor de C/N debe de ser mayor o igual a 14.9 dB [22], para poder determinar la potencia del ruido a partir de estos dos valores.

$$\frac{C}{N} = \frac{\text{Potencia de la Portadora}}{\text{Potencia del ruido}} \quad (1)$$

$$\frac{C}{N} [dB] = \text{Potencia de la Portadora [dBm]} - \text{Potencia del Ruido [dBm]} \quad (2)$$

De la ecuación (2) se despeja la potencia del ruido para poder calcularla, debido a que el ETL proporciona la potencia de la portadora y el valor de C/N, obteniendo la siguiente ecuación:

$$\text{Potencia del Ruido [dBm]} = \text{Potencia de la Portadora [dBm]} - \frac{C}{N} [dB] \quad (3)$$

En la tabla 3.12 se muestran los valores obtenidos de las señales a diferentes potencias generadas por el SFE de R&S y medidos por el equipo ETL TV Analyzer.

Potencia de la señal generada [dBm]	Potencia de la señal medida [dBm]	C/N [dB]	Potencia del ruido [dBm]
-30	-31.1	57.7	-88.9
-35	-36.1	53.8	-90.1
-40	-41.1	50	-91
-45	-46.1	45	-90.8
-50	-51.2	39.7	-90.9
-55	-56.2	34.6	-90.8
-60	-61.2	30.1	-90.7
-65	-66	24.5	-90.5
-70	-71.3	19.3	-90.6
-75	-76	14.8	-90.8

Tabla 3.12. Valores medidos con el ETL TV Analyzer para verificar la señal de TV Digital generada por el SFE de R&S.

De la tabla anterior se puede observar que las pérdidas por conectores y cable fue en promedio de 1.2 dB, esto se obtuvo con la diferencia de potencia generada por el equipo SFE de R&S y la potencia medida por el equipo ETL TV Analyzer, que en teoría debería ser la misma.

En la figura 3.19 se muestra el espectro de una señal de televisión digital de -30 dBm de potencia generada por el SFE y visualizado en el equipo ETL TV Analyzer.

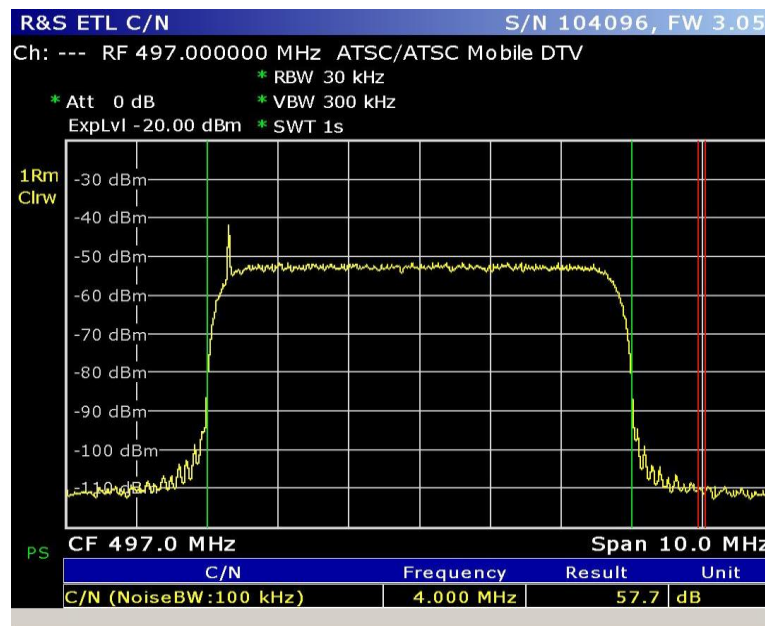


Figura 3.19. Espectro de la señal de televisión digital con una potencia de -30 dBm generado por el equipo SFE de R&S.

Después de caracterizar los cables, se medirá las pérdidas que tiene el USRP X300 cuando se utiliza como grabador y reproductor de señales y esto se realizará grabó señales de diferentes potencias (se utilizaron las potencias de la tabla 3.12) usando el SFE de R&S y el USRP con OCXO con el programa “Sistema de captura”. Para reproducir las señales y visualizarlas en el equipo ETL se utilizó el programa “Sistema de reproducción”. En la tabla 3.13 se muestran los valores obtenidos de la prueba.

Potencia de la señal generada [dBm]	Potencia de la señal grabada [dBm]	C/N grabado [dB]	Potencia del ruido grabado [dBm]
-30	-32.9	45.3	-78.2
-35	-37.9	40.8	-78.7
-40	-43.1	35.4	-78.5
-45	-48.4	30	-78.4
-50	-53.4	25	-78.4
-55	-58.5	20.1	-78.6
-60	-63.5	15	-78.5
-65	-68.3	10.1	-78.4
-70	-73.6	5.7	-79.3
-75	-75.4	2.9	-78.3

Tabla 3.13. Valores medidos con el ETL TV Analyzer de las señales grabadas y reproducidas con el USRP con OCXO.

En la figura 3.20 se muestra el espectro de una señal de ATSC a una potencia de -30 dBm, esta señal fue grabada y reproducida por el equipo USRP con OCXO.

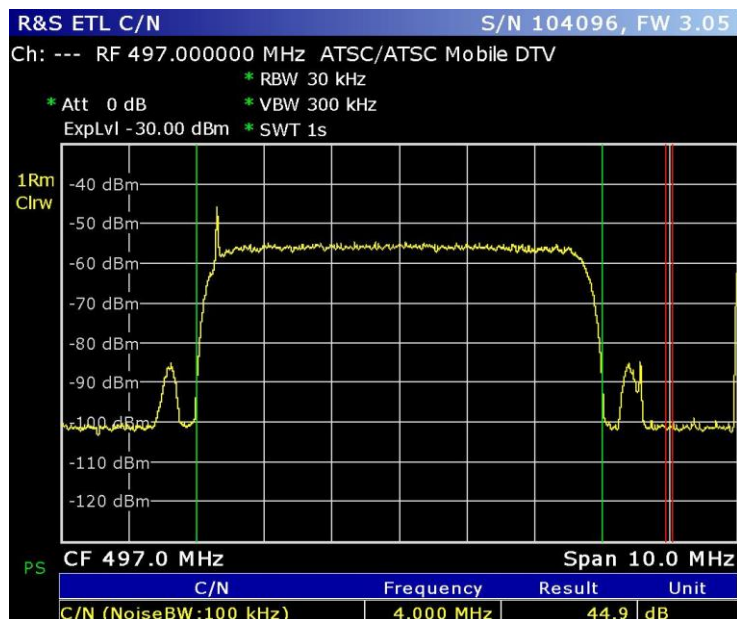


Figura 3.20. Espectro de la señal de televisión digital con una potencia de -30 dBm grabada y reproducida por el USRP con OCXO.

Comparando las tablas 3.12 y 3.13 se puede observar que la diferencia de potencia del canal de una señal grabada con el USRP con OCXO y de la señal transmitida del SFE R&S fue aproximadamente de 3 dB, en este valor se considera las pérdidas por cable y conectores, el cual es de aproximadamente 2.4 dB debido a que se consideran dos veces las pérdidas por cable (cuando se graba y cuando se reproduce la señal). La potencia del ruido generado por el USRP con OCXO es de -78.5 dBm y la potencia del ruido del SFE es de -90.5 dBm, teniendo una diferencia de potencia de ruido de 12 dB. Esto causa que la sensibilidad sea mayor, este resultado se debe a la electrónica que tiene la tarjeta madre e hija del USRP, además del procesamiento que tiene la señal cuando se graba y reproduce. Por lo que se llega a la conclusión, que en el sistema de captura de la señal se debe de colocar una ganancia aproximada de 14.4 dB, que incluye la pérdida por cables y la diferencia de potencia del ruido para que no afecte el umbral de visibilidad de los receptores.

Contrastando las figuras 3.19 y 3.20 se puede notar las dos señales tienen las mismas características, exceptuando el nivel de la señal y la frecuencia del oscilador local que tiene el USRP, por lo tanto se puede concluir que el equipo USRP con OCXO y los programas “Sistema de captura y reproducción”, realizan adecuadamente la tarea de grabar y reproducir señales con las mismas características de la original.

Para verificar esta conclusión, se grabó señales con multitrayecto de la prueba de eco estático que se le realizó al equipo ETL TV Analyzer (los resultados de esta prueba se observan en el capítulo

3.5.2). Estas señales grabadas, son los valores límite de la atenuación de la potencia del eco con respecto a la potencia directa (D/E) y el retardo del eco con respecto a la señal directa (los retardos positivos corresponden a la recepción posterior del eco a la señal directa y los retardos negativos corresponden a la recepción del eco antes que la señal directa), algunos de estos valores se muestran en la tabla 3.14.

D/E [dB]	Retardo [μ s]
9	-10
4.7	-5
2	5
2	10

Tabla 3.14. Valores de potencia y retardo del equipo ETL TV Analyzer ante la prueba de eco estático.

En las figuras 3.21, 3.22, 3.23 y 3.24 se observa el patrón de ecos, y una tabla que muestra el nivel de la señal directa (que corresponde al número uno de la tabla) y de los ecos (que corresponden del número dos al diez de la tabla) en forma relativa, además del retardo y la desviación de frecuencia que tienen los ecos con respecto a la señal directa.

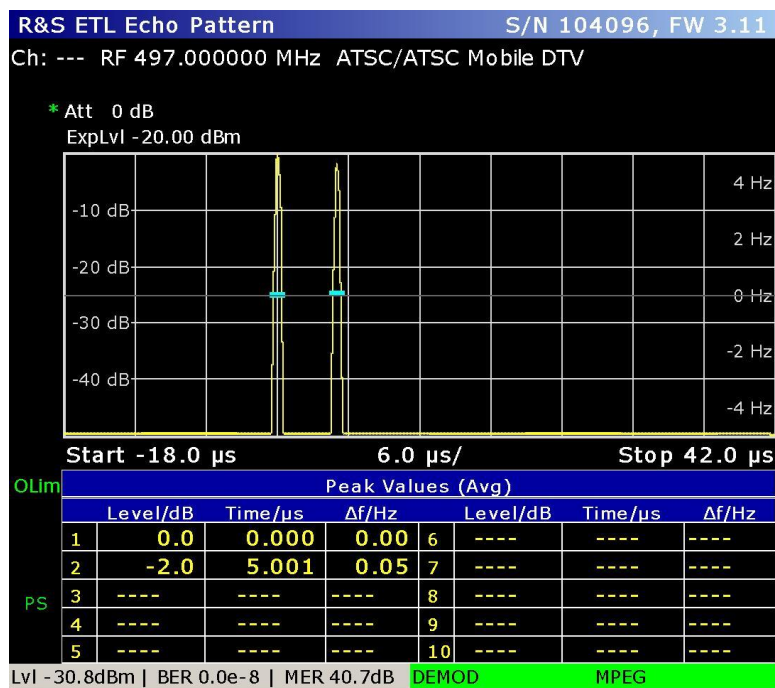


Figura 3.21. Representación de señal principal y una señal eco (pos-eco) con un retardo de 5 μ s.

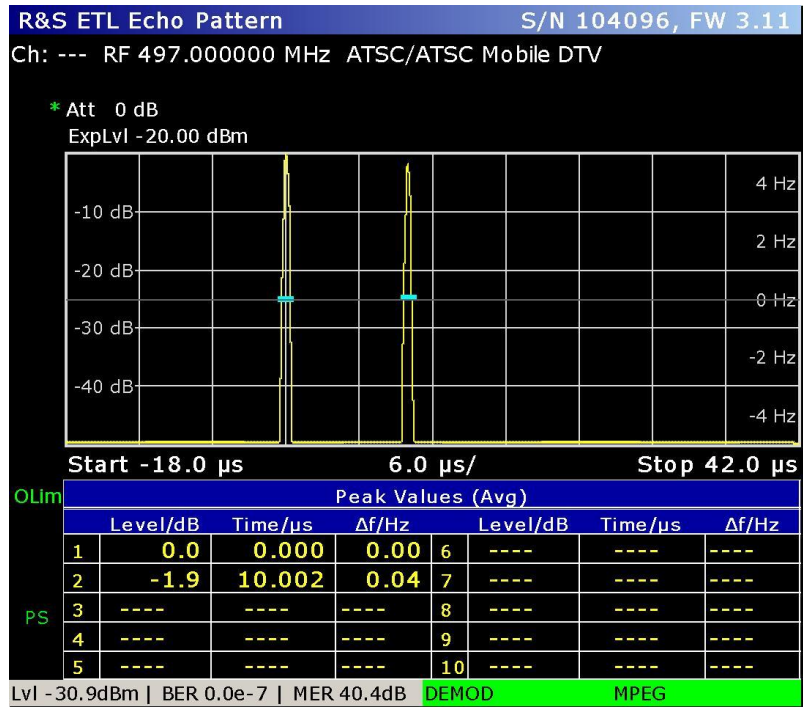


Figura 3.22. Representación de señal principal y una señal eco (pos-eco) con un retardo de 10 μs.

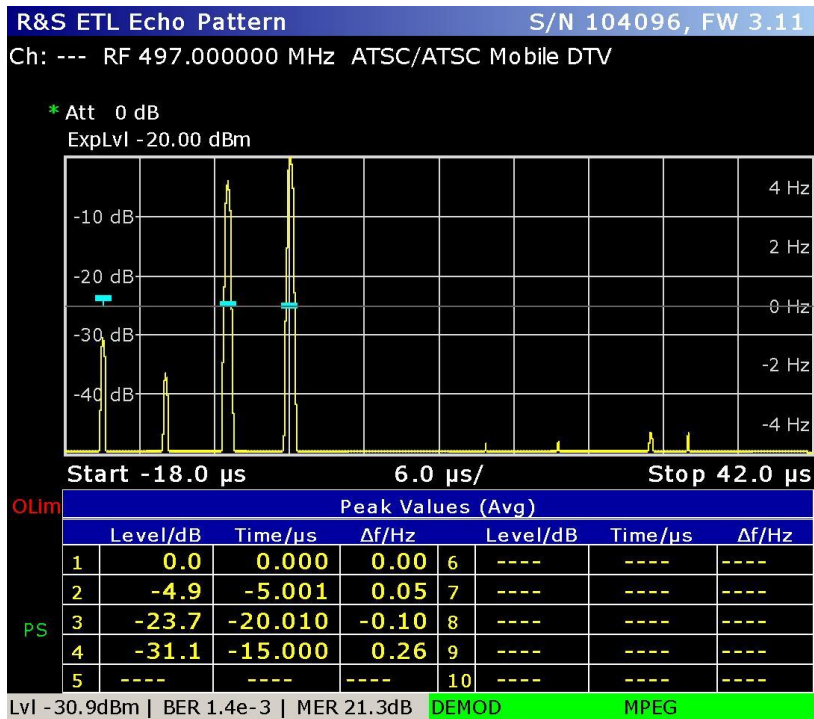


Figura 3.23. Representación de señal principal y una señal eco (pre-eco) con un retardo de 5 μs.

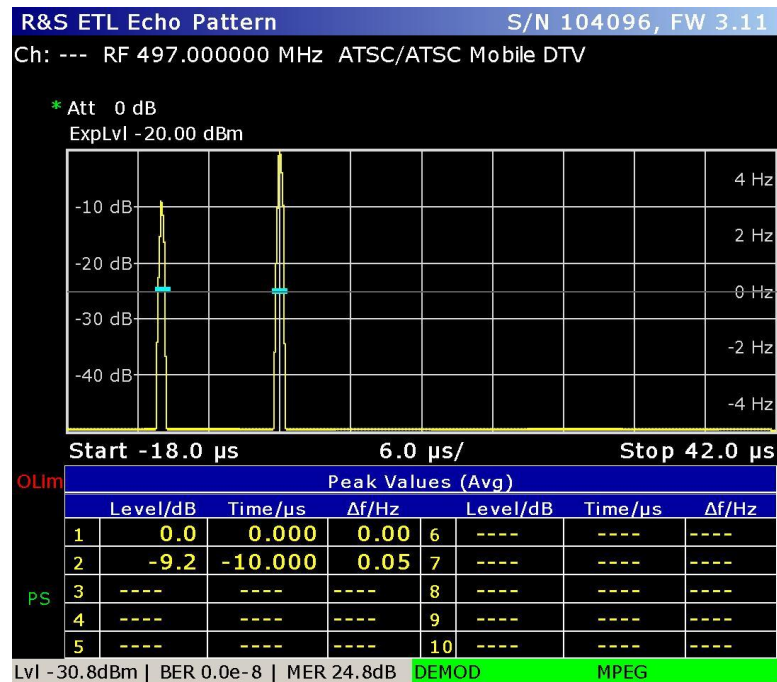


Figura 3.24. Representación de señal principal y una señal eco (pre-eco) con un retardo de 10 μs.

Comparando la tabla 3.14 y las figuras de la 3.21 a la 3.24 correspondientes al patrón de ecos, se puede demostrar que el equipo USRP con OCXO graba y reproduce las señales con los mismos aspectos que la original, ya que los valores de la tabla que corresponden al nivel y al retardo del eco, son similares a los valores del eco que se muestran en las figuras (que corresponde al número dos de la tabla).

3.5.2. ETL TV Analyzer de R&S

3.5.2.1 Descripción del equipo

El ETL TV Analyzer de R&S es un instrumento para analizar señales de TV, TV móvil y señales de radiodifusión, por lo que tiene cuatro modos de medición los cuales son:

1. Televisión/Analizador de señales/Receptor
2. Analizador de espectros
3. Grabación/Generación de señales de video y audio
4. Comprobación de transmisión

El equipo ETL TV Analyzer tiene la opción de ATSC/ATSC Mobile DTV para realizar medidas con ese estándar. Las características de este equipo son las siguientes [5]:

- El rango de frecuencias de operación: 500 kHz a 3 GHz
- El rango de potencia de la señal de entrada: -92 dBm a +10 dBm
- Las medidas que realiza el equipo son: Nivel de la señal, MER RMS, MER Pico, BER antes del Reed Solomon, BER después del Reed Solomon, PER, C/N, EVM (Error Vector Magnitude) RMS y EVM Pico. Estas mediciones las realiza tanto para ATSC fijo y móvil, adicionalmente para móvil mide las siguientes: el BER antes y después del Reed Solomon-Cyclic Redundancy Check, Payload, Ensemble Bit Rate y Parade Bit Rate.
- Los esquemas que genera de una señal son: espectro de la señal, la constelación, el diagrama de ojo, el patrón de ecos, grafica de amplitud y fase y gráfica de amplitud y retardo de grupo.

En la figura 3.25 se muestra el equipo ETL TV Analyzer.



Figura 3.25. Equipo ETL TV Analyzer [5].

3.5.2.1 Caracterización del equipo

Las pruebas de campo tienen como objeto medir la respuesta de los receptores frente a condiciones de multitrayecto, por lo tanto se debe de encontrar la respuesta que tiene el ETL ante el multitrayecto, por esta razón se realizarán algunas pruebas de laboratorio que se hicieron a los receptores comerciales para medir su máscara de recepción (diferencia de retardos y potencia de la señal principal y el eco en que es capaz de medir) en presencia del multitrayecto. El objetivo principal de estas pruebas es encontrar los límites de retardo y potencia con que puede demodular el ETL, debido a que con este equipo obtendremos los valores de los parámetros de medición de las señales de la red SFN y también con esto delimitar los sitios en donde se realizarán las pruebas.

La primera prueba a realizar es la tolerancia a un **eco estático**, debido a que comprende los valores mínimos de comportamiento que debe de cumplir ante la presencia de un eco, prueba que está relacionada con el comportamiento ideal de una red SFN de dos transmisores. Esta prueba se configuró un desplazamiento Doppler de 0.05 Hz a la señal eco para que esta pueda tener diferentes desfases de la señal principal, además se utiliza un nivel de potencia de -28 dBm [23].

La segunda prueba a realizar es **la respuesta a una red SFN de dos transmisores utilizando el modelo de canal Brasil A (Recepción en exteriores)**. Esta prueba es de gran importancia ya que proporciona los valores límite que soporta el receptor para demodular una señal correctamente en una forma más real en ambientes de exteriores. Las condiciones que simula este tipo de canal es que se tiene una antena fija en el exterior en una construcción, la cual se encuentra apuntando en línea de vista a un transmisor. En la tabla 3.15 se muestra los parámetros de simulación del modelo de canal Brasil A [24].

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 3.15. Modelo de canal Brasil A (Recepción en exteriores) [24].

La tercera y última prueba a realizar es **la respuesta a una red SFN de dos transmisores utilizando el modelo de canal Brasil D (Recepción en interiores)**. Esta prueba nos proporciona los valores límite en donde el receptor puede demodular en forma correcta una señal en ambientes de interiores. Las condiciones que representa este tipo de canal es una recepción que se encuentra en el interior de una construcción y se tiene una antena pequeña. En la tabla 3.16 se muestran los parámetros de simulación del modelo de canal Brasil D [24].

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 3.16. Modelo de canal Brasil D (Recepción en interiores) [24].

Los resultados obtenidos de estas tres pruebas se compararán con los valores límite que debe lograr demodular un receptor ATSC ante la presencia de dos señales estáticas o cuasi-estáticas según el documento A/74 de ATSC. La figura 3.26 corresponde a la referencia que marca la recomendación A/74 en la relación que existe entre una señal que llega de mayor potencia llamada señal directa (D) y otra señal que llega con menor potencia y retardada en tiempo llamada eco (E). Los ecos se clasifican de dos formas de acuerdo al retardo que presentan con la señal directa, la primera es pre-eco que es una señal de menor potencia que llega antes en tiempo que la señal directa y la segunda es pos-eco que es la señal eco que llega después que la señal directa.

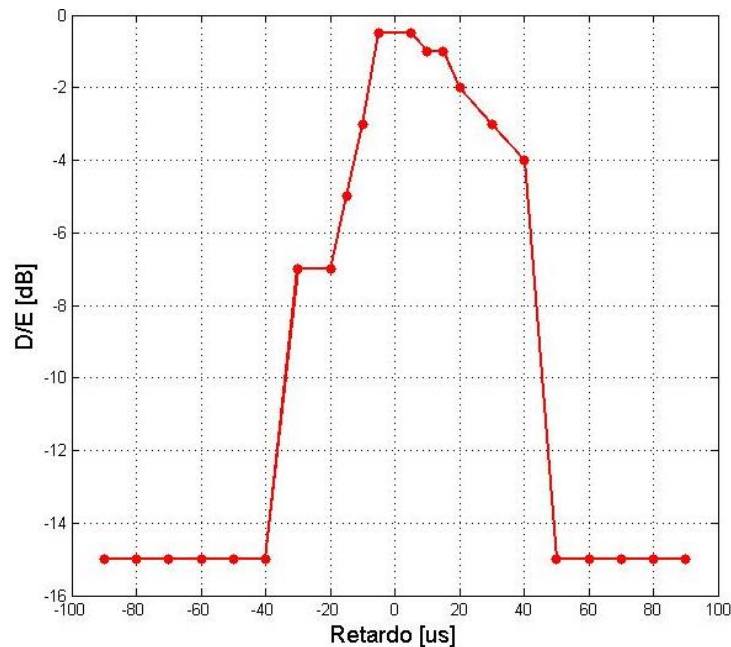


Figura 3.26. Valores mínimos que debe demodular un receptor de ATSC según la práctica recomendada A/74 de ATSC [23].

En la figura 3.27 se muestra la respuesta que tiene el ecualizador del equipo ETL TV Analyzer ante la presencia de un eco estático, además de colocar la gráfica de los valores límite de acuerdo que debe demodular un receptor de acuerdo al documento A/74 de ATSC, pero también se colocó la respuesta de los receptores comerciales que tuvieron el mejor y peor desempeño en las pruebas de laboratorio que realizó el proyecto REFUTV con esta misma condición de multitrayecto [25]. Estas pruebas se realizaron con el equipo SFE de R&S y con seis televisores, los cuales eran una muestra significativa de los receptores comerciales que México en el momento en que se hicieron las pruebas.

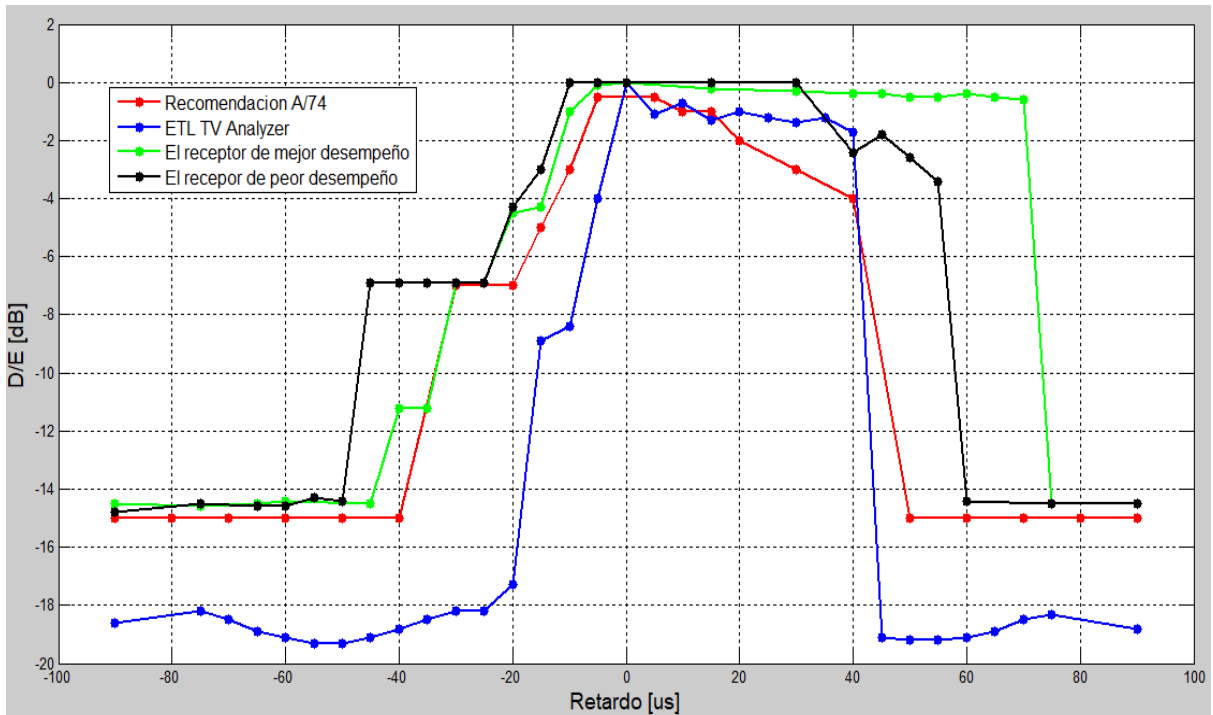


Figura 3.27. Desempeño de los receptores ante un Eco estático.

Con base a los resultados obtenidos, el ETL presenta el mismo desempeño en pos-eco en comparación con lo recomendado en la norma A/74 es decir el máximo retardo que soporta es de 40 μs aunque con una mejor relación de potencia de la señal directa y potencia del eco (D/E). Sin embargo, está por debajo de la máscara de recepción de los receptores comerciales porque ellos soportan un retardo de 55 μs (el peor receptor comercial) y de 70 μs (el mejor receptor comercial).

En la zona de pre-eco se tuvo un mal desempeño en el ETL, soportando solo un retardo de -20 μs , estando por debajo de la recomendación, por lo que se tendrá dificultades cuando se realicen mediciones en la zona de pre-eco dentro de una red SFN de dos transmisores. Los receptores comerciales tuvieron un mejor desempeño teniendo un máximo de retardo de -40 μs .

En la figura 3.28 se muestra el desempeño del ETL, y de dos receptores comerciales (el mejor y peor desempeño de las pruebas de laboratorio [25]) ante la recepción de la señal por medio de una antena colocada en exteriores (modelo de canal Brasil A). 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, además se incluye la gráfica de la recomendación A/74 de ATSC.

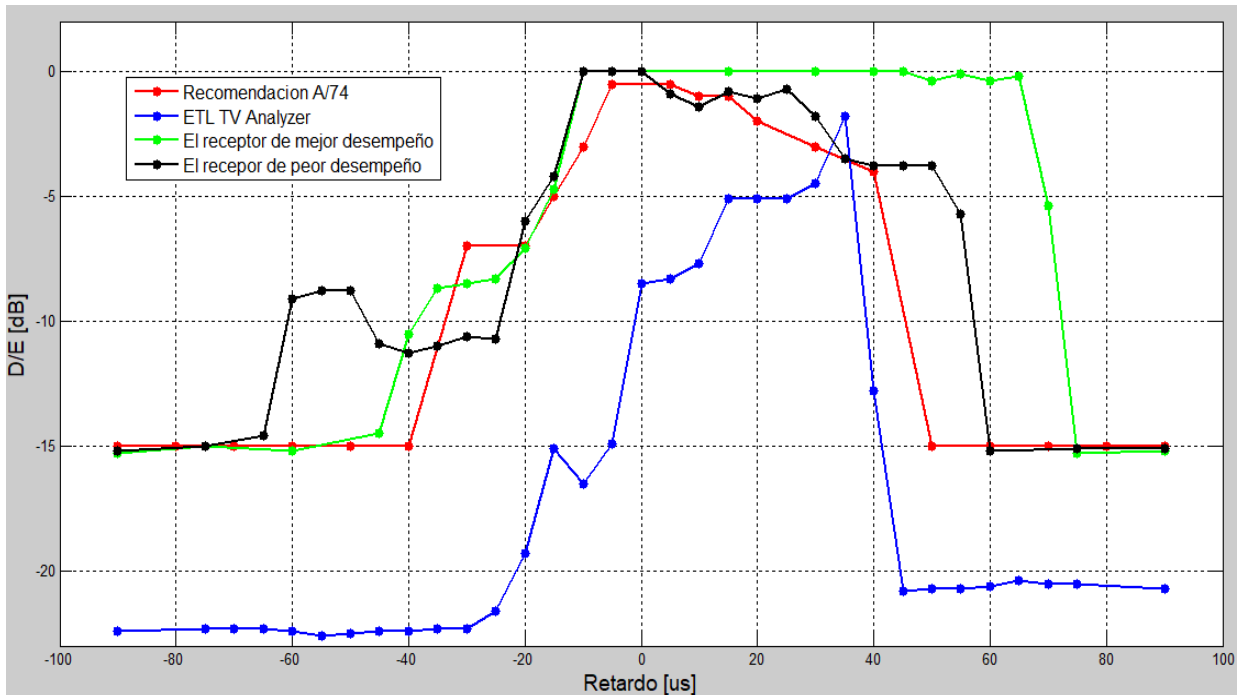


Figura 3.28. Mascara de recepción de los receptores ante una red SFN de dos transmisores utilizando el modelo de Brasil A (recepción externa).

De acuerdo a la figura se puede observar que el desempeño del ETL, es superado por el de los receptores, inclusive está por debajo de lo establecido en la recomendación A/74, esto se debe al ecualizador que presenta el equipo ETL que no se compara con los ecualizadores de los receptores que actualmente se tienen en el mercado, debido a que este equipo no solo es un receptor, si no también es un equipo de medición.

El resultado del desempeño del ecualizador del ETL en recepción en interiores se muestra en la figura 3.29.

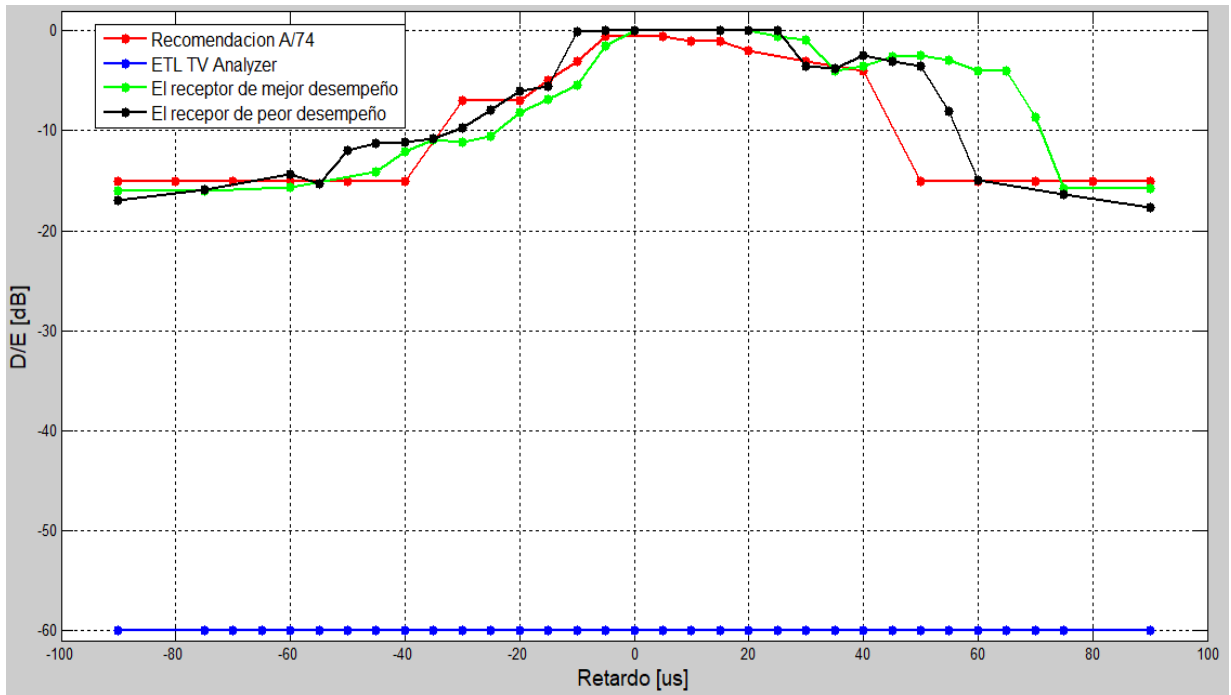


Figura 3.29. Respuesta de los receptores ante una red SFN de dos transmisores usando el modelo Brasil D (recepción interna).

Comparando la respuesta del ETL con respecto a la respuesta que debe presentar conforme a lo especificado por la recomendación A/74, este equipo no puede demodular señales ante la presencia de una red SFN en interiores. En cambio, los receptores comerciales en la zona de pos-eco siguen por encima de la recomendación, pero para la zona de pre-eco ninguno de los receptores presento mejoría comparada con la recomendación A/74.

En conclusión, el equipo ETL TV Analyzer solo puede demodular señales de una red SFN con ecos sin multitrayecto que estén en el rango de $-20 \mu\text{s}$ (pre-eco) hasta $40 \mu\text{s}$ (pos-eco), no cumpliendo con la recomendación A/74 para el pre-eco. En recepción en interiores, el ETL por lo menos no está diseñado para realizar mediciones con las características de multitrayecto del modelo de canal Brasil D.

Bibliografía

- [1] MFJ Enterprises Inc. "Catálogo MFJ-2017 Ham Radio. The world leader in amateur radio accessories". Fecha de consulta: 10 de Enero, 2017. Disponible: <http://www.mfjenterprises.com/>.
- [2] Mini-Circuit. "Power Splitter Combiner, 2 way, 50 Ω , 1 a 750 MHz". Fecha de consulta: 10 de Enero, 2017. Disponible: <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZFSC-2-1W+.pdf>.
- [3] Ettus Research. "USRP™ X300 and X310 X Series Datasheet". Fecha de consulta: 11 de Enero, 2017. Disponible: https://www.ettus.com/content/files/X300_X310_Spec_Sheet.pdf.
- [4] Ettus Research. "WBX 50-2200 MHz Rx/Tx (40 MHz)". Fecha de consulta: 01 de Junio, 2017. Disponible: <https://www.ettus.com/product/details/WBX>.
- [5] Rohde & Schwarz. "ETL TV Analyzer Specifications". Fecha de consulta: 12 de Enero, 2017. Disponible: http://analitika.info/public/files/rs_etl_specifications.pdf
- [6] Pasternack, Matching Pad. "Technical Datasheet PE7071". Fecha de consulta: 14 de Enero, 2017. Disponible: <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE7071.pdf>.
- [7] Advanced Television Systems Committee. "A/54: Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1". 04 December, 2003.
- [8] Dell™. "Vostro™ 3460 & 3560 Datasheet". Fecha de consulta: 01 de Febrero, 2017. Disponible: https://www.emc.com.br/PDF_Specs/DELL_Vostro_3460.pdf
- [9] Dell. "Precision M4800 Datasheet". Fecha de consulta: 02 de Febrero, 2017. Disponible: <http://www.alldea.si/media/uploads/slike/izdelki/Precision/Dell-Precision-M4800.pdf>.
- [10] LG Electronics. "Owner's Manual LED TV LG". Fecha de consulta: 03 de Febrero, 2017. Disponible: <http://www.lg.com/mx/soporte/soporte-producto/lg-42LA6205>.
- [11] Samsung. "Televisor 40" Full HD Smart TV H5510 características". Fecha de consulta: 03 de Febrero, 2017. Disponible: <http://www.samsung.com/es/consumer/tv-av/tv/gama-2014/UE40H5510SSXXC>.
- [12] Panasonic. "Panasonic Led TV Viera TC-L32E6 características". Fecha de consulta: 03 de Febrero, 2017. Disponible: <http://www.panasonic.com/ar/consumo/tv/viera-led-tv/tc-l32e6.specs.html>.
- [13] SONY Televisor. "LCD BRAVIA 32R430B especificaciones técnicas". Fecha de consulta: 03 de Febrero, 2017. Disponible: <http://www.sony.es/support/es/content/cnt-specs/KDL-32R430B/list>.
- [14] TCL. The Creative Life. "L19D3300C asistencia". Fecha de consulta: 03 de Febrero, 2017. Disponible: <http://www.tcl.eu/es/asistencia-de-producto/led-tv-19/47cm-l19d3300c>.

- [15] Simbaña Imacaña Franklin, Vinueza Escobar Nelson. Tesis de Maestría. "Estudio de las Unidades Móviles para TV Digital y diseño de una unidad para aplicación DSNG-EFP". Quito, Ecuador. 2005. pp. 181-187.
- [16] Samlex. "Inversor onda senoidal pura Samlex PST-1000 W, 12 V". Fecha de consulta: 10 de Agosto, 2017. Disponible: <http://webosolar.com/store/es/inversores-portables-12v-24v/868-inversor-onda-senoidal-pura-samlex-pst-1000-12-1000w-12v.html>.
- [17] Xantrex. "Power Invert, PROSine-1000 W de 120 VAC/60 Hz a 12 VCC". Fecha de consulta: 10 de Agosto, 2017. Disponible: <http://www.xantrex.com/power-products/power-inverters/prosine.aspx>.
- [18] Steren. "Inversor de corriente de 12 VCC a 110 VCA de 1000 W". Fecha de consulta: 10 de Marzo, 2017. Disponible: <http://www.steren.com.mx/inversor-de-corriente-de-12-vcc-a-110-vca-de-1000-watts.html>.
- [19] Steren. "Inversor de corriente de 12 VCC a 110 VCA de 1500 W". Fecha de consulta: 10 de Marzo, 2017. Disponible: <http://www.steren.com.mx/inversor-de-corriente-de-12-vcc-a-110-vca-de-1500-watts.html>.
- [20] Truper. "Inversor de corriente Truper". Fecha de consulta: 10 de Marzo, 2017. Disponible: <https://www.truper.com/catvigente/14.php>.
- [21] Advanced Television Systems Committee. "A/53: ATSC Digital Television Standard, Parte 2: RF/Transmission System Characteristic". Washington, D.C. 15 December, 2011.
- [22] Advanced Television Systems Committee. "A/54: Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1". 04 December, 2003.
- [23] Advanced Television Systems Committee. "A/74 Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines". Washington, D.C. 07 April, 2010.
- [24] ALBERT Mackenzie and SET. "General Description of Laboratory Tests, DTV Field Test Report in Brazil". July, 2000.
- [25] Jaime Huerta. Tesis de Maestría: "Pruebas de laboratorio de televisión digital ATSC en Redes en Frecuencia Única", Facultad de Ingeniería, UNAM. Enero, 2016.
- [26] Andrea Zentella y José María Matías. "Definición del equipamiento de medida para las pruebas de campo". Facultad de Ingeniería UNAM, CONACYT. 02 de Abril, 2017.
- [27] Steren. "Funcionamiento del inversor". Fecha de consulta: 10 de Marzo, 2017. Disponible: http://www.ehowenespanol.com/funciona-inversor-como_94524/.
- [28] GNU Radio. "The free & open software radio ecosystem. About GNU Radio". Fecha de consulta: 05 de Abril, 2017. Disponible: <https://www.gnuradio.org/about/>.

Capítulo 4. METODOLOGÍA PARA LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

En este capítulo se describen los parámetros que se medirán en cada prueba, los cuales son importantes porque proporcionan datos de la calidad de la señal y de su comportamiento dentro de una red SFN, y con estos valores determinar la máscara de recepción (diferencia de retardo y potencia de las señales principales recibidas por los dos transmisores), el cual es el principal objetivo de las pruebas de campo. También en este capítulo se explica la metodología que se utilizará en dichas pruebas de acuerdo al modo de recepción, es decir, tanto en recepción fija (externa o interna) como en recepción móvil. También se describe la metodología que se realizará en el laboratorio para evaluar cada receptor comercial con las señales obtenidas en campo, las cuales tendrán diferentes condiciones. Asimismo se realiza la estimación de cobertura de la red SFN con el software Radio Mobile, de acuerdo a la ubicación de cada transmisor y la potencia transmitida de cada uno de ellos, a partir de esto se localizarán los sitios de medición donde se realizarán las pruebas de campo. Y por último, se calculará aproximadamente la duración que tendrá cada prueba (recepción fija exteriores, recepción fija interiores y recepción móvil) y a partir de esto determinar la duración total de las pruebas de campo.

4.1. Parámetros de medida

En este apartado se explican los parámetros de medición que se realizarán en cada lugar de medición, estos sitios tendrán condiciones diferentes tanto de retardo como potencia de los transmisores principales, y con los valores se obtendrá la máscara de recepción de cada receptor comercial que se utilizó en las pruebas de laboratorio. La información que proporcionan los parámetros son características de calidad de recepción de la señal de ATSC y características de las condiciones de recepción dentro de una red SFN. La información de la calidad de recepción se va a obtener con las mediciones de MER (Modulation Error Ratio), relación C/N (Carrier to Noise) y BER (Bit Error Ratio) después del codificador Reed Solomon, y en forma subjetiva el TOV (Threshold Of Visibility). La información de las condiciones de recepción se obtiene con la respuesta impulsional y la desviación de frecuencias de la portadora, con estos dos parámetros se pueden conocer las características del canal de propagación.

A continuación se describen los parámetros de medición que se realizarán en las pruebas de campo.

4.1.1. Parámetros de medida de la calidad de recepción de la señal de ATSC

Los parámetros de calidad de la señal son indicadores que ayudarán a determinar qué tan buena es la recepción en el lugar de medida a diferentes niveles. Esto se determinará a partir de las características de la señal. Los parámetros que se van a medir son: MER, Relación C/N, BER y TOV, que se describen a continuación.

- **MER (Modulation Error Ratio):** Indica la calidad de la señal de ATSC recibida, el cual es un vector que define el desplazamiento entre los puntos ideales de una constelación y los reales. En el MER se reflejan todo tipo de deterioros de la señal como el ruido, el error de fase, el error de cuadratura, etc. Si el canal de transmisión es AWGN (Additive White Gaussian Noise), el mismo valor que se obtenga en el MER será igual al valor de C/N, si no es así, el valor del MER es más bajo (peor) que el valor C/N.
- **Relación C/N (Carrier to Noise):** Es la relación de la potencia de la portadora de la señal y la potencia del ruido. De acuerdo a la recomendación A/54 el valor de este parámetro debe de ser mayor o igual a 14.9 dB para una buena recepción [1].
- **BER (Bit Error Ratio) después del Reed Solomon:** El BER a medir será después del Reed Solomon, debido a que se tiene un valor cuantitativo que determina la buena recepción de la señal, por lo que este parámetro nos permite determinar la calidad objetiva de la señal demodulada, ya que cuantifica el número de errores de bit de una trama, sea cual fuese el origen del error. Este valor debe de estar por debajo de 3×10^{-6} [2] para que exista una decodificación correcta en los receptores comerciales, si se sobrepasa este valor, el receptor será incapaz de corregirlos y no decodificará la señal.
- **TOV (Threshold Of Visibility) o Umbral de Visibilidad:** Para determinar el desempeño de cada receptor en cada uno de los puntos de medición se evaluarán las fallas que tendrá en el video en un determinado tiempo en forma subjetiva, a este parámetro se le conoce como TOV. En el proyecto REFUTV, se definió el valor de este parámetro para las pruebas de laboratorio, el cual es la existencia de al menos dos errores visibles durante un minuto de la señal recibida, para que se considerara una mala recepción [3]. Este valor fue previamente definido en otras pruebas [4].

4.1.2. Parámetros de medida de las condiciones de recepción de la señal de ATSC dentro de una red SFN

Los parámetros de las condiciones de recepción dentro de la red SFN son indicadores que determinan las características de los sitios de medición tanto para recepción fija como para móvil en la red SFN, delimitando así el funcionamiento de los receptores. Los parámetros que se utilizarán son la respuesta al impulso del canal y la desviación de frecuencia de la portadora, que se describen a continuación.

- **Respuesta al impulso del canal:** Es la dispersión temporal de la señal, el cual determina los ecos que puede tener la señal y sus retardos (los ecos pueden ser producidos por la red de transmisión o de forma natural). De acuerdo a la recomendación A/74, el retardo máximo de una señal pre-eco (primero se presenta la señal eco y después la señal principal) para que se reciba correctamente debe de ser de $-5\mu\text{s}$ [2] y el retardo máximo de una señal post-eco (primero se presenta la señal principal y después la señal eco), igualmente para que tenga una buena recepción es de $+40\mu\text{s}$ [2]. Estos retardos provocados por la multitrayectoria delimitan el funcionamiento de los receptores. Con estos valores y la relación de amplitud del eco y de la señal principal, se puede generar la máscara de recepción, que nos proporciona información sobre hasta que retardo de eco la señal se puede recibir en forma correcta.
- **Desviación de frecuencia de la portadora:** Visualiza el efecto Doppler ocasionado por el canal de propagación, y esto es ocasionado por el movimiento del receptor. Es importante este parámetro porque la portadora debe de estar sincronizada en el receptor para que haya una correcta demodulación, por lo que se quiere determinar cuál es la desviación máxima que puede tener la portadora de la señal de ATSC (y por tanto, toda la señal) para que los receptores la demodulen en forma correctamente.

4.2. Datos adicionales a tomar durante las pruebas de campo

En esta sección se explicarán algunos datos adicionales que se tendrán que tomar en cuenta para la realización del análisis de resultados de las pruebas de campo. Esto es porque existen factores que pueden influir notablemente en las condiciones de recepción, y deben ser registrados si se quiere analizar su influencia.. Estos datos son: la ubicación del sitio de medición medida con el GPS, características del sitio, la descripción del clima y fotos del lugar.

- **Ubicación del sitio de medición:** Esta tarea es importante realizarla para poder comparar los resultados obtenidos en la simulación con los que se presentaron en las pruebas de campo y tener un control con los valores que se obtendrán. Esta actividad se realizará con el módulo de GPS, que tiene el equipo ETL TV Analyzer y se guardará con todos los valores obtenidos del ETL, este valor estará dado en coordenadas de latitud y longitud. Ello permitirá conocer las características del sitio tiempo después de haber realizado las medidas.
- **Características el sitio:** Estos datos que se tomarán en cuenta son: el tráfico vehicular en el momento de tomar las medidas, si hay mucho paso peatonal, si en el lugar de medición hay demasiados edificios alrededor, y si el sitio tiene una densa vegetación. Es muy importante tener las características del sitio porque pueden influenciar notablemente los resultados de recepción, y en el análisis de resultados pueden tener valores incongruentes de las pruebas de campo con respecto a las simulaciones y a las pruebas de laboratorio. Tomando en cuenta estas características se pueden realizar conclusiones importantes de la influencia de alguno de estos factores en el funcionamiento de las redes SFN, además se podría realizar un modelo matemático de sitios similares con las mismas características, como por ejemplo los modelos de canal Brasil A y Brasil D.
- **Descripción del clima:** El dato que se obtiene en este punto es el clima (esta soleado, nublado, lluvioso o ventoso); todas estas características del clima son importantes porque pueden atenuar la señal y tener un comportamiento distinto al que se esperaba de acuerdo a la simulación obtenida, esto ayudará a justificar los valores durante el análisis de resultados.
- **Fotografías del sitio de medición:** Este punto es muy importante en las pruebas de campo, porque se sacarán fotografías en general del sitio de medición y de la colocación de la antena. Esto será por si algunas características no se tomaron en cuenta en el momento de recopilar los datos y son importantes en el momento del análisis de resultados. La posición

de la antena es importante para comparar los resultados obtenidos en campo con los de la simulación y ver el comportamiento de los receptores bajo diferentes relaciones de potencia.

Una vez que se definieron los parámetros de medición que se realizaran en cada lugar y los datos adicionales que se tienen que tomar en cuenta, ahora se definirá la metodología que se hará en las pruebas de campo, el primer paso que se tiene que realizar es la grabación de una señal de referencia, para verificar que todo el sistema funcione correctamente antes de cada día de medición, ya teniendo esto, ahora se describirán las acciones que se tendrán que realizar al inicio de cada prueba para no tener datos erróneos, enseguida se describe los pasos a realizar para las pruebas en campo tanto para exteriores como en interiores y por último, se detallan los pasos que se tienen que seguir para realizar las pruebas en el laboratorio, y así poder obtener la máscara de recepción de la muestra de los receptores comerciales.

4.3. Grabación de la señal de referencia

Antes de realizar las pruebas de campo, se tiene que verificar que todo el sistema funcione correctamente, tanto en los transmisores como en el equipo de medición. La señal de referencia ayudará en esta tarea. En esta sección se explican los lineamientos para grabar la señal de referencia, la cual se tendrá que grabar el primer día antes de comenzar las pruebas de campo. Esta señal será la referencia para los demás días de medición, y servirá para verificar que todos los equipos, tanto en transmisión como en recepción, funcionen de manera adecuada. Los pasos a seguir son:

- a) Ubicar el vehículo en el lugar de referencia (este lugar podrá ser donde se deja estacionada la unidad móvil). El lugar de referencia debe tener visión directa a los dos transmisores y estar a más de 100 metros de ellos.
- b) Verificar el nivel de voltaje de la batería de la unidad móvil con un multímetro, en caso de que esté baja la batería arrancar el motor y esperar aproximadamente 5 minutos.
- c) Conectar el inversor de corriente a la batería de la unidad móvil.
- d) Verificar el funcionamiento del inversor (Voltaje, corriente) con un multímetro.
- e) Instalar y conectar todo el equipo de medida al inversor de corriente.
- f) Revisar que todos los equipos estén conectados.

- g) Colocar la antena en el mástil a 2 m de altura a nivel del suelo [5] y apuntarla hacia el transmisor principal.
- h) Grabar con el USRP la señal durante un minuto y simultáneamente con el equipo ETL TV Analyzer grabar los parámetros de medición (Nivel, BER después del Reed Solomon, MER RMS), además de visualizar la calidad de la señal en el receptor comercial.
- i) Repetir el procedimiento apuntando la antena hacia el transmisor secundario.
- j) Reproducir con el USRP las dos señales grabadas y comprobar que los valores obtenidos con el ETL TV Analyzer de la señal grabada y reproducida sean los mismos, para verificar que todo el sistema funcione correctamente.
- k) Desmontar el mástil con la antena y guardarla en la unidad móvil.

4.4. Acciones a realizar cada día

Las acciones a realizar cada día, sirven para verificar el buen funcionamiento de todo el sistema (unidad móvil y transmisores) antes de empezar con las mediciones para las pruebas de campo, para que todos los resultados que sean medidos sean los correctos y no se tenga que repetir mediciones en algunos sitios por errores de datos obtenidos. Si se realizan estas acciones se disminuirá el tiempo de la realización de las pruebas de campo.

4.4.1. Unidad Móvil

- a) Verificar los niveles de combustible de la unidad móvil, que sea suficiente para el trabajo diario.
- b) Comprobar la presión del aire de las llantas.
- c) Verificar el nivel de voltaje de la batería de la unidad móvil con un multímetro, en caso de que este baja la batería arrancar el motor y esperarse aproximadamente 5 minutos.
- d) Conectar el inversor de corriente a la batería de la unidad móvil.
- e) Verificar el funcionamiento del inversor (Voltaje, corriente) con un multímetro.

4.4.2. Verificación del buen funcionamiento del equipo de medida y los transmisores

- a) Ubicar el vehículo en el lugar de referencia
- b) Conectar el equipo de acuerdo al diagrama de grabación, que se puede observar en la figura 4.1 (ver capítulo 3.1.1), además de conectarlo al inversor de corriente.

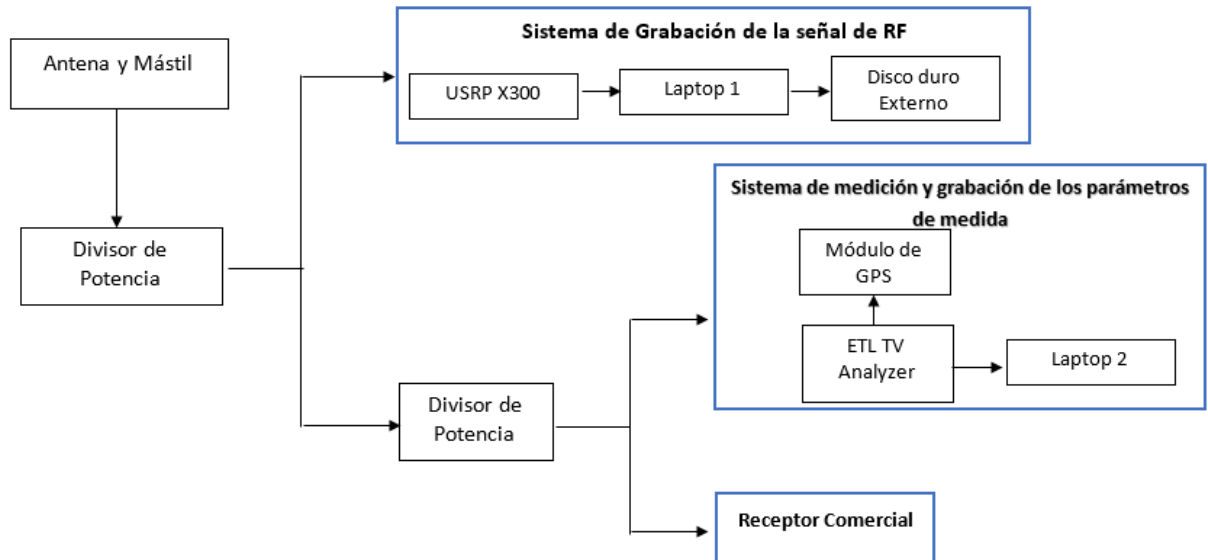


Figura 4.1. Diagrama del equipamiento de medida en la unidad móvil para las pruebas de campo.

- c) Revisar que todos los equipos estén conectados.
- d) Colocar la antena en el mástil a 2 m de altura a nivel del suelo y ubicarla hacia el transmisor principal.
- e) Grabar con el USRP la señal durante un minuto, visualizar en el receptor comercial la calidad de la imagen y grabar los parámetros de medición de la señal con el equipo ETL TV Analyzer (Nivel, BER antes y después del Reed Solomon, MER RMS, PER).
- f) Ubicar la antena hacia el transmisor secundario y repetir el mismo procedimiento.
- g) Reproducir las señales grabadas, obtener los valores de los parámetros de medición y comparar esos valores con los de la señal de referencia (obtenida el primer día), si existiera algún error comprobar el sistema de grabación y buscar el error.

- h) Si el sistema de grabación no tiene ningún error, el error podría estar en los transmisores, si es así avisar a SPR.

4.5. Realización de las pruebas de campo

Las pruebas de campo se realizarán tanto en recepción fija como en móvil. En la recepción móvil, no se tuvo la respuesta esperada de los receptores en las pruebas de laboratorio, debido a que el estándar ATSC A/53 ha sido diseñado para la recepción de señales en condiciones fija o estáticas, es decir, que el receptor no esté en movimiento, y porque el avance de la tecnología en cuanto a la implementación de ecualizadores de canal, no ha sido el suficiente para soportar la recepción móvil [6]. Por lo que se desea corroborar dicho resultado en las pruebas de campo.

4.5.1. Recepción fija

4.5.1.1 Recepción fija en exteriores

Para realizar las pruebas de campo para cada sitio de medición en recepción fija externa, se deben de seguir los siguientes pasos:

- a) Estacionar el vehículo en un lugar cercano y disponible al sitio de prueba.
- b) Dejar encendida la unidad móvil.
- c) Colocar la antena en el mástil a 2 m de altura a nivel del suelo, y ubicarla en un lugar cercana a la unidad móvil.
- d) Documentar el sitio de prueba en una hoja de datos (Excel):
 - a. Registrar la dirección específica del lugar, con calle, número, colonia, delegación.
 - b. Registrar la fecha y hora de la prueba.
 - c. Registrar latitud y longitud de la zona con el GPS.
 - d. Descripción del clima (si está soleado, nublado, ventoso, lloviendo, llovizna, con niebla, etc.).
 - e. Descripción del sitio (si hay edificios, árboles, tráfico, paso peatonal, puentes, elementos radiantes como cables de alta tensión, antenas cercanas, etc.).
 - f. Tomar fotografías del entorno del sitio de prueba.

- g. Con una brújula ubicar los transmisores.
- e) Posicionar el mástil con la antena direccional apuntando al transmisor principal, realizando simultáneamente las siguientes acciones.
 - a. Grabar con el USRP la señal del aire durante un minuto [7] y guardarlo en un disco externo.
 - b. Observar la imagen en el receptor comercial y escribir comentarios durante el minuto de grabación como número de defectos que se observan (audio/video).
 - c. Grabar con BC Drive y el ETL TV Analyzer los parámetros de medida (Nivel, BER después del Reed Solomon, MER RMS) y grabar los archivos en un disco externo.
- f) Después de que la señal se haya grabado obtener el valor de C/N y registrarlo con los demás parámetros de medida. Grabar la imagen del espectro de la señal (con los siguientes parámetros: span 12 MHz, RBW 30 kHz y VBW 300 kHz), de la constelación, del diagrama de ojo y del patrón de ecos. Por último tomar fotografías de la posición de la antena, es decir hacia donde está apuntando.
- g) Repetir el proceso ahora apuntando al transmisor secundario.
- h) Mover en azimut la antena cada 60 grados con respecto al transmisor principal y repetir el proceso. En total serían 5 mediciones más.
- i) Descargar todas las fotos en el disco externo colocando un nombre representativo a cada una de ellas. Después organizar todos los archivos de grabación y las fotografías del sitio de medición.
- j) Desmontar el mástil con la antena y guardarla en la unidad móvil. Continuar con el siguiente sitio de prueba.

4.5.1.2 Recepción fija en interiores

Los pasos a seguir para realizar las pruebas de campo en recepción fija en interiores, son los siguientes:

- a) Estacionar el vehículo en un lugar cercano y disponible al sitio de prueba.
- b) Localizar el edificio donde se realizará la prueba.
- c) Bajar todo el equipamiento de medida.

- d) Ubicarse en un lugar cercano del sitio de prueba.
- e) Conectar los equipos a una toma corriente.
- f) Colocar la antena en el mástil a 1 m de altura.
- g) Documentar el sitio de prueba en una hoja de datos (Excel)
 - a. Registrar la dirección específica del lugar, con calle, número, colonia, delegación.
 - b. Número de pisos de la construcción y ubicación del piso donde se realizará la prueba (1° piso, 2° piso, etc.).
 - c. Ubicación específica de la habitación dentro del edificio (piso, esquina, medio, ventana, etc.).
 - d. Material de construcción (ladrillo, revestimiento, metal, etc.).
 - e. Tipo de construcción (oficina, centro comercial, casa particular, etc.).
 - f. Registrar la fecha y hora de la prueba.
 - g. Registrar latitud y longitud de la zona con el GPS.
 - h. Descripción del clima (si está soleado, nublado, ventoso, lloviendo, llovizna, con niebla, etc.).
 - i. Tomar fotografías del entorno del sitio de prueba, incluyendo fotos del interior y desde el exterior del edificio.
- i) Posicionar el mástil con la antena direccional apuntando al transmisor principal, realizando simultáneamente las siguientes acciones.
 - a. Grabar con el USRP la señal del aire durante un minuto y guardarlo en un disco externo.
 - b. Visualizar la calidad de imagen que se tiene en el receptor comercial y escribir comentarios durante el minuto de grabación como número de defectos que se tiene (audio/video).
 - c. Grabar con BC Drive y el ETL TV Analyzer los parámetros de medida (Nivel, BER después del Reed Solomon, MER RMS) y grabar los archivos en un disco externo.

- j) Después de que la señal se haya grabado obtener el valor de C/N y registrarlo con los demás parámetros de medida. Guardar la imagen del espectro de la señal (con los siguientes parámetros: span 12 MHz, RBW 30 kHz y VBW 300 kHz), de la constelación, del diagrama de ojo y del patrón de ecos. Por último tomar fotografías de la posición de la antena, es decir hacia donde está apuntando.
- k) Repetir el proceso ahora apuntando al transmisor secundario.
- l) Descargar todas las fotos en el disco externo colocando un nombre representativo a cada una de ellas. Después organizar todos los archivos que se grabaron y las fotografías tomadas del sitio de medición.
- m) Desmontar el mástil con la antena y guardarla en la unidad móvil. Continuar con el siguiente sitio de prueba.

4.5.2. Recepción móvil

El procedimiento a utilizar para las pruebas de campo en recepción móvil, es el que se menciona a continuación:

- a) Determinar la ruta de la prueba del día.
- b) Ubicarse en el lugar de inicio de la ruta.
- c) Documentar el lugar de inicio de la ruta en una hoja de datos (Excel):
 - a. Registrar la dirección específica del lugar, con calle, número, colonia, delegación.
 - b. Registrar la fecha y hora de la prueba.
 - c. Registrar latitud y longitud de la zona con el GPS.
 - d. Descripción del clima (si está soleado, nublado, ventoso, lloviendo, llovizna, con niebla, etc.).
 - e. Descripción del sitio (si hay edificios, árboles, tráfico, paso peatonal, puentes, elementos radiantes (cables de alta tensión, antenas cercanas, etc.)).
 - f. Tomar fotografías del lugar de la ruta de inicio.
- d) Comenzar a conducir la ruta previamente asignada, a una velocidad mayor a 5 km/hora.

- e) Realizar simultáneamente las siguientes actividades:
 - a. Grabar con el USRP la señal del aire durante un minuto y guardarlo en un disco externo.
 - b. Visualizar la calidad de imagen que se tiene en el receptor comercial y escribir comentarios durante el minuto de grabación como número de defectos que se tiene (audio/video).
 - c. Grabar con BC Drive y el ETL TV Analyzer los parámetros de medida (Nivel, BER después del Reed Solomon, MER RMS) y grabar los archivos en un disco externo.
 - d. Tomar fotografías de la localización de la antena, al igual que del recorrido de la señal grabada.
- f) Repetir el mismo procedimiento en varios sitios de la ruta.
- g) Llegar al lugar final de la ruta, documentar los mismos datos que se obtuvieron en el lugar inicial de la ruta en la hoja de datos (Excel).
- h) Descargar todas las fotos en el disco externo colocando un nombre representativo a cada una de ellas. Después organizar todos los archivos y fotografías de la ruta establecida.

4.6. Pruebas en el laboratorio con los demás receptores

Las pruebas en el laboratorio son importantes, porque se determinará la máscara de recepción de cada uno de los receptores, debido a que en campo solo se evaluará un receptor para todas las pruebas que se realicen. La razón de ello es reducir el tiempo que se esté en campo, ya que las medidas en campo son muy costosas. A continuación se describe las acciones que se deben realizar cada día que se comienza las pruebas en el laboratorio y lo que se debe de hacer en ellas.

4.6.1. Acciones a realizar al inicio de cada día

A continuación se describe el procedimiento a realizar al inicio de las pruebas complementarias en el laboratorio:

- a) Conectar todo el equipo que requiere energía eléctrica a la toma de corriente.

- b) Conectar el equipo de acuerdo al diagrama que se puede observar en la figura 4.2 (ver capítulo 3.1.2).

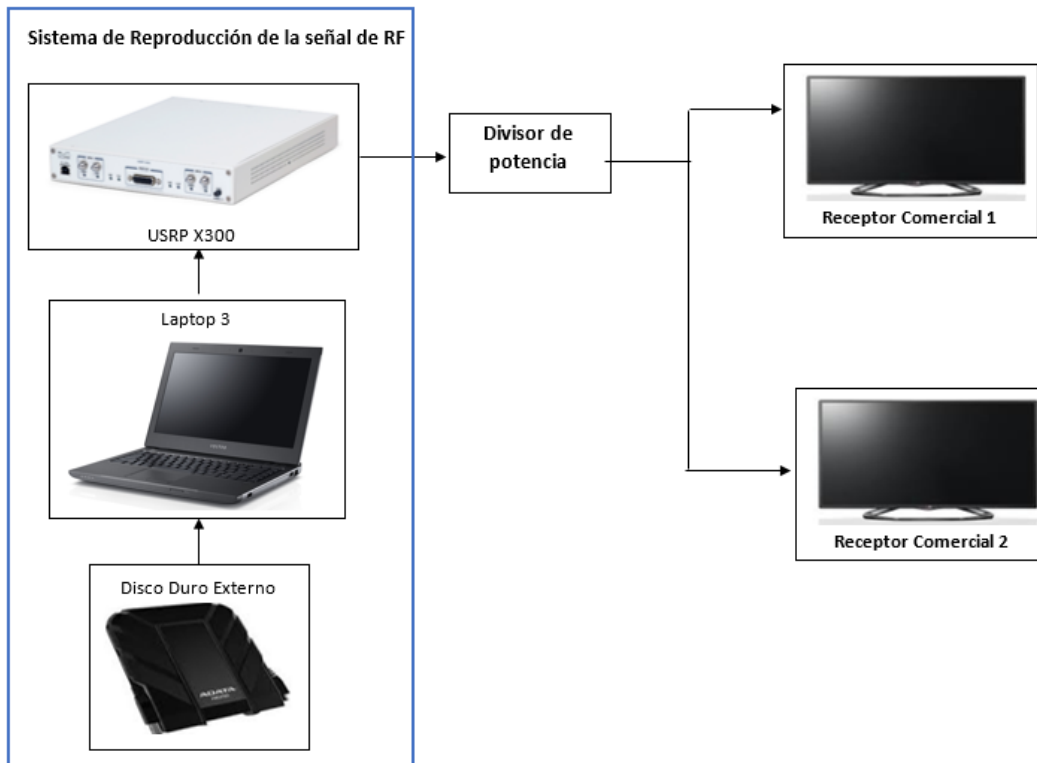


Figura 4.2. Diagrama del equipo de medida en el laboratorio.

- c) Verificar el buen funcionamiento del equipo de reproducción con la señal de referencia tanto en el receptor comercial como en el equipo de medida

4.6.2. Realización de las pruebas

Esta metodología es para todas las medidas de campo grabadas, independientemente si fueron grabadas en exteriores, en interiores o fueron medidas en movimiento.

- Ubicar en el disco externo los archivos de la medida a reproducir.
- Reproducir la señal donde la antena apuntaba al transmisor principal, y visualizarla en un receptor comercial diferente al usado en las pruebas de campo.
- Anotar el número de defectos que se tuvieron (audio/video) para esa configuración de señal grabada.

- d) Repetir el mismo procedimiento con todos los receptores comerciales que se utilizaron en las pruebas de laboratorio.
- e) Terminando la prueba con todos los receptores, seguir con las demás señales grabadas para ese sitio de medición, realizando el mismo procedimiento.

4.7. Predicción de cobertura y distribución de los sitios de medición

Para la planificación de las pruebas de campo es necesario conocer la estimación de cobertura de cada transmisor y de la red SFN. La cobertura dependerá de varios factores como la potencia transmitida, la altura de las antenas, su ganancia, la orografía del terreno, etc. Después se eligen los sitios de medición a partir de la cobertura estimada de la red SFN y las condiciones de retardo y potencia que se deseen medir, de acuerdo a los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio que se realizaron anteriormente.

4.7.1. Estimación de cobertura

La estimación de cobertura se realiza mediante la estimación del nivel de campo eléctrico y el umbral de campo eléctrico definido para ATSC en México, ya que con estos valores se podrán definir los sitios en donde se llevará a cabo las mediciones de la señal.

La estimación de campo se realizó con el software Radio Mobile versión 11.6.5, el cual es una herramienta gratuita que ayuda para el cálculo de radio enlace de largas distancias en terrenos irregulares, es decir ocupa el Modelo Longley-Rice [8], el cual es un modelo de predicción diseñado para frecuencias entre los 20 MHz a 20 GHz [9] y distancias que van de 1 a 2000 km [9]. El modelo Longley-Rice es el definido por la IFT para la estimación de cobertura de televisión digital [10].

Por otra parte, la red de transmisión se localizará en la Ciudad de México que se encuentra localizada a una latitud de 19.4194 Norte y a una longitud de 99.1455 Oeste. En su orografía presenta formaciones montañosas como el Cerro del Chiquihuite al norte y la sierra del Ajusto al sur de la ciudad. La ubicación de los dos transmisores estará a cargo del radiodifusor SPR (Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano). El Radiodifusor SPR cuenta con su transmisor principal en el cerro del Chiquihuite y el transmisor secundario se instalará en las instalaciones que Radio UNAM tiene en la sierra del Ajusco.

Los datos ubicación de los dos transmisores se muestran en la tabla 4.1:

Estación Transmisora	Coordenadas Geográficas	Altura (msnm)
Cerro del Chiquihuite	19°31'59.13"N 99°07'50.58"O	2743.0
Radio UNAM	19°16'10.5"N 99°12'20.5"O	2603.6

Tabla 4.1. Ubicación de los transmisores ATSC de la red SFN.

La frecuencia asignada al radiodifusor SPR es la de 569 MHz [11], teniendo como canal físico el número 30, por lo que las estimaciones de cobertura se realizaron a dicha frecuencia.

En la simulación de cobertura, el software no toma en cuenta la morfología del terreno, es decir, arboles, edificios, ambientes urbanos, entre otras cosas, sólo considera el perfil del terreno. Para la realización de la simulación de cobertura del transmisor principal localizado en el cerro del Chiquihuite, se consideraron las características de la estación, es decir, una altura de la antena de 120 metros, una ganancia de antena de 13.7 dBi o su equivalente 15.8 dBi, una potencia nominal de transmisión de 7.5 KW RMS (con lo cual, la PRA obtenida es de 97.7 kW). Las condiciones de recepción son: una antena Yagi-Uda con una ganancia de 14 dBi localizada a una altura de 2 metros. La simulación se calculó estimando una disponibilidad del 90% del tiempo, del 50% de las localizaciones y un 50% de las situaciones; valores que se obtuvieron del Diario Oficial de la Federación [10]. En dicho documento también se define el valor de 48 dBu [10], como el nivel de campo eléctrico que se requiere para una buena recepción para el canal que se está usando. Sin embargo, la experiencia de los radiodifusores indica que este nivel es insuficiente para una correcta recepción, siendo lo más habitual para ellos utilizar el valor de 58 dBu para una buena recepción en exteriores y 68 dBu para recepción en interiores. Derivado de ello, se usaron los siguientes valores:

- 78 dBu: buena recepción indoor
- 68-78 dBu: recepción indoor
- 58-68 dBu: buena recepción outdoor
- 48-58: recepción outdoor
- < 48 dBu no hay recepción

En la figura 4.3 se muestra la estimación de cobertura (para un campo eléctrico mayor a 48 dBu) del transmisor principal de acuerdo a las especificaciones de potencia y ganancia de la antena, ya mencionadas anteriormente.

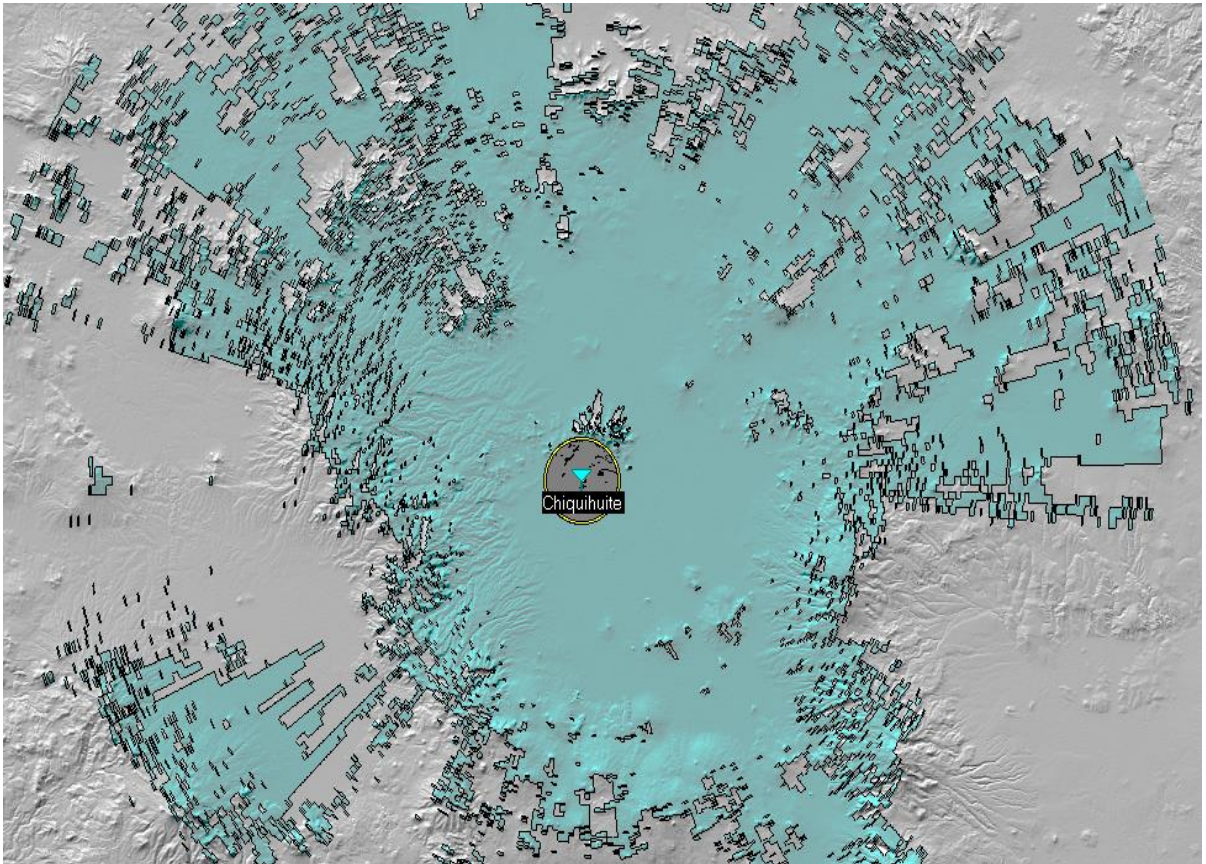


Figura 4.3. Simulación de la cobertura del transmisor principal (SPR) localizado en el Cerro del Chiquihuite.

Para la simulación de cobertura del transmisor secundario que estará localizado en Radio UNAM, se consideró un sistema de antenas de un solo panel cuya ganancia es de 11.35 dBd o su equivalente 13.5 dBi, cuya altura es de 25 metros, el transmisor tiene una potencia nominal de 700 W RMS (PRA de 6.76 KW). Las consideraciones de recepción fueron las mismas que se utilizaron para la simulación del transmisor principal.

En la figura 4.4 se muestra la estimación de cobertura del transmisor secundario simulado con el software Radio Mobile con las condiciones ya mencionadas para el transmisor principal.

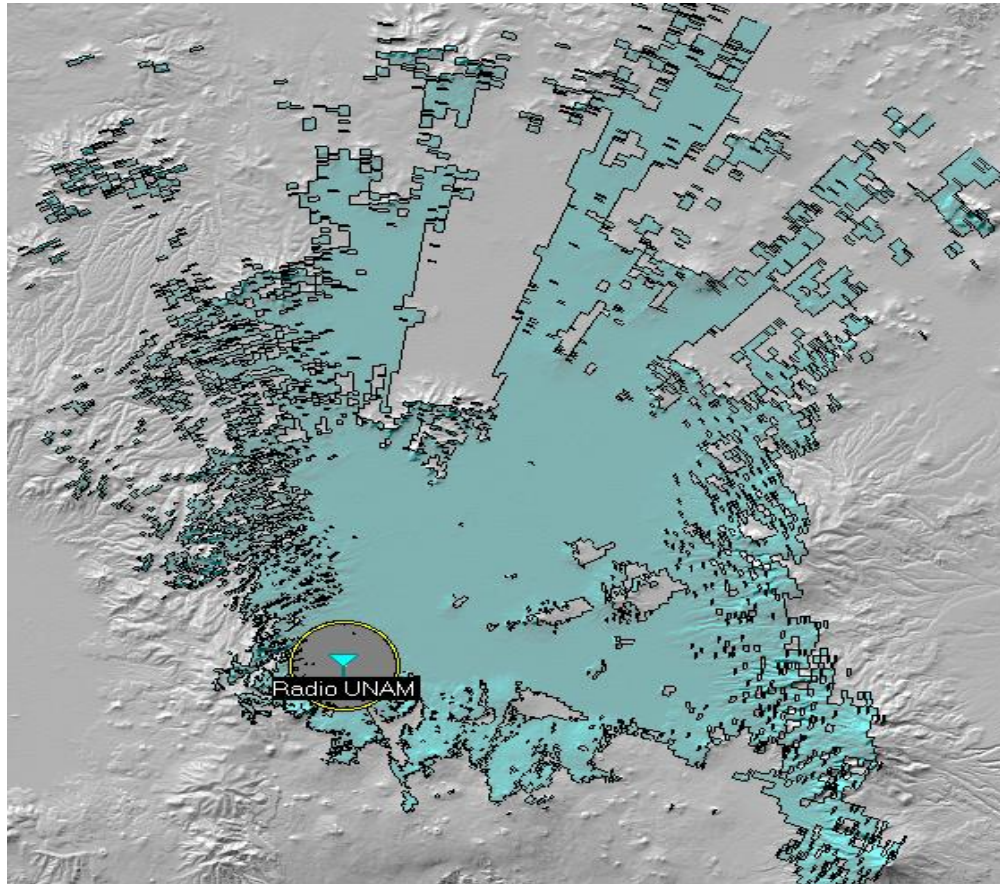


Figura 4.4. Simulación de la cobertura del transmisor secundario (Radio UNAM) localizado en la Sierra del Ajusco.

En la figura 4.5 se muestra la cobertura que abarcará la red SFN, de acuerdo a las características de cada transmisor. Obviamente el transmisor principal localizado en el Cerro del Chiquihuite tiene definida una mayor potencia de tal manera que dará cobertura a la mayor parte de la Ciudad de México y el transmisor secundario localizado en el Ajusco solo proporcionará la zona de cobertura de la red SFN, es decir, solo define la red dentro de la cobertura que ya existe.

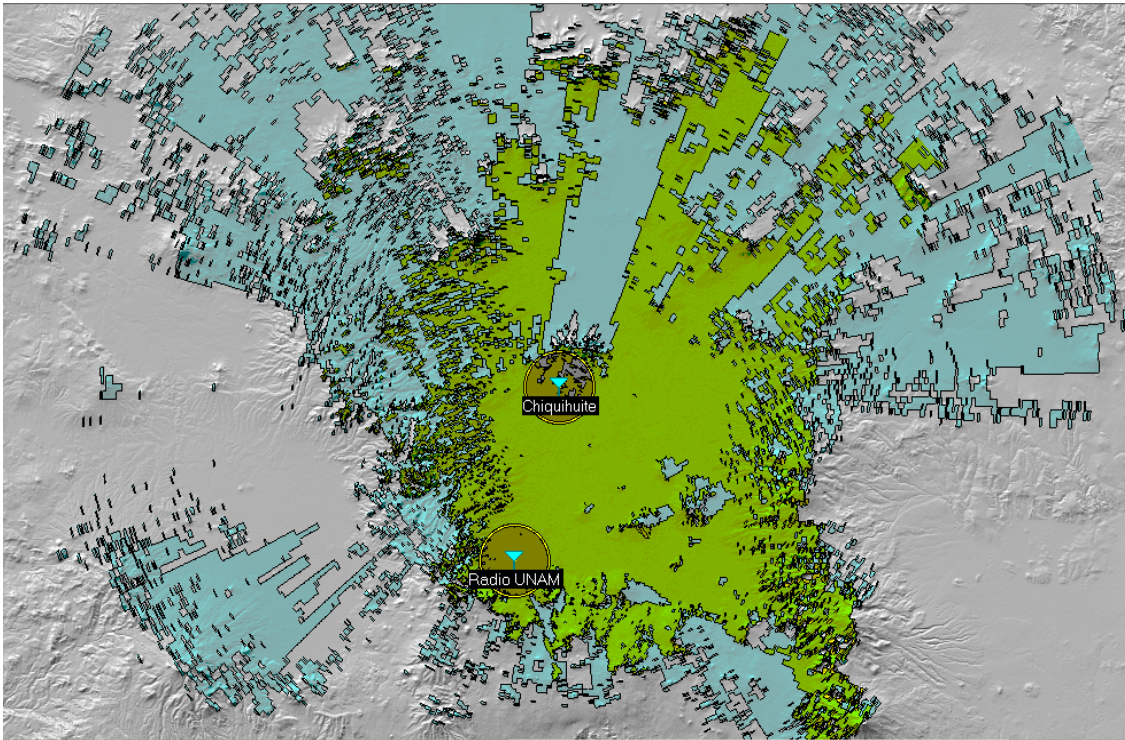


Figura 4.5. En color verde se muestra la simulación de la cobertura de la red SFN de los dos transmisores, en color azul la cobertura del transmisor principal y en color amarillo la cobertura del transmisor secundario.

En la figura 4.6 se observa el perfil del terreno entre los transmisores sobre la Ciudad de México, donde se muestra diferentes parámetros, como la altitud sobre el nivel del mar, la altura de las antenas, la distancia que hay entre los transmisores, que es de 30.3 km, y las pérdidas por espacio libre.

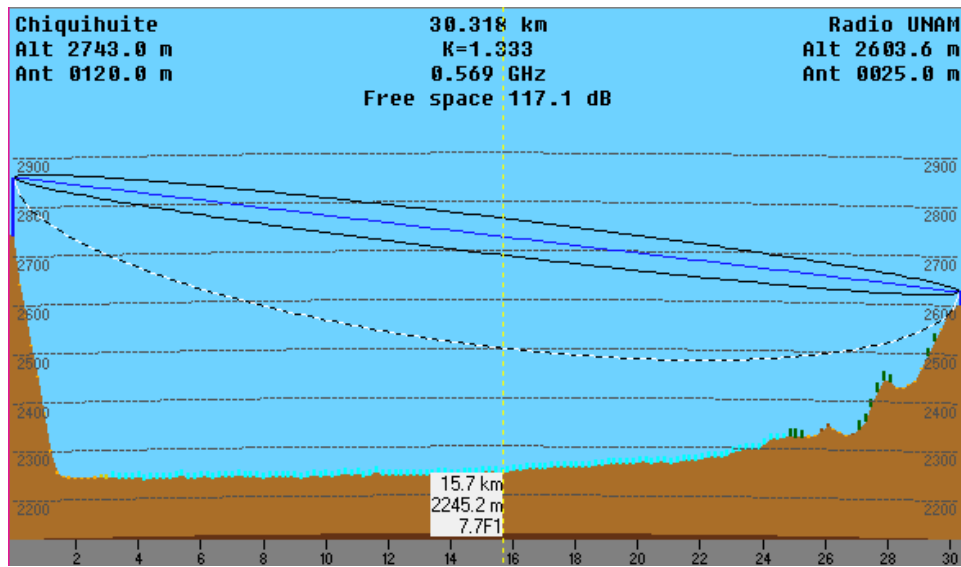


Figura 4.6. Perfil del terreno entre los transmisores sobre la Ciudad de México

4.7.2. Definición de los sitios de medida

Tomando en cuenta la cobertura de la red SFN, el siguiente paso es la localización de los sitios de medición, definiendo primero el número de sitios para realizar las pruebas de campo, para esto se tomarán en cuenta tres directrices. La primera es la recomendación A/75 [12], la cual menciona que para que se tenga un intervalo de confianza se requiere un número de sitios entre 200 y 400, sin embargo la misma recomendación propone realizar pruebas en un intervalo de 50 a 100 sitios [12] como mínimo. La segunda es la recomendación del Informe ITU-R BT-2035-2 [5], que indica que para obtener una muestra estadística significativa, los puntos de medición deben ser entre 30 y 100 sitios, aunque recomienda que sea un número mayor. Por último, la tercera directriz, fue tomar en cuenta el número de sitios de medición que se ha considerado para las pruebas de campo realizadas en la Ciudad de Nueva York para mediciones estadísticas sobre redes SFN de ATSC, que utiliza la configuración de Transmisores Distribuidos (DTxTs) [13]. Para estas pruebas se realizaron mediciones en 132 sitios, de los cuales 109 sitios fueron para mediciones estáticas para exteriores y 23 sitios fueron para mediciones en interiores. Este número de sitios cumple con la recomendación del Informe ITU-R BT-2035-2 [5], que señala que el número de sitios en interiores debe de ser una quinta parte del total de sitios a utilizar en mediciones de exteriores.

Tomando en cuenta lo anterior, se decidió realizar mediciones en 120 sitios en modo estático, de los cuales 96 sitios serán destinados para realizar mediciones en exteriores y los 24 sitios restantes serán para mediciones en interiores, cumpliendo con la recomendación del informe ITU-R BT-2035-2 [5].

Teniendo el número de sitios de medición, el siguiente paso es la localización de ellos, por lo que el primer aspecto que se tomará en cuenta son los diferentes tipos de sitio para las pruebas de campo, de acuerdo a la Recomendación A/75 [12], son los siguientes:

- a) Radiales: El ángulo de azimut de la antena es contante, variando la distancia que hay de la antena al transmisor.
- b) Arcos: Se tendrá una distancia constante de la antena al transmisor y el ángulo de azimut es el que irá variando.
- c) Rejillas: Patrón de forma rectangular con un espaciamiento aproximado de 1609 m (sirve para ver los efectos de la variabilidad de propagación en terrenos suburbanos).
- d) Clusters: Patrón de forma rectangular con un espaciamiento aproximado de 805 m (sirve para ver los efectos de la variabilidad de propagación en terrenos urbanos).

Por otro lado, otro de los aspectos que se tomará en cuenta para la localización de los sitios de medición son los retardos que tendrá la señal eco (señal de menor intensidad) con respecto a la señal principal (señal de mayor intensidad), estos serán:

- a) Zonas dentro de la cobertura de la red en donde la diferencia de tiempos entre las dos señales sea menor a $40 \mu\text{s}$. Este valor se describe en el documento A/74 [2], donde muestra una gráfica de amplitud y tiempo (máscara de eco estático), que representa los valores mínimos que un ecualizador de un receptor ATSC debería soportar para una red SFN con el estándar ATSC. En la figura 4.7 se muestra la máscara de eco estático de acuerdo a la recomendación A/74.

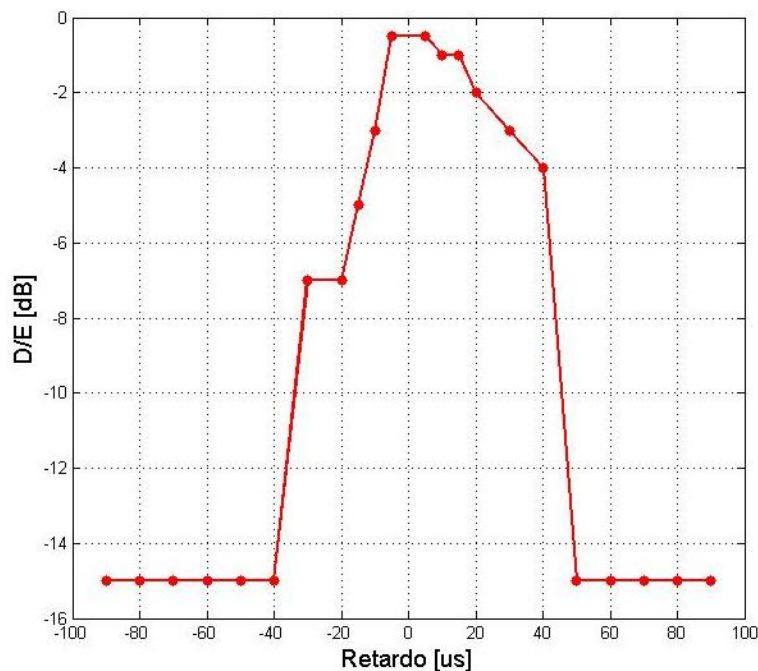


Figura 4.7. Valores mínimos del ecualizador para un receptor ATSC de acuerdo a la recomendación A/74 [2].

- b) Zonas dentro de la red con las características de que las señales recibidas presenten entre ellas un retardo entre $40 \mu\text{s}$ a $70 \mu\text{s}$. Estos valores se determinaron por las pruebas de laboratorio que realizó el proyecto REFUTV, debido a que tres de los receptores soportaban una señal de eco de $70 \mu\text{s}$ (en situación de pos-eco), por esta razón se decidió verificar estos resultados, con las condiciones que se tendrán en campo. Además con estos valores, se podrá obtener la máscara de eco estático para los receptores y estos resultados delimitarán la zona de cobertura de la red donde los receptores son capaces de recibir correctamente.

Para determinar la localización de estos valores de retardo en la red SFN, se tomó en cuenta la distancia que hay de los transmisores al receptor, debido a que, conforme se aleja el receptor con respecto a cada transmisor, la señal tardará más en llegar al receptor. Comparando la diferencia en el tiempo de propagación entre las dos señales al receptor se tiene una zona donde el valor del retardo entre ambas es nulo (cuya ubicación es exactamente la mitad de la distancia entre los dos transmisores). En esta zona, donde el retardo es nulo, se tendrá una recepción de dos señales con distintos niveles de potencia, dado que los transmisores trabajan con diferente potencia de transmisión. En la figura 4.8 se muestra la predicción de cobertura de la red SFN con los transmisores sincronizados, mostrando con líneas los diferentes tiempos de retardo relativo entre ambas señales en el receptor.

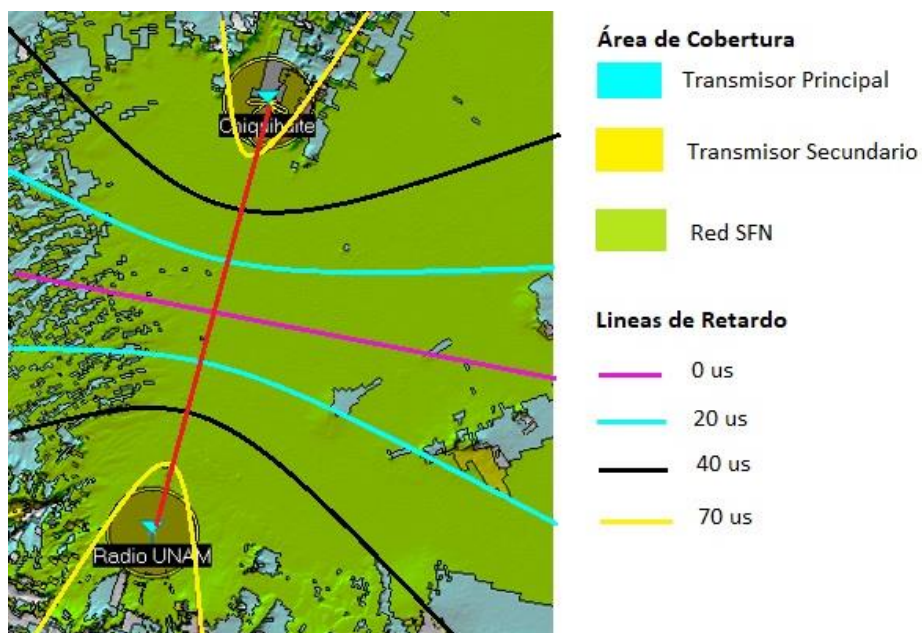


Figura 4.8. Predicción de cobertura de la red SFN con los diferentes tiempos de retardo relativo.

Para identificar la zona de pre-eco (la señal de menor intensidad llega antes que la señal de mayor intensidad) y la zona de pos-eco (la señal de menor intensidad llega después que la señal de mayor intensidad), en la figura 4.9 se muestra una gráfica de los niveles de potencia estimados para un receptor con una antena Yagi- Uda que tiene una ganancia de 14 dBi y a una altura de 2 metros (estos valores de recepción también se tomaron en cuenta para simular la cobertura de cada transmisor y de la red SFN) cuando recorre la ruta partiendo del transmisor del Cerro del Chiquihuite al transmisor de Radio UNAM y en forma inversa.

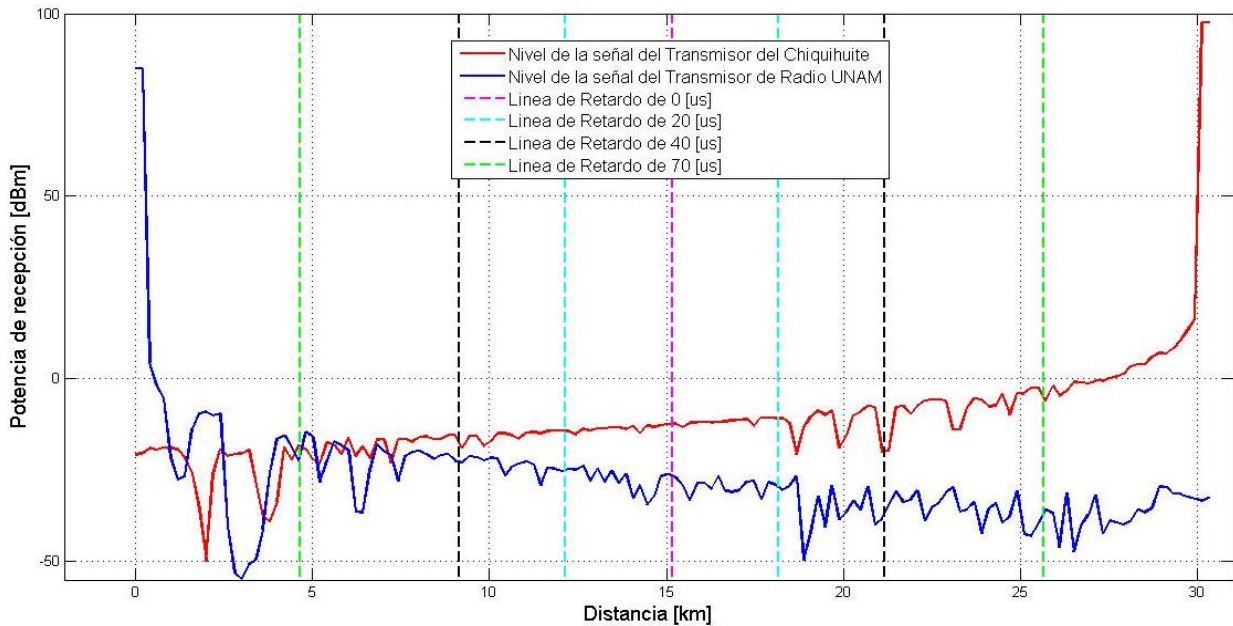


Figura 4.9. Gráfica del nivel de potencia en recepción y la distancia entre los transmisores.

El área de pre-eco, de acuerdo a la figura 4.9, se encuentra ubicada desde una distancia de 5.82 km respecto a Radio UNAM hasta los 15.16 km, es decir en el kilómetro 5.82 la señal de Radio UNAM llega antes pero con una potencia menor que la señal proveniente del Cerro del Chiquihuite, que tiene un nivel de potencia mayor. Después del kilómetro 15.159, ya no se tiene la situación anterior, puesto que la señal de Radio UNAM se comporta como post-eco hasta los 30.318 km, que es la distancia entre los dos transmisores.

A una distancia de 5.82 km (distancia del transmisor de Radio UNAM en dirección al transmisor del Cerro del Chiquihuite), existe el lugar donde comienza la zona de pre-eco, por lo que se calculó el tiempo de retardo que tiene la señal del Cerro del Chiquihuite con respecto a Radio UNAM, cuando el receptor se localiza a la distancia antes mencionada.

$$v = \frac{d}{t} \tag{1}$$

Donde

v= Velocidad en que viaja la señal, que es la velocidad de la luz porque el medio será el aire, el cual tiene un valor de $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

d= Distancia de separación entre el Cerro del Chiquihuite y el receptor que se encuentra en el comienzo de la zona de pre-eco (5.82 km con respecto a Radio UNAM), el cual tiene un valor de 24.498 km

t= Retardo en la zona de pre-eco

$$t = \frac{24498 \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 81.66 \mu\text{s}$$

El pre-eco en una red SFN es muy perjudicial al procesado de la señal que realiza el receptor, por lo que en las pruebas de campo se pretende eliminar, o al menos minimizar esta área donde existe el pre-eco, y esto se puede lograr agregando el tiempo de retardo de 81.66 μs a la señal que emite el transmisor de Radio UNAM. Esto implica que las líneas de retardo mostradas en la figura 4.9 se trasladan para situarse más cercanas al transmisor de Radio UNAM, que es al que se le añadió el retardo adicional.

En la figura 4.10 se muestra el nivel de la potencia del transmisor de Radio UNAM, a cuya señal se le agregó un retardo de 81.66 μs con respecto al transmisor del Cerro del Chiquihuite. La potencia de las dos señales que recibe el receptor no cambia, lo único que cambia es el instante de llegada entre una señal y otra, y por tanto, el retardo relativo entre ambas señales en el receptor. Se observa ahora que ya no se tiene área de pre-eco, pero el área donde existe post-eco ha aumentado.

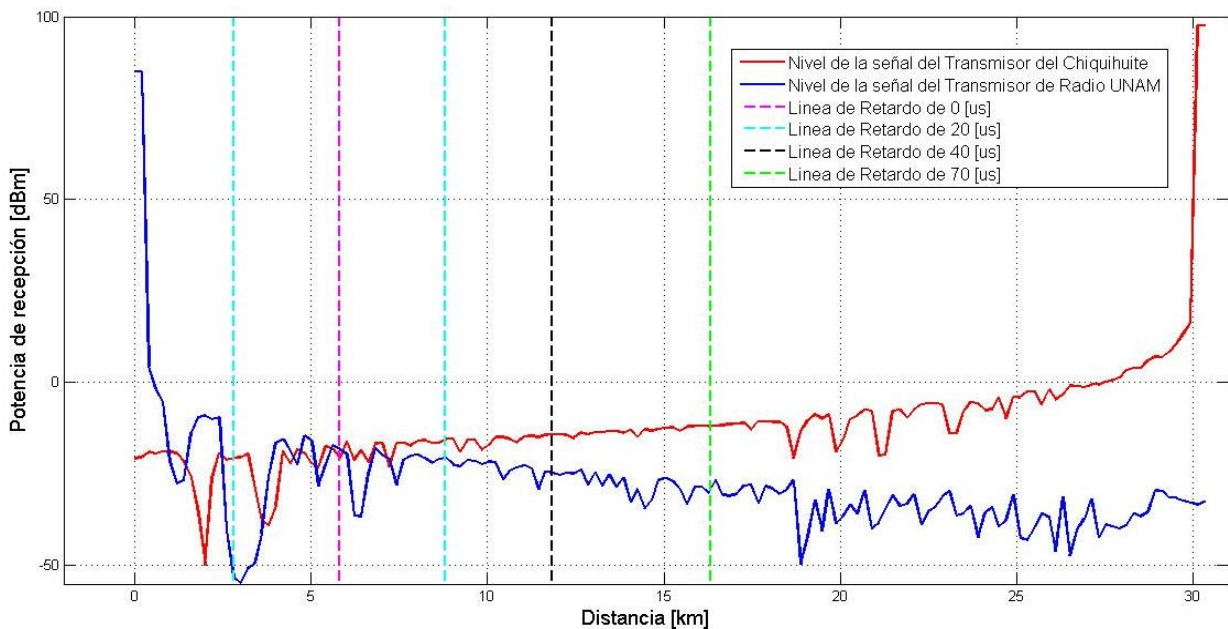


Figura 4.10. Gráfica del nivel de potencia en recepción y la distancia entre los transmisores, cuando el transmisor de Radio UNAM tiene un retardo de 81.66 μs .

Este valor de retardo añadido al transmisor de Radio UNAM hay que tenerlo en cuenta, porque aparte de eliminar el área de pre-eco, limita de manera significativa el desempeño de cualquier receptor en el área de pos-eco; aunque esta área no es tan perjudicial en la redes SFN.

Tomando en cuenta todo lo anterior, la distribución de los sitios de medición tiene los siguientes aspectos:

1. Sitios que estén dentro del área de cobertura de la red SFN, esto garantizará que se tiene un nivel de campo mayor a 48 dBu que es el valor del umbral de recepción para el canal que se está utilizando.
2. Sitios en donde se obtengan retardos de la señal eco con respecto a la señal principal menores a 40 μ s y sitios donde el retardo sea entre 40 μ s y 70 μ s, tanto en zonas de pre-eco como pos-eco, para obtener así, la máscara de recepción. Estas medidas se agrupan entorno a las líneas de retardo, que se definen a partir del tiempo de llegada entre las dos señales y niveles de potencia, como se muestra en la figura 4.9.
3. En el segundo escenario que se muestra en la figura 4.10, donde se eliminó el área de pre-eco, se realizarán algunas pruebas para corroborar lo que se presentó en la simulación, por lo que principalmente los sitios a medir serán cuando se tiene un retardo de 0 μ s y 20 μ s. Aunque también se verá el comportamiento de la red SFN para el área de pos-eco por lo que se harán pruebas en sitios donde el retardo sea hasta 70 μ s y se comparará con la máscara de recepción obtenida con los datos del punto anterior.
4. Sitios en donde se tiene la recepción de la señal proveniente de un solo transmisor (transmisor principal o transmisor secundario), para conocer la cobertura alcanzada de cada transmisor y, además con esto, se podrá evaluar la ganancia de la red (recepción con un solo transmisor y con dos transmisores).
5. Entornos urbanos donde haya mucha gente y automóviles transitando, de igual forma donde haya poca población y automóviles, para poder evaluar diferentes entornos que se tienen en la Ciudad de México.
6. La estructura a utilizar es la de radiales y arco, para tener diferentes variaciones de potencia de la señal ante la presencia de obstrucciones naturales y/o causada por el humano, que influye en las características de la señal que se recibe.

En la figura 4.11 se muestra la distribución propuesta, de los sitios de medición para las pruebas de campo. Los puntos de medición en exteriores se representan en color rojo y en color azul para interiores. Las líneas de retardo mostradas están definidas para cuando los transmisores estén sincronizados en su transmisión.

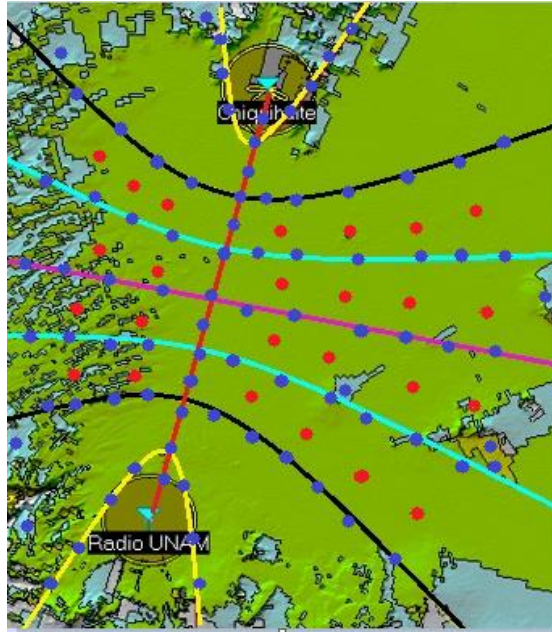


Figura 4.11. Ubicación de los puntos de medición en recepción fija para exteriores (azul) e interiores (rojo).

Los sitios de medición en exteriores se ubican en calles donde es factible que se pueda estacionar la unidad móvil. Los sitios de recepción fija en interiores se ubicarán en edificios públicos como por ejemplo edificios de oficinas, centros comerciales, etc., contando con habitaciones accesibles para la realización de las pruebas.

4.8. Duración de las pruebas en campo

Para determinar la duración de las pruebas en campo se tiene que tomar en cuenta el tiempo que se esté en cada sitio de medición, así como el traslado que haya de un lugar a otro. Teniendo un aproximado del tiempo que se esté en cada sitio de medición junto con el traslado, se puede estimar el número de sitios en donde se podrán realizar las medidas por día y a partir de ese valor, obtener los días totales que durarán las pruebas de campo, teniendo en cuenta que el total de sitios a medir en recepción fija será de 120 lugares. A continuación se detalla el proceso de cálculo que ha llevado a este valor.

En cada lugar, se realizarán 7 mediciones, la primera medición será apuntando la antena al transmisor principal (Cerro del Chihuante), la segunda se realizará apuntando la antena al transmisor secundario (Radio UNAM) y las otras cinco mediciones se realizarán cada 60° en azimut con respecto al transmisor principal. En cada medida, se grabará la señal por un minuto, debido a que es el tiempo requerido para determinar la mala recepción de una señal a partir del parámetro TOV, pero también por la recomendación A/326 [7]. Por lo tanto, el tiempo de grabación

aproximadamente será de 7 minutos, pero también se tiene que tomar en cuenta que se guardarán imágenes del lugar de medición, de la posición de la antena, del espectro de la señal, entre otras cosas, por lo que el tiempo total estimado que se estará en el sitio de medición tomando en cuenta los aspectos anteriores es de 15 minutos.

El traslado de un lugar a otro, tomando en cuenta el tráfico habitual de la Ciudad de México es aproximadamente de 25 minutos, cuando ya se esté en el sitio de medición se tendrá que buscar un lugar para estacionarse, ya estando en el lugar donde se realizarán las pruebas se tendrá que montar la antena en el mástil y posicionarla hacia el primer lugar de medición (transmisor principal), el tiempo estimado para estas tareas es de 20 minutos aproximadamente. El total del tiempo por cada lugar de medición es cerca de 60 minutos, por lo tanto, si se está en campo 6 horas al día, se podrán realizar 6 sitios de medición por día. En cinco días, ya se tendrán 30 lugares de medición, por lo tanto en un mes se realizarán los 120 sitios de medición que se proponen para recepción fija.

Para las pruebas de campo en recepción móvil aproximadamente se realizarán en 5 días, para poder verificar el comportamiento de la red SFN, con este tipo de recepción. Tomando en cuenta la duración tanto en recepción móvil como en recepción fija, las pruebas en campo tendrán una duración aproximado de 5 semanas.

Bibliografía

- [1] Advanced Television Systems Committee. "A/54: Recommended Practice: Guide to the Use of the ATSC Digital Television Standard, including Corrigendum No. 1". 04 December, 2003.
- [2] Advanced Television Systems Committee. "A/74 Recommended Practice: Receiver Performance Guidelines". Washington, D.C. 07 April, 2010.
- [3] Jaime Huerta. Tesis de Maestría: "Pruebas de laboratorio de televisión digital ATSC en Redes en Frecuencia Única", Facultad de Ingeniería, UNAM. Enero, 2016.
- [4] K. Salehian, Yiyang 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) pp: 1–8, March 2010.
- [5] 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. Noviembre, 2008.
- [6] José María Matías Maruri, Mario Albeto Hernández Flores. "Resultados de las pruebas de laboratorio de ATSC". Facultad de Ingeniería, CONACYT. 01 de Junio, 2016.
- [7] Advanced Television Systems Committee. "A/326: Recommended Practice: ATSC Field Test Plan". Washington, D.C. 22 February, 2017.
- [8] 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.
- [9] "Radio Mobile-RF propagation simulation software. About Radio Mobile". Fecha de consulta: 10 de Junio, 2017. Disponible: http://radiomobile.pe1mew.nl/?About_Radio_Mobile_Online.
- [10] Diario Oficial de la Federación. Capítulo 10: "Contorno de Intensidad de Campo y Umbral de Visibilidad". Diciembre, 2016.
- [11] Instituto Federal de Telecomunicaciones. "Infraestructura de estaciones de televisión". Marzo, 2016.
- [12] Advanced Television Systems Committee. "A/75: Recommended Practice: Developing DTV Field Test Plans". Washington, D.C. 26 July, 2001.
- [13] 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 06 27 08.doc. June, 2008.

[14] Andrea Zentella y José María Matías. “Definición del objetivo y metodología de las pruebas de campo”. Facultad de Ingeniería UNAM, CONACYT. 04 de Abril, 2017.

[15] Andrea Zentella y José María Matías. “Definición del equipamiento de medida para las pruebas de campo”. Facultad de Ingeniería UNAM, CONACYT. 02 de Abril, 2017.

[16] Ricardo Abraham Zavaleta. Tesis de Maestría. “Planificación de pruebas de campo sobre Redes en Frecuencia Única de Televisión Digital ATSC”. Facultad de Ingeniería, UNAM. Junio 2015.

Capítulo 5. CONCLUSIONES

En este capítulo se presentarán las conclusiones de este trabajo de investigación, por lo que primero se describen los objetivos logrados con la realización de esta tesis y después el trabajo a futuro con base a lo realizado anteriormente.

5.1. Objetivos logrados

En esta tesis se realizó la metodología de medida de las pruebas de campo de televisión digital ATSC en una red SFN para la Ciudad de México. Estas pruebas tanto de campo como de laboratorio determinarán de una muestra significativa de receptores comerciales de ATSC el comportamiento de éstos dentro de una red SFN de dos transmisores en condiciones reales.

El alcance y contenido de esta tesis es la definición del equipamiento de las pruebas de campo, así como la caracterización de estos equipos; además se determinaron los parámetros de medida que se tendrán que realizar en cada sitio, los cuales son importantes para el análisis de resultados; también se presentó la metodología para cada sitio de medidas y finalmente se definió la distribución de los lugares donde se realizaran las pruebas de campo.

Las características de las pruebas de campo son:

- El lugar de realización de las pruebas de campo será en la Ciudad de México
- La red SFN está conformada por dos transmisores, uno localizado en el Cerro del Chiquihuite y el otro estará en Radio UNAM. El despliegue de esta red estará a cargo del radiodifusor SPR, teniendo como canal físico el número 30, que es en el que transmite.
- La configuración de la red SFN, es la de Transmisores Distribuidos por lo que se seguirá los lineamientos establecidos en el Estándar ATSC/110 y en la Práctica Recomendada ATSC/111, dicha documentación describe las configuraciones en las cuales es posible implementar una red SFN.
- Los modos de recepción son estático (fijo) y móvil; en el modo de recepción estático es tanto en interiores como en exteriores.
- Las antenas a usar son directivas, porque se quiere estudiar el desempeño de los receptores con diferentes relaciones de potencia que se reciben de cada transmisor.
- Los parámetros a medir son MER, BER después del Reed Solomon, TOV, C/N, la respuesta al impulso y la desviación de frecuencia. Estos parámetros servirán para el

análisis de los resultados que se hará con las medidas obtenidas durante las pruebas de campo.

El equipamiento de medida se dividió en dos grupos: el primero es el que se llevará a campo para realizar las pruebas en la unidad móvil y el segundo es el equipo de medida a usar en el laboratorio; esto fue con el objetivo de hacer más eficiente el trabajo en campo, y también para comparar el desempeño de los diferentes receptores bajo las mismas condiciones.

El equipo de la unidad móvil está conformado por un sistema de grabación (USRP X300, laptop y disco duro), un sistema de medición y grabación de los parámetros de medida (ETL TV Analyzer y laptop) y un receptor comercial.

Para realizar las pruebas del laboratorio el equipo a utilizar es un USRP X300, laptop y disco duro, esto conforma el sistema de reproducción; y los receptores comerciales, para poder determinar el desempeño de cada uno de ellos bajo las mismas condiciones.

Los dos equipos que se caracterizaron fueron USRP X300 y ETL TV Analyzer. Para el equipo USRP X300 se concluyó que necesita una ganancia de 14.4 dB para que no afecte el umbral de visibilidad de los receptores (TOV). Esta ganancia será colocada en el programa de captura de la señal RF. Para el ETL TV Analyzer se determinó que solo puede demodular señales de una red SFN en un rango de $-5 \mu\text{s}$ (pre-eco) hasta $+40 \mu\text{s}$ (pos-eco). Para recepción en interiores este equipo no está diseñado para realizar mediciones con características de multitrayecto del modelo de canal Brasil D.

La predicción de cobertura de la red se realizó con el software Radio Mobile v 11.6.5, el cual ocupa el modelo de propagación Longley-Rice, este método es el que pide la IFT para la estimación de cobertura de una estación transmisora de TDT. Los sitios de medición se eligieron con base a los resultados de las pruebas de laboratorio y a la red SFN que se simuló, además los retardos que se consideraron entre las señales fueron nulos, moderados y fuertes para realizar a sí la máscara de recepción de la muestra de receptores.

El tiempo para la realización de las mediciones de la señal de RF será de un minuto en cada sitio. El número de sitios definidos fue de 120, donde 96 sitios son en exteriores y 24 sitios en interiores, cumpliendo así con la recomendación de la ITU para la evaluación de la cobertura de DTV. La duración de las pruebas de campo será aproximadamente de 5 semanas, tomando en cuenta que se trabaje 6 horas al día y cinco días a la semana.

Se espera que estas pruebas de campo sirvan como una guía para el diseño y despliegue de redes similares en todo México (configuración SFN de Transmisores Distribuidos), principalmente en entornos urbanos.

5.2. Trabajo a futuro

Una vez que se tiene todo el equipamiento que se usará en las pruebas de campo, y se hayan caracterizado estos equipos, el siguiente paso que se tendrá que realizar es la verificación del buen funcionamiento en conjunto del equipamiento que se llevará en la unidad móvil, teniendo que realizarse pruebas en diferentes puntos o sitios de medición dentro de la unidad móvil.

Otro punto que se tiene que tomar en cuenta, es la verificación de los lugares de medición, si realmente se puede realizar en forma adecuada las pruebas de campo o es necesario el cambio de ese lugar. Teniendo ya todo esto, se podrá realizar las pruebas de campo en la Ciudad de México y después hacer un análisis de resultados, para poder entregarlos a CONACYT y al IFT, como parte del proyecto REFUTV, dirigido por la Facultad de Ingeniería.

Anexo A. PRODUCTOS DE LA TESIS

Los productos de esta tesis fueron dos informes técnicos, dichos informes se entregaron a CONACYT como reporte del proyecto REFUTV.

Título: Definición del equipamiento de medidas para las pruebas de campo

Autores: Andrea Zentella León, José María Matías Maruri

Fecha: 02 de Abril del 2017

Título: Definición del objetivo y metodología de las pruebas de campo

Autores: Andrea Zentella León, José María Matías Maruri

Fecha: 04 de Abril del 2017

DEFINICIÓN DEL EQUIPAMIENTO DE MEDIDAS PARA LAS PRUEBAS DE CAMPO

Versión: 2

Fecha: 02-04-2017

Autores: Ing. Andrea Zentella, Dr. José María Matías.

1. INTRODUCCIÓN

En este informe técnico se explica el equipo de medición que se ocupará para las pruebas de campo del proyecto REFUTV. Con el objeto de abaratar costos, hacer más eficiente la toma de medidas, y comparar el desempeño de los diferentes televisores en igualdad de condiciones, durante las medidas en campo se grabarán los datos muestreados directamente de la antena con un programa desarrollado en SDR (Software Defined Radio, o Radio Definida por Software). De forma que, en el laboratorio, con otro programa y equipo de SDR, se podrán reproducir las condiciones de recepción grabadas en campo igual que si se estuviera allí, y en ese momento. Esto permitirá que en campo se hagan mediciones con un solo televisor, mientras que en el laboratorio se realizarán las pruebas con el resto de receptores, agilizando las pruebas.

Por tanto, el equipamiento se dividirá en dos partes: el equipo de medición que se llevará en la unidad móvil y el equipo de medición que se ocupará en laboratorio.

El documento está organizado de la siguiente forma: el equipamiento de medida usado en la unidad móvil, el equipamiento de medida usado en laboratorio y las conclusiones sobre este trabajo.

2. EQUIPAMIENTO DE MEDIDA

En este apartado se describirá el equipo a utilizar para las pruebas de campo dividiéndose en dos partes: el sistema de grabación que se ocupará en la unidad móvil y el sistema de reproducción que se usará en laboratorio. La importancia de estos dos sistemas es reducir el tiempo que se esté en campo, así como tener la misma señal con ciertas condiciones y poder evaluarla en todos los receptores de la misma manera.

2.1. Equipamiento de medida en la unidad móvil

El equipamiento de medidas en la unidad móvil se dividirá en tres partes: la primera es el equipo que se ocupa para grabar la señal de RF en cada lugar de medición, la segunda son los dispositivos que necesitamos para medir y grabar los parámetros de medición de la señal grabada y la tercera es el receptor comercial para verificar la calidad de la señal.

En la figura 1 se muestra el diagrama de los equipos a usar en la unidad móvil para la realización de las pruebas de campo.

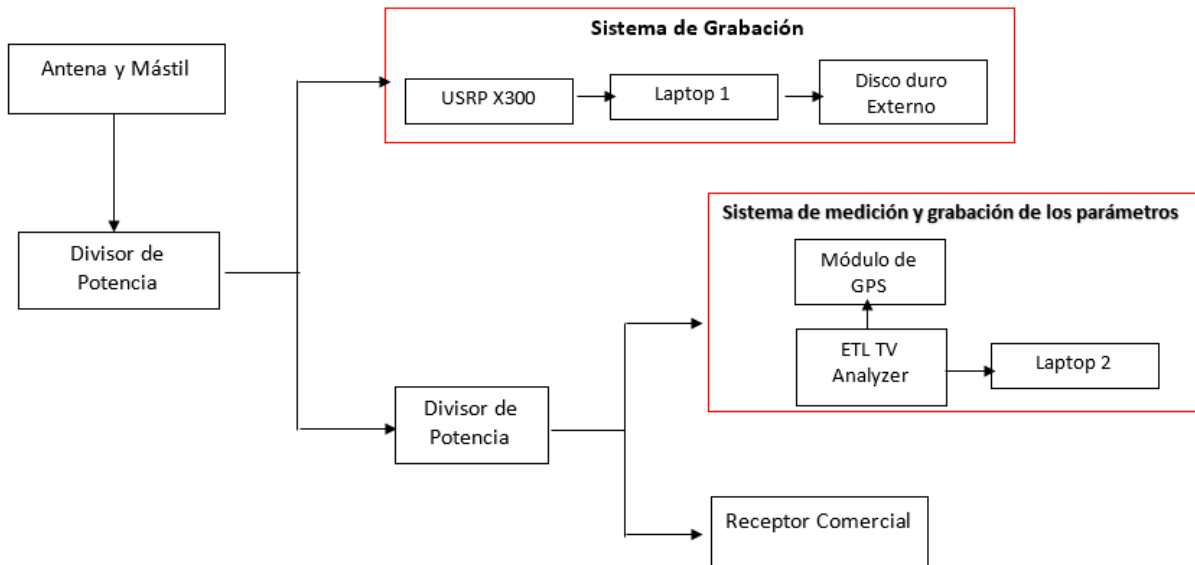


Fig. 1. Diagrama del equipamiento de medida en unidad móvil para las pruebas de campo

- **Antenas:** Deben ser antenas calibradas y poder operar a la frecuencia de 569 [MHz] (canal 30), que es la frecuencia de operación del transmisor SPR (Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano).
 - Antena Direccional: Otorga la posibilidad de estudiar el desempeño de los receptores bajo diferentes relaciones de potencia recibida desde cada transmisor.
- **Mástil [1]:** Poste que ayuda a la estabilidad de las antenas, para posicionarla a diferentes alturas y tener una mejor recepción de la señal. El mástil a usar es de la empresa MFJ modelo 1919, debido a que cuenta con una altura máxima de 2 [m], la base está formada por triángulos equiláteros la cual proporciona mayor estabilidad, y es manejable y fácilmente instalable y desmontable.
- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Macho):** Conecta la antena a utilizar con el divisor de potencia.
- **Divisores de Potencia [2]:** La señal captada por la antena, pasará por un divisor de potencia hacia los subsistemas de medición, esto es para tener la misma señal en los equipos de medición y tener siempre una referencia de ellos. La pérdida de potencia ocasionada por el divisor no es relevante en este estudio, ya que las pruebas de campo se enfocan al desempeño de los receptores debido al multitrayecto dentro de la red SFN, y por lo tanto, no se espera trabajar cerca del umbral de recepción, sino con potencias relativamente altas. Para la potencia total recibida por la antena, se le sumarán las pérdidas ocasionadas por un divisor o dos respectivamente. El divisor de potencia que se utilizará es el de la empresa Mini Circuit modelo ZFSC-2-1-N+, los conectores que tiene son de tipo “N”, éste tipo de conector es el que tienen las antenas de la frecuencia de 569 [MHz].

- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Macho) y SMA (Macho):** Conecta el divisor de potencia con el equipo USRP X300 NI.
- **Sistema de grabación de la señal de RF:** Este sistema graba una señal de RF con ciertas condiciones requeridas para las pruebas de campo. Este sistema está conformado por los siguientes equipos:
 - USRP X300 [3]: Está cargado con un software de grabación de señales. Muestra la señal RF recibida y la convierte en muestras IQ para después reproducir esta señal en los receptores y poder determinar su desempeño. El programa que este equipo usará para grabar la señal es el “Sistema de Captura”. Este equipo cuenta con un GPS OCXO el cual sirve para mejorar la estabilidad del oscilador local del USRP, proporcionando alta precisión en la frecuencia de grabación. El USRP es de la empresa Ettus Research y el modelo es el X300.
 - Laptop 1: Cuenta con el sistema operativo LINUX y el software libre GNU Radio. Éste último se encarga de controlar al equipo USRP X300, para que muestre y digitalice la señal en RF y se guarde directamente en el disco duro.
 - Cable Ethernet: Comunica la laptop con el USRP X300 NI a partir del cable gigabit Ethernet, que soporta la gran velocidad de datos requerida para esta operación.
 - Disco Duro Externo: Conformar la base de datos de los archivos grabados con el USRP X300; dependiendo de la duración de la medida es el peso de cada archivo.
- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Male):** Conecta el divisor de potencia con el equipo ETL TV Analyzer R&S.
- **Sistema para medir y grabar los parámetros de medición de las señales grabadas:** Este sistema nos ayuda a medir parámetros de medida (como el MER, el BER antes y después del Reed Solomon, la C/N, etc.) de las señales. Estos resultados serán importantes para el análisis de los resultados de las pruebas de campo, por lo tanto es necesario grabar estas medidas. El sistema está conformado de los siguientes equipos:
 - R&S ETL TV Analyzer [4]: Es un receptor profesional, analizador de señales ATSC, el cual será el encargado de medir los parámetros de medida de la señal de ATSC. Además, permite visualizar y capturar las imágenes del espectro de la señal, la constelación, el diagrama de ojo y el patrón de ecos; esta última medida es fundamental para el análisis de los resultados de recepción en una red SFN.
 - Módulo de GPS: Garantiza conocer la posición exacta de los lugares donde se realizaron las pruebas, además de poder grabar algunos parámetros de medición obtenidos en esos puntos.
 - Laptop 2: Cuenta con el sistema operativo Windows y el programa BC Drive de R&S, que permite grabar los valores de los parámetros de medición en diferentes lugares

y así poderlos visualizar en el programa Google Earth. Además, permite exportar esos valores a una tabla de Excel, que pueden ser útiles en un futuro para el análisis de los resultados de las pruebas de campo.

- **Acoplador de impedancias de “N” (Macho) a “F” (Hembra) [5]:** Debido a que la impedancia de salida del divisor de potencia es de 50 $[\Omega]$ y la impedancia de entrada de la televisión es de 75 $[\Omega]$, se necesita un acoplador de impedancias. El acoplador de impedancias que se va a usar es de la empresa Pasternack modelo PE7071.
- **Cable RG6 de 75 $[\Omega]$ con conectores “F” (Macho):** Conecta el acoplador de impedancias con la salida de la televisión.
- **Receptor Comercial:** Con este equipo se evaluará subjetivamente la calidad de recepción de la señal grabada, ayudando a documentar las medidas realizadas por el ETL TV Analyzer. En el laboratorio se repetirán las medidas con el resto de receptores comerciales.

2.2. Equipamiento de medida en laboratorio

Después de grabar señales en condiciones diferentes de una red SFN (Single Frequency Network), se reproducirán estas señales en el laboratorio para todos los receptores utilizados en las pruebas de laboratorio (estos receptores son una muestra significativa de los receptores vendidos en el país). De esta manera se podrá determinar el desempeño de cada receptor. La evaluación se realizará en forma subjetiva con el umbral de fallo ó TOV (Threshold of Visibility, o Umbral de Visibilidad). Dentro del Proyecto REFUTV, el criterio para definir el TOV es la existencia de al menos dos errores visibles en un periodo de un minuto de reproducción de la señal.

Este equipo de medición es muy importante porque, como ya se ha explicado, permite evaluar todos los receptores con las mismas condiciones. En campo no se podrían evaluar todos los receptores simultáneamente, por falta de espacio y porque requeriría una atenuación grande en la señal. Se podrían evaluar de forma consecutiva, pero las condiciones de la señal cambiarían, y el tiempo de medida sería mucho mayor. Por ello se optó por grabar las señales con un USRP y después reproducir las mismas señales con otro USRP en el laboratorio. Esto permite que todos los receptores se evalúen con las mismas señales y además permite reducir el tiempo de las medidas en campo. En laboratorio se aumenta el tiempo de medida, pero es mucho menos costoso y se puede realizar en cualquier momento.

En la Figura 2 se muestra el diagrama del equipo de medida usado en laboratorio para la reproducción de las señales grabadas. En este sistema se reproducirá la señal simultáneamente en dos receptores para para disminuir el tiempo de la realización de las pruebas.

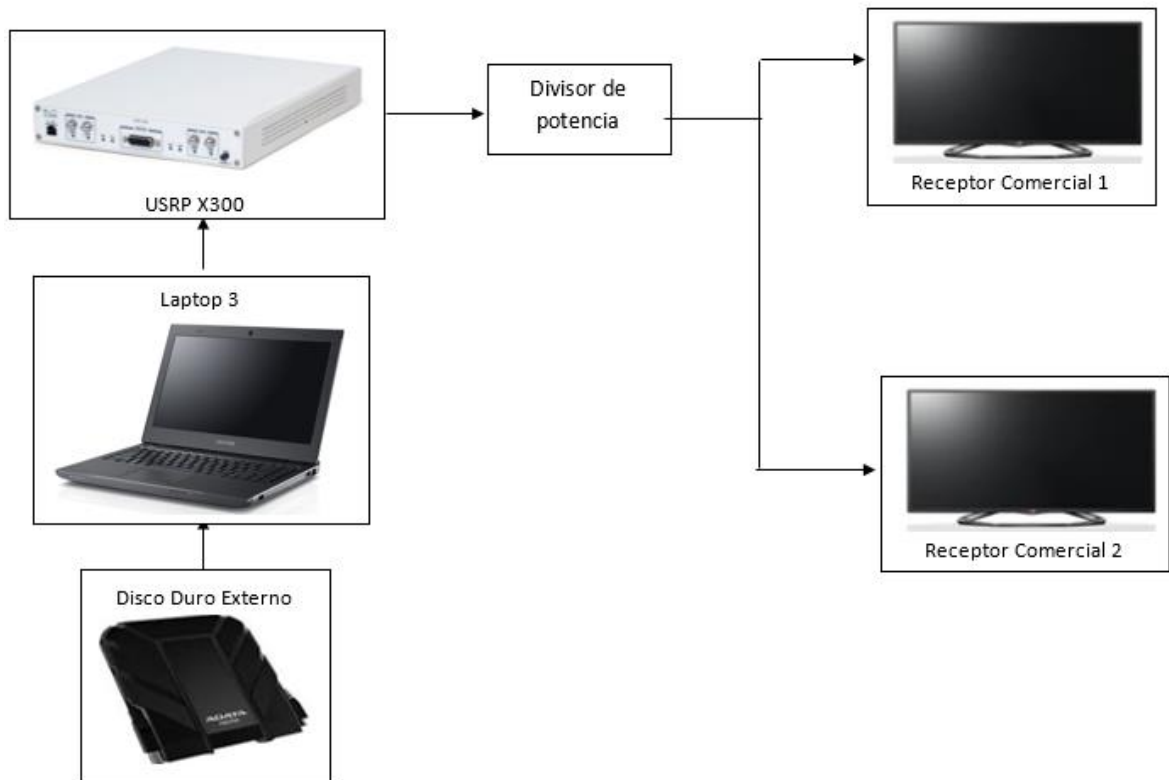


Fig. 2. Diagrama del equipamiento de medida en laboratorio

- **Sistema de reproducción de la señal de RF:** Este sistema reproduce las señales de RF que se grabaron en campo. El sistema está conformado por los siguientes equipos:
 - USRP X300 [3]: Este equipo de SDR reproducirá la señal que se grabó en campo, para poder evaluar los receptores comerciales usados en las pruebas de laboratorio. Este equipo usará el programa “Sistema de Reproducción” para reproducir la señal grabada.
 - Laptop 3: Cuenta con el sistema operativo LINUX y el software GNU Radio, este último se encarga de controlar al equipo USRP X300, para que funcione como reproductor para señales de RF.
 - Cable Ethernet: Comunica la computadora con el USRP X300, el cable a usar es un gigabit Ethernet, y como en el caso de la unidad móvil, tiene una alta capacidad de transmisión que permite reproducir las muestras grabadas en tiempo real.
 - Disco Duro Externo: Se localizan todos los archivos grabados que se necesitarán para evaluar el desempeño de los receptores.
- **Cable coaxial RJ58 con conectores “N” (Macho) y SMA (Macho):** Conecta el equipo USRP X300 con el divisor de potencia.

- **Divisor de Potencia [2]:** La señal de RF reproducida pasará por un divisor de potencia, para que se reproduzca la misma señal en dos receptores simultáneamente.
- **Acoplador de impedancias N (Macho) a F (Hembra) [5]:** Debido a que el divisor de potencia tiene impedancia de 50 $[\Omega]$ a la salida y la entrada de los televisores tienen una impedancia de 75 $[\Omega]$, se necesita un acoplador de impedancias.
- **Cable RG6 de 75 $[\Omega]$ con conectores "F" (Macho):** Conecta el acoplador de impedancias con la salida de la televisión.
- **Receptores Comerciales:** Con este equipo se evaluará la calidad de recepción de la señal de forma subjetiva, para así poder determinar el desempeño de los receptores comerciales dentro de una red SFN.

3. CONCLUSIONES

El equipamiento de medición para las pruebas de campo se divide en dos partes: la primera es el equipo de medición ocupado en la unidad móvil, el cual nos servirá para grabar las señales de RF con ciertas condiciones de multitrayecto dentro de una red SFN, midiendo también los parámetros de la señal como MER, BER antes y después del Reed Solomon, C/N y otros que serán importantes para el análisis de los resultados de las pruebas de campo.

Las señales grabadas se reproducirán en los receptores comerciales que se usaron en las pruebas de laboratorio para poder determinar su desempeño con señales reales en una red SFN, esta tarea se realiza en el laboratorio y será útil porque se podrán reproducir las señales grabadas las veces que sean necesarias en los receptores para tener datos certeros. Estos resultados se podrán comparar con los resultados de las pruebas de laboratorio.

Estos sistemas de grabación y reproducción son importantes, ya que reducen el tiempo que el equipo de trabajo estará en campo, además con este sistema se logra tener la misma señal en todos los receptores y poder evaluarlos Bajo las mismas condiciones.

4. REFERENCIAS

- [1] Catálogo MFJ-2017 Ham Radio. The world leader in amateur radio accessories. <http://www.mfjenterprises.com/>.
- [2] Mini-Circuit, Power Splitter Combiner, 2 way, 50 Ω , 1 a 750 MHz. <https://www.minicircuits.com/pdfs/ZFSC-2-1W+.pdf>.
- [3] Ettus Research USRP™ X300 and X310 X Series Datasheet. https://www.ettus.com/content/files/X300_X310_Spec_Sheet.pdf
- [4] R&S® ETL TV Analyzer Specifications. http://analitika.info/public/files/rs_etl_specifications.pdf
- [5] Pasternack, Matching Pad. Technical Datasheet PE7071. <https://www.pasternack.com/images/ProductPDF/PE7071.pdf>

DEFINICIÓN DEL OBJETIVO Y LA METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

Versión: 1

Fecha: 04-04-2017

Autores: Ing. Andrea Zentella, Dr. José María Matías.

1. RESUMEN

En este informe técnico se explican los objetivos y la metodología de las pruebas de campo que forman parte del Proyecto REFUTV.

El documento está organizado de la siguiente forma: En principio se explica el estándar de Televisión Digital ATSC (estándar A/53), así como también el concepto de Red en Frecuencia Única (SFN). Posteriormente, se describen los objetivos y la metodología de las pruebas de campo. Y finalmente se presenta la predicción de cobertura y la distribución de los sitios de medición de las pruebas de campo.

2. INTRODUCCIÓN

En julio de 2004 se publicó en el Diario Oficial de la Federación el: “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” [1], mediante el cual México adoptó el estándar de televisión digital ATSC, tanto la versión para recepción fija A/53 [2] como la versión para recepción móvil A/153 [3]. La fecha en la cual se debe llevó a cabo la suspensión de la transmisión de la señal de televisión analógica fue el 31 de diciembre del 2015 [4].

Para la selección de dicho estándar se creó en el año de 1999, el Comité Consultivo de Tecnologías Digitales para la Radiodifusión, el cual estuvo encargado del estudio, evaluación y desarrollo de tecnologías digitales de radiodifusión. Este 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. Algunas características que presenta este estándar son las siguientes [1]:

- Alta definición en canales de 6 MHz.
- La disponibilidad de aparatos de recepción en condiciones favorables de calidad, diversidad y precio.
- El potencial de desarrollo de nuevos servicios y de aplicaciones móviles y portátiles
- Las mejores condiciones para la recepción de las señales originadas en el territorio nacional y que por su ubicación pudieran ser captadas en el extranjero.

Por otro lado, existe un concepto importante relacionado a la televisión digital las Redes en Frecuencia Única (SFN, por sus siglas en Inglés Single Frequency Network), en donde varios transmisores transmiten simultáneamente la misma señal a la misma frecuencia. Esto permite usar

el mismo canal en zonas de sombra o en zonas de cobertura adyacentes. Las ventajas más importantes que tienen este tipo de redes son: aumentar el área de cobertura sin necesidad de más canales [5] así como tener un mejor uso del espectro radioeléctrico.

El objetivo del proyecto REFUTV es estudiar la viabilidad de implementar redes SFN con el estándar ATSC, y estudiar los parámetros que las haga viables. Usualmente las redes SFN se realizan con la modulación OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), por lo que se pensaría que con el sistema ATSC es imposible su implementación, pero con los últimos años se han llevado a cabo pruebas de laboratorio y de campo y los resultados indican que es posible la implementación de redes SFN con el estándar ATSC, debido al diseño de los ecualizadores del receptor, ya que ellos soportan el multitrayecto generado por una red SFN.

Para determinar la viabilidad de este tipo de redes, en el proyecto REFUTV se realizaron pruebas de laboratorio donde se generaban señales de ATSC simulando una red SFN, recibéndose en varios receptores comerciales. Estos resultados sirvieron para definir los parámetros de funcionamiento de la red y para la planificación de las pruebas de campo, la cual se espera que confirmen los resultados de las pruebas de laboratorio.

3. OBJETIVOS DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

De acuerdo a la planificación de las pruebas de campo del proyecto REFUTV se busca cumplir el siguiente **Objetivo General**:

Evaluar el desempeño de receptores comerciales de ATSC en una Red en Frecuencia Única (SFN) de dos transmisores, mediante la obtención de la máscara de recepción (diferencias de retardo y potencia de las señales principales recibidas de los dos transmisores) de los receptores tanto en exteriores como en interiores.

Derivado del objetivo general de las pruebas de campo se tienen los siguientes **Objetivos Secundarios**:

- Determinar la máscara de recepción de cada receptor.
- Comparar los resultados obtenidos de la máscara de recepción de cada receptor en campo con las pruebas realizadas en laboratorio.
- Verificar la respuesta de los receptores en recepción móvil dentro de una red SFN.
- Determinar las condiciones de retardo y potencia que debe tener un receptor en una red SFN, para que exista una buena recepción (determinar la máscara de recepción genérica).
- Definir parámetros de operación de una red SFN de ATSC de dos transmisores para que la mayoría de los receptores reciba correctamente.
- Comparar los resultados obtenidos de los modelos de canal presentados en las pruebas de campo con los modelos de canal teóricos (Brasil A y Brasil D) estudiados en laboratorio.
- Evaluar la ganancia de la red (recepción con un solo transmisor y con dos transmisores).

4. METODOLOGÍA DE LAS PRUEBAS DE CAMPO

En esta sección se describe la metodología que se realizará tanto en campo (para grabar señales de una red SFN) como en laboratorio (para obtener la máscara de recepción de cada uno de los receptores).

4.1. Grabación de la Señal de Referencia

Antes de realizar las medidas hay que verificar que todo el sistema funciona correctamente, tanto en los transmisores como en el equipo de medición. La señal de referencia ayudará en esta tarea. En esta sección se explica cómo se graba la señal de referencia. Se tendrá que hacer el primer día antes de comenzar con las pruebas de campo. La señal que se grabará será de referencia para los demás días, para verificar que todos los equipos tanto en transmisión como en recepción funcionen de manera adecuada. Los pasos a seguir son:

- a) Ubicar el vehículo en el lugar de referencia (este lugar podrá ser donde se deja estacionada la unidad móvil).
- b) Verificar el nivel de voltaje de la batería de la unidad móvil con un multímetro, en caso de que esté baja la batería arrancar el motor y esperar aproximadamente 5 minutos.
- c) Conectar el inversor de corriente a la batería de la unidad móvil.
- d) Verificar el funcionamiento del inversor (Voltaje, corriente) con un multímetro.
- e) Instalar y conectar todo el equipo de medida al inversor de corriente.
- f) Revisar que todos los equipos estén conectados.
- g) Colocar la antena en el mástil a 2 m de altura a nivel del suelo [6] y ubicarla hacia el transmisor principal.
- h) Grabar con el USRP la señal durante un minuto y simultáneamente con el equipo ETL TV Analyzer grabar los parámetros de medición (Nivel, BER antes y después del Reed Solomon, MER RMS, PER), además de visualizar la calidad de la señal en el receptor comercial.
- i) Repetir el procedimiento apuntando la antena hacia el transmisor secundario.
- j) Reproducir con el USRP las dos señales grabadas y comprobar que los valores obtenidos con el ETL TV Analyzer de la señal grabada y reproducida sean los mismos, para verificar que todo el sistema funcione correctamente.
- k) Desmontar el mástil con la antena y guardarla en la unidad móvil.

4.2. Acciones a realizar al inicio de cada día

En este apartado se explica lo que se tendrá que hacer cada día para verificar el buen funcionamiento de todo el sistema antes de empezar con las mediciones para las pruebas de campo.

4.2.1. Unidad Móvil

- a) Verificar los niveles de combustible de la unidad móvil, que sea suficiente para el trabajo diario.
- b) Comprobar la presión del aire de las llantas.
- c) Verificar el nivel de voltaje de la batería de la unidad móvil con un multímetro, en caso de que este baja la batería arrancar el motor y esperarse aproximadamente 5 minutos.
- d) Conectar el inversor de corriente a la batería de la unidad móvil.
- e) Verificar el funcionamiento del inversor (Voltaje, corriente) con un multímetro.

4.1.1. Verificación del buen funcionamiento del equipo de medida y de los transmisores (principal y secundario).

- a) Ubicar el vehículo en el lugar de referencia
- b) Conectar el equipo de acuerdo al diagrama de grabación [7], además de conectarlo al inversor de corriente.

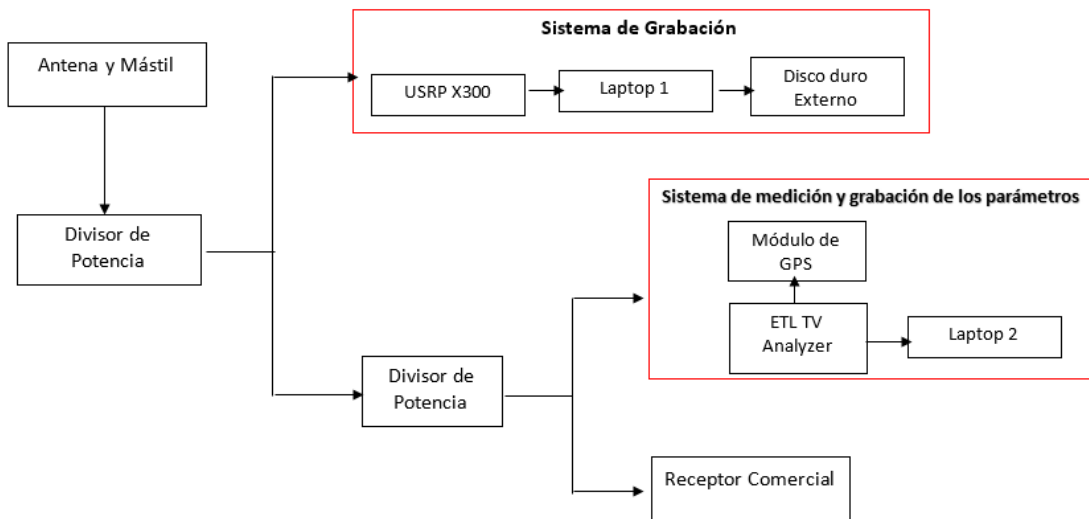


Fig. 1. Diagrama del equipamiento de medida en la unidad móvil para las pruebas de campo

- c) Revisar que todos los equipos estén conectados.
- d) Colocar la antena en el mástil a 2 m de altura a nivel del suelo y ubicarla hacia el transmisor principal.
- e) Grabar con el USRP la señal durante un minuto, visualizar en el receptor comercial la calidad de la imagen y grabar los parámetros de medición de la señal con el equipo ETL TV Analyzer (Nivel, BER antes y después del Reed Solomon, MER RMS, PER).
- f) Ubicar la antena hacia el transmisor secundario y repetir el mismo procedimiento.

- g) Reproducir las señales grabadas, obtener los valores de los parámetros de medición y comparar esos valores con los de la señal de referencia (obtenida el primer día), si existiera algún error comprobar el sistema de grabación y buscar el error.
- h) Si el sistema de grabación no tiene ningún error, el error podría estar en los transmisores, si es así avisar a SPR.

4.3. Realización de las pruebas de campo en recepción fija en exteriores

En esta sección se explicará el procedimiento para realizar las pruebas de campo para cada lugar de medición en recepción fija externa, los pasos a seguir son los siguientes:

- a) Estacionar el vehículo en un lugar cercano y disponible al sitio de prueba.
- b) Dejar encendida la unidad móvil.
- c) Colocar la antena en el mástil a 2 m de altura a nivel del suelo, y ubicarla en un lugar cercana a la unidad móvil.
- d) Documentar el sitio de prueba en una hoja de datos (Excel):
 - a. Registrar la dirección específica del lugar, con calle, número, colonia, delegación.
 - b. Registrar la fecha y hora de la prueba.
 - c. Registrar latitud y longitud de la zona con el GPS.
 - d. Descripción del clima (si esta soleado, nublado, ventoso, lloviendo, llovizna, con niebla, etc.).
 - e. Descripción del sitio (si hay edificios, árboles, tránsito, paso peatonal, puentes, elementos radiantes como cables de alta tensión, antenas cercanas, etc.).
 - f. Tomar fotografías del entorno del sitio de prueba.
 - g. Con una brújula ubicar los transmisores.
- e) Posicionar el mástil con la antena direccional apuntando al transmisor principal, realizando simultáneamente las siguientes acciones.
 - a. Grabar con el USRP la señal del aire durante un minuto [8] y guardarlo en un disco externo.
 - b. Observar la imagen en el receptor comercial y escribir comentarios durante el minuto de grabación como número de defectos que se observan (audio/video).
 - c. Grabar con BC Drive y el ETL TV Analyzer los parámetros de medida (Nivel, BER antes y después del Reed Solomon, MER RMS, PER) y grabar los archivos en un disco externo.
- f) Después de que la señal se haya grabado obtener el valor de C/N y registrarlo con los demás parámetros de medida. Grabar la imagen del espectro de la señal (span 12 MHz, RBW 30 kHz y VBW 300 kHz), de la constelación, del diagrama de ojo y del patrón de ecos. Por último tomar fotografías de la posición de la antena, es decir hacia donde está apuntando.

- g) Repetir el proceso ahora apuntando al transmisor secundario.
- h) Mover en azimut la antena cada 60 grados con respecto al transmisor principal y repetir el proceso. En total serían 5 mediciones.
- i) Descargar todas las fotos en el disco externo colocando un nombre representativo a cada una de ellas. Después organizar todos los archivos de grabación y las fotografías del sitio de medición.
- j) Desmontar el mástil con la antena y guardarla en la unidad móvil. Continuar con el siguiente sitio de prueba.

4.4. Realización de las pruebas de campo en recepción fija en interiores

En este apartado se explicará el procedimiento para realizar las pruebas de campo en recepción fija interna, los pasos a seguir son los siguientes:

- a) Estacionar el vehículo en un lugar cercano y disponible al sitio de prueba.
- b) Localizar el edificio donde se realizará la prueba.
- c) Bajar todo el equipamiento de medida.
- d) Ubicarse en un lugar cercano del sitio de prueba.
- e) Conectar los equipos a una toma corriente.
- f) Colocar la antena en el mástil a 1 m de altura.
- g) Documentar el sitio de prueba en una hoja de datos (Excel)
 - a. Registrar la dirección específica del lugar, con calle, número, colonia, delegación.
 - b. Número de pisos de la construcción y ubicación del piso donde se realizará la prueba (1° piso, 2° piso, etc.).
 - c. Ubicación específica de la habitación dentro del edificio (piso, esquina, medio, ventana, etc.).
 - d. Material de construcción (ladrillo, revestimiento, metal, etc.).
 - e. Tipo de construcción (oficina, centro comercial, casa particular, etc.).
 - f. Registrar la fecha y hora de la prueba.
 - g. Registrar latitud y longitud de la zona con el GPS.
 - h. Descripción del clima (si esta soleado, nublado, ventoso, lloviendo, llovizna, con niebla, etc.).
 - i. Tomar fotografías del entorno del sitio de prueba.
- h) Posicionar el mástil con la antena direccional apuntando al transmisor principal, realizando simultanea las siguientes acciones.
 - a. Grabar con el USRP la señal del aire durante un minuto y guardarlo en un disco externo.

- b. Visualizar la calidad de imagen que se tiene en el receptor comercial y escribir comentarios durante el minuto de grabación como número de defectos que se tiene (audio/video).
- c. Grabar con BC Drive y el ETL TV Analyzer los parámetros de medida (Nivel, BER antes y después del Reed Solomon, MER RMS, PER) y grabar los archivos en un disco externo.
- i) Después de que la señal se haya grabado obtener el valor de C/N y registrarlo con los demás parámetros de medida. Guardar la imagen del espectro de la señal (span 12 MHz, RBW 30 kHz y VBW 300 kHz), de la constelación, del diagrama de ojo y del patrón de ecos. Por último tomar fotografías de la posición de la antena, es decir hacia donde está apuntando.
- j) Repetir el proceso ahora apuntando al transmisor secundario.
- k) Descargar todas las fotos en el disco externo colocando un nombre representativo a cada una de ellas. Después organizar todos los archivos que se grabaron y las fotografías tomadas del sitio de medición.
- l) Desmontar el mástil con la antena y guardarla en la unidad móvil. Continuar con el siguiente sitio de prueba.

4.5. Realización de las pruebas de campo en recepción móvil

En esta sección se explicará el procedimiento a utilizar para las pruebas de campo en recepción móvil, los pasos a seguir son los siguientes:

- a) Determinar la ruta de la prueba del día.
- b) Ubicarse en el lugar de inicio de la ruta.
- c) Documentar el lugar de inicio de la ruta en una hoja de datos (Excel):
 - a. Registrar la dirección específica del lugar, con calle, número, colonia, delegación.
 - b. Registrar la fecha y hora de la prueba.
 - c. Registrar latitud y longitud de la zona con el GPS.
 - d. Descripción del clima (si está soleado, nublado, ventoso, lloviendo, llovizna, con niebla, etc.).
 - e. Descripción del sitio (si hay edificios, árboles, tránsito, paso peatonal, puentes, elementos radiantes (cables de alta tensión, antenas cercanas, etc.)).
 - f. Tomar fotografías del lugar de la ruta de inicio.
- d) Comenzar a conducir la ruta previamente asignada, a una velocidad mayor a 5 km/hora.
- e) Realizar simultáneamente las siguientes actividades:
 - a. Grabar con el USRP la señal del aire durante un minuto y guardarlo en un disco externo.

- b. Visualizar la calidad de imagen que se tiene en el receptor comercial y escribir comentarios durante el minuto de grabación como número de defectos que se tiene (audio/video).
 - c. Grabar con BC Drive y el ETL TV Analyzer los parámetros de medida (Nivel, BER antes y después del Reed Solomon, MER RMS, PER) y grabar los archivos en un disco externo.
 - d. Tomar fotografías de la localización de la antena, al igual que del recorrido de la señal grabada.
- f) Repetir el mismo procedimiento en varios sitios de la ruta.
 - g) Llegar al lugar final de la ruta, documentar los mismos datos que se obtuvieron en el lugar inicial de la ruta en la hoja de datos (Excel).
 - h) Descargar todas las fotos en el disco externo colocando un nombre representativo a cada una de ellas. Después organizar todos los archivos y fotografías de la ruta establecida.

4.6. Pruebas en el laboratorio con los demás receptores

En este apartado se explicará cómo se harán las pruebas para los demás receptores en laboratorio para determinar la máscara de recepción para cada uno de ellos de acuerdo a las señales grabas en campo.

4.6.1. Acciones a realizar al inicio de cada día

- a) Conectar todo el equipo que requiere energía eléctrica a la toma de corriente.
- b) Conectar el equipo de acuerdo al diagrama de reproducción [7].

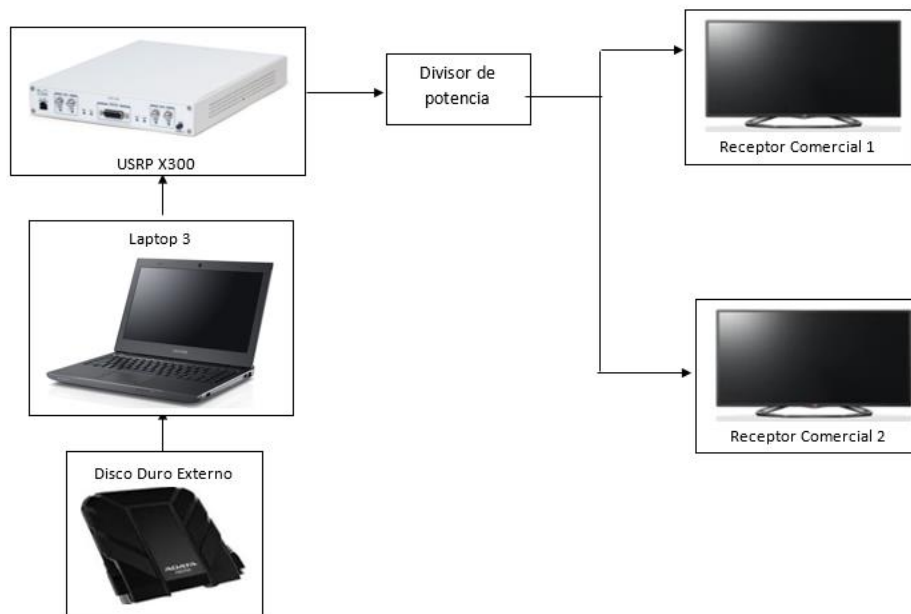


Fig. 2 Diagrama del equipamiento de medida en laboratorio

- c) Verificar el buen funcionamiento del equipo de reproducción con la señal de referencia tanto en el receptor comercial como en el equipo de medida

4.6.2. Realización de las pruebas

Esta metodología es para todas las medidas de campo grabadas independientemente si fueron en exteriores, en interiores o móviles.

- a) Ubicar en el disco externo los archivos de la medida a reproducir.
- b) Reproducir la señal donde la antena apuntaba al transmisor principal, y visualizarla en un receptor comercial diferente al usado en las pruebas de campo.
- c) Anotar el número de defectos que se tuvieron (audio/video) para esa configuración de señal grabada.
- d) Repetir el mismo procedimiento con todos los receptores comerciales que se utilizaron en las pruebas de laboratorio.
- e) Terminando la prueba con todos los receptores, seguir con las demás señales grabadas para ese sitio de medición, realizando el mismo procedimiento.

5. PREDICCIÓN DE COBERTURA Y DISTRIBUCIÓN DE LOS SITIOS DE MEDICIÓN

Para la planificación de las pruebas de campo es necesario conocer la estimación de cobertura de cada transmisor y de la red SFN, para elegir los sitios de medición a partir de la cobertura y las condiciones que se deseen tener.

5.1. Estimación de cobertura

La estimación de cobertura será mediante el nivel de campo eléctrico estimado y el umbral de campo eléctrico definido para ATSC en México, ya que con estos valores se podrán definir los sitios en donde se llevará a cabo las mediciones de la señal.

La estimación de campo se realizó con el software SIRENET, el cual es una herramienta que se basa en la simulación de entornos reales apoyándose en un sistema de información geográfica [9]. Éste software utiliza el método de estimación ITU-526, el cual evalúa el efecto de difracción de la intensidad de campo recibida, aplicándose a diferentes tipos de obstáculo y a diversos trayectos [10].

Por otra parte la red de transmisión se localizará en la Ciudad de México, donde la ubicación de los dos transmisores estará a cargo del radiodifusor SPR (Sistema Público de Radiodifusión del Estado Mexicano). SPR tiene su transmisor principal en el Cerro del Chiquihuite y el transmisor secundario se localizará en las instalaciones de TV UNAM.

La ubicación de los dos transmisores se muestra en la tabla 1:

Estación Transmisora	Coordenadas Geográficas		Altura (msnm)
Cerro del Chiquihuite	19°31'59.13"N	99°07'50.58"O	2743.0
TV UNAM	19°19'1.98"N	99°10'31.66"O	2295.7

Tabla 1. Ubicación de los transmisores ATSC de la red SFN.

La frecuencia asignada al radiodifusor SPR de acuerdo a la IFT es la de 569 MHz [11], teniendo como canal físico el número 30, por lo que las estimaciones de cobertura se realizó a dicha frecuencia.

Para la simulación de cobertura del transmisor principal localizado en el Cerro del Chiquihuite, se consideraron las características de la estación, es decir, una altura de la antena de 120 metros con un sistema de antenas tipo slot de 12 paneles considerando una ganancia de antena de 13.7 dBd o su equivalente 15.8 dBi, teniendo el transmisor una potencia nominal de 7.5 KW RMS (la PRA obtenida es de 97.7 KW). Las condiciones de recepción fueron una antena Yagi-Uda con una ganancia de 14 dB localizada a una altura de 5 metros. La resolución del software fue a 100 metros y estimando disponibilidad 90% del tiempo y 50% de las ubicaciones.

De acuerdo al Diario Oficial de la Federación el valor del umbral de recepción para el canal que se está usando debe de ser de 48 dBu [12], sin embargo, la experiencia de los radiodifusores indica que este nivel es insuficiente para una correcta recepción, siendo lo más habitual para ellos utilizar el valor de 58 dBu para una buena recepción en exteriores y 68 dBu para recepción en interiores.

- 78 dBu: buena recepción indoor
- 68-78 dBu: recepción indoor
- 58-68 dBu: buena recepción outdoor
- 48-58: recepción outdoor
- < 48 dBu no hay recepción

En la figura 3 se muestra la estimación de cobertura y niveles de campo del transmisor principal de acuerdo a las especificaciones ya mencionadas anteriormente.

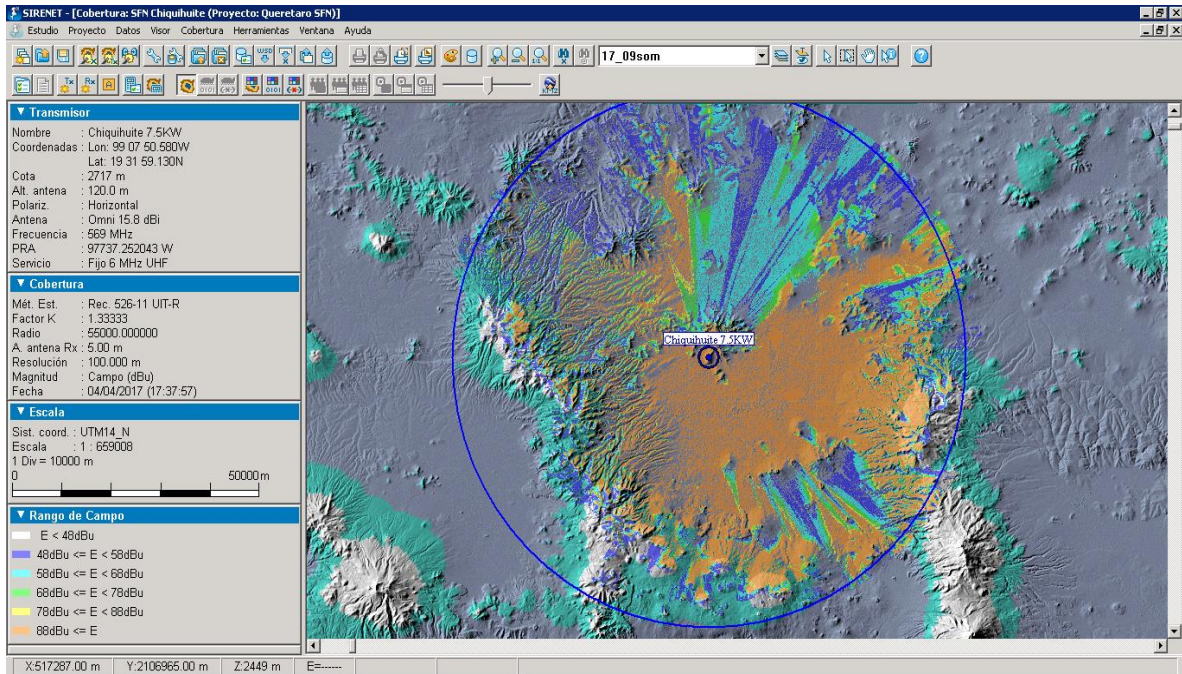


Fig. 3. Simulación de la cobertura del transmisor principal localizado en el Cerro del Chiquihuite

Para la simulación de cobertura para el transmisor secundario que estará localizado en TV UNAM, se consideró un sistema de antenas de un solo panel cuya ganancia es de 11.35 dBd o su equivalente 13.5 dBi, cuya altura es de 25 metros, el transmisor tiene una potencia nominal de 700 W RMS (PRA de 6.76 KW). Las consideraciones de recepción fueron las mismas que se utilizaron para la simulación del transmisor principal. La resolución del software fue de 100 metros con una estimando disponibilidad 90% del tiempo y 50% de las ubicaciones.

En la figura 4 se muestra la estimación de cobertura y niveles de campo del transmisor secundario simulado con el software SIRENET con las condiciones que ya mencionadas para dicho transmisor.

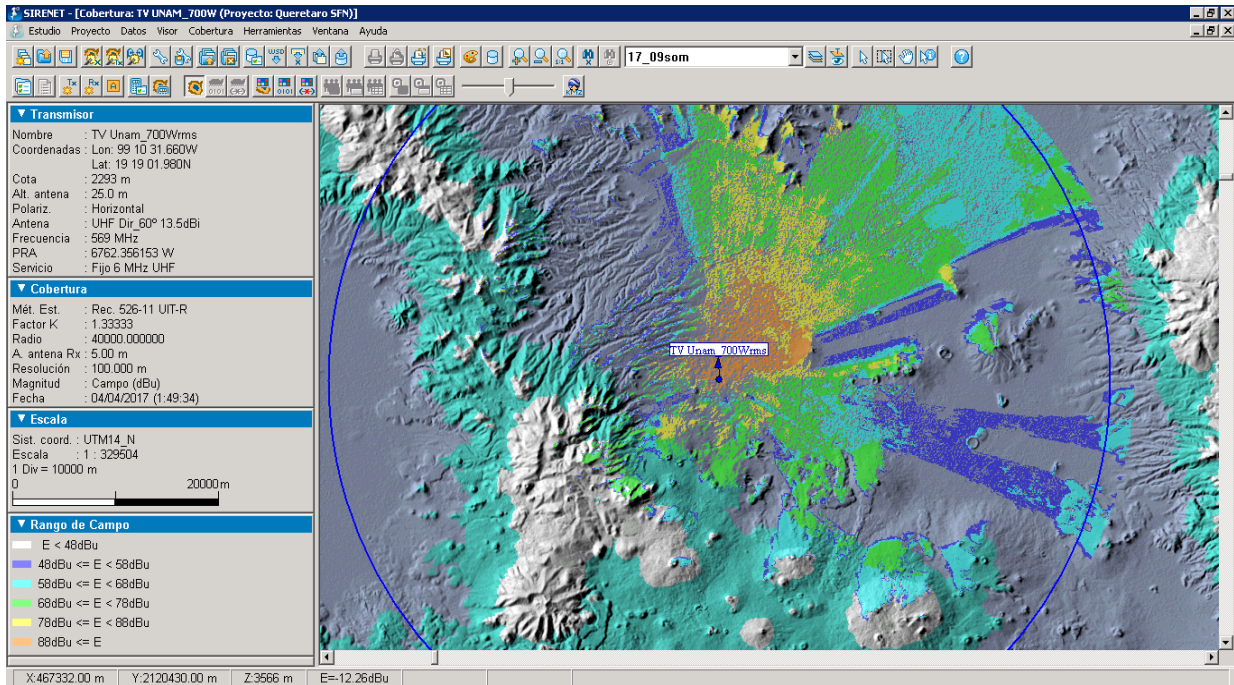


Fig. 4. Simulación de la cobertura del transmisor secundario localizado en TV UNAM

En las Figuras 3 y 4 se muestran con diferentes colores los distintos umbrales de recepción (en intensidad de campo eléctrico) ya mencionados anteriormente. En color naranja se tiene una intensidad de campo mayor o igual a 88 dBu, en color amarillo una intensidad que está entre 78 dBu y 87 dBu, para una intensidad de campo que está entre 68 dBu y 77 dBu le corresponde el color verde, para una intensidad de 58 dBu a 67 dBu en el mapa se localizará con el color azul cielo, para el color azul le corresponde la intensidad de campo de 48 dBu a 57 dBu y por debajo de 48 dBu no está sombreado indicando que en ese lugar no hay recepción.

5.2. Definición de los sitios de medición

Teniendo ya la cobertura con las intensidades de campo de cada transmisor, el siguiente paso es escoger los sitios de medición, definiendo primero el número de sitios para realizar las pruebas de campo teniendo tres directrices. La primera es la Recomendación A/75 la cual dice que para tener un intervalo de confianza se requiere un número de sitios entre 200 y 400, sin embargo la misma recomendación sugiere realizar pruebas en un intervalo de 50 a 100 sitios [13]. La segunda, es la recomendación del Informe ITU-R BT-2035-2 [6] que indica que para obtener una muestra estadística significativa, los puntos de medición deben ser entre 30 y 100 sitios, aunque recomienda que sea un número mayor. Por último, la tercera directriz, fue tomar en cuenta el número de sitios de medición que se han considerado para pruebas de campo realizadas en la Ciudad de Nueva York para mediciones estáticas sobre redes SFN de ATSC, que utiliza la configuración de Transmisores Distribuidos (DTxTs) [14], en esta prueba indica se realizaron mediciones en 132 sitios, de los cuales 109 sitios fueron para mediciones estáticas en exteriores y los 23 sitios restantes fueron para mediciones en interiores. Este número de sitios cumple con lo que recomienda el Informe ITU-R BT-

2035-2, que señala que el número de sitios en interiores debe ser una quinta parte del total de sitios a utilizar en mediciones de exteriores.

Tomando en cuenta lo anterior, se decidió realizar mediciones en 100 sitios en modo estático, de los cuales 90 sitios serán destinados para realizar mediciones en exteriores y 10 sitios en interiores.

De acuerdo a la Recomendación A/75 [13], sugiere que se consideren los siguientes tipos de sitios para las pruebas de campo:

- a) Radiales: El ángulo de azimut de la antena es constante, variando la distancia que hay de la antena al transmisor.
- b) Arcos: Se tendrá una distancia constante de la antena al transmisor y el ángulo de azimut es el que irá variando.
- c) Rejillas: Patrón de forma rectangular con un espaciado aproximado de 1609 m (sirve para ver los efectos de la variabilidad de propagación en terrenos suburbanos).
- d) Clusters: Patrón de forma rectangular con un espaciado aproximado de 805 m (sirve para ver los efectos de la variabilidad de propagación en terrenos urbanos).

Tomando en cuenta todo lo anterior, la distribución de los sitios de medición toma en cuenta los siguientes aspectos:

1. El nivel de campo el cual debe ser mayor a 58 dBu para exteriores y 68 dBu para interiores.
2. Sitios en donde se tiene la recepción de la señal proveniente de un solo transmisor (transmisor principal o transmisor secundario).
3. Entornos urbanos donde haya mucha gente y automóviles transitando, de igual forma donde haya poca población y automóviles.
4. La estructura a utilizar es la de radiales y arco, para tener diferentes variaciones de intensidad de campo ante la presencia de obstrucciones naturales y/o causada por el humano, que influye en las características de la señal que se recibe.

En la Figura 5 se muestra la distribución propuesta de los sitios de medición para las pruebas de campo. Los puntos de medición para exteriores se representan con color rojo y con color azul para interiores

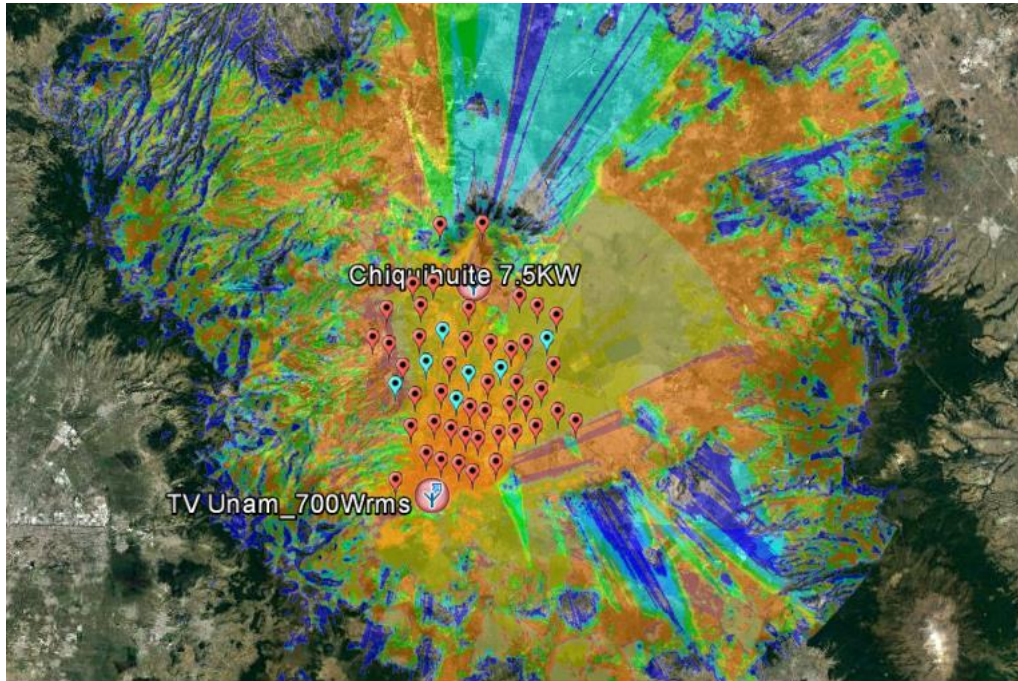


Fig. 5. Ubicación de los puntos de medición en recepción fija para exteriores (rojo) e interiores (azul)

Los sitios de medición en exteriores se ubican en calles donde es factible que se pueda estacionar la unidad móvil. Los sitios de recepción fija en interiores se ubicarán en edificios públicos como por ejemplo edificios de oficinas, centros comerciales, etc., contando con habitaciones accesibles para la realización de las pruebas.

6. REFERENCIAS

- [1] 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.
- [2] Advanced Television Systems Committee. "A/53: ATSC Digital Television Standard, Parts 1-6". Washington, D.C. 07 August, 2013.
- [3] Advanced Television Systems Committee. "A/153: ATSC Mobile DTV Standard, Parts 1-10". Washington, D.C. 11 March, 2013.
- [4] Diario Oficial de la Federación. Art IV: Política para la Transición Digital Terrestre. México. Septiembre, 2014.
- [5] Mattsson, A., "Single Frequency Networks in DTV,"IEEE Transactions on Broadcasting, Vol. 51, No. 4. December, 2005.
- [6] 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. Noviembre, 2008.
- [7] Andrea Zentella, José María Matías. Informe técnico "Definición del equipamiento de medida para las pruebas de campo". Proyecto REFUTV. 02 de Abril 2017.

[8] Advanced Television Systems Committee. "A/326: Recommended Practice: ATSC Field Test Plan". Washington, D.C. 22 February, 2017.

[9] APTICA, SIRENET. Disponible: <http://www.aptica.es/productos?op=sirenet>.

[10] Recomendación ITU-R P.526-11. "Propagación por difracción". International Telecommunication Union. 2011.

[11] Instituto Federal de Telecomunicaciones. "Infraestructura de estaciones de televisión". Marzo, 2016.

[12] Diario Oficial de la Federación. Capítulo 10: "Contorno de Intensidad de Campo y Umbral de Visibilidad". Diciembre, 2016.

[13] Advanced Television Systems Committee. "A/75: Recommended Practice: Developing DTV Field Test Plans". Washington, D.C. 26 July, 2001.

[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 06 27 08.doc. June, 2008.

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.

Ciudad de México, Noviembre del 2017

Andrea Zentella León